



**T.C.  
GAZİ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**DOKTORA  
TEZİ**

**SERAMİK TAKVİYELİ ALÜMİNYUM  
ESASLI KOMPOZİT MALZEMELERİN  
DELİNEBİLİRLİK ÖZELLİKLERİNİN  
BELİRLENMESİ**

**Kenan KÜTÜKDE**

**MAKİNA EĞİTİMİ  
ANABİLİM DALI**

**NİSAN 2014**



**SERAMİK TAKVİYELİ ALÜMİNYUM ESASLI KOMPOZİT  
MALZEMELERİN DELİNEBİLİRLİK ÖZELLİKLERİNİN  
BELİRLENMESİ**

**Kenan KÜTÜKDE**

**DOKTORA TEZİ  
MAKİNA EĞİTİMİ ANABİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**NİSAN 2014**



Kenan KÜTÜKDE tarafından hazırlanan “SERAMİK TAKVİYELİ ALÜMİNYUM ESASLI KOMPOZİT MALZEMELERİN DELİNEBİLİRLİK ÖZELLİKLERİNİN BELİRLENMESİ” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ ile Gazi Üniversitesi Makina Eğitimi Anabilim Dalında DOKTORA TEZİ olarak kabul edilmiştir.

**Danışman :** Doç. Dr. Ahmet TAŞKESEN

Endüstriyel Tasarım Mühendisliği, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum.



**Başkan :** Prof. Dr. Ulvi ŞEKER

İmalat Mühendisliği, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum.



**Üye :** Prof. Dr. İbrahim USLAN

Makine Mühendisliği, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum.



**Üye :** Prof. Dr. Can ÇOĞUN

Mekatronik Mühendisliği, Çankaya Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum.



**Üye :** Prof. Dr. Sadık Engin KILIÇ

İmalat Mühendisliği, Atılım Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum.



Tez Savunma Tarihi: 30/04/2014

Jüri tarafından kabul edilen bu tezin Doktora Tezi olması için gerekli şartları yerine getirdiğini onaylıyorum.



Prof. Dr. Şeref SAĞIROĞLU  
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

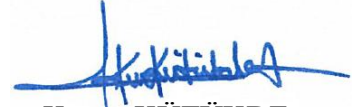


## ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.



Kenan KÜTÜKDE

30/04/2014

# SERAMİK TAKVİYELİ ALÜMİNYUM ESASLI KOMPOZİT MALZEMELERİN DELİNEBİLİRLİK ÖZELLİKLERİNİN BELİRLENMESİ

(Doktora Tezi)

Kenan KÜTÜKDE

GAZİ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Nisan 2014

## ÖZET

Bu çalışmada, üç farklı oranda (%10, %15 ve %25)  $B_4C_p$  takviyeli  $Al_7XXX$  matrisli kompozitler toz metalurjisi metodu ile üretilmiştir. Üretilen kompozitlerin mikro yapısı ile sertlik ve çekme dayanımı gibi mekanik özellikleri araştırılmıştır. Seramik parçacıkların kompozit içinde oldukça homojen biçimde dağıldığı ve takviye oranındaki artışla kompozit malzemenin sertliğinde artış görülmüştür. Üretilen kompozit malzemelerin helisel matkapla delinmesiyle oluşan, delme kuvvetleri, aşınma mekanizmaları, yüzey pürüzlülük değerleri, talaş oluşumu ve delme sıcaklıkları deneysel olarak araştırılmış ve optimum işleme parametreleri istatistiksel yöntemler kullanılarak belirlenmiştir. Delme deneyleri; 8 mm çapında HSS, kaplamasız ve  $TiAlN$  kaplamalı karbür matkaplarla kuru kesme şartları altında, dört farklı devir sayısı, üç farklı ilerleme hızı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Kompozit malzeme içeriğindeki takviye oranının artmasıyla, ilerleme kuvveti ve kesme momenti ciddi şekilde artmıştır. İlerleme kuvveti, ilerleme hızındaki artışla artmış, devir sayısındaki artışla azalmıştır. Delinen deliklerin ortalama yüzey pürüzlülük değerleri takviye oranındaki artışla, kaplamalı ve kaplamasız karbür matkaplarla delme yapıldığında azalmış, HSS matkaplarla delme yapıldığında ise artmıştır. En iyi yüzey kalitesi kaplamalı ve kaplamasız karbür matkaplarla elde edilirken, en kötü yüzey kalitesi ise HSS matkapla delme yapıldığı zaman elde edilmiştir. Kesici takımlarda genellikle abraziv aşınma mekanizması ve yığıntı talaş hâkim olmuştur. Serbest yüzey aşınması, takviye oranının artmasıyla artmış, ilerleme hızının artmasıyla azalmıştır. Bütün kesici takımlar delme sonucunda, çoğunlukla iğne ve kopuk yay biçiminde talaşlar üretmişlerdir. Temassız ölçüm metoduyla, optik lazer piroetre kullanılarak delme esnasındaki sıcaklık değerleri ölçülmüştür. Delme sıcaklığı, takviye oranı ve devir sayısındaki artışla artmış, ilerleme hızındaki artışla azalmıştır. Düşük takviye oranı, düşük kesme hızı ve nispeten yüksek ilerleme oranlarında ve karbür matkaplarla en düşük kesme sıcaklıkları elde edilmiştir. Aynı takım ile iki kez üst üste delme yapıldığında takım aşınmasına bağlı olarak sıcaklık artmıştır.

Bilim Kodu : 708.3.028  
Anahtar Kelimeler :  $B_4C_p$ , metal matrisli kompozit, delme işlenebilirliği, kesme kuvvetleri, yüzey pürüzlülüğü, takım aşınması, delme sıcaklığı, Taguchi, ANOVA, Deform 3D, sonlu eleman analizi  
Sayfa Adedi : 249  
Tez Yöneticisi : Doç. Dr. Ahmet TAŞKESEN

DETERMINE OF DRILLABILITY FEATURES OF REINFORCED CERAMIC  
COMPOSITE MATERIALS BASED ON ALUMINUM

(Ph.D. Thesis)

Kenan KÜTÜKDE

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

April 2014

ABSTRACT

In this study, three different rates (10%, 15% and 25%) of composites with  $B_4C_p$  reinforced Al7XXX matrixes were produced by powder metallurgy method. Some mechanical properties of the produced composites such as hardness and tensile strength as well as microstructure were investigated. A homogeneous distribution of ceramic particles through the matrix was found, and hardness of the composites increased as reinforcement rate increased. Drilling forces, wear mechanisms, surface roughness values, chip formation and drilling temperatures obtained when drilling with spiral drill bit of the produced composite materials were experimentally investigated and optimum machining parameters were determined by using some statistical methods. Drilling experiments were carried out with used four different spindle speed and three different feeds with under dry cutting conditions by using 8 mm diameter HSS, uncoated and TiAlN-coated carbide drills. The thrust force and torque significantly increased with increase of reinforcement ratio in the composite material. The thrust force increased with increase in feed rate, but decreased with increase in spindle speed. The average surface roughness decreased with the increase in weight fraction for carbide tools and increased for HSS tools at all cutting speeds. Moreover, better surface finish was determined with coated carbide tools and poor surface quality was obtained with HSS tools. Generally, abrasive tool wear and BUE were seen in the cutting tools. Flank wear increased in parallel to the increase in the reinforcement ratio but decreased with increase in feed rate. Generally, all of the cutting tool at the end of drilling experiment, were produced chips in form needle and loose arc. Moreover, non-contact measurements of drilling temperatures were performed with optical pyrometer. The maximum drilling temperature increased as the particle fraction and spindle speed increased, and it decreased as feed rate increased. Minimum cutting temperatures were obtained with lower particle fraction and cutting speed, with relatively higher feed rates and carbide tools. The cutting temperatures increased depending on tool wear when drilling with successive two drillings.

Science Code : 708.3.028  
Key Words :  $B_4C_p$ , metal matrix composite, machinability of drilling, cutting forces, surface roughness, tool wear, drilling temperature, Taguchi, ANOVA, Deform 3D, finite element analysis  
Page Number : 249  
Adviser : Assoc. Prof. Dr. Ahmet TAŞKESEN



## TEŞEKKÜR

Çalışmalar için yapılan harcamalarda maddi kaynak sağlayan Gazi Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi Başkanlığı'na teşekkür ederim. Çalışmalarım boyunca değerli yardım ve katkılarıyla beni yönlendiren danışman hocam Doç. Dr. Ahmet TAŞKESEN'e, yine kıymetli tecrübelerinden yararlandığım hocam Prof. Dr. Mustafa ÜBEYLİ'ye ve Prof. Dr. Ulvi ŞEKER'e, ayrıca çalışmalarımı başarıya ulaştırmamda sürekli rehberlik ve teşviklerinden dolayı Prof. Dr. Ahmet ÖZDEMİR'e, çalışmalarımda teknik desteklerini esirgemeyen Mensan Mentеше San. Tic. Ltd. Şti, Baytek Makinaya ve HOT PVD Yüksek Yüzey Kaplamaya, mesai arkadaşlarıma, manevi destekleriyle beni hiçbir zaman yalnız bırakmayan çok değerli dostlarıma teşekkürü bir borç bilirim. Ayrıca, MMK'ların üretimi ile ilgili sağladığı laboratuvar imkânlarından dolayı TOBB ETÜ'ye, çekme ve darbe deneylerinin gerçekleştirilmesinde sağladığı imkânlardan dolayı MİTAŞ CİVATA'ya, delme deneylerinin gerçekleştirilmesinde sağladığı imkânlardan dolayı Gazi Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Makine Eğitimi Anabilim Dalı Talaşlı Üretim Bölümüne ve sıcaklık deneylerinin gerçekleştirilmesinde sağladığı imkânlardan dolayı ERMAKSAN Makina Dışli San. ve Tic. Ltd. Şti.'ye ve FAYMER Makinaya teşekkür ederim.

## İÇİNDEKİLER

	<b>Sayfa</b>
ÖZET .....	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER .....	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	xi
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	xiv
RESİMLERİN LİSTESİ .....	xviii
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xx
1. GİRİŞ .....	1
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI .....	5
2.1. Metal Matrisli Kompozit Malzemelerin Üretimi ve Mekanik Özellikleri Üzerine Yapılan Çalışmalar .....	5
2.2. MMK'ların İşlenmesi Esnasında Oluşan Kesme Kuvvetleri ve Modelleme ile İlgili Çalışmalar.....	18
2.3. Yüzey Pürüzlülüğü, Takım Aşınması, Talaş Formu ve Çapak Yüksekliği Üzerine Yapılan Çalışmalar .....	30
2.4. Delme Esnasında Oluşan Sıcaklık Üzerine Yapılan Çalışmalar .....	40
2.5. Literatür Araştırmalarının Değerlendirilmesi.....	48
2.5.1. MMK üretim yöntemleri ve mekanik özellikleri ile ilgili literatür değerlendirmesi .....	48
2.5.2. Delme esnasında oluşan kesme kuvvetleri ve modelleme ile ilgili değerlendirme .....	49
2.5.3. Yüzey pürüzlülüğü, takım aşınması, talaş formu, çapak yüksekliği ve delik ölçüsü ile ilgili literatür değerlendirilmesi.....	51
2.5.4. Delme esnasında oluşan sıcaklık ile ilgili çalışmaların değerlendirilmesi	57
2.5.5. Genel değerlendirme .....	59
3. MATERYAL VE METOT .....	61

3.1. MMK Malzemelerin Üretimi .....	61
3.2. Metal Matris Kompozitlerin Karakterizasyonu.....	64
3.2.1. Mikroyapı incelemeleri .....	64
3.2.2. Sertlik ölçme deneyi.....	65
3.2.3. Çekme deneyi.....	65
3.2.4. Darbe deneyi .....	66
3.3. Matkapla Yapılan Delme Deneyleri.....	67
3.3.1. Delme deneylerinde kullanılan kesici takımlar.....	67
3.3.2. Delme deneylerinde kullanılan takım tezgâhı ve işleme parametreleri ....	68
3.3.3. İlerleme kuvveti ve kesme momentinin ölçümü .....	69
3.3.4. Yüzey pürüzlülüğünün ölçümü .....	72
3.3.5. Takım aşınmasının ve delik ölçüsünün ölçümü .....	72
3.3.6. Kesici takım üzerinde oluşan sıcaklıkların ölçülmesi.....	74
3.4. Taguchi Metodu .....	79
3.5. Varyans Analizi (ANOVA).....	83
3.6. Gri İlişki Analizi.....	86
4. DENEY SONUÇLARI ve TARTIŞMA .....	91
4.1. Mikroyapı ve Mekanik Özellikler .....	91
4.2. B <sub>4</sub> C Takviyeli MMK'nın Delinebilirlik Özellikleri.....	94
4.2.1. İlerleme kuvveti ve kesme momentinin değerlendirilmesi .....	94
4.2.2. İlerleme kuvveti ve kesme momenti için Taguchi metodu ve ANOVA...	98
4.2.3. Delme sonrası oluşan takım aşınmasının ve delik ölçüsünün değerlendirilmesi .....	104
4.2.4. Serbest yüzey aşınması için Taguchi metodu ve ANOVA .....	115
4.2.5. Delme sonrası oluşan yüzey pürüzlülüğü ve talaş oluşumu .....	120
4.2.6. Yüzey pürüzlülüğü için Taguchi metodu ve ANOVA.....	128



**Sayfa**

4.2.7. Delme esnasında oluşan kesici takım sıcaklığı .....	134
4.2.8. Kesici takım sıcaklığı için Taguchi metodu ve ANOVA .....	137
4.3. B <sub>4</sub> C <sub>p</sub> İçerikli Alüminyum MMK'ların Delinmesinde İşleme Parametrelerinin Taguchi Tabanlı Gri İlişki Analizi ile Optimizasyonu.....	141
4.3.1. İlerleme kuvveti, kesme momenti, serbest yüzey aşınması ve yüzey pürüzlülüğü için gri ilişki analizi .....	141
4.3.2. Serbest yüzey aşınması ve kesici takım sıcaklığı için gri ilişki analizi ....	147
5. SONLU ELEMANLAR ANALİZİ ve MATEMATİKSEL MODELLEME.....	153
5.1. Sonlu Elemanlar Analizi .....	153
5.1.1. Delme sürecinde sonlu elemanlar metodu .....	155
5.1.2. İş parçası ve matkabın modellenmesi ve mesh edilmesi.....	157
5.1.3. İş parçası ve kesici takım malzemesi .....	159
5.1.4. Kesme parametreleri .....	160
5.1.5. İş parçası ve kesici takım sınır şartları .....	160
5.1.6. Simulasyon kontrol parametreleri .....	161
5.1.7. Sonuçlar ve tartışma.....	162
5.2. Matematiksel Modelleme .....	171
5.2.1. İlerleme kuvveti için GEP model.....	173
5.2.2. Kesme momenti için GEP model.....	176
5.2.3. Yüzey pürüzlülüğü için GEP model .....	179
5.2.4. Takım aşınması için GEP model.....	183
5.2.5. Kesici takım sıcaklığı için GEP model .....	187
6. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	191
6.1. B <sub>4</sub> C <sub>p</sub> İçerikli Kompozitlerin Üretimi ve Karakterizasyonu.....	191
6.2. İlerleme Kuvveti ve Kesme Momenti .....	191
6.3. Takım Aşınması ve Delik Ölçüsü .....	192
6.4. Yüzey Pürüzlülüğü ve Talaş Oluşumu.....	193

**Sayfa**

6.5. Delme Esnasında Oluşan Sıcaklık.....	195
6.6. Gri İlişki Analizi Sonuçları .....	196
6.6.1. İlerleme kuvveti, kesme momenti, serbest yüzey aşınması ve yüzey pürüzlülüğü için gri ilişki analizi sonuçları .....	196
6.6.2. Serbest yüzey aşınması ve kesici takım sıcaklığı için gri ilişki analizi ....	196
6.7. Öneriler.....	197
KAYNAKLAR .....	201
EKLER.....	211
EK-1. Kompozit ve kesici takım malzemesine göre, işleme parametreleri ve ölçülen delme kuvveti değerleri.....	212
EK-2. Taguchi metodu ile elde edilen ve doğrulama deneyleri sonucunda elde edilen ilerleme kuvveti ve kesme momenti sonuçlarının karşılaştırılması .....	215
EK-3. Deney numarasına göre ölçülen takım aşınması, yüzey pürüzlülüğü ve kesici takım sıcaklığı değerleri.....	217
EK-4. Taguchi metodu ile elde edilen ve doğrulama deneyleri sonucunda elde edilen serbest yüzey aşınması sonuçlarının karşılaştırılması.....	220
EK-5. Taguchi metodu ile elde edilen ve doğrulama deneyleri sonucunda elde edilen yüzey pürüzlülüğü sonuçlarının karşılaştırılması .....	221
EK-6. Taguchi metodu ile elde edilen ve doğrulama deneyleri sonucunda elde edilen kesici takım sıcaklığı sonuçlarının karşılaştırılması .....	222
ÖZGEÇMİŞ .....	223

## ÇİZELGELERİN LİSTESİ

<b>Çizelge</b>	<b>Sayfa</b>
Çizelge 2.1. Üretilen Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ve B <sub>4</sub> C içerikli kompozit malzemelerin mekanik özellikleri .....	7
Çizelge 2.2. Patlayıcılı birleştirme ile elde edilen B <sub>4</sub> C içerikli alüminyum kompozitlerin sertlik değerleri .....	11
Çizelge 2.3. B <sub>4</sub> C takviyeli AA2024 matrisli MMK'ların sertlik değerleri ile akma ve çekme mukavemeti değerleri .....	12
Çizelge 2.4. Ekstrüzyon işlemine tabi tutulmuş AA7015 matris alaşımlı malzemelerin mekanik ve fiziksel özellikleri .....	13
Çizelge 2.5. %20 SiC takviyeli Al6061, Al6063 ve Al7072 matrisli MMK'ların uzama (%) ve akma mukavemeti .....	14
Çizelge 2.6. Farklı SiC oranlarına sahip alüminyum MMK'ların sertlik değerleri .....	15
Çizelge 2.7. Farklı SiC takviye oranlarına sahip alüminyum MMK'ların % uzama, akma ve çekme mukavemeti değerleri .....	15
Çizelge 2.8. Farklı SiC ve Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> oranlarına sahip alüminyum MMK'ların sertlik ve çekme mukavemeti değerleri .....	16
Çizelge 2.9. Al-Rashed ve diğerleri, (1993) tarafından deneylerde kullanılan matris malzemeleri ve kompozit malzemeler .....	18
Çizelge 2.10. Haq ve diğerleri, (2008) tarafından deneyde kullanılan faktörler ve seviyeleri .....	25
Çizelge 2.11. Rajmohan ve Palanikumar (2012) tarafından, Box-Behnken deneysel tasarımında kullanılan parametreler ve değerleri .....	37
Çizelge 2.12. Li ve Shih (2007) tarafından, Ti6Al4V alaşımının yüksek verimlilikte delinmesi için kullanılan deney parametreleri .....	42
Çizelge 3.1. Al <sub>7</sub> XXX sersit kompozit malzemenin kimyasal bileşimi (%) .....	62
Çizelge 3.2. Deneylerde kullanılan matkaplar ve özellikleri .....	67
Çizelge 3.3. Çalışmada kullanılan işleme şartları .....	69
Çizelge 3.4. Optris 3MH2 temassız sıcaklık ölçüm cihazı teknik özellikleri .....	78
Çizelge 3.5. Deneylerde kullanılan faktörler ve seviyeleri .....	80
Çizelge 3.6. Deneyde kullanılan Taguchi'nin L <sub>27</sub> ortogonal dizisi .....	81



<b>Çizelge</b>	<b>Sayfa</b>
Çizelge 4.1. MMK numunelerin ölçülen ortalama sertlik değerleri .....	93
Çizelge 4.2. Değişik takviye oranlarına sahip B <sub>4</sub> C içerikli MMK'ların çekme ve darbe testi sonuçları .....	94
Çizelge 4.3. Delme kuvvetleri için kullanılan faktör ve seviyelerin Taguchi'nin L <sub>27</sub> ortogonal dizisine yerleştirilmiş hali ve S/N oranları .....	99
Çizelge 4.4. İlerleme kuvvetine ait her bir faktör ve seviye için ortalama S/N oranları	100
Çizelge 4.5. Kesme momentine ait her bir faktör ve seviyeye için ortalama S/N oranı	100
Çizelge 4.6. İlerleme kuvveti ve kesme momenti için belirlenmiş olan optimum şartlar .....	100
Çizelge 4.7. İlerleme kuvvetine ait ANOVA sonuçları .....	102
Çizelge 4.8. Kesme momentine ait ANOVA sonuçları .....	103
Çizelge 4.9. Serbest yüzey aşınması için kullanılan faktör ve seviyelerin Taguchi'nin L <sub>27</sub> ortogonal dizisine yerleştirilmiş hali ve S/N oranları .....	116
Çizelge 4.10. Serbest yüzey aşınmasına ait her bir faktör ve seviyeye için ortalama S/N oranı .....	117
Çizelge 4.11. Serbest yüzey aşınması için belirlenmiş olan optimum şartlar .....	118
Çizelge 4.12. Serbest yüzey aşınmasına ait ANOVA sonuçları .....	118
Çizelge 4.13. Matkap malzemesine göre en iyi ve en kötü işleme yüzeylerinin oluştuğu kesme şartları .....	123
Çizelge 4.14. Yüzey pürüzlülüğü için kullanılan faktör ve seviyelerin Taguchi'nin L <sub>27</sub> ortogonal dizisine yerleştirilmiş hali ve S/N oranları .....	129
Çizelge 4.15. Yüzey pürüzlülüğüne ait her bir faktör ve seviyeye için ortalama S/N oranı .....	130
Çizelge 4.16. Yüzey pürüzlülüğü için belirlenmiş olan optimum şartlar .....	131
Çizelge 4.17. Yüzey pürüzlülüğüne ait ANOVA sonuçları .....	131
Çizelge 4.18. Kesici takım sıcaklığı için kullanılan faktör ve seviyelerin Taguchi'nin L <sub>27</sub> ortogonal dizisine yerleştirilmiş hali ve S/N oranları .....	138
Çizelge 4.19. Kesici takım sıcaklığına ait her bir faktör ve seviyeye için ortalama S/N oranı .....	139
Çizelge 4.20. Kesici takım sıcaklığı için belirlenmiş olan optimum şartlar .....	140
Çizelge 4.21. Kesici takım sıcaklığına ait ANOVA sonuçları .....	140

<b>Çizelge</b>	<b>Sayfa</b>
Çizelge 4.22. Gri ilişki analizi için kullanılan faktör ve seviyelerin Taguchi'nin $L_{27}$ ortogonal dizisine yerleştirilmiş hali ve elde edilen sonuçlar.....	142
Çizelge 4.23. İlerleme kuvveti, kesme momenti, serbest yüzey aşınması ve yüzey pürüzlülük değerine ait normalizasyon, gri ilişki katsayı ve gri ilişki derecesi değerleri .....	143
Çizelge 4.24. Faktörlere ait gri ilişki derecelerinin etkileri .....	144
Çizelge 4.25. Gri ilişki derecesine ait ANOVA sonuçları .....	145
Çizelge 4.26. Gri ilişki analizi için kullanılan faktör ve seviyelerin Taguchi'nin $L_{27}$ ortogonal dizisine yerleştirilmiş hali ve elde edilen sonuçlar.....	148
Çizelge 4.27. Serbest yüzey aşınması ve kesici takım sıcaklığı değerine ait normalizasyon, gri ilişki katsayı ve gri ilişki derecesi değerleri .....	149
Çizelge 4.28. Faktörlere ait gri ilişki derecelerinin etkileri .....	149
Çizelge 4.29. Gri ilişki derecesine ait ANOVA sonuçları .....	151
Çizelge 5.1. Abaqus, Advantedge ve Deform sonlu elemanlar yazılımlarının karşılaştırılması .....	154
Çizelge 5.2. Modellenen matkabın geometrik özellikleri .....	158
Çizelge 5.3. Kesme parametreleri .....	160
Çizelge 5.4. Kompozit ve kesici takım malzemesi Vickers sertlik değerleri .....	172
Çizelge 5.5. Gen yapısında kullanılan simgeler ve açıklamaları .....	173
Çizelge 5.6. İlerleme kuvvetine ait gen yapısındaki sabit değerler .....	173
Çizelge 5.7. İlerleme kuvvetine ait hesaba katılmayan 9 adet deney .....	175
Çizelge 5.8. Kesme momentine ait gen yapısındaki sabit değerler .....	178
Çizelge 5.9. Kesme momentine ait hesaba katılmayan 9 adet deney .....	179
Çizelge 5.10. Yüzey pürüzlülüğüne ait gen yapısındaki sabit değerler .....	180
Çizelge 5.11. Yüzey pürüzlülüğüne ait hesaba katılmayan 9 adet deney .....	182
Çizelge 5.12. Takım aşınmasına ait gen yapısındaki sabit değerler .....	183
Çizelge 5.13. Takım aşınmasına ait hesaba katılmayan 9 adet deney .....	186
Çizelge 5.14. Kesici takım sıcaklığına ait gen yapısındaki sabit değerler.....	188
Çizelge 5.15. Kesici takım sıcaklığına ait hesaba katılmayan 9 adet deney.....	189

## ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Değişik takviye oranına sahip B <sub>4</sub> C içerikli alüminyum kompozitlerin sertlik ölçüm sonuçları .....	8
Şekil 2.2. TM yöntemi ile üretilen Al/B <sub>4</sub> C kompozitlerin mikrosertlik grafiği .....	8
Şekil 2.3. %2-6 Al6061- SiC ve %2-6 Al7075-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> MMK'ların (a) sertlik ve (b) çekme mukavemeti değerleri .....	17
Şekil 2.4. %0-30 oranında SiC, Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , WC ve Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> içeren M1, M5 ve M6 matrisin HB cinsinden sertlik grafiği .....	18
Şekil 3.1. Bilyalı öğütme yöntemi ile seramik ve metal tozların karıştırılması.....	62
Şekil 3.2. Sinterleme .....	64
Şekil 3.3. Sıcak presleme yöntemi .....	64
Şekil 3.4. Kompozit malzemeyi dinamometre üzerine tespit etmek için tasarlanmış bağlama kalıbı ve ölçüleri.....	70
Şekil 3.5. Kesme kuvvetlerini ölçme düzeneğinin şematik gösterimi .....	71
Şekil 3.6. (a) Toplam delme mesafesi (b) matkabın kesme yüküne maruz kaldığı mesafe .....	71
Şekil 3.7. Matkapta, serbest yüzey aşınma miktarının ölçülmesi, (HSS takımlar için $\theta = 67,5^\circ$ ), (Karbür takımlar için $\theta = 70^\circ$ ).....	73
Şekil 3.8. HSS, karbür ve TiAlN kaplamalı karbür matkapların emisivite değerleri ....	75
Şekil 3.9. Hızlı delik delme tezgâhında 24 adet delik delinmiş kompozit malzeme .....	76
Şekil 3.10. Pirometreyi tezgâh gövdesine bağlama sistemi .....	77
Şekil 3.11. Pirometre ile matkap arasındaki mesafenin ayarlanması.....	78
Şekil 3.12. Taguchi tasarım süreci .....	80
Şekil 4.1. Farklı takviye oranlarına sahip B <sub>4</sub> C <sub>p</sub> içerikli MMK'ların sertlik ölçüm sonuçları.....	93
Şekil 4.2. (a) Çekme mukavemeti ve (b) Darbe mukavemeti sonuçları .....	94
Şekil 4.3. Delme esnasında matkaba gelen kuvvetler .....	95
Şekil 4.4. (a) Takviye oranı (b) İlerleme hızı ve (c) Devir sayısına bağlı ilerleme kuvveti değişimleri .....	96

<b>Şekil</b>	<b>Sayfa</b>
Şekil 4.5. (a) Takviye oranı (b) İlerleme hızı ve (c) Devir sayısına bağlı kesme momenti değişimleri .....	97
Şekil 4.6. İlerleme kuvvetine ait kontrol faktörlerinin, “En düşük daha iyidir” yöntemi ile hesaplanmış S/N oranı etki grafiği .....	100
Şekil 4.7. Kesme momentine ait kontrol faktörlerinin, “En düşük daha iyidir” yöntemi ile hesaplanmış S/N oranı etki grafiği .....	101
Şekil 4.8. Deney sonuçları ile tahmin sonuçlarının karşılaştırılması. (a) İlerleme Kuvveti, (b) Kesme momenti.....	103
Şekil 4.9. (a) Matkapta oluşan aşınma tipleri (b) Matkap çapına bağlı olarak çevresel kesme hızı ve kontak mesafesi.....	105
Şekil 4.10. n= 1000 dev/dak’da takviye oranına göre serbest yüzey aşınması (a) f=0,1 mm/dev (b) f=0,2 mm/dev (c) f=0,3 mm/dev .....	107
Şekil 4.11. İlerleme hızına göre serbest yüzey aşınması (a) n=1000 dev/dak (b) n=1500 dev/dak (c) n=2000 dev/dak (d) n=2500 dev/dak.....	107
Şekil 4.12. Devir sayısına göre serbest yüzey aşınması (a) f=0,1 mm/dev (b) f=0,2 mm/dev (c) f=0,3 mm/dev.....	108
Şekil 4.13. Matkap üzerinde YT’nin olduğu bölge.....	109
Şekil 4.14. Birinci delmeye ve ikinci delme sonucunda matkapta oluşan serbest yüzey aşınma değerleri (a) n=1000 dev/dak (b) n=1500 dev/dak.....	114
Şekil 4.15. Birinci delme ve ikinci delme sonucunda matkapta oluşan köşe aşınma değerleri (a) n=1000 dev/dak (b) n=1500 dev/dak.....	115
Şekil 4.16. Serbest yüzey aşınmasına ait kontrol faktörlerinin, “En düşük daha iyidir” yöntemi ile hesaplanmış S/N oranı etki grafiği .....	117
Şekil 4.17. Serbest yüzey aşınması için deney sonuçları ile tahmin sonuçlarının karşılaştırılması.....	119
Şekil 4.18. Köşe aşınma değerlerine göre delik ölçüsündeki sapmalar.....	120
Şekil 4.19. Takviye oranının yüzey pürüzlülüğüne etkisi.....	121
Şekil 4.20. İlerleme hızının yüzey pürüzlülüğüne etkisi.....	122
Şekil 4.21. Devir sayısının yüzey pürüzlülüğüne etkisi.....	124
Şekil 4.22. İş parçası ile matkap arasında sıkışan ve yüzeysel yırtılmaya neden olan talaş.....	126

<b>Şekil</b>	<b>Sayfa</b>
Şekil 4.23. Yüzey pürüzlülüğüne ait kontrol faktörlerinin, “En düşük daha iyidir” yöntemi ile hesaplanmış S/N oranı etki grafiği .....	130
Şekil 4.24. Kesme esnasında oluşan sıcaklık .....	135
Şekil 4.25. (a) % 10, (b) % 15 ve (c) % 25 B <sub>4</sub> C <sub>p</sub> esaslı kompozit malzemenin 0,3 mm/dev ilerleme hızında delinmesinde devir sayısındaki değişimin sıcaklığa etkisi .....	136
Şekil 4.26. (a) % 10, (b) % 15 ve (c) % 25 B <sub>4</sub> C <sub>p</sub> esaslı kompozit malzemenin 1500 dev/dak devir sayısında delinmesinde ilerleme hızındaki değişimin sıcaklığa etkisi .....	137
Şekil 4.27. Kompozit malzemelerin (a) 1000 dev/dak, (b) 1500 dev/dak ve (c) 2000 dev/dak devir sayısında, 0,3 mm/dev ilerleme hızında delinmesinde takviye oranındaki değişimin sıcaklığa etkisi.....	137
Şekil 4.28. Kesici takım sıcaklığına ait kontrol faktörlerinin, “En düşük daha iyidir” yöntemi ile hesaplanmış S/N oranı etki grafiği .....	139
Şekil 4.29. Kesici takım sıcaklığı için deney sonuçları ile tahmin sonuçlarının karşılaştırılması.....	141
Şekil 4.30. Her faktör ve seviyelerinin ortalama gri ilişki dereceleri etki grafiği .....	144
Şekil 4.31. Gri ilişki derecesine ait ANOVA sonuçlarına göre faktörler ve faktörlerin etkisi (%) .....	145
Şekil 4.32. Gri ilişki analizi için doğrulama deneylerinin sonuçları.....	147
Şekil 4.33. Her faktör ve seviyelerinin ortalama gri ilişki dereceleri etki grafiği .....	150
Şekil 4.34. Gri ilişki derecesine ait ANOVA sonuçlarına göre faktörler ve faktörlerin etkisi (%) .....	151
Şekil 4.35. Gri ilişki analizi için doğrulama deneylerinin sonuçları.....	152
Şekil 5.1. Deform 3D sonlu elemanlar metodunun aşamaları .....	156
Şekil 5.2. İş parçası modeli .....	157
Şekil 5.3. Kesici takım modeli.....	158
Şekil 5.4. Mesh edilmiş a) matkap b) iş parçası .....	159
Şekil 5.5. Al 7075 iş parçası üzerinde zamana bağlı olarak oluşan sıcaklık değerleri ..	162
Şekil 5.6. İş parçasına ait zamana bağlı sıcaklık değişim grafiği .....	165

<b>Şekil</b>	<b>Sayfa</b>
Şekil 5.7. % 15 kobalt içerikli karbür matkap üzerinde zamana bağlı olarak oluşan sıcaklık değerleri.....	166
Şekil 5.8. Matkaba ait zamana bağlı sıcaklık değişim grafiği .....	168
Şekil 5.9. Karbür matkapla 2500 dev/dak, 0,3 mm/dev ilerleme hızında elde edilen sıcaklık değerleri.....	169
Şekil 5.10. Deform 3D sonlu elemanlar yazılımı ile elde edilen ilerleme kuvveti grafiği .....	170
Şekil 5.11. Deform 3D sonlu elemanlar yazılımı ile elde edilen kesme momenti grafiği .....	171
Şekil 5.12. İlerleme kuvvetine ait gen yapısı.....	173
Şekil 5.13. İlerleme kuvveti için deney sonuçları ile modelden elde edilen sonuçların karşılaştırılması.....	175
Şekil 5.14. İlerleme kuvveti için, GEP model ile deney sonuçlarının karşılaştırılması.	176
Şekil 5.15. Kesme momentine ait gen yapısı.....	176
Şekil 5.16. Kesme momenti için deney sonuçları ile modelden elde edilen sonuçların karşılaştırılması.....	178
Şekil 5.17. Kesme momenti için, GEP model ile deney sonuçlarının karşılaştırılması.	179
Şekil 5.18. Yüzey pürüzlülüğüne ait gen yapısı .....	180
Şekil 5.19. Yüzey pürüzlülüğü için deney sonuçları ile modelden elde edilen sonuçların karşılaştırılması.....	182
Şekil 5.20. Yüzey pürüzlülüğü için, GEP model ile deney sonuçlarının karşılaştırılması	183
Şekil 5.21. Takım aşınmasına ait gen yapısı.....	184
Şekil 5.22. Takım aşınması için deney sonuçları ile modelden elde edilen sonuçların karşılaştırılması.....	185
Şekil 5.23. Takım aşınması için, GEP model ile deney sonuçlarının karşılaştırılması .	186
Şekil 5.24. Kesici takım sıcaklığına ait gen yapısı .....	187
Şekil 5.25. Kesici takım sıcaklığı için deney sonuçları ile modelden elde edilen sonuçların karşılaştırılması.....	189
Şekil 5.26. Kesici takım sıcaklığı için, GEP model ile deney sonuçlarının karşılaştırılması.....	190

## RESİMLERİN LİSTESİ

<b>Resim</b>	<b>Sayfa</b>
Resim 3.1. Alüminyum folyo içerisine konulmuş metal ve seramik tozu karışımı.....	63
Resim 3.2. Kompozit üretiminde kullanılan (a) kalıp ve (b) kalıbın fırın içerisine yerleştirilmesi .....	63
Resim 3.3. (a) $B_4C_p$ içerikli alüminyum matris kompozitin sıcak preslenmesi ile üretimi (b) Üretilen kompozit malzeme .....	63
Resim 3.4. OKO SEIKI sertlik ölçme tezgâhında sertlik ölçme işlemi.....	65
Resim 3.5. (a) Çekme ve (b) darbe testi için hazırlanmış deney numuneleri 1) %10 $B_4C$ , 2) %15 $B_4C$ , 3) %25 $B_4C$ içerikli alüminyum kompozit malzeme.....	66
Resim 3.6. Tinius Olsen çekme testi cihazına çekme testi numunesinin yerleştirilmesi	66
Resim 3.7. Deneylerin yapıldığı Johnford VMC-550 düşey işleme merkezi .....	68
Resim 3.8. Kistler 9272 dinamometre ve teknik özellikleri .....	69
Resim 3.9. Mitutoyo SJ-201 yüzey pürüzlülük ölçüm cihazı ve teknik özellikleri.....	72
Resim 3.10. TiAlN kaplamalı karbür matkapta oluşan aşınma değerinin ölçümü .....	73
Resim 3.11. %25 $B_4C_p$ kompozitin karbür matkap ile 1000 dev/dak devir sayısında 0,1 mm/dev ilerleme hızında delinmesi ile elde edilen sıcaklık ölçümü sonuç grafiğinin ekran görüntüsü .....	79
Resim 4.1. MMK'ların üretiminde kullanılan tozların morfolojisi (a) $B_4C$ , (b) Al, (c) Zn, (d) Cu .....	91
Resim 4.2. Sıvı faz sinterleme metodu ile üretilmiş (a) %10, (b) %15 ve (c) %25 $B_4C_p$ içerikli MMK'nın optik mikroskop görüntüsü .....	92
Resim 4.3. %10 $B_4C$ içerikli kompozit malzemenin HSS matkapla 2000 dev/dak devir sayısında, 0,3 mm/dev ilerleme hızında delinmesi sonucunda oluşan YT .....	109
Resim 4.4. Aşındırıcı tanelerin matkabın kesici ağzında oluşturduğu küçük oluklar ...	111
Resim 4.5. En hassas yüzey elde edilen HSS matkabın SEM görüntüsü (%10 $B_4C_p$ , n=1000 dev/dak, f= 0,3 mm/dev) .....	112
Resim 4.6. En kötü yüzey elde edilen HSS matkabın SEM görüntüsü (%15 $B_4C_p$ , n=2500 dev/dak, f= 0,1 mm/dev) .....	112

<b>Resim</b>	<b>Sayfa</b>
Resim 4.7. En hassas yüzey elde edilen karbür matkabın SEM görüntüsü (% 15 B <sub>4</sub> C <sub>p</sub> , n=1000 dev/dak, f= 0,3 mm/dev ) .....	112
Resim 4.8. En kötü yüzey elde edilen karbür matkabın SEM görüntüsü (% 10 B <sub>4</sub> C <sub>p</sub> , n=2000 dev/dak, f= 0,3 mm/dev ) .....	113
Resim 4.9. En hassas yüzey elde edilen kaplamalı karbür matkabın SEM görüntüsü (% 25 B <sub>4</sub> C <sub>p</sub> , n=2500 dev/dak, f= 0,3 mm/dev ) .....	113
Resim 4.10. En kötü yüzey elde edilen kaplamalı karbür matkabın SEM görüntüsü (% 10 B <sub>4</sub> C <sub>p</sub> MMK, n=2500 dev/dak, f= 0,1 mm/dev ).....	113
Resim 4.11. HSS matkap ile elde edilen en hassas yüzeyin SEM görüntüsü (% 10 B <sub>4</sub> C <sub>p</sub> MMK, n=1000 dev/dak, f= 0,3 mm/dev).....	126
Resim 4.12. HSS matkap ile elde edilen en kötü yüzeyin SEM görüntüsü (% 15 B <sub>4</sub> C <sub>p</sub> MMK, n=2500 dev/dak, f= 0,1 mm/dev ).....	126
Resim 4.13. Karbür matkap ile elde edilen en hassas yüzeyin SEM görüntüsü (% 15 B <sub>4</sub> C <sub>p</sub> MMK, n=1000 dev/dak, f= 0,3 mm/dev).....	127
Resim 4.14. Karbür matkap ile elde edilen en kötü yüzeyin SEM görüntüsü (% 10 B <sub>4</sub> C <sub>p</sub> MMK, n=2000 dev/dak, f= 0,3 mm/dev).....	127
Resim 4.15. Kaplamalı karbür matkap ile elde edilen en hassas yüzeyin SEM görüntüsü (%25 B <sub>4</sub> C <sub>p</sub> MMK, n=2500 dev/dak, f= 0,3 mm/dev ).....	127
Resim 4.16. Kaplamalı karbür matkap ile elde edilen en kötü yüzeyin SEM görüntüsü (%10 B <sub>4</sub> C <sub>p</sub> MMK, n=2500 dev/dak, f= 0,1 mm/dev).....	128
Resim 4.17. Delik sonlarında elde edilen talaş resimleri.....	128
Resim 4.18. HSS matkapla kompozit malzemenin delinmesi sonucu elde edilen talaş biçimleri (a) f=0,1 mm/dev (b) f=0,3 mm/dev .....	133
Resim 4.19. (a) Karbür matkapla ve (b) Kaplamalı karbür matkapla kompozit malzemenin delinmesi sonucu elde edilen talaş biçimleri.....	134



## SİMGELER VE KISALTMALAR

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

<b>Simgeler</b>	<b>Açıklama</b>
<b>AA2618 (Al2618)</b>	2618 serisi alüminyum alaşımı
<b>AA7015</b>	7015 serisi alüminyum alaşımı
<b>AxB</b>	A ve B faktörünün etkileşimi
<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	Aluminum oxide (Alüminyum oksit)
<b>Al2024 (AA2024)</b>	2024 serisi alüminyum alaşımı
<b>Al2124 (AA2124)</b>	2124 serisi alüminyum alaşımı
<b>Al2219 (AA2219)</b>	2219 serisi alüminyum alaşımı
<b>Al356 (A356)</b>	356 serisi alüminyum alaşımı
<b>Al380</b>	380 serisi alüminyum alaşımı
<b>Al6061 (AA6061)</b>	6061 serisi alüminyum alaşımı
<b>Al6063</b>	6063 serisi alüminyum alaşımı
<b>Al6092</b>	6092 serisi alüminyum alaşımı
<b>Al7XXX</b>	7000 serisi alüminyum alaşımı
<b>Al7039</b>	7039 serisi alüminyum alaşımı
<b>Al7072</b>	7072 serisi alüminyum alaşımı
<b>Al7075</b>	7075 serisi alüminyum alaşımı
<b>b</b>	Talaş genişliği (mm)
<b>BHN (HB veya BSD)</b>	Brinell hardness (Brinell sertliği)
<b>B-Al</b>	Boron-aluminum (Bor-alüminyum)
<b>B<sub>4</sub>C<sub>p</sub></b>	Boron carbide particulate (Bor karbür parçacığı)
<b>c</b>	chopped (Kırpık biçimli)
<b>d</b>	Yoğunluk (g/cm <sup>3</sup> )
<b>E</b>	Elastikiyet modülü (MPa)
<b>f</b>	İlerleme hızı
<b>F<sub>a</sub></b>	İlerleme kuvveti (N)
<b>F<sub>c</sub></b>	Kesme kuvveti (N)
<b>f<sub>e</sub></b>	Hatanın serbestlik derecesi

<b>Simgeler</b>	<b>Açıklama</b>
<b>Fr</b>	Radyal kuvvet
<b>Ft</b>	Teğet kuvvet
<b>F<sub>test</sub></b>	Varyans analizi
<b>F-tablo</b>	F değerlerine ait standart tablo
<b>F<sub>x</sub></b>	X eksenindeki tepki kuvveti (N)
<b>F<sub>y</sub></b>	Y eksenindeki tepki kuvveti (N)
<b>F<sub>α</sub>(1,f<sub>c</sub>)</b>	%95'lik önem aralığındaki F-tablo değeri olup
<b>GKT</b>	Toplama ait genel kareler toplamı
<b>Gr</b>	Graphite (Grafit)
<b>h</b>	Talaş kalınlığı (mm)
<b>HB500</b>	500 kgf yük altında 10 mm çelik bilye ile elde edilen Brinell sertliği
<b>HRB</b>	Rockwell hardness B scale (Rokvel B sertliği)
<b>HRE</b>	Rockwell hardness E scale (Rokvel E sertliği)
<b>HSS</b>	High speed steel (Yüksek hız çeliği)
<b>HV (VHN)</b>	Vickers hardness (Vickers sertliği)
<b>k</b>	Performans karakteristiğini önemli derecede etkileyen işleme parametrelerinin sayısı
<b>k<sub>s</sub></b>	Özgül kesme basıncı (N/mm <sup>2</sup> )
<b>KT</b>	Kareler toplamı
<b>KT<sub>e</sub></b>	Hata değerine ait kareler toplamı
<b>K(10,20,30, 40)</b>	Karbür kesici takıma ait sınıflandırma-Sayı yükseldikçe yüksek hızda hassas kesme uygulamaları için, sayı küçüldükçe daha düşük hızlarda kaba işlemler için
<b>L<sub>i</sub></b>	O merkezli çemberin çevresel uzunluğu
<b>LM2</b>	LM2 serisi Alüminyum alaşımlı külçe
<b>LM25</b>	LM25 serisi Alüminyum alaşımlı külçe
<b>M<sub>c</sub> (M<sub>z</sub>)</b>	Kesme momenti (Ncm)
<b>n</b>	Devir sayısı (dev/dak)
<b>n<sub>eff</sub></b>	Etkili olan toplam deney sayısı
<b>N(1-12)</b>	İşleme tekniğine göre yüzey pürüzlülük ölççeği
<b>Omega OB-400</b>	Yüksek sıcaklıklara, yağa, çözücülere ve aside dayanıklı çimento
<b>p</b>	Particulate (Parçacık biçimi)

<b>Simgeler</b>	<b>Açıklama</b>
<b>PCD</b>	Polycrystalline diamond (Sentetik çok kristalli elmas)
<b>r</b>	Radyal mesafe
<b>R</b>	Doğrulama deneylerinin tekrar sayısını
<b>R<sub>a</sub></b>	Ortalama yüzey pürüzlülük değeri ( $\mu\text{m}$ )
<b>R<sub>i</sub></b>	O merkezli çemberin yarıçapı
<b>R<sup>2</sup></b>	Güvenirlilik katsayısı
<b>Sd (SD)</b>	Serbestlik derecesi
<b>Sd<sub>e</sub></b>	Hatanın serbestlik derecesi
<b>Sd<sub>T</sub></b>	Toplam serbestlik derecesi
<b>SiC</b>	Silicon carbide (Silisyum karbür)
<b>S/N (<math>\eta</math>)</b>	Signal/Noise (Sinyal/Gürültü)
<b>T</b>	Yapılan gözlemlerin toplamını
<b>Ti6Al4V</b>	%6 Al, %4 V geri kalan kısmını da titanyumun oluşturduğu alaşımlı malzeme
<b>T6</b>	Çözeltiyeye alma, su verme ve yaşlandırma aşamalarından oluşan ısıl işlem
<b>T651</b>	Çözeltiyeye alma ısıl işlemi, kontrollü miktarda uzatarak gerginlikleri giderme ve daha sonra yapay olarak yaşlandırma
<b>Var</b>	Varyans
<b>Var<sub>e</sub></b>	Hatanın varyansı
<b>V<sub>B</sub></b>	Serbest yüzey aşınma miktarı (mm)
<b>V<sub>Bmax</sub></b>	Maksimum serbest yüzey aşınma miktarı (mm)
<b>V<sub>c</sub></b>	Cutting speed (Kesme hızı, m/dak)
<b>V<sub>i</sub></b>	Her hangi bir noktanın kesme hızı
<b>w</b>	whisker (İnce kristal biçimli)
<b>WC</b>	Tungsten karbür
<b>x<sub>i</sub>(k)</b>	k. performans karakteristiğinin i. deneyine ait normalleştirme sonucunu
<b>x<sub>j</sub>(k)</b>	Özgül karşılaştırma serisi
<b>x<sup>0</sup><sub>i</sub>(k)</b>	k. performans karakteristiğinin i. deneyine ait normalleştirilecek değeri
<b>x<sup>0</sup></b>	İstenilen ideal değer
<b>x<sub>0</sub>(k)</b>	Referans serisi

<b>Simgeler</b>	<b>Açıklama</b>
<b>YD</b>	Yüzde dağılım
$y_{ij}$	Ölçülen karakteristik değer
<b>Y<sub>tahmin</sub></b>	S/N değerine karşılık gelen gerçek değer
<b>ZA27</b>	Zinc-aluminum casting alloys (Çinko alüminyum döküm alaşımları)
$\alpha$	alfa
$\gamma(x_0, x_i)$	Gri bir sistemdeki $x_i$ serisi ile $x_0$ serisi arasındaki geometrik bezerliğin ölçüsü
$\hat{\gamma}$	Gri ilişki derecesi
$\bar{\gamma}_i$	Optimum seviyedeki gri ilişki derecesi ortalamasını
$\hat{\gamma}_{egg}$	Gri ilişki derecesi değeri
$\gamma_m$	Gri ilişki derecelerinin toplamının ortalaması
$\epsilon$	Matkabın uç açısı
$\epsilon_U$	Kopma uzaması (%)
$\epsilon(x_0(\mathbf{k}), x_i(\mathbf{k}))$	Gri ilişki katsayısı
$\hat{\eta}$	Optimum seviyede tahmin edilen S/N oranı sonucu
$\bar{\eta}_i$	Optimum seviyedeki S/N oranının ortalaması
$\eta_m$	S/N oranlarının toplamının ortalaması
$\mu$	Hesap edilen seviyedeki aritmetik ortalama
$\xi$	Ayırt etme katsayısı
$\Sigma$	Matematikte toplama sembolü
$\sigma$	Ortalama kareler toplamı
$\sigma_U$	Çekme mukavemeti (MPa)
$\sigma_f$	Eğilme mukavemeti (MPa)

<b>Kısaltmalar</b>	<b>Açıklama</b>
<b>AISI</b>	American Iron and Steel Institute (Amerikan Demir ve Çelik Enstitüsü)
<b>ANOVA</b>	Analysis of Variance (Varyans Analizi)
<b>ASTM</b>	American Society for Testing and Materials (Amerikan Test ve Malzemeler Derneği)
<b>C.I.</b>	Confidence Interval (Güven aralığı)
<b>CMM</b>	Coordinate Measuring Machine (Koordinat Ölçme Tezgâhı)
<b>CNC</b>	Computer Numerical Control (Bilgisayarlı Sayısal Kotrol)
<b>CVD</b>	Chemical Vapor Deposition (Kimyasal Buhar Yoğuşturma)
<b>DIN</b>	Deutsches Institut für Normung (Alman Standartlar Enstitüsü)
<b>EDM</b>	Electrical Discharge Machining (Elektro Erozyon ile İşleme)
<b>EN</b>	European Norm (Avrupa Standardı)
<b>GEP</b>	Gen ile İfade Edilen Programlama
<b>ISO</b>	International Organization for Standardization (Uluslararası Standartlar Teşkilâtı)
<b>MMK</b>	Metal Matrisli Kompozit
<b>PA</b>	Point Angle (Uç açısı)
<b>RSM</b>	Response Surface Methodology (Yanıt Yüzey Metodu)
<b>SEM</b>	Scanning Electron Microscope (Elektron Tarama Mikroskobu)
<b>TM</b>	Toz Metalürjisi
<b>USB</b>	Universal Serial Bus (Evrensel Seri Veriyolu)
<b>vb.</b>	ve benzeri
<b>XRD</b>	X-Ray Diffraction (X-Işını Kırınımı)
<b>YT</b>	Yığıntı Talaş (Kesici Kenar Üzerinde Talaşın Sıvanarak Birikmesi)

## 1. GİRİŞ

Günümüzde, malzeme özelliklerinin geliştirilmesine ve geliştirilen malzemelerin işlenebilirliğine olan ihtiyaç giderek artmakta ve bu malzemelerden kullanıldıkları alana göre maksimum performans sergilemesi beklenmektedir [1-29]. Öncelikli olarak kullanılan malzeme hafif ve aynı zamanda yüksek derecede mukavemetli olmalıdır. Bu özelliklerdeki malzeme, farklı özellik ve yapılarıdaki en az iki ve daha fazla malzemenin bir araya gelmesi ile elde edilebilmekte ve bu tür malzemeler kompozit malzemeler olarak bilinmektedir. Hafif oluşları ve içerisindeki takviye elemanlarından dolayı yüksek derecede mukavemet göstermelerinin yanı sıra yüksek aşınma direnci, düşük termal genişleme katsayısı ve yüksek ısı iletkenlik özelliklerinden dolayı, metal matrisli kompozitlere (MMK) olan ilgi gün geçtikçe artmaktadır [1-3, 5-9, 11, 15-17, 19-24, 26-30]. Kompozit malzemeler genel olarak otomotiv, havacılık ve uzay sanayi, gemi yapımı, askeri araç ve gereçlerin yapımında ve günlük yaşama dair birçok alanda kullanılmaktadır. Yataklar, pistonlar, biyel, otomobillerin fren diski, kayan elektrik bağlantıları, turbo kompresör çarkları ve uzay çerçeveli yapılar gibi elemanlar MMK malzemelerin kullanımına örnek verilebilir [31, 32].

Kompozit malzemelerin özelliklerini matris, takviye elemanı ve ara yüzeyin doğası etkilemektedir ve takviye malzemeleri % 60'a kadar değişebilen oranlarda genellikle parçacık (p), ince kılımsı kristaller (w) veya kırpık elyaf (c) biçiminde kullanılmaktadır [33]. Uygun nitelikte matris ve takviye elemanının seçimi ve birleştirilmesi, onların üretiminde anahtar faktördür. Takviye elemanı olarak SiC, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ve B<sub>4</sub>C yaygın olarak kullanılırken, matris malzemeleri olarak Al, Ti ve Mg gibi çeşitli malzemeler kullanılmaktadır. İlâveten, MMK'ların üretiminde, toz metalürjisi (TM) ve karıştırarak dökme gibi çeşitli üretim yöntemleri kullanılmaktadır. Karıştırarak dökme yöntemi, gözenekli yapının oluşması, seramik takviyelerin çökmesi ve parçacıklarla takviye elemanı arasındaki zayıf ıslanabilirlik gibi dezavantajlara sahiptir [34, 35]. Diğer taraftan TM yöntemi, üretimde kolaylık ve ucuzluk sağlamasıyla birlikte, takviye parçacıklarının matris alışı içerisinde homojen bir biçimde dağılması ve üretilen kompozitlerin yüksek kalitede mekanik özellikler göstermesi gibi önemli avantajlar sunmaktadır [36]. Son zamanlarda B<sub>4</sub>C, düşük yoğunluğa (2,51 g/cm<sup>3</sup>); yüksek elastikiyete (445 GPa); yüksek ergime noktasına (2450 °C); yüksek sertliğe (3800-4200 HV) ve iyi bir termal kararlılığa sahip olmasından dolayı araştırmacıların ilgisini çekmektedir [9, 23]. Ayrıca, Türkiye'de bol miktarda bor

rezervlerinin bulunması, bu malzemeye olan ilgiyi artırmakta ve bu alandaki çalışmalar TÜBİTAK tarafından araştırma projeleri ile desteklenmektedir. Takviye elemanı olarak  $B_4C$  parçacıkların ilave edilmesi,  $SiC$  (~3500 HV) ve  $Al_2O_3$  (~2300 HV) gibi diğer seramiklerden daha yüksek sertlik değerine (~4200 HV) sahip olmasıyla avantajlıdır [7, 34]. Düşük maliyetli üretim tekniği olan TM yöntemi ile üretilen bor karbürlü sermetler, düşük yoğunluk, yüksek elastikiyet modülü ve yüksek aşınma direncine sahip malzemelerdir [37]. Geçtiğimiz yıllarda,  $SiC$ ,  $Al_2O_3$  ve  $B_4C$  seramik parçacıkları içeren metal matris kompozitlerin sahip olduğu fiziksel ve mekanik özellikler, yüksek aşınma direnci ve hafif malzemelerin tercih edildiği uygulamalar için sürekli geliştirilmiştir [30, 38]

Kompozit malzemeler istenilen özellikte üretildikten sonra, makine parçası olarak kullanılabilmesi için talaş kaldırma yöntemlerinden faydalanılarak şekillendirilmeleri gerekmektedir. Makine parçalarının şekillendirilmesinde tornalama, frezeleme ve delme operasyonları gibi çeşitli geleneksel metal işleme teknikleri kullanılmaktadır. Tornalama, delme ve frezeleme gibi işleme tekniklerinin kompozit malzemelere uygulanabilmesi, ancak özel olarak tasarlanmış kesici takım ile ve önceden belirlenmiş işleme şartları ile mümkün olabilmektedir. Kompozit malzemelerin işlenmesi ile ilgili literatür çalışmaları incelendiğinde, yapılan çalışmaların çoğunlukla tornalama ve frezeleme ile ilgili olduğu görülmektedir. Genellikle birleştirme ve montaj öncesi yapılması gereken son talaş kaldırma süreci olan delme operasyonu ile ilgili sınırlı sayıda çalışma bulunmaktadır.

Toplam talaş kaldırma süreci içerisinde yer alan delme operasyonu, tornalama ve frezeleme operasyonlarından sonra gelmektedir. Ayrıca, delme operasyonu son işleme adımları arasında yer aldığı için, bu aşamada oluşabilecek bir problem malzemenin hurdaya ayrılmasıyla ve önceki üretim süreçlerinin boşa gitmesiyle sonuçlanacak maliyet kayıplarına yol açmaktadır [25]. Bu nedenle, kompozitlerin delinmesinde, iyi bir delik yüzeyi elde etmek ve matkap malzemesi seçmek için, MMK'ların delinme sürecini anlamak önemlidir [6].

Anizotropik bir yapıya sahip MMK'ların belirtilen avantajlarına rağmen, bu kompozitlerin içeriğindeki sert parçacıklardan dolayı işlenebilirlikleri zordur [1, 3, 4, 11, 16, 26]. Matris içerisindeki seramik tanelerinin aşındırıcı doğası kesici takımı daha hızlı aşındırmakta ve bundan dolayı iş kayıpları, yüksek takım maliyeti, iş parçasındaki ölçü hataları, kötü yüzey kalitesi ve daha az takım ömrüne sebep olmaktadır. MMK'ların delinmesi sürecinde geleneksel malzemelere göre oldukça yüksek takım aşınmasına ilave olarak, yüksek delme

kuvvetleri ve apak oluşumu gibi birçok problemi de beraberinde getirmektedir [6, 17, 23, 26, 27]. Bu nedenlerle, kesme parametreleri ve işleme şartlarına bağlı olarak kesici takım aşınma mekanizmaları bilindiği takdirde kesici takımlar daha etkin olarak kullanılabilir.

Bu alışmada,  $B_4C_p$  içerikli alüminyum kompozit malzemelerin üretimi ve delme özelliklerinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla,  $B_4C_p$  içerikli alüminyum matris kompozitler, %10, %15, %25 gibi değişik oranlarda sıvı faz sinterleme metodu ile üretilmiş ve bu malzemelerin çekme ve darbe testleri ile sertlik ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Daha sonra, üretilen kompozitlerin değişik takım malzemeleri ve kuru delme şartları altında delme deneyleri yapılmıştır. Delme parametrelerinin kesme kuvvetlerine, yüzey pürüzlülüğüne, takım aşınmasına ve kesme esnasında meydana gelen sıcaklığa olan etkisini belirlemek amacı ile dört farklı devir sayısı (n) ve üç farklı ilerleme hızı (f) kullanılmıştır.  $B_4C_p$  içerikli alüminyum kompozitlerin, HSS, TiAlN kaplamalı ve kaplamasız sementit karbür takımlar kullanılarak delinmesi sonucu elde edilen kesme kuvvetleri, yüzey pürüzlülüğü, takım aşınması ve kesme esnasında oluşan sıcaklıklar kayıt edilmiş ve elde edilen bu sonuçlar istatistiksel olarak değerlendirilmiştir. Ayrıca, kesme parametreleri; takım aşınması, yüzey pürüzlülüğü ve takım sıcaklığı gibi bazı test sonuçlarına göre optimize edilmiştir.





## 2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Malzeme bilimi alanında, genellikle üretilen MMK'lar üzerinde yapılan mikroyapı incelemeleri ile kompozit malzeme içerisinde seramik takviye elemanının dağılımının homojenliği ve kompozit malzemenin gözenekli bir yapıya sahip olup olmadığı araştırılmıştır. Ayrıca, kompozit malzemelere uygulanan bazı testler ile mekanik özellikleri belirlenmeye çalışılmıştır.

Talaş kaldırma mühendisliği alanında bu zamana kadar yapılan çalışmaların, kompozit malzemelerin işlenmesinde kesici takım malzemelerinin ve kesme parametrelerinin, kesme kuvvetleri, yüzey pürüzlülük ve takım aşınma değeri ve delme esnasında oluşan sıcaklık değerine etkisinin araştırılması üzerine yapıldığı görülmektedir. Bu sebeple, MMK malzemeler ile ilgili bu çalışmada yapılan literatür araştırması; bu malzemelerin i) üretimi ve mekanik özellikleri, ii) kesme kuvvetleri ve modelleme, iii) yüzey pürüzlülüğü, takım aşınması, talaş formu ve iv) delme esnasında oluşan sıcaklık üzerine yapılan çalışmalar adı altında dört ana başlıkta incelenmiştir.

### 2.1. Metal Matrisli Kompozit Malzemelerin Üretimi ve Mekanik Özellikleri Üzerine Yapılan Çalışmalar

MMK malzemeler değişik metotlarla üretilmekte ve üretilen bu malzemeler metalurjik olarak farklı testlere tabi tutulmaktadır. Bu sayede istenilen özellikteki MMK malzemenin üretilmesi mümkün olmaktadır. MMK malzemelerin üretimi, mekanik ve yapısal özelliklerinin incelenmesi üzerine yapılan literatür araştırması aşağıda anlatılmıştır.

Božić ve diğerleri, (2011) tarafından, toz metalurjisi tekniği ile üretilen %10 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> takviyeli çinko matrisli kompozit malzemelerin (ZA27-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) ve ZA27 alaşımlarının, oda sıcaklığında ve yükselen sıcaklıklarda basınç dayanımı, mikro yapısı ve mekanik özellikleri araştırılmıştır [34]. Ticari olarak elde edilen Zn-Al-Cu (Zn-25Al-3Cu) alaşımı 550 °C sıcaklıkta azot atmosferinde gaz atomizasyon işlemine tabi tutulmuş ve 30 dakika süre ile Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> tozları ile karıştırılarak silindirik kaplar içinde sıcak olarak sıkıştırılmıştır. Metal ve seramik tozlar 230 °C'de 150 MPa basınç altında 45 dak preslenmiştir. 20 °C ile 160 °C arasındaki sıcaklıkta  $2,4 \times 10^{-3} s^{-1}$  deformasyon oranında basınç gerilimi testlerine tabi tutulmuştur. Sonuçta ZA27 alaşımlarına yapılan Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ilavesinin, ZA27 alaşımlarına göre

oda sıcaklığında ve yükselen sıcaklıklarda akma mukavemetini ve elastik modülünü iyileştirdiği tespit edilmiştir. İlaveten sıcaklığın artması (20 °C den 140 °C'ye) ile ZA27- $Al_2O_3$  kompozitlerin akma mukavemetinin yaklaşık 390 MPa'dan 300 MPa'ya düştüğü, elastikiyet modülünün ise yaklaşık 85 GPa'dan 30 GPa'ya düştüğü bildirilmiştir. Yükselen sıcaklıklarda çinko alaşımı yumuşadığı için dislokasyon hareketlerinin kolaylaştığı,  $Al_2O_3$  seramik parçacıklarının varlığının bu dislokasyon hareketlerinin önünde bir engel oluşturduğu belirtilmiştir.

Kommel ve Kımmarı (2006) tarafından, bor karbür takviyeli kompozitlerin üretimi ve geri dönüşüm özelliklerini belirlemek amacıyla, ince taneli (1,24  $\mu m$ ) ve kaba taneli (4,2-74,7  $\mu m$ ) bor karbür içerikli %46-48 alüminyum tozu içeren sermetler, toz metalurjisi tekniği ile üretilmiş, mekanik, tribolojik ve mikroyapı testlerine tabi tutulmuştur [37]. Bor karbür içerikli alüminyum sermetlerin stabil sürtünme katsayısı ve düşük yoğunlukla birlikte, kuru kayma şartlarında yüksek aşınma direnci gösterdiği bildirilmiştir. Ayrıca ince taneli bor karbür kullanımının sermetlerin aşınma direncini önemli biçimde etkilemediği, fakat mukavemet özelliklerini artırdığı belirtilmiştir. Üretilen sermetlerin, oksitli ortamlarda ilave ısı işlem sonucu kendiliğinden çözüldüğü gözlemlenmiştir. Çözülen malzeme ilave aşındırma ve öğütme işlemine tabi tutularak kendiliğinden yayılan yüksek sıcaklık sentezi ile kompozit malzemenin yeniden üretiminde kullanılmıştır. Yeniden üretilen kompozit malzemelerin, zirkonyum oksit tozu ortamında 1080 °C sıcaklık altında ısı işleme tabi tutulmasıyla yeniden kullanılabilenliği bulunmuştur.

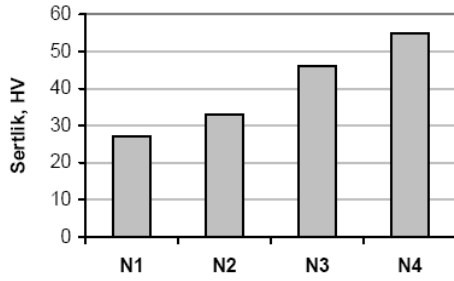
Nie ve diğerleri, (2007) tarafından, bor karbür takviyeli  $Al_{20}B_{24}$  matrisli kompozit malzemeler mekanik alaşımlama-sıcak ekstrüzyon tekniği ile üretilmiş, mikro yapı ve mekanik özellikleri araştırılmıştır [39]. Alüminyum ve  $B_4C$  tozları gezegen tipi değirmen cihazında mekanik olarak alaşımlanmış, beş saat süreyle karıştırılmış, çelik kalıp içerisine yerleştirilmiş, 400 MPa basınçta soğuk halde preslenmiş ve daha sonra 570 °C'de 300 MPa basınçta sıcak olarak preslenmiştir. Bu şekilde 38 mm çapında ve 50 mm yüksekliğinde çubuklar elde edilmiştir. Sıcak preslenen çubuklar, grafit yağlayıcı kullanılarak 480 °C' 10:1 oranında ekstrüzyon işlemine tabi tutulmuştur. Üretilen malzemelerin mekanik özellikleri Çizelge 2.1'de verilmiştir. Üretilen kompozit malzemelerin mikro yapısı optik mikroskop altında incelenmiş, seramik parçacıkların matris içerisinde homojen biçimde dağıldığı, gözenek ve çatlak gibi kusurların olmadığı ifade edilmiştir.  $B_4C$  takviyeli kompozitlerin

mekanik özelliklerinin, saf haldeki matris malzemesine göre önemli derecede arttığı ifade edilmiştir.

Çizelge 2.1. Üretilen Al2024 ve B<sub>4</sub>C içerikli kompozit malzemelerin mekanik özellikleri [39]

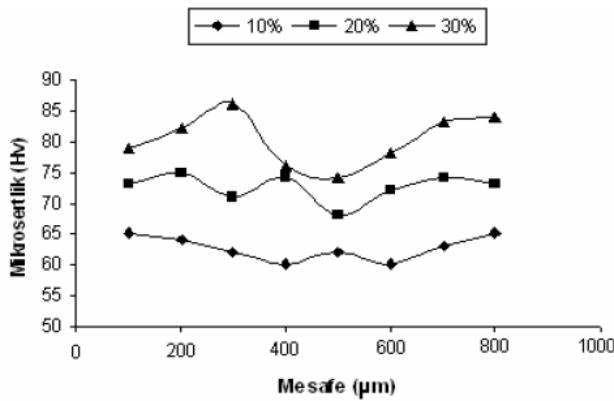
Malzeme	Akma Mukavemeti (MPa)	Çekme Mukavemeti (MPa)	Elastikiyet Modülü (GPa)	Uzama (%)
Al2024	400,8	489	69,93	14,7
% 10 B <sub>4</sub> C içerikli kompozit	456	573,5	95,63	1,71
%20 B <sub>4</sub> C içerikli kompozit	528,1	626,7	119,8	1,645

Hasırcı ve Gül (2010) tarafından, farklı hacimsel oranlarda B<sub>4</sub>C parçacık takviyeli Al matrisli kompozit malzemeler, yapı, mekanik ve abrazyon aşınma özelliklerinin belirlenmesi amacı ile toz metalurjisi yöntemi ile üretilmiştir [40]. Deneylerde saf alüminyum (N1), %5 B<sub>4</sub>C-Al (N2), % 10 B<sub>4</sub>C-Al (N3) ve %20 B<sub>4</sub>C-Al (N4) olmak üzere dört farklı malzeme kullanılmıştır. Ortalama 25 µm boyutunda Al ve B<sub>4</sub>C tozları 2 saat süreyle karıştırılmış, 700 MPa basınç altında preslenmiş ve sonuçta 10 mm çapında üretilen kompozit numuneler 570 °C sıcaklıkta açık atmosferde 12 saat süreyle sinterlenmiştir. Üretilen kompozit malzemelerin mikro yapısı optik mikroskop altında incelenmiş, seramik parçacıkların matris içerisinde homojen biçimde dağıldığı ifade edilmiştir. Üretilen numunelerin sertlik ölçümleri yapılmış ve elde edilen sonuçlar Şekil 2.1’de grafik halinde verilmiştir. Şekil 2.1’de verilen grafikten de anlaşıldığı gibi, takviye oranındaki artışa bağlı olarak üretilen kompozit malzemenin sertliğinin de arttığı belirtilmiştir. Kompozit malzeme içerisine katılan takviye elemanının amacının, matrisin dayanım ve sertliğini artırmak olduğu vurgulanmıştır. Üretilen numuneler son aşamada pim aşınma test cihazında aşınma testlerine tabi tutulmuş ve en iyi sonucu %10 B<sub>4</sub>C içerikli alüminyum kompozitin verdiği bildirilmiştir. Kompozit malzemelerin artan takviye oranında gevrek ve kırılgan bir davranış sergilediklerinden dolayı %20 B<sub>4</sub>C içerikli alüminyum kompozitin beklenildiği gibi aşınma direncine sahip olmadığı ifade edilmiştir.



Şekil 2.1. Değişik takviye oranına sahip B<sub>4</sub>C içerikli alüminyum kompozitlerin sertlik ölçüm sonuçları [40]

Orhan ve diğerleri, (2007) tarafından, mikroyapı incelemeleri ve mikrosertlik ölçümleri için, değişik takviye oranına sahip (%10, %20 ve %30) B<sub>4</sub>C içerikli alüminyum MMK'lar toz metalurjisi yöntemiyle üretilmiştir [41]. MMK'larda genellikle matris malzemesi olarak Al, Ti, Mg, Ni, Cu ve Zn elementlerinin kullanılmasına rağmen, Al ve alaşımlarının düşük yoğunluk ve korozif ortamlarda bozulmaya karşı dirençli olmaları sebebiyle daha yaygın bir şekilde kullanıldığı ifade edilmiştir. Sonuçta, kompozit malzeme içerisindeki takviye dağılımının homojen olduğu ve takviye oranındaki artışla doğru orantılı olarak kompozit malzemenin mikrosertliğinin de arttığı ifade edilmiştir. 550 °C'de yapılan sıcak preslemenin, takviye miktarına bağlı olarak kompozit malzemelerin yoğunluklarını azalttığı bildirilmiştir. Şekil 2.2'de üretilen kompozitlerin mikrosertlik değerleri görülmektedir.



Şekil 2.2. TM yöntemi ile üretilen Al/B<sub>4</sub>C kompozitlerin mikrosertlik grafiği [41]

Mahesh ve diğerleri, (2011) tarafından, sıvı metal karıştırma döküm tekniği ile üretilmiş %10 parçacık takviyeli Al6061-B<sub>4</sub>C MMK'ların sertlik, yapısal, mekanik ve ara yüzey karakteristikleri üzerine araştırma yapılmıştır [42]. 250 °C'den 600 °C'ye kadar değişen sıcaklıklarda ön ısıtma işlemine tabi tutulmuş B<sub>4</sub>C parçacıkları alkali çözeltisi içerisinde yıkandıktan sonra, mekanik pervaneler yardımıyla oluşturulan girdabın içerisinde ilave

edilerek ortalama 600-700 dev/dak devirde karıştırılmış ve kompozit malzemeler 730 °C’de döküm yolu ile elde edilmiştir. Daha sonra numunelerin bir kısmına T6 ısıl işlemi uygulanmıştır. Isıl işlem görmüş ve görmemiş malzemeler incelenmiştir. Sonuçta kompozit malzeme içerisine ilave edilen B<sub>4</sub>C seramiğinin hem ısıl işlem görmüş hem de ısıl işlem görmemiş kompozit malzemenin mikro sertliğini artırdığı bildirilmiştir. %10 B<sub>4</sub>C içerikli Al6061 kompozitin çekme mukavemeti 247 MPa ve sertliği 105 BHN olarak ölçülmüştür. B<sub>4</sub>C parçacıklarına 300 °C’nin üzerinde ön ısıtma yapılmasının, bor oksit fazının oluşumuna yol açtığı ve matris elemanı içerisinde takviye parçacıklarının düzgün bir şekilde dağılmayarak yığılmalara yol açtığı, 250 °C’de ön ısıtma yapılmasıyla matris elemanı içerisinde takviye parçacıklarının düzgün bir şekilde dağıldığı ifade edilmiştir. Kompozit malzemeler üzerinde yapılan elektron tarama mikroskobu (SEM, Scanning electron microscope) ve X-Işını kırınımı (XRD, X-ray diffraction) çalışmaları ile ara yüzey reaksiyonu sonucu AlB<sub>2</sub>, Al<sub>3</sub>BC, AlB<sub>12</sub>, ve AlB<sub>10</sub> gibi ürünlerin oluştuğu belirtilmiştir.

Abenojar ve diğerleri, (2007) tarafından, toz metalurjisi tekniği ile üretilmiş %10 parçacık takviyeli Al-B<sub>4</sub>C MMK’ların üretim sürecindeki parametreler incelenmiştir [43]. İlk aşamada planet dişli bilyalı karıştırıcıda %10 B<sub>4</sub>C ile alüminyum tozları, koruyucu atmosfer olmaksızın, 600 dev/dak hızında, 12 saat süreyle karıştırılmıştır. Sistemik olarak her iki saatte bir toz numuneleri alınarak, yoğunluk ile akış oranı ölçülmüş ve optimum karıştırma zamanını belirlemek için, SEM ile mikroyapı değişimleri incelenmiştir. İkinci aşamada, 12 saat karıştırılan Al+%10 B<sub>4</sub>C tozu, optimum sıkıştırma basıncını belirleme amacı ile çeşitli sıkıştırma basıncı altında (500 MPa, 600 MPa, 700 MPa) tek eksenli olarak sıkıştırılmıştır. Daha sonra sinterleme yoğunluğu, boyutsal değişimler, eğilme mukavemeti ve sertlik değerlendirmeleri yapılmıştır. Son olarak sinterleme atmosferinin etkilerini incelemek için, 700 MPa basınç altında sıkıştırılan numuneler, 600 °C, 610 °C, 620 °C, 635 °C ve 650 °C’de 30 dak süreyle N<sub>2</sub>/10H<sub>2</sub>/0,1CH<sub>4</sub> atmosferi altında sinterlenmiş ve 600 °C sıcaklıkta N<sub>2</sub>/10H<sub>2</sub>/0,1CH<sub>4</sub> atmosferi altında sinterlenen malzemeler ile argon gazı altında sinterlenen malzemeler kıyaslanmıştır. Sonuçta, bu malzemeleri üretmek için en iyi sıkıştırma basıncının 700 MPa olduğu, en iyi sonuçların 635 °C’de azot atmosferi altında sinterlendiği zaman elde edildiği bildirilmiştir. Üretilen kompozitlerin, toz metalurjisi ile üretilen alüminyumdan daha düşük mekanik dirence (eğilme mukavemeti) sahip olduğu, daha sert (~100 HV) ve daha kırılğan olduğu ifade edilmiştir. Eğilme mukavemeti değerinin (165 MPa) saf alüminyumun hemen hemen %86’sına karşılık geldiği, fakat bu değerlerin diğer tekniklerle üretilen malzemelerle kıyaslandığında oldukça yüksek olduğu belirtilmiştir.

Kompozit malzeme içerisindeki bor karbür dağılımının homojenliğinin ve üretilen malzemelerin mekanik özelliklerinin radyasyondan korunma amaçlı kullanımlar için uygun olduğu ifade edilmiştir.

Çirakoğlu ve diğerleri, (1997) tarafından, AlN-B<sub>4</sub>C takviyeli alüminyum matrisli kompozit malzemeler vakum infiltrasyon (sıvı metal emdirme) metodu ile üretilmiştir [44]. Öncelikli olarak %1, %2, %4 ve %10 B<sub>4</sub>C ve AlN tozu karıştırılarak soğuk izostatik presleme ile ön şekillendirilme işlemine tabi tutulmuş ve daha sonra azot gazı atmosferi altında 1400-1600 °C sıcaklıklarda sinterlenmiştir. Sinterlenmiş numunelere 1250 °C'de 6,5 kPa argon gazı altında alüminyumla infiltrasyon işlemi uygulanmıştır. Sonuçta, sinterleme sıcaklığındaki artışın ön şekillendirmede gözenek çapını artırdığı ve infiltrasyon işleminin numunenin tamamında görülebilmesi için B<sub>4</sub>C içeriğinin en az %4 ve sinterleme sıcaklığının 1600 °C olması gerektiği bildirilmiştir.

Yücel ve Tekin (1997) tarafından, patlayıcı birleştirme yöntemi ile Al7075-B<sub>4</sub>C ve Al-B<sub>4</sub>C'nin sermetleri hazırlandıktan sonra bu sermetler üzerinde yoğunluk, sertlik, kırılma tokluğu ve bükülme mukavemeti testleri gerçekleştirilmiştir [45]. Al-B<sub>4</sub>C sermetlerin hazırlanmasında seramik oranı %30, %50 ve %80 ve Al7075-B<sub>4</sub>C sermetlerin hazırlanmasında seramik oranı %0, %40 ve %60 olarak seçilmiştir. 10-12 GPa basınç uygulanan simetrik eksenli birleştirmeler için patlayıcı ile çevrilmiş ve içerisinde toz karışımı tutacak bir kap kullanılmıştır. Patlama neticesinde kabın daralmasıyla birlikte 1x4x0,5 cm boyutlarında kompozit numuneler elde edilmiştir. Çizelge 2.2'de üretilen kompozit malzemelerden elde edilen sertlik değerleri görülmektedir. Sonuçta, kompozitler bu yöntem ile üretildiğinde, seramiklerin matris içerisinde düzgün dağıldığı, mikro çatlakların olmadığı ve metal ile seramik arasında birleşmelerin iyi olduğu bildirilmiştir. Ayrıca bu metotla üretilen kompozitlerde takviye oranının artırılmasının, yüksek sertlik artışına, daha düşük teorik yoğunluğa, daha düşük bükülme mukavemetine ve daha düşük kırılma tokluğuna yol açtığı ifade edilmiştir.

Çizelge 2.2. Patlayıcı birleştirme ile elde edilen B<sub>4</sub>C içerikli alüminyum kompozitlerin sertlik değerleri [45]

Malzeme	Sertlik (HRB)
% 30 B <sub>4</sub> C-% 70 Al	66,5
% 50 B <sub>4</sub> C-% 50 Al	82,7
% 80 B <sub>4</sub> C-% 20 Al	90,2
% 30 B <sub>4</sub> C-% 70 Al	65,6
% 50 B <sub>4</sub> C-% 50 Al	78,8
% 80 B <sub>4</sub> C-% 20 Al	96,3
% 30 B <sub>4</sub> C-% 70 Al	75,7
% 50 B <sub>4</sub> C-% 50 Al	79,1
% 70 B <sub>4</sub> C-% 30 Al	92,4
% 00 B <sub>4</sub> C-% 100 Al7075	32,5
% 40 B <sub>4</sub> C-% 60 Al7075	92,3
% 60 B <sub>4</sub> C-% 40 Al7075	99,1

Zhang ve diğerleri, (2004) tarafından, %5 ve %15 B<sub>4</sub>C ile takviyeli Al6092 matrisli kompozit malzemeler, ekstrüzyon ve sıcak izostatik presleme olmak üzere iki farklı toz birleştirme yöntemi kullanılarak üretilmiştir [46]. Her iki yöntemde de öncelikli olarak tozlar karıştırılmış, devamında 48 ksi (330,95 MPa) basınç altında soğuk izostatik preslenmiş ve 550 °C’de sinterleme işlemine tabi tutulmuştur. Daha sonra ekstrüzyon metodu ile üretilecek olan malzemeler 5:1 oranında ekstrüzyon işlemine tabi tutulmuş, sinterlenmiş ve devamında hava ile soğutulmuştur. Sıcak izostatik presleme yöntemi ile üretilecek olan malzemeler 15 ksi (103,42 MPa ) basınç altında sıcak izostatik presleme işlemine tabi tutulmuştur. Sonuçta her iki üretim metodu ile üretilen malzemede parçacıkların homojen bir şekilde dağıldığı bildirilmiştir. Üretim yönteminin mikroyapıda değişimlere neden olduğu ve bunun sonucu olarak metal matrisin mukavemetini etkilediği ifade edilmiştir. Ekstrüzyon metodu ile üretilen monolitik matris malzemesinin, sinterleme ve sıcak izostatik presleme yapılmış benzer malzemelerden daha çok mukavemet gösterdiği belirtilmiştir. Ayrıca, ekstrüzyon metodu ile üretilen kompozitlerde, takviyenin hacimsel oranındaki değişime karşılık benzer gerinim sertleşmesi görülürken, sinterleme ve sıcak izostatik presleme ile üretilen kompozitlerde takviyenin hacimsel oranının artmasıyla, kompozit malzemelerin gerinim sertleşmesinin arttığı sonucuna ulaşılmıştır.

Lillo (2005) tarafından, %10 B<sub>4</sub>C takviyeli Al6061 MMK’lar toz metalurjisi metodu ile üretilmiş, sinterlenmiş ve sıcak izostatik preslenmiştir [47]. 32x32x140 mm ebatlarında üretilen çubuklara 412 °C 2 saat süreyle ısıl işlem yapılmış ve yavaşça soğutulmuştur. Eş kanallı açısız ekstrüzyonun etkileri (işleme sıcaklığı, işleme yöntemi ve eş kanallı açısız ekstrüzyon kalıbı ile paso sayısı) araştırılmıştır. Üretilen kompozitlerin (ekstrüzyon işlemi



uygulanmamış) mikroyapı incelemeleri sonunda, B<sub>4</sub>C tanelerinin topaklandığı ve gözenekli bir yapının oluştuğu gözlemlenmiştir. Mekanik özelliklerin değerlendirilmesi sonucunda, elastik modülünün bir miktar iyileştiği, düşük çekme mukavemeti ve önemsiz miktarda süneklik gösterdiği bildirilmiştir. Eş kanallı açısız ekstrüzyon işleminin uygulanması sonucunda, bu tür MMK'ların mekanik özelliklerinde (özellikle çekme sünekliği) belirgin bir iyileşmeye yol açtığı bildirilmiştir. Kompozit içeriğindeki parçacıkların yeniden dağıldığı ve gözeneklerin giderildiği ifade edilmiştir. Bu iyileşmenin, daha ince taneli B<sub>4</sub>C parçacığı, daha ince taneli matris tozu ve daha iyi karıştırma metodu kullanımıyla artabileceği vurgulanmıştır.

Çanakçı (2006) tarafından, vorteks (girdap) metodu ile üretilmiş değişik (%0, %3, %4, %7) parçacık takviyeli AA2024-B<sub>4</sub>C MMK'ların özellikleri incelenmiştir [48]. AA2024 matris malzemesi elektrikli direnç fırınında 720 °C sıcaklıkta tamamen eritilmiş ve sıvı metal sıcaklığı 700 °C'ye düşürülmüştür. Ön ısıtma işlemine tabi tutulmuş karıştırıcı pervane, ergiyik haldeki sıvı metale daldırılmış ve 450 dev/dak karıştırma hızında argon gazı atmosferi altında döndürülmüştür. 600 °C sıcaklıkta 8 saat süreyle tavlama işlemine tabi tutulmuş B<sub>4</sub>C parçacıkları, sıvı metal içerisine ilave edilmiştir. Sıvı metal sıcaklığı 680 °C'ye düşünceye kadar, yaklaşık 5 dak süre ile 350 dev/dak dönme hızında karıştırmış, daha sonra silindirik kokil kalıba dökülerek kompozit malzeme üretimi tamamlanmıştır. Çizelge 2.3'de deneyler sonucunda elde edilen sertlik değerleri ile akma ve çekme mukavemeti değerleri verilmiştir. Sonuçta kompozit malzeme içeriğindeki takviye oranının artmasıyla, gözenek oranının arttığı, yoğunluğun azaldığı ve sertlik değerinin arttığı bildirilmiştir. Ayrıca kompozit malzeme içeriğindeki takviye oranının artmasıyla oluşan çentik etkisi sebebiyle, akma ve çekme mukavemeti ile uzama değerlerinin (%) azaldığı ifade edilmiştir.

Çizelge 2.3. B<sub>4</sub>C takviyeli AA2024 matrisli MMK'ların sertlik değerleri ile akma ve çekme mukavemeti değerleri [48]

Malzeme	Sertlik (BSD)	Akma Mukavemeti (MPa)	Çekme Mukavemeti (MPa)	Uzama (%)
AA2024	87,1	163	227	4,4
AA2024-%3 B <sub>4</sub> C	89,5	135	209	2,88
AA2024-%4 B <sub>4</sub> C	90,7	136	207	2,40
AA2024-%6 B <sub>4</sub> C	91,6	128	193	1,96
AA2024-%7 B <sub>4</sub> C	93	122	191	1,56

Cambronero ve diğerleri, (2003) tarafından, seramik takviyeli AA7015 alüminyum alaşımlarının mekanik karakterizasyonunu incelemek amacı ile MMK'lar toz metalurjisi

yöntemi ile üretilmiştir [49]. Yüksek mekanik özellikler gösteren AA7015 metal matrisli alaşım içerisinde sırasıyla  $B_4C$ ,  $TiB_2$  ve  $Si_3N_4$  seramikleri %5 oranında ilave edilmek suretiyle, üç farklı seramik takviyesine sahip MMK'lar imal edilmiştir. Sıcak ekstrüzyon işlemine tabi tutulmuş kompozit numuneler üzerinde yoğunluk, iletkenlik ve doğrusal genişleme katsayısı gibi fiziksel özellikler belirlenmiş ve sertlik ile çekme mukavemeti ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Yapılan deneyler sonucunda üretilen malzemelerin mekanik özellikleri Çizelge 2.4'de verilmiştir. Sonuçta, AA7015 alaşımının mekanik özelliklerini azalttığı için, seramik ilavesinin nihai MMK'yı güçlendirmede, fakat mikrosertliği artırdığı ifade edilmiştir. AA7015 alaşımına göre, kompozitlerin plastik deformasyonunun azaldığı ve daha iyi aşınma davranışı gösterdiği bildirilmiştir.

Çizelge 2.4. Ekstrüzyon işlemine tabi tutulmuş AA7015 matris alaşımlı malzemelerin mekanik ve fiziksel özellikleri [49]

Malzeme	Sertlik (HRE)	Sertlik (HV)	Çekme Mukavemeti (MPa)	Uzama (%)
AA7015-ekstrüze olmuş	80-83	~ 92	502	23
AA7015-T6	102-108	~ 144	543	19,6
AA7015+%5 $Si_3N_4$	92-94	~ 108	458	15,6
AA7015+%5 $TiB_2$	90-92	~ 105	440	15
AA7015+%5 $B_4C$	95-97	~ 114	432	12

Bedir (2006) tarafından, alüminyum MMK'ların üretimi, mikroyapısal özellikleri ve endüstriyel uygulamaları üzerine değerlendirme yapılmıştır [50]. Parçacık takviyeli MMK'larda kullanılan takviye parçacıklarının genelde oksit, karbür veya bor bileşenleri olduğunu, ayrıca bu tür kompozitlerin genelde toz metalurjisi veya sıvı yöntemle üretildiği bildirilmiştir. Sıvı üretim yönteminin, sıvı haldeki alüminyum alaşımı içerine katılan seramik tozlarının, katılma esnasında belirli bölgelerde yığılması ve topaklanmasının bir dezavantaj olabileceği ifade edilmiştir.

Doğan ve diğerleri, (2012) tarafından, vorteks metodu ve basınç ile iki farklı boyut ve üç farklı ağırlık oranına sahip  $\alpha-Al_2O_3$  parçacıkları ile takviye edilmiş Al6061 MMK'lar üretilmiş, yoğunluk ölçümleri yapılmış, porozite oranları hesaplanmış ve metal mikroskobu ile mikroyapı incelemeleri gerçekleştirilmiştir [51]. Matris alaşımı 700 °C sıcaklıkta ergitilmiş ve içerisine 400 °C'de ön ısıtma işlemine tabi tutulmuş  $Al_2O_3$  seramik tozları koruyucu argon gazı atmosferi altında ilave edilmiştir. Homojen bir karışım sağlamak amacı ile karışım 5 dak süre ile karıştırılmış ve 550 °C ön ısıtma işlemine tabi tutulmuş kalıp içerisine alınarak hidrolik preste 6 MPa basınç uygulanarak 40 mm çapında ve 140 mm boyunda

üretimiştir. Sonuçta, partikül oranının artması ve boyutunun düşmesi ile porozite oranının arttığı, düşük boyutlu partiküllerin partikül topaklanmasına ve porozite oluşumuna neden olduğu, partikül boyutunun artmasının homojen bir dağılım sağladığı ifade edilmiştir. Kompozit malzemelere ilave edilen  $Al_2O_3$  oranındaki artışın, kompozit malzemenin sertliğini artırdığı belirtilmiştir.

Reddy ve Zitoun (2010) tarafından, karıştırma döküm tekniği ile üretilmiş SiC takviyeli Al6061, Al6063 ve Al7072 matrisli MMK'ların akma ve kopma mukavemeti ile sünekliği araştırılmıştır [52]. Grafitten imal edilmiş pota içerisindeki sıvı matris içerisine, ön ısıtma işlemi uygulanmış takviye parçacıkları %20 oranında ilave edilmiştir. Bir karıştırıcı yardımıyla, karışım homojen bir hale gelinceye kadar karıştırılmış ve ön ısıtma işlemi uygulanmış dökme demir kalıp içerisine dökülmek suretiyle üç farklı matrise sahip MMK'lar imal edilmiştir. Çizelge 2.5'de deneyler sonucunda elde edilen uzama değeri (%) ile akma mukavemeti değerleri verilmiştir. Al/SiC kompozit malzemelerine ait akma ve kopma mukavemeti ile sünekliğin, Al6061 matris alaşımından, Al6063 matris alaşımına ve Al7072 alaşımına doğru gidildikçe azaldığı bildirilmiştir.

Çizelge 2.5. %20 SiC takviyeli Al6061, Al6063 ve Al7072 matrisli MMK'ların uzama (%) ve akma mukavemeti [52]

Malzeme	% Uzama (Takviyesiz)	% Uzama	Akma Mukavemeti (MPa)
%20 SiC-Al6061	~ 22	~ 7	~ 379
%20 SiC-Al6063	~ 20	~ 6	~ 368
%20 SiC-Al7072	~ 15	~ 5	~ 361

Das ve diğerleri, (2010) tarafından, toz metalurjisi yöntemi ile üretilen farklı SiC takviye oranına sahip (%0, %5, %10, %15 ve %20) alüminyum MMK'ların, dövülebilirlik ve sertlik gibi mekanik özellikleri araştırılmıştır [53]. Toz metalurjisi yöntemi ile üretilen alüminyum MMK'ların dövülebilirliğinin, takviye malzemesi oranına ve boyutuna, sıkıştırma yüküne, sinterleme sıcaklığına ve ıslatma zamanına bağlı olduğu ifade edilmiştir. Çizelge 2.6'da deneyler sonucunda elde edilen sertlik değerleri BHN cinsinden verilmiştir. Sonuçta, MMK içerisinde SiC parçacıklarının homojen bir şekilde dağıldığı, takviye oranının artmasıyla sertlik değerinin arttığı ve dövülebilirliğin kayda değer bir şekilde azaldığı bildirilmiştir.

Çizelge 2.6. Farklı SiC oranlarına sahip alüminyum MMK'ların sertlik değerleri [53]

Malzeme	Sertlik HB	Sertlik HV
Alüminyum	89	104
%5 SiC	92	107
%10 SiC içerikli MMK	95	110
%15 SiC içerikli MMK	97	111,5
%20 SiC içerikli MMK	101	114

Singh ve Prasad (2004) tarafından, sıvı metalurji tekniği ile üretilmiş SiC takviyeli AA6061 matrisli MMK'ların mekanik özellikleri araştırılmıştır [54]. AA6061 alaşımı SiC pota içerisinde ergitilmiş, ergiyiğin sıcaklığı karıştırma öncesi düşürülmüş, 800 °C'de ön ısıtma işlemi uygulanmış SiC parçacıkları ergiyik haldeki bulamacın içerisine ilave edilmiş, parçacıkların ıslatılmasını sağlamak için ilave olarak 15 dak daha karıştırılmış ve karışım ön ısıtma işlemi uygulanmış kalıp içerisine dökülmüştür. Üretilen döküm kütükler sıcak olarak haddelenmiştir. Çizelge 2.7'de deneyler sonucunda elde edilen uzama değeri (%) ile akma ve çekme mukavemeti değerleri verilmiştir. Sonuçta, çekinti boşluğu ve parçacık kırılmasından dolayı, sıcak hadde sonrası MMK'ların mekanik özelliklerinin önemli bir şekilde iyileştirilemediği ve MMK üretiminde karıştırma süresince Mg içeriğinde kayıplar olduğu için mekanik özelliklerin azaldığı bildirilmiştir.

Çizelge 2.7. Farklı SiC takviye oranlarına sahip alüminyum MMK'ların % uzama, akma ve çekme mukavemeti değerleri [54]

Malzeme	Uzama (%)	Akma Mukavemeti (MPa)	Çekme Mukavemeti (MPa)
AA6061 (T6)	22	289,91	328,5
AA6061 (Tavlınmış)	35	56,12	135,6
%5 SiC içerikli MMK	1,8	52,1	52,8
%10 SiC içerikli MMK	1,2	40	40,5
%15 SiC içerikli MMK	0,4	50	53,4

Altınkök ve Çoban (2012) tarafından, karıştırma dökme yöntemi ile 650 °C'de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/SiC takviyeli alüminyum hibrid kompozitler üretilmiş, çekme mukavemeti üzerine parçacık boyutlarının etkisi, yoğunluk ve porozite özellikleri araştırılmıştır [55]. Literatür çalışması sonucunda yazarlar tarafından, alüminyum matris alaşımı içerisine ilave edilen hem SiC hem de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> seramik parçacıkların, bu tür kompozit malzemelerin mukavemetini iyileştirdiğini ve hatta SiC parçacıklı malzemelerin mükemmel çekme mukavemeti ve yüksek sıcaklıklarda oksitlenme direnci gösterdiği rapor edilmiştir. Sonuçta karıştırma dökme yöntemi ile başarılı bir şekilde üretilen Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/SiC kompozitlerde yoğunluk ve porozite değişiminin takviye boyutuna bağlı olduğu ve parçacık boyutu azalınca porozite değerlerinin arttığı bildirilmiştir.

Ayrıca %10 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/SiC içerikli hibrid kompozitlerin çekme mukavemetinin, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/SiC parçacıkların ilave edilmesi ile iyileştiği ve SiC parçacıkların boyutunun artması ile azaldığı belirtilmiştir. Maksimum çekme mukavemeti değerinin (~280 MPa), 4 µm boyutunda parçacık ilave edildiği zaman elde edildiği ifade edilmiştir.

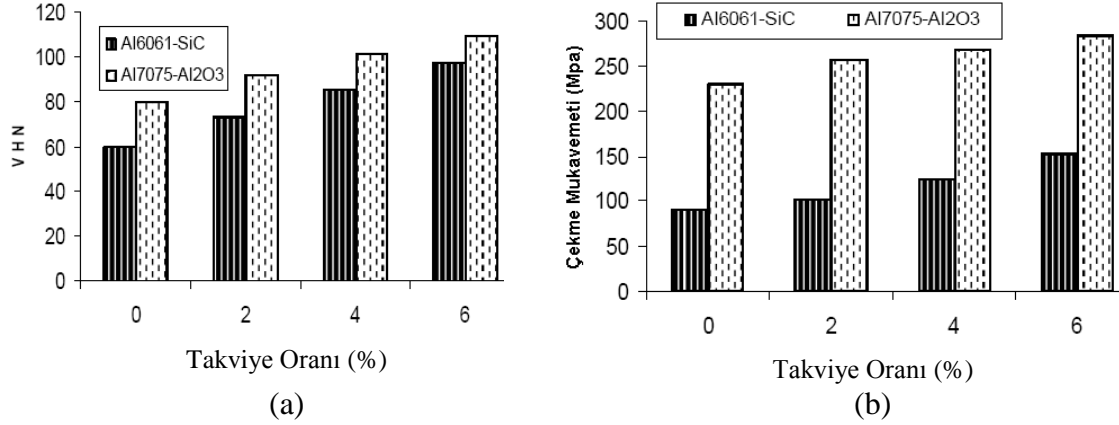
Sujan ve diğerleri, (2012) tarafından, karıştırma döküm tekniği ile üretilmiş Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ve SiC takviyeli Al356 matrisli MMK'ların fiziksel ve mekanik özellikleri araştırılmıştır [56]. Değişik takviye oranına sahip (%5, %10, %15) Al-SiC ve Al-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> kompozit malzemeler elde etmek amacı ile Al356 tozları ile seramik tozlar karıştırılmış ve 700 °C'de 2 saat süreyle fırında ergitilmiştir. Daha sonra ergiyik karıştırılmış ve fırın içerisinde seramik plaka üzerinde katılaşmaya bırakılmıştır. Çizelge 2.8'de deneyler sonucunda elde edilen sertlik ve çekme mukavemeti değerleri verilmiştir. Neticede, MMK'ların, takviye oranının artmasıyla düşük termal genleşme katsayısı, yüksek çekme mukavemeti, yüksek darbe dayanımı, yüksek sertlik gibi gelişmiş fiziksel ve mekanik özelliklere sahip olduğu, ayrıca abrazyon aşınmaya karşı düşük aşınma oranı gösterdiği bildirilmiştir.

Çizelge 2.8. Farklı SiC ve Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> oranlarına sahip alüminyum MMK'ların sertlik ve çekme mukavemeti değerleri [56]

Malzeme	Sertlik HB	Sertlik HV	Çekme Mukavemeti (MPa)
%100 Alüminyum	70	87	241,5
%5 Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> içerikli MMK	76	93	262,2
%10 Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> içerikli MMK	80	97	276
%15 Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> içerikli MMK	82	99	282,9
%5 SiC içerikli MMK	75	92	258,8
%10 SiC içerikli MMK	85	101	293,3
%15 SiC içerikli MMK	90	105	310,5

Kumar ve diğerleri, (2010) tarafından, sıvı metalürji tekniği ile üretilmiş Al6061-SiC ve Al7075-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> MMK'ların sertlik, çekme mukavemeti ve aşınma direnci özellikleri araştırılmıştır [57]. Ön ısıtma işlemine tabi tutulmuş parçacıklar oluşturulan girdabın içerisine ilave edilerek, 400 dev/dak devirde 10 dak süre ile karıştırılmış ve kompozit malzemeler 720 °C'de döküm yolu ile elde edilmiştir. Şekil 2.3'de deneyler sonucunda elde edilen sertlik değeri ile çekme mukavemeti değerleri verilmiştir. Al7075 matris alaşımının sertliği 60 HB500 (17 HRB, 78 HV) ve Al6061 matris alaşımının sertliği 30 HB500 olarak bildirilmiştir. Kompozit malzeme içerisindeki seramik takviyesinin artmasıyla mikro sertliğin arttığı belirtilmiştir. Üretilen kompozitlerin çekme mukavemeti değerlerinin,

katkısız matris elamanına göre daha büyük olduğu ve Al7075-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> MMK'ların çekme mukavemeti değerlerinin, Al6061-SiC MMK'lardan daha üstün olduğu ifade edilmiştir.

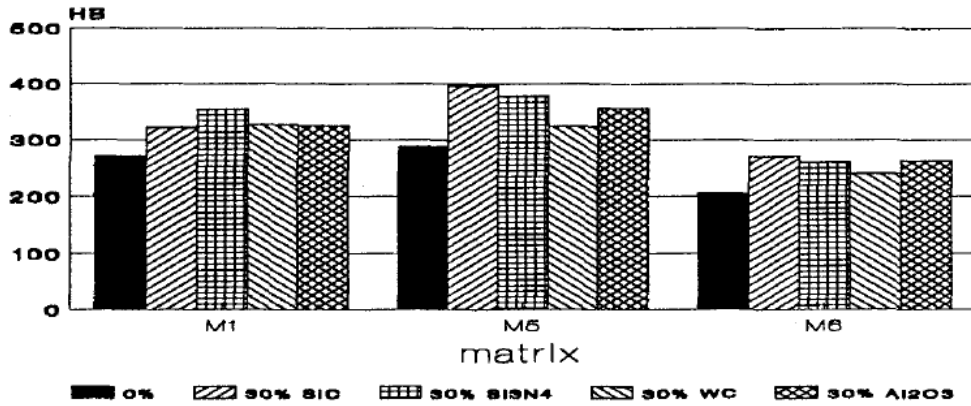


Şekil 2.3. %2-6 Al6061- SiC ve %2-6 Al7075-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> MMK'ların (a) sertlik ve (b) çekme mukavemeti değerleri [57]

Al-Rashed ve diğerleri, (1993) tarafından, farklı matris alaşımlarına %30 oranında ilave edilen, SiC, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, tungsten karbür (WC) ve Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> seramikleri ile toz metalurjisi yöntemi ile üretilen birbirinden farklı kompozitlerle, saf haldeki farklı matris alaşımlarının aşınma ve mekanik testleri yapılmıştır [58]. Deneyleerde kullanılan matris malzemesi ve kompozitler Çizelge 2.9'da verilmiştir. Şekil 2.4'de, elde edilen sertlik değerleri HB cinsinden grafik halinde verilmiştir. Sonuçta, matrisle kıyaslandığında, seramik takviyesi yapılmış kompozit malzemelerin yüksek sertlik değerleri ve mükemmel aşınma direncine sahip olduğu bildirilmiştir. Ayrıca en iyi sonuçların diğer kompozitlerle kıyaslandığında yüksek sertlik değerleri ve mükemmel aşınma direnci ile %30 SiC takviyeli M5 matris alaşımlı kompozit malzemelerle elde edildiği ifade edilmiştir.

Çizelge 2.9. Al-Rashed ve diğerleri, (1993) tarafından deneylerde kullanılan matris malzemeleri ve kompozit malzemeler [58]

Matris	Kimyasal bileşimi	Presleme sıcaklığı (°C)	Takviye
M1	AlSi20, Ni2, Cu13, Mn2, Ti0,5, Fe1,5	540	saf
			%30 SiC
			%30 Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>
			%30 WC
			%30 Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
M5	AlSi20, Ni10, Cu10	500	saf
			%30 SiC
			%30 Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>
			%30 WC
			%30 Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
M6	AlSi20, Ni5	540	saf
			%30 SiC
			%30 Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>
			%30 WC
			%30 Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>



Şekil 2.4. %0-30 oranında SiC, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, WC ve Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> içeren M1, M5 ve M6 matrisin HB cinsinden sertlik grafiği [58]

## 2.2. MMK'ların İşlenmesi Esnasında Oluşan Kesme Kuvvetleri ve Modelleme ile İlgili Çalışmalar

Delme esnasında oluşan kuvvetler, kesici takım ve iş parçası üzerinde olumsuz sonuçlar doğurarak işlenebilirliği olumsuz yönde etkilemektedir. Kesici takımın titreşimine ve hatta kesme ekseninden sapmasına neden olarak, iş parçasının nihai ölçülerinden ve toleranslarından sapmasına neden olabilmektedir. İlaveten, kesici takımın daha çabuk ömrünü tamamlamasına ve hatta kesme yapmadan kırılmasına yol açabilmektedir. Ayrıca, bu kuvvetler, tezgâh kayıt ve kızakları, milleri, yatakları üzerinde olumsuz bir rol oynamaktadır. Tezgâhın enerji tüketimini de artırmaktadır.

Alüminyum alaşımlarının işlenmesinin kolay olduğu ve kesme esnasında düşük kuvvetlerin oluşmasına neden olduğu için tercih edilen malzemeler olduğu bildirilmiştir [2]. Fakat içerisine katılan takviye elemanlarının oranının artırılması, delme kuvvetlerini önemli derecede artırmaktadır [23]. Bu sebeple araştırmacılar tarafından, kompozit malzemelerin delinmesi esnasında oluşan kuvvetler ve bu kuvvetlerin önceden tahmin edilebilmesi üzerine bir takım çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Yapılan bu çalışmalar aşağıda anlatılmıştır.

Alrashdan ve diğerleri, (2011) tarafından, Al/4Mg-Cu alaşımları ve Al/4Mg-Cu/SiC kompozit malzemelerin delinmesiyle oluşan, kesme kuvvetleri incelenmiştir [2]. Matris malzemesi olarak Al-Mg-Cu alaşımı kullanılmıştır. Al-Mg-Cu alaşımı içerisinde (hacimce %), Cu (0, 1, 2, 3, 4, 5), Mg (4), Fe (maksimum 0,5), Cr (maksimum 0,25), Mn (maksimum 0,25), Ti (maksimum 0,25), Zn (maksimum 0,25) ve geri kalan kısmının da alüminyumdan oluştuğu bir bileşim kullanılmıştır. Al-Mg-Cu alaşımı içerisine bakır %0-5 arasında değişik oranlarda takviye edilmek suretiyle, beş farklı bakır oranına sahip Al-Mg-Cu alaşımı elde edilmiştir. %99,5 saflıkta, ortalama parçacık boyutu 75 µm olan silisyum karbür tozları %5 ve %10 oranında Al-Mg-Cu matris alaşımına ilave edilmiştir. Malzemeler karıştırılarak dökme yöntemi ile üretilmiştir. Öncelikli olarak %99 saflıktaki alüminyum külçelerle, 0,425 mm boyutundaki bakır granülleri birlikte 850°C'de ergitilmiştir. SiC tozunun ergimiş alüminyum ile ıslanabilirliğini iyileştirmek amacıyla yüzeyinde SiO<sub>2</sub> katmanı oluşturmak için, SiC tozu yaklaşık 30 dak boyunca 900°C'de öncelikli olarak oksidize edilmiştir. Bu işlemden sonra SiC parçacıkları, ergimiş haldeki malzemenin içerisine katılmıştır. Son aşamada %99 saflıkta %4 magnezyum, metal matris ile takviye elemanları arasındaki ıslatmayı sağlamak için ergimiş haldeki malzemenin içerisine ilave edilmiştir. Döküm sıcaklığı yarı katı halde 580-600°C'de muhafaza edilmiştir. Daha sonra oda sıcaklığında soğumaya bırakılmıştır. Deney parçaları elde etmek amacıyla, elde edilen döküm çubuklar, 25 mm çapında ve 40 mm uzunluğunda torna edilmiştir. Numunelerin sertlik ölçümleri yapılmıştır. Malzeme içerisine ilave edilen bakır oranının artmasıyla, malzemenin sertliğinde artış sağlandığı görülmüştür. Elde edilmeleri kolay ve ucuz olduğu için, ayrıca alüminyum gibi yumuşak malzemelerin delinmesinde iyi bir performans gösterdiği için, delme deneylerinde 8,5 mm çapında HSS matkaplar kullanılmıştır. Delme deneyleri kuru işleme şartları altında, 300 dev/dak devir sayısı ile 0,229 mm/dev ilerleme hızında yapılmıştır. Her bir delik 20 mm derinliğinde delinmiştir. Kesme momenti değerinin Al/4Mg için 542,5 Ncm'den Al/4 Mg-%5 Cu alaşımı için 316 Ncm'ye düştüğü bildirilmiştir. İlerleme kuvveti değerinin ise 1244 N'dan 1102 N'a düştüğü bildirilmiştir. Bu



sonuçlara göre alaşım içerisindeki bakır oranının artırılmasının, kesme momenti ve ilerleme kuvveti değerlerini azalttığı belirtilmiştir. Magnezyumun matris alaşımını sertleştirdiği ve kesici takım ile iş parçası arasındaki sürtünme katsayısını azalttığı için, az miktardaki magnezyum ilavesinin, alaşımın işlenebilirliğini iyileştirdiği ve kesme momenti ve ilerleme kuvvetini azalttığı bildirilmiştir. Kesme momenti değerinin Al/4Mg için 542,5 Ncm'den Al/4Mg/10SiC alaşımı için 477 Ncm'ye düştüğü bildirilmiştir. İlerleme kuvveti değerinin ise Al/4Mg için 1244 N'dan Al/4 Mg/10 SiC alaşımı için 640,5 N'a düştüğü bildirilmiştir. Bu sonuçlara göre de alaşım içerisindeki SiC takviye oranının artırılmasının, kesme momenti ve ilerleme kuvveti değerlerini azalttığı ve işlenebilirlikte iyileşme sağladığı belirtilmiştir.

Altunpak ve diğerleri, (2012) tarafından yapılan, vorteks yöntemi ile üretilen Al/20SiC/5Gr ve Al/20SiC/10Gr hibrid kompozit malzemelerin delinmesinde, kesme parametrelerinin kesme kuvveti üzerine etkisi araştırılmıştır [3]. Matris malzemesi olarak alüminyum (LM2) kullanılmıştır. Al-Si-Cu alaşımı içerisinde (hacimce %), Si (maksimum 12), Cu (0,7-0,9), Fe (maksimum 0,7), Mn (maksimum 0,25), Mg (maksimum 0,02), Zn (maksimum 0,3), Ni (maksimum 0,03), Ti (maksimum 0,03), Pb (maksimum 0,09) ve geri kalan kısmının da alüminyumdan oluştuğu bir bileşim kullanılmıştır. Al(LM2)/20SiC<sub>p</sub>-5Gr ve Al(LM2)/20SiC<sub>p</sub>-10Gr aynı şartlar altında üretilmiştir. Takviye elemanı olarak ortalama boyutu sırasıyla 53 ve 90 µm olan, SiC<sub>p</sub> ve grafit parçacıkları kullanılmıştır. Numunelerin üretimi için sıvı faz yöntemi kullanılmış ve matris alaşımları, MMK üretimi için geliştirilen fırında (pota kapasitesi yaklaşık olarak 10 kg ergitilmiştir. Fırın 30 dak süreyle 700°C'ye kadar ısıtılmış; daha sonra alüminyum demir etkileşimini engellemek için, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>'le kaplanmış pervanelerle karıştırılmış ve plazma püskürtme yöntemiyle SiC<sub>p</sub> ve grafit parçacıkları, oluşan girdabın içine ilave edilmiştir. Karıştırma işlemi tamamlandıktan sonra, 700°C'de parçacıkların çökmesini önlemek için 20 s süreyle karıştırılmıştır. Daha sonra 500°C'ye kadar ısıtılmış, ısıl işlem görmüş sıkıştırılmalı döküm çeliği kalıbı içerisine dökülmüştür. 50 MPa basınç altında katılaştırma işlemi tamamlanarak kompozitler elde edilmiştir. Ergitme, parçacıkların ilave edilmesi ve karıştırma işlemi koruyucu argon gazı atmosferi altında gerçekleştirilmiştir. İşlenecek numuneler 100x10x10 mm bloklar halinde hazırlanmıştır. Malzemelerin delinmesinde, 5 mm çapında ve 118° uç açısına sahip elmaslı karbon kaplamalı kesici takımlar kullanılmıştır. Tüm delme deneylerinde soğutma sıvısı kullanılmamıştır. Her bir matkap, tüm kesme şartları altında, her bir malzemeye üç adet delik delmek için kullanılmıştır. Delme deneyleri her iki iş parçası

malzemesi için 3500 dev/dak, 4000 dev/dak ve 4500 dev/dak devir sayısı ile 0,1 mm/dev, 0,13 mm/dev, 0,16 mm/dev ilerleme hızlarında gerçekleştirilmiştir. İlerleme hızının 0,1 mm/dev'den 0,16 mm/dev'e çıkmasıyla, her iki iş parçası malzemesi için tüm devirlerde ilerleme kuvvetinin arttığı bildirilmiştir. İlerleme hızı arttıkça, itme kuvvetleri arasındaki farkın da arttığı ifade edilmiştir. Devir sayısı 3500 dev/dak'dan 4500 dev/dak'ya çıktığında ilerleme kuvveti değeri (333 N'dan 388,4 N'a) yaklaşık olarak %16,5 artarken, ilerleme hızı 0,1 mm/dev'den 0,16 mm/dev'e çıktığında ilerleme kuvveti değeri (333 N'dan 510 N'a) yaklaşık olarak %53 arttığı belirtilmiştir. Bu sonuçla birlikte itme kuvvetlerinin değişiminde, ilerleme hızının baskın bir faktör olduğu, kesme hızının ise baskın bir faktör olmadığı bildirilmiştir. Minimum seviyede kesme kuvvetleri elde etmek için kesme şartları, devir sayısı 4500 dev/dak ve ilerleme hızı 0,1 mm/dev olarak belirlenmiştir. Kompozit malzeme içerisindeki grafit parçacıklarının katı yağlayıcı özelliğinden dolayı, takımla iş parçası malzemesi arasındaki sürtünmeyi ve kesme akış gerilimini azalttığı ve grafit içeriğinin artırılmasıyla kesme kuvvetlerinin azaldığı ifade edilmiştir.

Barnes ve Pashby (2000) tarafından, AA2618/18/SiC alüminyum kompozit malzemenin, kuru, geleneksel soğutma ve takım içinden soğutma olmak üzere üç farklı durumda, delme deneyleri gerçekleştirilmiştir [4]. Metal püskürtme tekniği ile 150x100x25 mm ebadında plakalar halinde üretilen kompozit malzeme içerisinde (hacimce %) sırasıyla, Si (0,24), Fe (1), Cu (2,6), Mg (1,5), Ni (1) ve ortalama 10-15 µm boyutunda SiC<sub>p</sub> (18) ve geri kalan kısmının da alüminyumdan oluştuğu bir bileşim kullanılmıştır. Malzemelerin delinmesinde, 8 mm çapında, soğutma kanallı, TiN kaplamalı karbür matkaplar kullanılmıştır. Deneyler 30 m/dak kesme hızında ve 0,15 mm/dev ilerleme hızında gerçekleştirilmiştir. Birinci delik sonunda ölçülen ilerleme kuvveti açısından bakıldığında, kuru ve geleneksel soğutma ile yapılan delme operasyonları sonunda yaklaşık olarak aynı ilerleme kuvveti değeri ortaya çıktığı ve takım içerisinden soğutma yapılarak gerçekleştirilen delme operasyonunda ise diğerlerine nazaran %35 daha düşük ilerleme kuvveti değeri ortaya çıktığı ifade edilmiştir. Delinen delik sayılarının artmasına bağlı olarak, ölçülen ilerleme kuvveti değerinin arttığı bildirilmiştir. Yüzüncü deliğin delinmesi ile ölçülen ilerleme kuvveti değerinin, kuru ve geleneksel soğutma ile yapılan delme operasyonları sonunda yaklaşık olarak aynı seviyedeysen, takım içerisinden soğutma yapılarak gerçekleştirilen delme operasyonunda diğerlerine nazaran %74 daha düşük ilerleme kuvveti değerinin ortaya çıktığı belirtilmiştir. Üretilen kesme momenti açısından bakıldığında, geleneksel soğutma yapıldığında üretilen

kesme momenti değerinin, takım içerisinden soğutmalı ve kuru delmede üretilen kesme momenti değerinden daha düşük olduğu bildirilmiştir.

Basavarajappa ve diğerleri, (2008) tarafından, Al2219/15SiC<sub>p</sub> ve Al2219/15SiC<sub>p</sub>-3Gr kompozitlerin delinmesinde kesme parametrelerinin ilerleme kuvveti üzerine etkisi araştırılmıştır [6]. Malzeme olarak, yüksek mukavemetli ve yüksek sıcaklık için yaşlandırılabilir Al-Cu-Mg matris alaşımı (AA2219) kullanılmıştır. Matris alaşımı içerisinde (hacimce %) sırasıyla, Si (maksimum 0,20), Fe (maksimum 0,30), Cu (5,8 ila 6,8), Mn (0,20 ila 0,40), Mg (maksimum 0,02), Zn (maksimum 0,10), V (0,05 ila 0,15), Ti (0,02 ila 0,1), Zr (0,1 ila 0,25) içeren ve geri kalan kısmının da alüminyumdan oluştuğu bir bileşim kullanılmıştır. Kompozit malzemelerin üretilmesi için, 25 m büyüklüğünde %15 SiC<sub>p</sub> parçacıkları ile ortalama 45 m büyüklüğünde %3 grafit parçacıkları takviye malzemesi olarak kullanılmıştır. Öncelikli olarak Al2219/15SiC<sub>p</sub> ve Al2219/15SiC<sub>p</sub>-3Gr kompozit malzemeler sıvı metalurji metoduyla üretilmiştir. Sıvı metalurji metodu ile üretilen kompozitler, deneyler için yaklaşık olarak 150x45x10 mm plakalar halinde kesilmiştir. Malzemelerin delinmesinde, SANDVIK firması tarafından imal edilen, 5 mm çapında 118° uç açılı karbür ve çok katmanlı TiN/TiAlN kaplamalı karbür matkap kullanılmıştır. Deneyler kuru delme şartları altında, 1000 dev/dak, 2000 dev/dak ve 3000 dev/dak devir sayısı ile 0,05 mm/dev, 0,15 mm/dev ve 0,25 mm/dev ilerleme hızında gerçekleştirilmiştir. Deney planı için Taguchi'nin üç seviyede iki faktörlü L<sub>9</sub> (2<sup>3</sup>) ortogonal dizisi kullanılmıştır [5]. Bu faktörler kesme hızı ve ilerleme hızı olarak belirlenmiştir. Kesme parametrelerine bağlı olarak ortogonal dizi başına elde edilen deneysel ölçüm sonuçları kayıt edilmiş ve Varyans analizi (ANOVA, Analysis of Variance) kullanılarak analiz edilmiştir. Analiz sonucuna göre ilerleme kuvveti açısından her iki malzeme için ilerleme hızının, %99'luk bir öneme sahip olduğu ortaya çıkmıştır. Devir sayısındaki artışın ilerleme kuvvetini etkilemediği ve ilerleme kuvvetini artıran en önemli faktörün ilerleme hızı oluğu sonucuna ulaşılmıştır. İlerleme kuvvetindeki azalma, grafit parçacıklarının katı yağlama özelliğine bağlanmıştır. Al2219/15SiC<sub>p</sub> kompozit malzemesine %3'lk grafitin ilave edilmesiyle, takım ve iş parçası ara yüzeyindeki sürtünme ve kesme akış mukavemetinin azaldığı, dolayısı ile ilerleme kuvvetinin önemli ölçüde azaldığı bildirilmiştir. Ayrıca, delinen deliklerin sayısının artmasıyla ilerleme kuvvetinin arttığı belirtilmiştir.

Davim ve diğerleri tarafından yapılan çalışmalarda, A356/20/SiC<sub>p</sub>-T6 MMK'ların delinmesi üzerine odaklanılmıştır [8-11]. 15 mm kalınlığındaki kompozit malzeme içerisinde (hacimce

%) sırasıyla, Si (7), Mg (0,4), ortalama 20  $\mu\text{m}$  boyutunda  $\text{SiC}_p$  (%20) ve geri kalan kısmının da alüminyumdan oluştuğu bir bileşim kullanılmıştır. İlk olarak %20 hacimli SiC takviyeli alüminyum kompozit malzemeye 5 saat süre ile  $154^\circ\text{C}$ 'de T6 ısıl işleme uygulanmıştır. Kompozitlerin delinmesinde PCD matkaplar kullanılmıştır. MMK'ların delinmesinde, özgül kesme basıncı ( $k_s$ ) ile kesme hızı, ilerleme hızı ve kesme zamanı arasındaki ilişkiyi belirlemek üzerine odaklanılan çalışmada, deney planı için Taguchi'nin üç seviyede üç faktörlü (kesme hızı, ilerleme hızı ve kesme zamanı)  $L_{27}(3^{13})$  ortogonal dizisi seçilmiştir [8]. Yapılan ANOVA sonucuna göre  $k_s$  üzerinde, ilerleme hızının %63'lük, kesme hızının %14'lük ve kesme zamanının %14'lük bir etkiye sahip olduğu ortaya çıkmıştır. Kesme basıncı üzerinde en büyük etkiye ilerleme hızının sahip olduğu, ilerleme hızının ardından kesme hızının ve kesme zamanının etkili olduğu bildirilmiştir. Diğer bir çalışmada MMK'ların delinmesinde, kesme kuvvetlerinin deneysel ve sayısal değerlendirilmesi yapılmıştır [9]. İlerleme kuvvetinin kesici takım üzerindeki serbest yüzey aşınmasına bağlı olarak arttığı, kesme momentinin ise kesici takım üzerindeki serbest yüzey aşınmasına karşı duyarsız olduğu ifade edilmiştir. Nümerik modelleme için genetik algoritma kullanılmıştır. Tasarım değişkenleri olarak kesme hızı, ilerleme hızı ve kesme zamanı kullanılmıştır. Deneysel veriler kullanılarak geliştirilen ve genetik araştırmaya dayanan sayısal modelin, delmede kesme şartlarını optimize etmek için etkili bir yöntem olabileceği kanıtlanmıştır. MMK'ların delinmesinde ve tornalanmasında, takım aşınması ile kesme kuvvetleri arasındaki ilişki araştırılmıştır [10]. Deneyler %8 Alusol-B emülsiyonla soğutma yapılarak, 30 m/dak, 40 m/dak ve 50 m/dak kesme hızlarında, 0,1 mm/dev ilerleme hızı kullanılarak ve ayrıca 50 m/dak kesme hızında, 0,05 mm/dev ve 0,2 mm/dev ilerleme hızları kullanılarak gerçekleştirilmiştir [10, 11]. İlerleme hızındaki artışın ilerleme kuvveti ve kesme momentinin artmasında belirleyici bir faktör olduğu, kesme hızındaki artışın etkisinin az olduğu ifade edilmiştir. Kesici takım üzerinde meydana gelen aşınmanın ilerleme kuvvetlerini artırdığı ve kesme momentinin aşınmadaki artışa duyarsız olduğu bildirilmiştir. PCD matkaplarla kompozit malzeme işlendiğinde meydana gelen kesme kuvvetlerinde, kesme zamanı süresince yavaş bir şekilde kademeli olarak sürekli bir artış görülmüştür. MMK'ların delinmesi üzerine yapılan başka bir çalışmada ise, kesme kuvvetlerindeki değişimin araştırılması üzerine bir çalışma yapılmıştır [11]. Aynı ilerleme değerlerinde kesme hızının artmasıyla genel olarak kesme gücünün arttığı bildirilmiştir. Aynı kesme hızı değerinde ( $V_c=50\text{m/dak}$ ), ilerleme hızının artmasıyla kesme gücünün arttığı ifade edilmiştir.

Daha düşük kesme basıncı ( $k_s$ ) değerlerinin, en yüksek ilerleme hızlarına karşılık geldiği ve aralarında ters bir orantının olduğu belirtilmiştir.

Elhachimi ve diğerleri, (1999) tarafından, yüksek hızda delik delmede, ilerleme kuvveti ve kesme momentinin hesaplanması için, matkabın geometrik özellikleri, kesme şartları ve işlenen malzemenin özellikleri ile elde edilen yeni bir teorik model geliştirilmiştir [12]. Hesaplama matkabın kesici ağızları için eğik kesme modeli, keski kenarı için dik kesme modeli kullanılmıştır. Modelin geliştirilmesinde deney sonuçları kullanılmamıştır. Model, matkabın geometrisinden yola çıkarak geliştirilmiştir. Sonuçta geliştirilen modelin, kesme hızı ve ilerleme hızı gibi farklı kesme parametreleri açısından ilerleme kuvveti ve kesme momentinin analitik olarak değerlendirilmesine izin verdiği bildirilmiştir. Geliştirilen modelin aynı zamanda, delme sürecinde oluşan ilerleme kuvveti ve kesme momenti üzerine, matkap geometrisinin etkisini belirlemeye izin verdiği belirtilmiştir. Teorik modeli geçerli kılmak için bir dizi deneysel testler yapılmış ve teorik model sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırma sonucunda, tahminlerle, deneysel sonuçlar arasında iyi bir uyum olduğu görülmüştür.

Hamade ve diğerleri, (2006) tarafından, helisel matkapla delik delmede oluşan kesme kuvvetlerini tahmin etmek için, kesme deneylerinden kesme kuvveti katsayıları belirlenmeye çalışılmıştır [14]. Geniş bir aralıkta kesme hızı, ilerleme hızı ve talaş açısı değerleri içeren bir dizi test yapılmıştır. Bu testlerde 10 mm çapında HSS matkapla, Al6061-T6 malzeme üzerine 22,39 mm derinliğinde delikler delinmiştir. Deneylerde 25 m/dak, 50 m/dak, 100 m/dak, 200 m/dak ve 310 m/dak kesme hızı ve 0,04 mm/dev, 0,08 mm/dev, 0,16 mm/dev, 0,32 mm/dev ve 0,64 mm/dev ilerleme hızı kullanılmıştır. Delme deneylerinin çoğunda soğutma sıvısı kullanılmasına karşılık, bir miktar deney kuru işleme şartları altında gerçekleştirilmiştir. Kuru işleme şartları altında gerçekleştirilen deneylerle, soğutma sıvısının kullanıldığı deneyler arasında ölçülen ilerleme kuvveti ve kesme momenti değeri açısından ayırt edilebilir bir fark olmadığı bildirilmiştir. Delme deneyleri gerçekleştirilmeden önce malzemelere 2,5 mm, 3,5 mm, 5,5 mm ve 7,5 mm çapında ön delikler delinmiştir. Daha sonra bu delikler üzerine 10 mm çapında HSS matkap ile delikler delinerek ilerleme kuvveti ve kesme momenti değerleri kayıt edilmiştir. Elde edilen kesme kuvveti değerleri, kesici ağız başına düşen kesme kuvveti değerini elde edilebilmek amacıyla ikiye bölünmüştür. Daha sonra 2,5 mm, 3,5 mm, 5,5 mm ve 7,5 mm çapında ön delikler delinmiş malzemelerden elde edilen kesme kuvvetleri birbirinden çıkarılmış ve fark

değerleri elde edilmiştir. Elde edilen fark değerleri normalleştirilmiştir. Kesici ağız üzerinde etkili olan kuvvetlerin kesme hızı ve talaş açısının değişimine bağlı olduğu fikriyle, kesici kenar üzerinde etkili olan kuvvetlerin tahmin edilebilmesi için, ölçülen kuvvetlerden faydalanılarak kesme katsayıları çıkartılmıştır.

Haq ve diğerleri, (2008) tarafından, Al/SiC MMK'ların delinmesinde, delme parametrelerinin optimizasyonu için, gri ilişkisel analiz ile ortogonal dizili çoklu yanıt yöntemine dayanan yeni bir yaklaşım önerilmiştir [15]. Deneylerde 25µm boyutunda %10 SiC takviyeli LM25 alüminyum alaşımı kullanılmıştır. LM25 tabanlı alüminyum alaşımı (hacimce %) sırasıyla, Cu (%7,15), Mg (%0,49), Mn (%0,11), Fe (%0,47), Ni (%0,002), Ti (%0,064), Zn (%0,017), Pb (%0,003), Sn (%0,005) içermektedir. Deney numuneleri 150x50x20 mm ebatlarında üretilmiştir. Kuru delme şartları altında yapılan deneylerde, 10 mm çapında ve 90°, 115° ve 140° değişik uç açılara sahip TiN kaplamalı HSS matkaplar kullanılmıştır. Deney planı için, Taguchi'nin üç seviyede üç faktörlü L<sub>9</sub> ortogonal dizisi kullanılmıştır. Bu faktörler kesme hızı, ilerleme hızı ve matkap uç açısı olarak belirlenmiştir. Deneylerde kullanılan faktörler ve seviyeleri Çizelge 2.10'da görülmektedir. Yüzey pürüzlülüğü, kesme kuvveti ve kesme momenti gibi çoklu yanıtlar hesaba katılarak, delme parametreleri (kesme hızı, ilerleme hızı ve uç açısı) optimize edilmiştir. Test sonuçlarını geçerli kılmak için, ANOVA ve doğrulama testleri yapılmıştır. Al/%10 SiC MMK'nın delinmesinde Taguchi metodunda gri ilişki analizinin kesme kuvveti ve kesme momenti değerlerini tahmin etmek için kullanışlı bir araç olduğu rapor edilmiştir. Ayrıca analiz sonuçlarından Al/%10 SiC MMK'nın delinmesinde, uç açısının %43,21'lik, kesme hızının %28,64'lük ve ilerleme hızının %26,21'lik bir etkiye sahip olduğu ortaya çıkmıştır. Bu sonuçlardan Al/%10 SiC MMK'nın delinmesini etkileyen önemli faktörlerin sırasıyla uç açısı, kesme hızı ve ilerleme hızı olduğu bildirilmiştir. En iyi performans değerlerinin (kesme hızı, ilerleme hızı ve matkap uç açısı), Al/%10 SiC MMK'nın TiN kaplamalı HSS matkaplarla, düşük uç açısı ile 90°, yüksek ilerleme hızı 0,2 mm/dev ve yüksek kesme hızında 87,96 m/dak delinmesi ile elde edildiği bildirilmiştir.

Çizelge 2.10. Haq ve diğerleri, (2008) tarafından deneyde kullanılan faktörler ve seviyeleri [15]

Parametreler	Birim	Sembol	Seviyeler		
			1	2	3
Kesme hızı	m/dak	V <sub>c</sub>	35,18	56,54	87,96
İlerleme hızı	mm/dev	f	0,050	0,125	0,20
Uç Açısı	derece	PA	90	115	140

Hayajneh ve diğeri, (2009) tarafından,  $Al_2O_3$  ve Gr takviyeli alüminyum kompozit malzemenin delinmesinde, ilerleme kuvveti ve kesme momenti üzerine bazı parametrelerin etkisini araştırmak üzere yapay sinir ağı sistemi kullanılmıştır [16]. 20 mm çapındaki ve 30 mm yüksekliğindeki kompozit malzeme içerisinde sırasıyla (hacimce %), Fe (0,09), Si (0,05), Cu (0,0005), Mn (0,001), Zn (0,0032), ortalama 0,7-5  $\mu m$  boyutunda Gr (0,2 ve 4), ortalama 240 mesh altı  $Al_2O_3$  (0,2 ve 4) ve geri kalan kısmının da alüminyumdan oluştuğu bir bileşim kullanılmıştır. Malzemelerin delinmesinde, 5 mm çapında ve  $118^\circ$  uç açısına sahip K20 karbür matkap kullanılmıştır. Deneyler kuru delme şartları altında, 150 dev/dak, 300 dev/dak ve 600 dev/dak devir sayısı ile 0,076 mm/dev, 0,127 mm/dev ve 0,152 mm/dev ilerleme oranlarında gerçekleştirilmiştir. Çalışmalarının deneysel kısmında, ilerleme kuvveti ve kesme momentinin, ilerleme hızındaki artışla arttığı sonucuna ulaşılmıştır. İlerleme kuvveti ve kesme momentini tahmin edebilmek amacıyla, yapay sinir ağları kullanılmıştır. Değişik bağımsız değişken (3 farklı  $Al_2O_3$  takviye oranı x 3 farklı Gr oranı x 3 farklı ilerleme hızı x 3 farklı devir sayısı) tarafından tanımlanan 81 işleme şartları altında, kesme momenti ve ilerleme kuvveti değerleri kayıt edilmiştir. Bunlardan rasgele 54 tanesi eğitim seti olarak, 27 tanesi ise deney seti olarak kullanılmıştır. Kesme kuvveti modeli,  $Al_2O_3$  takviye oranı, Gr takviye oranı, ilerleme hızı ve devir sayısı girdi verisi olarak, ilerleme kuvveti ve kesme momenti çıktı verisi olarak tanımlanmıştır. Yapay sinir ağı modeli, farklı giriş değerlerine sahip daha fazla deney tarafından deneysel olarak doğrulanmıştır. Yapılan bu deneylerin sonucunda elde edilen değerlerle, yapay sinir ağları modeli kullanılarak tahmin edilen değerlerin uyum içerisinde olduğu görülmüştür.

Langella ve diğeri, (2005) tarafından, kompozit malzemelerin delinmesinde ilerleme kuvveti ve kesme momentini tahmin etmek için mekanik bir model geliştirilmiştir [18]. Mekanik modelin, delme kuvvetlerini ve kesici takım geometrisini kullanarak geliştirilen bir model olduğu ifade edilmiştir. Çalışmalarında matkabın merkezinden itibaren istenilen r mesafede etkili olan ilerleme kuvveti ve kesme momenti değerinin matematiksel olarak formülasyonu çıkarılmıştır. Kesme kuvvetlerinin tahmin edilmesinde, eğim açısı, boşluk açısı, keski kenarının genişliği, matkabın yarıçapı ve ilerleme hızının dâhil olduğu matematiksel yaklaşım için A, B, C ve c gibi katsayıların belirlenmesi üzerine odaklanılmıştır. Kesme kuvvetlerini elde etmek için yapmış oldukları delme deneylerinde  $118^\circ$ ,  $140^\circ$ ,  $160^\circ$  uç açısına ve  $30^\circ$  ile  $45^\circ$  helis açısına sahip sert metal matkaplar kullanılmıştır. Deney numuneleri sıcak presleme ile üretilen 7 mm kalınlığındaki cam

takviyeli plastik laminattan elde edilmiştir. Deneyle 1250 dev/dak devir sayısı ile 0,125 mm/dev ve 0,25 mm/dev ilerleme hızında yapılmıştır. Deneyle sonucunda ölçülen kesme kuvvetlerinden özgül enerji değerleri çıkartılmıştır. Yarı deneysel katsayı değerleri, elde edilen matematiksel model ile belirlenmiştir. Teorik verilerle test bulgularını karşılaştırarak elde ettikleri sonuçların tatmin edici şekilde birbirine benzediği rapor edilmiştir. Geliştirilen mekanik modelin, özellikle 160° uç açısına sahip matkaplar için oldukça uygun olduğu iddia edilmiştir. Bunun nedeni, matkabın 160° uç açısına sahip ‘düz’ şeklinin, diğerlerinden daha çok ortogonal kesme koşullarına uygun olması ile açıklanmıştır.

Monaghan ve O'Reilly (1992) tarafından, %25 Al/SiC MMK'ların delinmesinde, kesme parametrelerinin ve kesici takım malzeme sertliğinin, delme kuvvetleri üzerine etkisi araştırılmıştır [19]. Çalışmalarında, sıcak-izostatik presleme metodu ile 200 mm çapında ve 400 mm uzunluğunda silindirik bir çubuk halinde üretilen %25 Al/SiC MMK, elektro erozyon ile işleme (EDM, Electrical Discharge Machining) tezgâhında 25 mm çapında ve 28 mm uzunluğunda kesilmiştir. Matris malzemesinin, %12 silisyum içerdiği ve alüminyum 1050 serisi alaşıma benzediği ifade edilmiştir. Malzemelerin delinmesinde, Guhring firması tarafından üretilen, 6 mm çapında, 118° uç açısı ve 32° helis açısına sahip HSS, TiN kaplamalı HSS, karbür uçlu HSS ve yekpare karbür matkaplar kullanılmıştır. İlâveten PCD uçlu HSS matkaplar da kullanılmıştır. Deneyle, 50 dev/dak, 102 dev/dak ve 198 dev/dak devir sayısı ile 0,1 mm/dev, 0,2 mm/dev, 0,3 mm/dev ilerleme hızında gerçekleştirilmiştir. Her bir kesme hızında karbür matkaplar üzerindeki ilerleme kuvvetinin, ilerleme hızının artmasıyla arttığı bildirilmiştir. En düşük kesme kuvvetlerinin, PCD matkaplar kullanıldığı zaman elde edildiği, daha sonra karbür matkaplarda ve en sonunda da HSS matkaplarda gözlemlendiği ifade edilmiştir. PCD ve karbür matkaplar için hem kesme momenti hem de ilerleme kuvveti değerlerinin, HSS matkaplarla elde edilenin yaklaşık üçte biri olması, delme süreçlerinin verimini etkileyen en önemli faktörün takım sertliği olduğunu açıkça gösterdiği belirtilmiştir.

Morin ve diğerleri, (1995) tarafından, Al6061-T6 alaşımı ve 12 µm çapında %20 SiC parçacıkları içeren Duralcan® (6061/SiC/20p) MMK delindiğinde oluşan ilerleme kuvveti ve kesme momenti incelenmiştir [20]. Malzemelerin delinmesinde, 10 mm çapında HSS matkap kullanılmıştır. Deneyle %20 SiC Duralcan® malzeme, 56 dev/dak ve 1120 dev/dak-(1,8 m/dak ve 35,2 m/dak) devir sayısı ile 0,16 mm/dev, 0,31 mm/dev ve 0,63 mm/dev ilerleme hızında ve 40 mm derinliğinde delinmiştir. Al6061-T6 malzemesi ise 112



dev/dak-(3,52 m/dak) devir sayısında, 0,16 mm/dev ilerleme hızında, 10 mm derinliğinde delinmiştir. İlerleme hızının artmasıyla hem ilerleme kuvvetinin hem de kesme momentinin arttığı, fakat kesme hızının kullanılan kesme hızı aralığında önemli bir etkiye sahip olmadığı bildirilmiştir. Duralcan® ve Al 6061-T6 alaşımı delindiğinde her iki malzeme için oluşan ilerleme kuvveti ve kesme momenti değerlerinin birbirine oldukça benzemesinden dolayı, delme kuvvetlerini takviye parçacıklarının etkilemediği, delme kuvvetlerini matrisin etkilediği ifade edilmiştir. Kesme momenti ve ilerleme kuvveti tahmininde aşınmanın da hesaba katılması gerektiği belirtilmiştir. Duralcan® delindiğinde, delme derinliği arttıkça kesici takım üzerinde oluşan aşınma miktarının artmasına bağlı olarak, hem ilerleme kuvvetinin hem de kesme momentinin arttığı bildirilmiştir. Hem kesme momenti hem de ilerleme kuvvetinin tahmin edilebilmesi için regresyon analizi yapılmıştır. Regresyon analizinde serbest yüzey aşınmasını ve ilerleme hızını hesaba katmışlardır. Regresyon analizi sonucunda, serbest yüzey aşınması ve ilerleme hızı ile hem kesme momenti hem de ilerleme kuvveti arasında lineer bir ilişki olduğu ortaya çıkmıştır. Regresyon analizi sonucunda  $R^2$ , kesme momenti için 0,994, ilerleme kuvveti için 0,9262 olarak çıkmıştır.

Rajmohan ve Palanikumar (2011) tarafından, hibrid MMK delinmesinde, kesme parametrelerinin ve takviye oranının, ilerleme kuvveti üzerine etkisi araştırılmıştır [21]. Malzeme olarak, Al356 alüminyum alaşımı ile SiC ve mika takviye elemanlarından oluşan hibrid kompozit malzeme kullanılmıştır. Al356 alüminyum alaşımı içerisinde (hacimce %), Cu (<0,0005), Si (7,27), Mg (0,45), Mn (<0,002), Fe (0,123), Ti (0,08), Zn (0,005), diğerleri (maksimum 0,05 ila 0,15) ve geri kalan kısmının da alüminyumdan oluştuğu bir bileşim kullanılmıştır. Al356 alaşımının içerisine ortalama parçacık boyutu 25  $\mu\text{m}$  olan %2,5-15 arasında değişen oranlarda SiC parçacıkları ile ortalama parçacık boyutu 45  $\mu\text{m}$  olan %3 mika parçacıkları ilave edilmiştir. Alüminyum hibrid MMK'lar karıştırılarak dökme yöntemi ile üretilmiştir. Al356 alüminyum küçük parçalara bölünerek silisyum potasına konulmuş ve 750°C'ye kadar ısıtılmıştır. SiC ve mika parçacıkları 620°C'de ön ısıtma işlemine tabi tutulmuş ve karıştırılan sıvı haldeki alüminyum alaşımı içerisine sürekli ilave edilmiştir. Ön ısıtma işlemine tabi tutulan SiC ve mika takviyeleri ile alüminyum alaşımı 500 dev/dak'da 5-7 dak karıştırılarak bulamaç haline getirilmiş ve metal kalıplara dökülmüştür. Her bir deney numunesi, 150x150x10 mm ebatlarında bloklar halinde hazırlanmıştır. Malzemelerin delinmesinde, 6 mm çapında TiN kaplamalı karbür matkap kullanılmıştır. Deneyler kuru delme şartları altında, 5,92 m/dak, 18,85 m/dak, 37,745 m/dak, 56,65 m/dak ve 69,52 m/dak farklı kesme hızlarında ve 15 mm/dak, 50 mm/dak, 100

mm/dak, 150 mm/dak ve 185 mm/dak ilerleme hızında gerçekleştirilmiştir. Bütün kesme hızlarında, ilerleme hızının artmasıyla ilerleme kuvvetinin arttığı ve ilerleme hızının ilerleme kuvveti için baskın bir faktör olduğu ifade edilmiştir. %3'lük mika parçacıklarının katı yağlayıcı özelliğinden dolayı, takım ve iş parçası arasındaki sürtünmeyi azalttığı ve sonuç olarak ilerleme kuvvetini önemli ölçüde azalttığı bildirilmiştir. Hibrid kompozit malzeme içerisindeki SiC parçacıklarının oranının artırılmasının ilerleme kuvvetini artırdığı belirtilmiştir. Yaptıkları analiz sonucunda kesme hızının önemsenmeyecek kadar küçük bir etkiye sahip olduğu ortaya çıkmıştır. Delme parametreleri ile ilerleme kuvveti arasındaki ilişkiyi belirlemek için, yanıt yüzey metodu (RSM, Response Surface Methodology) kullanılarak bir model geliştirilmiştir. RSM yöntemi kullanılarak geliştirilen modelde, kesme hızını, ilerleme hızını ve takviyenin hacimsel oranını hesaba katılmıştır. Ortaya çıkan ikinci dereceden, non-lineer model için ANOVA yapılmıştır. Varyans analizi sonucunda, Al356/SiC-mikanın delinmesinde ilerleme hızının ve SiC parçacıkların oranının, hâkim faktörler olduğu bildirilmiştir. Güvenirlik seviyesi %95 olan modelin, hibrid MMK'lar delindiğinde meydana gelen ilerleme kuvvetini tahmin etmek için uygun olduğu rapor edilmiştir.

Ramulu ve diğerleri, (2002) tarafından, %10 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/6061 ve %20 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/6061 kompozitlerin delinmesinde, kesme parametrelerinin, delme kuvvetleri üzerine etkisi araştırılmıştır [23]. Çalışmalarında, %10 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/6061 kompozit malzeme içerisinde, tane büyüklüğü dağılımı 10±1,5 µm olan Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ve %20 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/6061 kompozit malzeme içerisinde, tane büyüklüğü dağılımı 21±1,5 µm olan Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> seramik tozları kullanılmıştır. %10 hacimsel orana sahip kompozit malzeme 125x6x10 mm ebadında, %20 hacimsel orana sahip kompozit malzeme 125x75x19 mm ebadında üretilmiştir. Malzemelerin delinmesinde, 6,35 mm çapında ve 118° uç açısına sahip HSS, karbür ve PCD matkap kullanılmıştır. Deneyler, kuru delme şartları altında, 1320 dev/dak, 2230 dev/dak, 3500 dev/dak ve 5440 dev/dak devir sayısı ile 0,0635 mm/dev, 0,1270 mm/dev, 0,1905 mm/dev ve 0,2540 mm/dev ilerleme hızında gerçekleştirilmiştir. Alüminyum MMK'ların delinmesinde matkap takım malzemesinin önemli olduğu bildirilmiştir. PCD elmas matkaplarla delme işlemi yapıldığında, minimum delme kuvvetlerinin olduğu ve delinen deliğin kalitesine göre, diğer bütün matkaplardan daha iyi performans gösterdiği sonucuna ulaşılmıştır. Delinen deliklerin sayısındaki artışa bağlı olarak matkapta meydana gelen körleşmenin arttığı ve oluşan bu körleşmeye bağlı olarak ilerleme kuvveti ve kesme momentinin arttığı belirtilmiştir. Delme kuvvetlerinin önemli bir şekilde kesici takım malzemesi ve iş parçası malzemesinden etkilendiği ifade

edilmiştir. Takviyenin hacimsel oranının artırılmasından dolayı, delme kuvvetlerinin önemli derecede arttığı, hem ilerleme kuvvetinin hem de kesme momentinin önemli derecede ilerleme hızına bağlı olduğu ifade edilmiştir. İlerleme hızının artmasıyla, ilerleme kuvvetinin ve kesme momentinin hızlı ve önemli bir şekilde arttığı bildirilmiştir. Kesme hızının, ilerleme kuvveti ve kesme momenti üzerinde önemsiz bir etkiye sahip olduğu bildirilmiştir. PCD elmas matkaplar tarafından üretilen delme kuvvetlerinin (ilerleme kuvveti ve tork), sert maden uçlu matkap tarafından üretilen delme kuvvetlerine nazaran daha düşük olduğu bulunmuştur.

Strenkowski ve diğerleri, (2004) tarafından, helisel matkapla delik delmede oluşan ilerleme kuvvetini tahmin etmek için, kesme esnasında matkabın kesici ağzına etki eden yatay ve düşey kuvvetlerle, matkap geometrisine dayanan analitik bir sonlu elemanlar metodu geliştirilmiştir [25]. Matkap geometrisi; helis açısı, uç açısı ve matkabın öz kalınlığını içeren üç anahtar parametre ile ifade edilmiştir. Kesme momentinin ise matkabın ağzına etki eden yatay kuvvet ile radyal mesafenin çarpına eşit olduğu belirtilmiştir. Geliştirilen modelin geçerliliğini sınamak için bir dizi deneyler yapılmıştır. Bu deneylerde, 30° helis açısına ve 118° uç açısına sahip, 6,35 mm, 9,53 mm, ve 12,5 mm çapında HSS matkap kullanılmıştır. Deneyler 302 dev/dak devir sayısı ile 0,051 mm/dev, 0,076 mm/dev ve 0,102 mm/dev ilerleme hızında yapılmıştır. Delme deneylerinden elde edilen sonuçlarla, tahmin sonuçları karşılaştırılmış ve aralarında iyi bir uyum olduğu bildirilmiştir. En yüksek ilerleme kuvveti değerinin, en büyük çap değerine sahip matkapla en büyük ilerleme hızında elde edildiği bildirilmiştir.

### **2.3. Yüzey Pürüzlülüğü, Takım Aşınması, Talaş Formu ve Çapak Yüksekliği Üzerine Yapılan Çalışmalar**

MMK'lar içerisindeki aşındırıcı seramik takviyelerden dolayı, kesici takımın hızlı bir biçimde aşınmasına neden olmakta, bu durum MMK'ların işlenebilirlik özelliklerini azaltmaktadır [1, 4, 5, 17]. Kompozit malzemeler işlenmesinde, alışılmış malzemelerin işlenmesinden farklı olarak, hızlı takım aşınması, yüzey pürüzlülüğünün artması ve çapak oluşumu gibi birçok olumsuz durum ortaya çıkmaktadır [2, 3]. MMK'ların delinmesi esnasında, delinen deliğin yüzey kalitesi, talaş formu ve çapak yüksekliği ile ilgili literatür çalışmaları aşağıda özetlenmiştir.

Ahamed ve diğeri, (2010) tarafından, Al/%5SiC<sub>p</sub> ve Al/%5B<sub>4</sub>C<sub>p</sub> hibrid kompozitlerin delinmesinde, iyileştirilmiş bitirme yüzeyi elde etmek ve takım aşınmasını azaltmak amacıyla kesme şartlarını belirlemeye yönelik araştırma yapılmıştır [1]. Malzeme olarak, 1100 alüminyum alaşımları ile SiC ve B<sub>4</sub>C takviye elemanlarından oluşan hibrid kompozit malzeme kullanılmıştır. 1100 alüminyum alaşımı içerisinde (hacimce %), Si (0,95), Cu (0,05 ila 0,2), Mn (0,05), Zn (0,1), diğeri (maksimum 0,05 ila 0,15) ve alüminyum (minimum 99) bileşiminden oluşan kimyasal bileşim kullanılmıştır. 1100 alüminyum alaşımının içerisine ortalama parçacık boyutu 10 µm olan %5 SiC parçacıkları ile ortalama parçacık boyutu 65 µm olan %5 B<sub>4</sub>C parçacıkları ilave edilmiştir. Alüminyum hibrid MMK'lar, karıştırılarak dökme yöntemi ile üretilmiştir. 1100 alüminyum hurdalarına 450°C'de 3 ila 4 saat ön ısıtma uygulanmıştır. SiC ve B<sub>4</sub>C parçacıkları yüzeylerinde oksit oluşumunu önlemek için, 1000°C ila 1200°C ön ısıtma işlemine tabi tutulmuştur. Ön ısıtma işlemine tabi tutulan alüminyum alaşım ile takviyeler el ile karıştırılarak bulamaç haline getirilmiştir. Daha sonra tamamen sıvı hale gelinceye kadar tekrar ısıtıldıktan sonra 150-300 dev/dak karıştırma hızında 10-15 dakika süreyle mekanik olarak karıştırılmıştır. Ergiyik 720°C'de 20 mm çapında ve 30 cm uzunluğunda olan çelik kalıplar içine dökülmüş ve soğumaya bırakılmıştır. Dairesel çubuklar frezelenerek kare şeklinde çubuklara dönüştürülmüştür. Kare çubuk daha sonra, dokuz delik delinmesine imkân sağlayacak şekilde, jet taşı ile uzunlamasına kesilerek iki parçaya ayrılmıştır. Malzemelerin delinmesinde, 5 mm çapında ve 118° uç açısına sahip HSS matkap kullanılmıştır. Deneyler kuru delme şartları altında, 160 dev/dak, 315 dev/dak ve 630 dev/dak devir sayısı ile 0,125 mm/dev, 0,20 mm/dev ve 0,315 mm/dev ilerleme hızında gerçekleştirilmiştir. Takımda oluşan aşınmayı ölçmek için, yatayla 59° açı yapan özel tutucu geliştirilmiştir. İlerleme hızının düşürülmesiyle matkapın sert SiC ve B<sub>4</sub>C parçacıkları ile temas alanının arttığı, bu nedenle abraziv aşınmanın neden olduğu matkap aşınmasının arttığı bildirilmiştir. Takım üzerinde abraziv ve yapışma aşınma mekanizmalarının etkili olduğu ve daha yüksek hızlarda krater aşınmasının olduğu belirtilmiştir. Ayrıca, ilerleme hızını hesaba katmadan, kesme hızının düşürülmesiyle yüzey pürüzlülüğünün azaldığı ve kesme hızındaki artışla yüzey pürüzlülük değerinin arttığı sonucuna ulaşılmıştır. Kesme hızındaki artışın, takım üzerine yapışan malzemenin azalmasına ve yumuşamasına yol açan daha büyük sıcaklıklara neden olduğu ifade edilmiştir.

Alrashdan ve diğeri, (2011) tarafından, Al/%4Mg-Cu alaşımları ve Al/%4Mg-Cu/SiC kompozit malzemelerin delinmesiyle oluşan yüzey pürüzlülüğü ve talaş şekilleri

incelenmiştir [2]. Bakır ve magnezyum ilavesinin alaşım sertliğini artırdığı, işlenen yüzeyin pürüzlülüğünü iyileştirdiği ve kesici takım üzerindeki yığıntı talaş (YT) oluşumunu azalttığı bildirilmiştir. Yüzey pürüzlülük değerinin Al/4Mg için 12,78  $\mu\text{m}$ 'den, Al/4Mg/5Cu alaşımı için 7,42  $\mu\text{m}$ 'ye düştüğü bildirilmiştir. Bu sonuçlara göre, alaşım içerisindeki bakır oranının artırılmasının, yüzey pürüzlülük değerini azalttığı belirtilmiştir. Magnezyumun, matris alaşımını sertleştirdiği ve kesici takım ile iş parçası arasındaki sürtünme katsayısını azalttığı için, daha iyi bitirme yüzeyi sağladığı bildirilmiştir. Yüzey pürüzlülük değerinin Al/4Mg için 12,78  $\mu\text{m}$ 'den, Al/4Mg/10SiC alaşımı için 7,48  $\mu\text{m}$ 'ye düştüğü bildirilmiştir. Bu sonuçlara göre de, alaşım içerisindeki SiC takviye oranının artırılmasının yüzey pürüzlülük değerlerini azalttığı ve işlenebilirlikte iyileşme sağladığı belirtilmiştir. Al/4Mg alaşımını işlendiğinde, sürekli talaş oluştuğu bildirilmiştir. Alüminyumun, kesici takım ile yüksek derecede birleşme eğilimine sahip olmasından dolayı, kolay bir şekilde YT katmanına dönüştüğü ifade edilmiştir. Üretilen talaşların çoğunluğunun sürekli talaş olduğu, Al/4Mg-Cu içerisine katılan SiC<sub>p</sub> parçacıkların kırılğan etkisinden dolayı, kısa helis konik talaş üretildiği bildirilmiştir.

Altunpak ve diğerleri, (2012) tarafından yapılan, vorteks yöntemi ile üretilen Al/20SiC/5Gr ve Al/20SiC/10Gr hibrid kompozit malzemelerin delinmesinde, kesme parametrelerinin kesme kuvveti ve yüzey pürüzlülüğü üzerine etkisi araştırılmıştır [3]. Her iki kompozit malzeme için yüzey pürüzlülüğünün, devir sayısındaki artışla birlikte azaldığı, ilerleme hızının artmasıyla arttığı bildirilmiştir. Yüzey pürüzlülüğü üzerine ilerleme hızındaki artışın, kesme hızına göre daha baskın bir etkiye sahip olduğu ifade edilmiştir. En düşük yüzey pürüzlülük değeri, en düşük ilerleme hızında ve en yüksek kesme hızında gözlemlenmiştir. Bu durum, iş parçası ve takımın serbest yüzeyi arasında hapsedilmiş küçük SiC parçacıklarının ovalanmasıyla üretilen parlatma veya honlama etkisine atfedilmiştir. Grafit parçacıkları yüzeyden koparıldığından dolayı, Al/20SiC/10Gr kompozitler, Al/20SiC/5Gr kompozitlerden daha büyük yüzey pürüzlülük değerine sahip olduğu belirtilmiştir. Bu sayede oluşan çatlakların, çukurların ve kazıntıların, Al/20SiC/10Gr kompozitlerde daha fazla olduğu bildirilmiştir.

Barnes ve Pashby (2000) tarafından yapılan çalışmada, takım aşınması ve çapak yüksekliği araştırılmıştır [4]. Takım aşınması açısından bakıldığında, kuru ve geleneksel soğutma ile yapılan delme operasyonları sonunda ölçülen serbest yüzey aşınması değerinin oldukça benzer olmasına karşılık, takım içerisinden soğutma yapıldığında diğerlerine nazaran daha

az serbest yüzey aşınması olduğu ifade edilmiştir. Kuru ve geleneksel soğutma ile yapılan delme operasyonları sonunda önemli derecede YT oluşumu gözlemlenmiştir. Üretilen çapak yüksekliği açısından da benzer sonuçların elde edildiği ifade edilmiştir. Tüm soğutma şartları altında yapılan soğutma işlemi sonunda oluşan çapak yüksekliğinin, delik sayısındaki artışta bağlı olarak arttığı belirtilmiştir. Takım içerisinde yapılan soğutma işleminde elde edilen çapak yüksekliğinin, kuru işleme şartları altında elde edilenden %38 ve geleneksel soğutma şartları altında elde edilenden %25 daha az olduğu bildirilmiştir. Ayrıca çapak yüksekliğinin kesici takım üzerinde oluşan aşınmanın artmasıyla arttığı ifade edilmiştir.

Basavarajappa ve diğerleri, (2008) tarafından, Al2219/15SiC<sub>p</sub> ve Al2219/15SiC<sub>p</sub>-3Gr kompozitlerin delinmesinde kesme parametrelerinin, bitirme yüzeyi ve çapak oluşumu üzerine etkisi araştırılmıştır [6]. Taguchi deney planına göre yapılan deneylerin ANOVA analizi sonucuna göre, ilerleme hızının Al2219/15SiC<sub>p</sub> malzemenin yüzey pürüzlülüğü üzerinde %53,53 ve Al2219/15SiC<sub>p</sub>-3Gr malzemenin yüzey pürüzlülüğü üzerinde ise %71,27'lik bir öneme sahip olduğu ortaya çıkmıştır. Kesme hızının Al2219/15SiC<sub>p</sub> malzemenin yüzey pürüzlülüğü üzerinde %44,17 ve Al2219/15SiC<sub>p</sub>-3Gr malzemenin yüzey pürüzlülüğü üzerinde ise %23,62'lik bir öneme sahip olduğu ortaya çıkmıştır. Kesme hızı ve ilerleme hızının etkileşiminin, yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkisinin minimum olduğu ve ihmal edilebileceği ifade edilmiştir. Ayrıca, ilerleme hızının Al2219/15SiC<sub>p</sub> malzemenin çapak yüksekliği üzerinde %79,49 ve Al2219/15SiC<sub>p</sub>-3Gr malzemenin çapak yüksekliği üzerinde ise %63,17'lik bir öneme sahip olduğu ortaya çıkmıştır. Kesme hızının Al2219/15SiC<sub>p</sub> malzemenin çapak yüksekliği üzerinde %12,87 ve Al2219/15SiC<sub>p</sub>-3Gr malzemenin çapak yüksekliği üzerinde ise %32,87'lik bir öneme sahip olduğu iddia edilmiştir. Kesme hızı ve ilerleme hızının etkileşiminin çapak yüksekliği üzerinde herhangi bir etkiye sahip olmadığı ifade edilmiştir. Grafit tanelerinin yüzeyden kopartılmasına bağlı olarak Al2219/15SiC<sub>p</sub>-3Gr kompozitin, Al2219/15SiC<sub>p</sub> kompozit malzeme ile karşılaştırıldığında, daha yüksek yüzey pürüzlülüğü sergilediği belirtilmiştir. Al2219/15SiC<sub>p</sub> takviyeli kompozitler için, devir sayısındaki artış ile yüzey pürüzlülük değerinin azaldığı, ilerleme hızındaki artış ile yüzey pürüzlülük değerinin arttığı ifade edilmiştir. Kaplamalı karbür matkap ile delme yapıldığında, karbür matkaba göre daha iyi bitirme yüzeyi elde edildiği bildirilmiştir. İlerleme hızı arttıkça ilerleme kuvvetinin arttığı ve böylece artan ilerleme kuvvetinin daha büyük çapak oluşumu ile sonuçlandığı ifade edilmiştir. Katı yağlayıcı özelliğinden dolayı Al2219/15SiC<sub>p</sub>'e ilave edilen grafitin, çapak yüksekliğinin azalmasına yardımcı olduğu ve delinen deliklerin sayısının artmasıyla çapak oluşumunun

arttığı ifade edilmiştir. Kompozit malzemeye ilave edilen SiC<sub>p</sub> takviyesinin, kompozit malzemenin gevrekliğini kırılgenliğini artırdığı ve bu sebeple testere dişine benzer tipli talaşların oluşmasına yol açtığı belirtilmiştir.

Coelho ve diğerleri, (1995) tarafından, ötektik altı ve ötektik üstü %7 ile %13 silisyum içeren Al-Si alaşımları ile %15 silisyum karbür (SiC<sub>p</sub>) takviyeli spreycöküm Al2618 MMK'nın delinmesi ve tek bıçakla delik büyütülmesi üzerine araştırma yapılmıştır [7]. Delme deneylerinde 8 mm çapında HSS, elmas kaplamalı HSS, WC, TiN kaplı WC ve PCD kesici takım malzemeleri kullanılırken, delik büyütme deneylerinde sadece PCD uçlu kesiciler kullanılmıştır. Deneyler 1500 dev/dak ve 3000 dev/dak devir sayısı ile 0,05 mm/dev, 0,1 mm/dev, 0,2 mm/dev ve 0,3 mm/dev ilerleme hızında gerçekleştirilmiştir. Delme deneylerinde 20:1 oranında seyreltilmiş su bazlı sentetik akışkan kullanılırken, delik büyütme testlerinde %8 oranında seyreltilmiş Blasocut 2000 üniversal özel bir akışkan kullanılmıştır. Çalışma sonucunda %15 SiC<sub>p</sub> takviyeli Al2618 MMK işlendiğinde, Al-Si alaşımları ile kıyaslandığında takım aşınmasının daha hızlı olduğu belirtilmiştir. HSS matkapların SiC<sub>p</sub> takviyeli Al2618 MMK'nın delinmesi için uygun takım malzemesi olmadığı bildirilmiştir. Yatırım maliyeti açısından küçük parti üretimlerinde WC matkapların kullanılabileceği, büyük parti üretimlerinde ise PCD uçlu delme ve delik büyütme takımlarının kullanılabileceği ifade edilmiştir. Delme ve delik büyütme yapıldığında, kesme hızının takım ömrünü etkileyen önemli bir faktör olmadığı, ilerleme hızının artması ile serbest yüzey aşınmasının azaldığı belirtilmiştir.

Davim ve diğerleri tarafından yapılan çalışmalarda, A356/20/SiC<sub>p</sub> MMK'ların delinmesinde takım aşınması, deliklerin yüzey pürüzlülüğü ve talaş oluşumu üzerine odaklanılmıştır [8-11]. Taguchi deney planına göre yapılan deneylerin ANOVA analizi sonucuna göre takım aşınması üzerinde kesme zamanının etkisinin %'50 ve ilerleme hızının etkisinin %24 olduğu ortaya çıkmıştır [8]. Yüzey pürüzlülüğü üzerinde ilerleme hızının etkisinin %43 ve kesme hızının etkisinin %41 olduğu ortaya çıkmıştır. Ayrıca yüzey pürüzlülüğü üzerinde etkili olan en önemli etkileşimin %14'lük oranla kesme hızı/ilerleme hızı etkileşiminin olduğu ifade edilmiştir. Yüzey pürüzlülüğünün ilerleme hızının artmasına bağlı olarak arttığı, kesme hızındaki artışla beraber yüzey pürüzlülüğünde önemli bir değişimin olmadığı belirtilmiştir [9, 11]. Elde edilen ortalama yüzey pürüzlülük değeri (R<sub>a</sub>) 0,25-1,2 µm arasında ölçülmüştür [11]. Deneysel veriler kullanılarak geliştirilen ve genetik algoritmaya dayanan sayısal modelin, delmede kesme şartlarını optimize edebileceği belirtilmiştir [9]. Optimum takım

ömrünün, kesici takım aşınmasından ve yüzey pürüzlülüğünden kuvvetli bir şekilde etkilendiği bildirilmiştir. SiC takviyeli alüminyum kompozit disklerin delinmesinde, hâkim olan aşınma mekanizmasının, kesici takımın serbest yüzeyinde meydana gelen abraziv aşınma mekanizması olduğu ifade edilmiştir [9-11]. Arada sırada yapışma mekanizmasının da gözlemlendiği bildirilmiştir [10, 11]. Çeliklerin işlenmesinde yaygın olarak görülen krater etkisinin görülmediği bildirilmiştir [10]. Kesme hızındaki artışla birlikte takım aşınmasının arttığı, fakat bu artışın önemsiz olduğu vurgulanmıştır. İlerleme hızının artmasıyla birlikte takım aşınmasının oldukça az bir biçimde azaldığı belirtilmiştir. Alüminyum matris kompozitler delinirken oluşan kısa talaş tipinin, bu malzemeleri sürekli operasyonlar için tercih edilmesini sağladığı ifade edilmiştir [11].

Karakaş ve diğerleri, (2006) tarafından, %20 B<sub>4</sub>C<sub>p</sub> içerikli kompozit malzemenin frezelenmesinde, kesme parametrelerinin, takım aşınması ve takım aşınma mekanizmaları üzerine etkisini araştırılmıştır [17]. Bu amaç için deney numuneleri 50x50x10 mm ebatlarında, sıvı faz sinterleme metodu ile üretilmiştir. Malzemelerin frezelenmesinde 30 mm çapında takım tutucu ve üç değişik takma uçlu kesici takım kullanılmıştır. Kesici takım malzemesi olarak sırasıyla Mitsubishi firmasına ait, kaplamasız karbür takım, üç kaplı (TiCN+Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+TiN) karbür takım ve çift kaplı (TiN+ TiAlN) karbür takım kullanılmıştır. Deneyler, kuru delme şartları altında 100 m/dak, 130 m/dak, 169 m/dak, 220 m/dak ve 286 m/dak farklı kesme hızlarında ve 0,20 mm/diş sabit ilerleme hızında gerçekleştirilmiştir. Frezeleme deneyleri, takım aşınması V<sub>B</sub>=0,3 mm ulaşınca kadar devam ettirilmiştir. Alüminyum kompozitin frezelenmesi sürecinde, abraziv aşınmanın ve YT'nin hâkim olduğu ve her üç takım malzemesinde oluşan serbest yüzey aşınmasının, kesme hızının artmasıyla arttığı sonucuna varılmıştır. Aynı zamanda kesme hızının artmasıyla YT'nin azaldığı bildirilmiştir. Kesici takım malzemeleri içinde en iyi performansı üç kaplı karbür takımın gösterdiği ve kaplamasız karbür takımın en fazla aşınan takım olduğu belirtilmiştir.

Monaghan ve O'Reilly (1992) tarafından, %25 Al/SiC MMK'ların delinmesinde, kesme parametrelerinin ve kesici takım malzeme sertliğinin, takım aşınması ve yüzey pürüzlülüğü üzerine etkisi araştırılmıştır [19]. En büyük ve en önemli aşınmanın genellikle matkabın serbest yüzeyi boyunca gözlemlendiği belirtilmiştir. PCD uçlu matkapların serbest yüzey aşınma miktarının ihmal edilebilir bir seviyede olduğu, karbür takımların sertliğinden dolayı TiN kaplamalı ve kaplamasız HSS matkaplardan daha az aşındığı bildirilmiştir. Bütün aşınma sonuçlarına göre, ucuz olmalarına karşılık HSS takımların MMK malzemelerin



delinmesi için uygun olmadığı bildirilmiştir. HSS üzerindeki TiN kaplamanın, kaplamasız HSS takımlara göre önemli derecede performansını arttırmadığı vurgulanmıştır. Devir sayısındaki artışın matkabın serbest yüzey aşınması üzerinde, 102-198 dev/dak'da elde edilen sonuçlara göre bir miktar etkili olurken, 50-102 dev/dak arasında değişen devir sayısının etkisinin daha belirgin olduğu ifade edilmiştir. İlerleme hızının artmasıyla TiN kaplamalı ve kaplamasız HSS matkaplar üzerinde oluşan serbest yüzey aşınmasının azaldığı belirtilmiştir. İlerleme hızının ve kesme hızının artmasıyla kesme zamanının azaldığı için, aşınma miktarının da azaldığı sonucuna ulaşılmıştır. Karbür matkaplarda ise kaplamalı ve kaplamasız HSS matkaplardan farklı olarak, ilerleme hızının artmasıyla serbest yüzey aşınmasının bir miktar arttığı belirtilmiştir. Takım sertliğinin yüzey pürüzlülüğünü etkileyen önemli bir faktör olduğu bildirilmiştir. Sert karbür takımlar, HSS takımlardan daha iyi yüzey kalitesi üretmiştir. Her bir kesme hızında ilerleme hızının artmasıyla, yüzey pürüzlülüğünün arttığı bildirilmiştir. Devir sayısı 50 dev/dak'dan 102 dev/dak'ya artırıldığında, yüzey pürüzlülüğünün bir miktar arttığı, fakat 198 dev/dak'da azaldığı belirtilmiştir. Matkabın ovalama etkisiyle ürettiği parlatma etkisinden dolayı, yüzey pürüzlülüğünün azaldığı vurgulanmıştır. PCD uçlu takımların karbür takımlardan, karbür takımların da kaplamalı ve kaplamasız HSS takımlardan daha iyi performans gösterdiği ifade edilmiştir.

Morin ve diğerleri, (1995) tarafından, Al6061-T6 alaşımı ve 12 µm çapında %20 SiC parçacıkları içeren Duralcan® (6061/SiC/20p) MMK delindiğinde kesici takım üzerinde oluşan serbest yüzey aşınması incelenmiştir [20]. En şiddetli aşınmanın matkabın serbest yüzeyi boyunca gözlemlendiği belirtilmiştir. Al6061-T6 alaşımının delindiğinde aşınma gözlemlenmediği, Duralcan delindiği zaman matkabın serbest yüzeyinde gözlemlenen aşınmanın 10 mm derinliğe kadar hızlı ve doğrusal bir şekilde arttığı, 10 mm derinlikten sonra yavaş bir biçimde arttığı ifade edilmiştir. Kesme hızının, aşınma üzerinde önemli bir etkiye sahip olmadığı, ilerleme hızının aşınmayı etkilediği belirtilmiştir. Takım üzerinde oluşan serbest yüzey aşınmasının, ilerleme hızı arttıkça azaldığı ve kesme derinliği arttıkça arttığı sonucuna ulaşılmıştır.

Rajmohan ve Palanikumar (2012) tarafından, hibrid MMK'nın delinmesinde, kesme parametrelerinin ve takviye oranının, yüzey pürüzlülüğü ve çapak yüksekliği üzerine etkisi araştırılmıştır [22]. Al356/SiC-mika kompozitlerin delinmesinde, yüzey pürüzlülüğü ve çapak yüksekliğini tahmin etmek için matematiksel model geliştirilmiştir. RSM Box-Behnken deneysel tasarımına göre yapılan deneylerde, süreç parametreleri Çizelge 2.11'de

görülmektedir. Al 356/SiC-mika hibrid kompozitlerin delinmesinde, devir sayısındaki artışla yüzey pürüzlülüğünün azaldığı bildirilmiştir. İlerleme hızındaki artışın, ilerleme kuvvetini, kesme momentini ve delme süresince üretilen sıcaklıkları artırdığı ve daha kötü bitirme yüzeyine yol açtığı bildirilmiştir. Takviye oranındaki artışın yüzey pürüzlülüğünü azalttığı ifade edilmiştir. Delik çıkışında oluşan çapak yüksekliğinin, ilerleme hızının artmasıyla arttığı ve devir sayısındaki artışla çapak yüksekliğindeki artışın azaldığı bildirilmiştir. Al 356/SiC kompozite mika ilave edilmesinin çapak yüksekliğini azaltmaya yardımcı olduğu bildirilmiştir. Elde ettikleri optimizasyon sonuçlarına göre, orta devir sayısı, düşük ilerleme hızı ve yüksek oranda SiC takviyesi kombinasyonunun, hibrid kompozit malzemelerin delinmesinde, çapak yüksekliğinin ve yüzey pürüzlülüğünün minimize edilebilmesi için tercih edilebileceği bildirilmiştir.

Çizelge 2.11. Rajmohan ve Palanikumar (2012) tarafından, Box-Behnken deneysel tasarımında kullanılan parametreler ve değerleri [22]

Kontrol parametreleri	Birim	Sembol	Behnken Tasarımında Seviyeler		
			-1	0	1
Devir sayısı	dev/dak	n	1000	2000	3000
İlerleme hızı	mm/dev	f	50	100	150
Takviyenin hacimsel oranı	%	w	5	10	15

Ramulu ve diğerleri, (2002) tarafından, %10Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/6061 ve %20Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/6061 kompozitlerin delinmesinde, kesme parametrelerinin, takım aşınması, delinen deliğin kalitesi, talaş ve çapak oluşumu üzerine etkisi araştırılmıştır [23]. HSS matkap ile %10'luk MMK üzerinde 7 adet delik delinebilirken, aynı işleme şartları altında %20'lik MMK üzerinde sadece bir adet delik delinebildiğini ve sonrasında takımın körelendiği gözlemlenmiştir. Bunun yanı sıra ilerleme hızının azalmasıyla, kesme kenarı ile işlenmiş yüzey arasındaki temas süresinin arttığı ve bu nedenle serbest yüzey aşınmasındaki artışın daha şiddetli olduğu belirtilmiştir. Matkabın köşesinde bir miktar mikro çentiklerin oluştuğu, sert ve aşındırıcı parçacıkların takım kenarına çarpmasıyla kenar çentiği meydana geldiği gözlemlenmiştir. Sert maden uçlu matkaplar, elmas matkaplara göre daha ciddi YT'ye sahip olduğu ve YT'nin bitirme yüzeyinin daha pürüzlü olmasına neden olduğu tespit edilmiştir. PCD matkaplar üzerinde 63 ve 96 delik sonrası belli belirsiz bir aşınma tespit edilmiştir. PCD matkaplar üzerinde oluşan YT formu, 63 delik delindikten sonra matkabın kesici kenarında görülmüş ve 96 delik sonra ise keski kenarında görülmüştür. Yüzey pürüzlülüğünün ilerleme hızının artmasıyla arttığı ve kesme hızının artmasıyla azaldığı belirtilmiştir. En iyi yüzey kalitesinin PCD elmas

matkaplar ile elde edildiği bildirilmiştir. HSS ve karbür uçlu matkapların talaşları istenildiği gibi kırılmadığı ve üretilen bazı talaşların sürekli talaş olduğu belirtilmiştir. Uzun talaşların iş parçasına zarar vermesi muhtemel olduğundan dolayı arzu edilmeyen talaş türü olduğu ifade edilmiştir. PCD matkapların üretilen talaşları kırabildiği ve üretilen talaşların birçoğunun birbirine benzeyen tek konik helisel talaş formunda olduğu bildirilmiştir. Takımda meydana gelen aşınmanın bir sonucu olarak, çapak oluşumunun da arttığı gözlenilmiştir. Aynı zamanda ilerleme kuvvetindeki artışla beraber, çapak boyutlarının da arttığı ifade edilmiştir. Çalışılan üç takım malzemesi arasında, PCD elmas matkapların en yüksek aşınma direncine sahip olduğu ve karbür matkabın kabul edilebilir delik kalitesi gösterdiği ifade edilmiştir. HSS matkapların alüminyum oksit ile takviye edilmiş MMK'ların delinmesi için uygun olmadığı rapor edilmiştir.

Songmene ve Balazinski (1999) tarafından, Al/SiC<sub>p</sub>, Al/SiC<sub>p</sub>-Gr and Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Gr kompozit malzemelerin delme ve frezeleme operasyonları çalışılmıştır [24]. İş parçası olarak saf alüminyum alaşımlarına (Al380) ilaveten, GrA-Ni 5A.4G (%5 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, %4 Ni-Gr), GrA-Ni 10S.4G (%10 SiC, %4 Ni-Gr), GrA-Ni 6S.2,5G (%6 SiC, %2,5 Ni-Gr) ve Al/9Si/20SiC (%20 SiC) içerikli kompozit malzemeler kullanılmıştır. Frezeleme testleri için TiCN kaplamalı karbür uçlar kullanılmıştır. Takım çapı 38,1 mm, aksenal derinlik 6,35 mm ve kesme genişliği 2,54 mm olarak seçilmiştir. Delme testleri için 10 mm çapında kaplamasız HSS matkap kullanılmıştır. Frezeleme testleri için, 61 m/dak ve 122 m/dak kesme hızı ve 0,254 mm diş başına ilerleme hızı seçilmiştir. Delme testleri için, 7 m/dak kesme hızı ve 0,254 mm/dev ilerleme hızı seçilmiştir. Deneyler kuru işleme şartlarında gerçekleştirilmiştir. Sonuçta alüminyum MMK malzemelerin içerisine grafit eklenmesinin ve sert parçacıkların oranının azaltılmasının, takım aşınma oranını azalttığı ve bu kompozit malzemelerin işlenebilirliğini iyileştirdiği görülmüştür. Takım aşınma oranının kompozit malzeme içerisindeki seramik parçacıklarının doğasına ve oranına bağlı olduğu ve diğer kompozitlerle kıyaslandığında %5 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ve %4 Ni-Gr içeren GrA-Ni kompozitin daha düşük aşınma oranı sergilediği belirtilmiştir. Kesici kenar ömrü başına kaldırılan talaş hacmi açısından bakıldığında, %10 SiC ve %4 Ni-Gr içeriğine sahip MMK'dan kaldırılan talaş hacmi, %5 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, %4 Ni-Gr içeriğine sahip MMK'dan kaldırılan talaş hacminden 15 kat daha az olduğu bildirilmiştir. Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> içerikli MMK'yı işlemenin SiC içerikli kompozit malzemeleri işlemekten daha kolay olduğu belirtilmiştir. Kompozit malzeme içeriğindeki seramik parçacıkların azaltılmasıyla, Al380 gibi saf alüminyum alaşımları delindiğinde meydana gelen talaş biçimine benzer testere dişli ve uzun talaşların elde edilme olasılığının azaldığı

ifade edilmiştir. Kompozit malzemeler işlenebilirlik açısından sırasıyla, GrA-Ni 5A.4G, GrA-Ni 6S.2,5G ve GrA-Ni 10S.4G şeklinde azalan sıraya göre sıralanmıştır.

Tosun ve Muratoğlu (2004) tarafından, delme parametrelerine bağlı olarak, 2-3 µm boyutunda %17 SiC seramik tozları ile takviyelendirilmiş Al2124 matrisli kompozit malzeme üzerindeki değişimler araştırılmıştır [28, 29]. Bu çalışmada, TM tekniği ile üretilmiş, sıcak dövülüp haddelenmiş, 10 mm kalınlığında hazır plaka şeklindeki kompozit malzeme kullanılmıştır. Matris alaşımı içerisinde (hacimce %) sırasıyla, Cu (3,69), Mg (1,42), Mn (0,55), Fe (<0,01), Si (<0,01) ve geri kalan kısmının da alüminyumdan oluştuğu bir bileşim kullanılmıştır. Deneylerde kullanılacak numuneler, Sodick tel erozyon tezgâhında, 10x10x15 mm ebatlarında kesilmiştir. Malzemelerin delinmesinde, 5 mm çapında, 90°,118°,130° uç açılarına sahip HSS, TiN kaplı HSS ve karbür matkaplar kullanılmıştır. Deneyler kuru delme şartları altında, 260 dev/dak ve 1330 dev/dak devir sayısı ile 0,08 mm/dev ve 0,16 mm/dev ilerleme oranlarında gerçekleştirilmiştir. Yapılan deneyler sonucunda, matkap sertliği ve ilerleme hızı arttıkça işlenmiş yüzeyin yüzey pürüzlülüğü azaldığı tespit edilmiştir. TiN kaplı ve karbür matkaplar kullanıldığında, devir sayısı arttıkça yüzey pürüzlülük değerlerinin azaldığı, bunun aksine HSS matkaplar kullanıldığında devir sayısı arttıkça yüzey pürüzlülük değerlerinin arttığı görülmüştür. Karbür matkaplar kullanıldığı zaman en iyi yüzey kalitesi elde edilmiştir. İlerleme hızındaki, matkap uç açısındaki ve matkap sertliğindeki artışa bağlı olarak işlenmiş yüzeydeki deformasyonun ve yüzey pürüzlülüğünün azaldığı tespit edilmiştir. Deney planı için Taguchi'nin beş faktörlü L<sub>36</sub> ortogonal dizisi kullanılmıştır [27]. Bu faktörler devir sayısı, ilerleme hızı, matkap tipi, matkabın uç açısı ve malzemeye uygulanan ısı işlem parametreleri olarak belirlenmiştir. Belirtilen parametrelere bağlı olarak ortogonal dizi başına elde edilen deneysel ölçüm sonuçları kayıt edilmiş ve ANOVA kullanılarak analiz edilmiştir. Analiz sonucuna göre iş parçası yüzey pürüzlülüğü üzerinde en etkili parametrenin sırasıyla matkap tipi ve ilerleme hızı olduğu ve devir sayısı, matkap uç açısı ve ısı işlem parametrelerinin yüzey pürüzlülüğü üzerinde etkili olmadığı tespit edilmiştir. Yüzey pürüzlülük değeri için optimum işleme parametresi belirlenmiştir. Yüzey pürüzlülüğünü kontrol etmek için en önemli faktör olan matkap tipinin, ikinci önemli faktör olan ilerleme hızından 15 kat daha fazla etkiye sahip olduğu ifade edilmiştir. Sonuçta en iyi yüzey pürüzlülük değeri, 130° uç açısına sahip karbür matkapla, 260 dev/dak devir sayısında ve 0,16 mm/dev ilerleme hızında ısı işlematsız Al-SiC kompozitin delinmesinde elde edilmiştir.

Dhavamani ve Alwarsamy (2011) tarafından, AA2124/SiC MMK'ların delinmesinde, takviyenin hacimsel oranı, kesme hızı, ilerleme hızı, matkap çapı ve işleme zamanının, serbest yüzey aşınması, özgül enerji ve yüzey pürüzlülüğü üzerine etkisi araştırılmış ve delme sürecinin optimizasyonunda genetik algoritmaya dayalı çok amaçlı optimizasyon metodu kullanılmıştır [59]. Çalışmalarında, karıştırma döküm tekniği ile 10x40x250 mm ebatlarında üretilen farklı takviye oranına sahip (%10, %15 ve %25) AA2124/SiC MMK'lar kullanılmıştır. Malzemelerin delinmesinde, 4 mm, 7 mm ve 10 mm çapında karbür matkaplar kullanılmıştır. Deneyler, 400 dev/dak, 1000 dev/dak ve 1500 dev/dak devir sayısı ile 0,12 mm/dev, 0,22 mm/dev, 0,4 mm/dev ilerleme hızında gerçekleştirilmiştir. Takviyenin hacimsel oranının artmasıyla serbest yüzey aşınmasının ve özgül enerjinin arttığı, fakat yüzey pürüzlülüğünün azaldığı ifade edilmiştir. Devir sayısının artmasıyla serbest yüzey aşınmasının ve yüzey pürüzlülüğünün arttığı, fakat özgül enerjinin azaldığı belirtilmiştir. İlerleme hızının artmasıyla özgül enerjinin ve serbest yüzey aşınmasının arttığı bildirilmiştir. Matkap çapındaki artışın özgül enerji üzerinde çok küçük bir etkiye sahip olduğu ve yüzey pürüzlülüğü üzerinde hiçbir etkiye sahip olmadığı sonucuna ulaşılmıştır.

#### **2.4. Delme Esnasında Oluşan Sıcaklık Üzerine Yapılan Çalışmalar**

Delme esnasında matkabın iş parçasına gömülü olması, küçük bir alanda sıcaklığın hapsolmesine ve delme derinliği arttıkça bu sıcaklığın giderek yükselmesine neden olmaktadır [60, 61]. Delme esnasında oluşan sıcaklıklar kesici takım ömrü ve yüzey pürüzlülüğü üzerinde önemli bir rol oynamaktadır [61-63]. Buna ek olarak, iş parçasının mekanik özelliklerinin değişmesine neden olduğu ve delik üzerinde boyut ve konum hatalarına yol açtığı bildirilmiştir [60, 63]. Delme sıcaklıklarının hassas bir şekilde ölçülmesi, delik kalitesinin iyileştirilebilmesi ve kesici takım ömrünü artırmak için matkap ve delme süreçlerinin tasarlanması amacıyla önem kazanmaktadır [62]. MMK'ların işlenmesi esnasında, kesici takımda oluşan sıcaklıklar üzerine yapılan literatür çalışmaları aşağıda özetlenmiştir.

Bono ve Ni (2002) tarafından, kuru delme şartları altında oluşan ve iş parçasına akan ısıyı tahmin etmek için bir model geliştirilmiş ve iş parçasına yerleştirilen ısı çiftleri yardımı ile geliştirilen modelin hassas bir şekilde tahminde bulunduğu tespit edilmiştir [60]. Geliştirdikleri modelde üretilen ısının bir kısmının matkabın kesme yapmasıyla üretildiği ve bir kısmının da sürtünme ile üretildiği varsayılmıştır. Neticede üretilen iki ısının toplamı

alınmış ve matkabın geometrisi, ilerleme kuvveti ve üretilen tork değeri ile ilişkilendirilmiştir. Elde ettikleri modelin sonuçlarını doğrulamak amacı ile iş parçası içerisine ısı çiftleri yerleştirmişler ve bu yöntemle ölçme yaparken çeşitli zorluklarla karşılaşıldığı bildirilmiştir. Isıl çiftin uç noktasının, yerleştirildiği delik içerisindeki yerinin belirsiz olmasının sıcaklık eğrilerinin çok büyük olduğu delik kenarına yakın bir noktaya yerleştirilen ısı çiftleri için bir problem oluşturduğu ifade edilmiştir.

Bono ve Ni (2002) tarafından yapılan diğer bir çalışmada, matkabın kesici kenarları boyunca oluşan sıcaklık dağılımlarını ölçmek için, matkap-folyo ısı çift sistemi kullanılmıştır [62]. Bu sistemde 25 mm kalınlığındaki iki adet Al 319 plaka arasına 100 µ kalınlığındaki iki adet plastik levha ile yalıtılmış 51 µ kalınlığındaki alüminyum folyo yerleştirilmiştir. 120° uç açısına sahip 9,92 mm çapındaki HSS matkap ile farklı devirlerde delikler delinmiş ve kullanılan sistemle kesici kenar boyunca oluşan sıcaklıklar ölçülmüştür. Sonuçta devir sayısı ve ilerleme hızındaki artışla sıcaklığın arttığı bildirilmiştir. Ayrıca matkap uç açısındaki artışla sıcaklığın arttığı ve özellikle keski kenarına yakın bölgede sıcaklıktaki artışın kesme kenarlarındaki artışa göre daha fazla olduğu ifade edilmiştir.

Li ve Shih (2007) tarafından, 9,92 mm çapında helisel matkapla Ti6Al4V alaşımının 384 mm<sup>3</sup>/s malzeme kaldırma oranıyla yüksek verimlilikte delinmesiyle matkap üzerinde oluşan gerilmeler ve sıcaklık dağılımları incelenmiş, takım-talaş temas alanındaki ısı bölümlerini ve kesme sıvısı konveksiyon ısı iletim katsayısını bulmak için termal sonlu elemanlar modeli kullanılmıştır [61]. 0,127 mm çapındaki ısı çiftleri matkabın serbest yüzeyi üzerinde açılan oluklara gömülerek, matkabın kesici ağızlarının orta noktasına yakın bir biçimde konumlandırılmıştır. Isıl çiftlerin dönen iş parçası ile temas etmesini engellemek ve pozisyonunu korumak için, ısı çiftlerinin üzeri Omega OB-400 ile kaplanmıştır. Isıl çiftlerin soğutma esnasında soğutma sıvısı ile etkileşimini engellemek için, ısı çiftleri matkabın soğutma kanallarının içerisine değil, matkabın çevresindeki olukların içerisine yerleştirilmiştir. Deneyde kullanılan delme derinliğinin 10,2 mm ve delme zamanının 2 s olduğu tüm işleme şartları Çizelge 2.12’de verilmiştir. Sonuçta, dört farklı kesme şartı altında da matkabın en yüksek sıcaklığının kesme kenarında meydana geldiği bildirilmiştir. Kesme sıvısız yapılan delme süresince sıcaklığın yüksek olduğu, matkabın soğutma kanalları ile yapılan kesme sıvısı ile soğutmanın matkap sıcaklığını azaltmada kritik bir öneme sahip olduğu belirtilmiştir. Matkabın soğutma kanalları vasıtası ile yapılan soğutma işleminin, matkabın kesme yetisini kaybetmesini engellemeye yardımcı olduğu

vurgulanmıştır. Delme esnasında kullanılacak olan kesme hızının azaltılması ve ilerleme hızının artırılması ile matkap sıcaklığının daha da azaltılabileceğini ifade etmişlerdir. Deneylelerden ölçülen sıcaklıklarla, termal model sonuçları karşılaştırılmış ve sonuçların uyumlu olduğu bildirilmiştir.

Çizelge 2.12. Li ve Shih (2007) tarafından, Ti6Al4V alaşımının yüksek verimlilikte delinmesi için kullanılan deney parametreleri [61]

	Deneyler			
	D183*	W183*	W91	W61
Kesme sıvısı kullanımı	Soğuma sıvısız	Soğuma sıvılı	Soğuma sıvılı	Soğuma sıvılı
Çevresel kesme hızı (m/dak)	183	183	91	61
İlerleme hızı (mm/dev)	0,051	0,051	0,102	0,102

\* D=soğutma sıvısız, W=Soğutma sıvılı, D183=Soğutma sıvısız 183 m/dak kesme hızı

Özçelik ve Bağcı (2006) tarafından, 25 mm çapında ve 75 mm boyunda AISI 1040 çeliği ile Al 7075-T651'in delinmesinde, devir sayısı ve ilerleme hızının delme sıcaklığı üzerine etkilerini araştırılmış ve matkap sıcaklığı Third Wave AdvantEdge™ Lagrangian açık sonlu eleman analizi yazılımıyla tahmin edilmiştir [63]. İş parçası malzemesinin takım tutucuya bağlandığı deneyler kuru delme şartları altında gerçekleştirilmiştir. Deney şartlarının belirlenmesinde Taguchi'nin  $L_9(3^2)$  iki faktörlü, üç seviyeli ve dokuz satırlı ortogonal dizi kullanılmıştır. Deneylelerde Sandvik firmasına ait 10 mm çapında, 140° uç açısına ve 30° helis açısına sahip TiN/TiAlN kaplamalı karbür takımlar kullanılmıştır. Sıcaklık ölçümlerinde 10 µs tepki süresine sahip, 500 °C sıcaklığa kadar ölçüm yapabilen 127 µm çapında PFA Teflon kaplamalı K tipi ısı çifti kullanılmıştır. Delme esnasında oluşan matkap sıcaklıkları TiN/TiAlN kaplamalı karbür matkapların soğutma kanalları boyunca yerleştirilen standart ısı çiftleri ile ölçülmüştür. Deneyleler Al 7075-T651 alaşımı için, 1910 dev/dak, 2547 dev/dak ve 3184 dev/dak devir sayısı ve 0,1 mm/dev, 0,15 mm/dev ve 0,2 mm/dev ilerleme hızında gerçekleştirilirken, AISI 1040 çeliği için, 955 dev/dak, 1433 dev/dak ve 1910 dev/dak devir sayısı ve 0,08 mm/dev, 0,12 mm/dev ve 0,16 mm/dev ilerleme hızında gerçekleştirilmiştir. Sonuçta, kullanılan her iki malzemedede sıcaklığın hem ilerleme hızı hem de devir sayısındaki artışla birlikte arttığı gözlemlenmiştir. Kullanılan her iki malzemedede ilerleme hızı artarken sıcaklıktaki artışın azaldığı bildirilmiştir. İlerleme hızı ve devir sayısı lineer bir şekilde artarken, sıcaklık artışının non-lineer olduğu belirtilmiştir. Deneylelerde elde edilen sonuçlarla, Third Wave AdvantEdge™ Lagrangian açık sonlu eleman analizi yazılımıyla tahmin edilen sonuçların uyum içine olduğu ifade edilmiştir.

Weinert ve Kempmann (2004) tarafından, 20 mm çapında ve delme derinliği 25 mm olan % 70 karbon elyaf takviyeli polimer kompozit malzemelerin delinmesinde oluşan sıcaklıklar ölçülmüş ve aşırı kesme sıcaklıklarının neden olduğu işleme hataları incelenmiştir [64]. Bu tür malzemelerin işlenmesinde soğutma sıvısının kullanımının, polimer malzemenin kabarmasına yol açacağı bildirilmiş, soğutma sıvısız işlenmesi durumunda ise oluşan kesme sıcaklıklarının polimer malzemelerin plastiklenmesine neden olduğu ifade edilmiştir. İş parçası tezgâh fener miline, 8 mm çapındaki karbür matkap ise tezgâh tablasına monte edilen bir ayna vasıtası ile bağlanmıştır. Üç adet ısıtıcı çift nikel-krom-nikel matkabın soğutma kanallarından geçirilerek matkabın serbest yüzeyi üzerinde kesici kenara yakın bir noktada yerleştirilmiştir. Sıcaklığı önceden bilinen bir malzeme ile ısıtıcı çiftlerin kalibrasyonu yapılmıştır. Deneysel sonuçlarında, hem kesme hızındaki hem de ilerleme hızındaki artışın, takım sıcaklığının artmasına yol açtığı belirtilmiştir. Kesme şartlarına bağlı olarak takım sıcaklıklarının 200-350 °C'ye ulaştığı, oluşan ısı yüklerinin delinen delik üzerinde işleme kusurlarına yol açtığı bildirilmiştir.

Özçelik ve Bağcı (2006) tarafından, sürekli delme ve gagalamalı delmede kesici takım sıcaklığı üzerine delme derinliği, devir sayısı ve ilerleme hızının etkilerini araştırmak amacıyla, 25 mm çapında ve 75 mm boyunda AISI 1040 (American Iron and Steel Institute, Amerikan demir ve çelik enstitüsü) çeliği ile Al 7075-T651 olmak üzere iki farklı iş parçası malzemesi kullanılmıştır [65]. İş parçası malzemesinin takım tutucuya bağlandığı deneyler kuru delme şartları altında gerçekleştirilmiştir. Deneylerde Sandvik firmasına ait 10 mm çapında, 140° uç açısına ve 30° helis açısına sahip TiN/TiAlN kaplamalı karbür takımlar kullanılmıştır. Sıcaklık ölçümlerinde 10 µs tepki süresine sahip, 500 °C sıcaklığa kadar ölçüm yapabilen 127 µm çapında PFA (Perfloroalkoksi) Teflon kaplamalı K tipi ısıtıcı çift kullanılmıştır. Delme esnasında oluşan matkap sıcaklıkları TiN/TiAlN kaplamalı karbür matkapların soğutma kanalları boyunca yerleştirilen standart ısıtıcı çiftler ile ölçülmüştür. Al 7075-T651 alaşımı için 20 mm, 30 mm ve 40 mm derinliğinde 0,1 mm/dev, 0,15 mm/dev, ve 0,2 mm/dev ilerleme hızında, sürekli delik delmek için 2547 dev/dak devir sayısı kullanılırken, gagalamalı delmede 2547 dev/dak ve 1910 dev/dak devir sayısı kullanılmıştır. AISI 1040 çeliği için 20 mm, 25 mm ve 30 mm derinliğinde 0,08 mm/dev, 0,12 mm/dev ve 0,16 mm/dev ilerleme hızında, sürekli delik delmek için 955 dev/dak devir sayısı kullanılırken, gagalamalı delmede 955 dev/dak ve 1433 dev/dak devir sayısı kullanılmıştır. Sonuçta, sürekli delme operasyonunda AISI 1040 çelik ve Al 7075-T651 alaşımı için, aynı devir ve ilerleme hızında delme derinliği ile birlikte sıcaklığın arttığı, aynı devir sayısı ve



delme derinliğindeki değerlerde ise ilerleme hızındaki artışla matkap üzerindeki sıcaklığın azaldığı bildirilmiştir. Gagalamalı delme operasyonunda AISI 1040 çelik ve Al 7075-T651 alaşımı için, delme adımıdaki artışla matkap üzerindeki maksimum sıcaklık değerlerinin arttığı belirtilmiştir. Gagalamalı delme operasyonunda, AISI 1040 çelik malzemenin aynı ilerleme hızı değerlerinde, devir sayısındaki artışla matkap üzerindeki sıcaklığı artarken, Al 7075-T651 alaşımı için devir sayısındaki artışla matkap üzerindeki sıcaklığın azaldığı ifade edilmiştir.

Bagci ve Ozcelik (2006) tarafından, Al 7075-T651 malzemenin helisel matkap ile kuru işleme şartları altında delinmesinde, delme derinliği, ilerleme hızı ve devir sayısı gibi delme parametrelerinin ilerleme kuvveti ve delme sıcaklıkları üzerine etkisi araştırılmıştır [66]. Delme sıcaklıkları, TiN/TiAlN kaplamalı karbür matkapların soğutma deliği içerisine yerleştirilen ısı çiftleri vasıtasıyla ölçülmüştür. Delme parametrelerinin seçilmesinde Taguchi deneysel tasarım metodundan yararlanılmış ve delme parametrelerinin etkilerini belirlemede ise S/N oranı ve ANOVA kullanılmıştır. Al 7075-T651 malzemenin delinmesinde, İlerleme kuvveti ve delme sıcaklıkları ile delme derinliği, ilerleme hızı ve devir sayısı gibi delme parametreleri arasındaki model oluşturmak için çoklu regresyon analizi kullanılmıştır. Geliştirdikleri özel bir bağlama yöntemiyle aynı anda hem ilerleme kuvveti hem de delme sıcaklıkları ölçülmüştür. Geliştirilen bu metotta matkabı dinamometreye, iş parçasını ise tezgâhın fener miline bağlamışlardır. Sonuçta delme sıcaklıkları üzerinde, ilerleme hızının ve devir sayısının etkisinin önemsiz olduğunu bildirmişlerdir. Delme sıcaklıkları üzerinde, delme derinliğinin daha büyük bir etkiye sahip olduğunu ifade etmişlerdir. İlerleme kuvveti üzerinde ilerleme hızının etkisinin çok küçük olduğunu ve devir sayısının daha büyük bir etkiye sahip olduğunu bildirmişlerdir.

Bagci ve Ozcelik (2006) tarafından, AISI 1040 çeliği ve Al 7075-T651 malzemelerinin kuru işleme şartları altında ardışık olarak delinmesiyle ortaya çıkan matkap sıcaklığı hem deneysel olarak hem de sayısal olarak incelenmiştir [67]. Matkap içerisine yerleştirilen ısı çiftleri yardımı ile gerçekleştirilen çalışmada, delinen delik sayısındaki artışla birlikte sıcaklık arttığı ifade edilmiştir. Deneysel çalışmalardan ve sonlu elemanlar analizinden elde edilen sonuçlar karşılaştırılmış ve sonuçlar arasında uyum olduğu bildirilmiştir.

Bagci ve Ozcelik (2007) tarafından, AISI 1040 çeliği malzemenin kuru işleme şartları altında delinmesinde, delme derinliği, ilerleme hızı ve devir sayısı gibi delme parametrelerinin

delme sıcaklıkları üzerine etkisi araştırılmıştır [68]. Matkabın soğutma kanallarına yerleştirilen ısıl çiftlerle gerçekleştirilen deneyler sonrasında delme parametrelerinin etkilerini belirlemek için S/N oranı ve ANOVA kullanılmıştır. Delme sıcaklıkları ile delme derinliği, ilerleme hızı ve devir sayısı gibi delme parametreleri arasındaki model oluşturmak için çoklu regresyon analizi yapılmıştır. AISI 1040 çelik malzemeyi delerken elde edilen matkap sıcaklığı üzerinde, delme derinliğinin ilerleme hızına göre nispi etkisinin % 91,31, ilerleme hızının etkisinin % 7,62 olduğu ifade edilmiştir. Diğer durumda, devir sayısı ile ilerleme hızı karşılaştırıldığında ise, devir sayısının nispi etkisinin % 75,47 ve ilerleme hızının etkisinin ise % 10,10 olduğu belirtilmiştir.

Zeilmann ve Weingaertner (2006) tarafından, K10 sınıflamasında yer alan kaplamalı ve kaplamasız karbür matkaplarla, minimum miktarda soğutma sıvısı kullanılarak Ti6Al4V titanyum alaşımlarının delinmesiyle oluşan kesme sıcaklığı incelenmiş ve bu malzemeler için minimum miktarda soğutma sıvısı kullanmanın yararları araştırılmıştır [69]. Yapılan soğutma işlemi, dıştan bir nozul yardımı ile ve kesici takım içerisinde olmak üzere iki değişik yöntemle uygulanmıştır. Delme deneyleri, 10-50 m/dak kesme hızında, 0,1-0,2 mm/dev ilerleme hızında, minimum miktarda soğutma sıvısı kullanılarak, 970 N/mm<sup>2</sup> çekme mukavemetine ve 300 HB sertliğe sahip Ti6Al4V alfa-beta alaşımı plakalar üzerinde gerçekleştirilmiştir. Deneylerde kullanılan kaplamasız karbür matkaplar içten soğutma kanallarına sahipken, kaplama malzemesinin faydalarını araştırmak için kullanılan TiAlN, CrCN ve TiCN'le kaplı karbür matkaplar içten soğutma kanallarına sahip değildi. Kesme esnasında oluşan sıcaklıkları ölçmek amacı ile üç adet ısıl çift, iş parçasına delik duvarından 0,2 mm içeride kalacak biçimde yerleştirilmiştir. Sıcaklığın derinliğe göre değişimini ölçmek amacıyla, ısıl çiftler delik eksenini yönünde birbirlerinden ve parça kenarlarından 5'er mm aralıklarla yerleştirilmiştir. Sonuçta, takım içinden minimum miktarda soğutma sıvısı kullanılarak yapılan delme işleminde ölçülen sıcaklık değerinin, dıştan nozul yardımı ile minimum miktarda soğutma sıvısı kullanılarak yapılan delme işleminde elde edilen sıcaklık değerinden %50 daha küçük olduğu bildirilmiştir. Takım içinden bol miktarda soğutma sıvısı kullanılarak yapılan delme işleminde ölçülen sıcaklık değerinin, dıştan nozul yardımı ile minimum miktarda soğutma sıvısı kullanılarak yapılan delme işleminde elde edilen sıcaklık değerinin %22-32'sine karşılık geldiği belirtilmiştir. Kuru delme ile dıştan nozul yardımı ile minimum miktarda soğutma sıvısı kullanılarak yapılan delme işlemi kıyaslanmış ve kuru delmede elde edilen sıcaklık değerleri 455 °C'den 482 °C'ye yaklaşık olarak %6 daha büyük çıkmıştır. En yüksek sıcaklıklar, kaplamasız matkaplarla dıştan nozul yardımı

ile minimum miktarda soğutma sıvısı kullanılarak yapılan delme işleminde elde edilmiştir. Kaplamasız takımlarla, kaplamalı takımlar kıyaslandığında en yüksek sıcaklık değerlerini kaplamasız takımların gösterdiğini ve farklı kaplamalar için sıcaklıkta önemli bir değişim olmadığı ifade edilmiştir. Delme derinliği arttıkça sıcaklığın arttığı bildirilmiştir.

Ueda ve diğerleri, (2007) tarafından, karbon çeliği (AISI 1045), dökme demir (AISI 100/70/03) ve alüminyum pres döküm alaşımının (ASTM 383 (American Society for Testing and Materials, Amerikan Test ve Malzemeler Derneği) ) delinmesiyle matkabın kesme kenarlarında oluşan sıcaklık üzerine devir sayısı ve ilerleme hızının etkisini araştırmak için fiber optikli iki renkli pirometre kullanılmıştır [70]. Soğutma kanallı matkabın, soğutma kanalından püskürtülerek yapılan soğutma işleminin, takım sıcaklığı üzerine etkisi incelenmiş ve soğutma sıvısı kullanılmadan yapılan delme, tornalama ve parmak frezeleme sonuçları ile kıyaslanmıştır. Deneyler, 10 mm çapında karbür matkaplarla, 1500 dev/dak, 1900 dev/dak ve 2300 dev/dak devir sayısında ve 0,05 mm/dev, 0,1 mm/dev, 0,15 mm/dev ve 0,2 mm/dev ilerleme hızında yapılmıştır. Kullanılan bu yöntemde iş parçasına 1,15 mm çapında boydan boya delik delinmiş ve delinen bu deliğin içerisine sıcaklık ölçme işlemi gerçekleştirecek olan fiber optik kablo yerleştirilmiştir. Karbür matkap torna tezgâhının pensine bağlanmış ve sabit devirde döndürülmüştür. İş parçası ise tornanın arabası üzerine bağlanmıştır. İlerleme hızı, torna kızakları boyunca, tornanın arabası vasıtası ile verilmiştir. Bu şekilde sıcaklık ölçümleri 2,5 mm delik derinliğinde gerçekleştirilmiştir. Sonuçta, maksimum kesici takım sıcaklığı, karbonlu çeliklerin delinmesi sürecinde gözlemlenirken, en düşük kesici takım sıcaklığı, alüminyum pres döküm alaşımının delinmesi sürecinde gözlemlenmiştir. Soğutma sıvılı kesme esnasında oluşan sıcaklık soğutma sıvısız yapılan kesme esnasında oluşan sıcaklıkla mukayese edildiğinde, yaklaşık olarak meydana gelen sıcaklıktaki azalmanın, tornalamada %5, frezede %10-15 ve delmede %20-25 olduğu bildirilmiştir. Hem devir sayısındaki (kesme hızı) hem de ilerleme hızındaki artışla, matkabın kesici kenar sıcaklığının arttığı belirtilmiştir. Kesici kenar üzerindeki sıcaklık dağılımını ölçmek amacıyla, matkabın merkezinden 2 mm, 3 mm, 4 mm ve 5 mm mesafede ölçümler gerçekleştirilmiş ve matkabın merkezinden dışa doğru gidildikçe kesici kenar sıcaklığının arttığı ve nihayet köşe noktasında sıcaklığın maksimum olduğu ifade edilmiştir.

Wu ve Han (2009) tarafından, kuru işleme şartları altında yapılan delme işleminde meydana gelen sıcaklığı tahmin etmek için üç farklı sonlu elemanlar yazılımı (Abaqus, Deform 2D ve Third Wave Systems AdvantEdge) kullanılmış ve sıcaklık üzerine delme hızlarının ve

ilerleme hızlarının etkisi sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak araştırılmıştır [71]. Deneyler süresince, 12 mm kalınlığındaki AISI 1045 çeliğin delinmesinde 6,8 mm çapında ve 120° uç açısına sahip HSS matkaplar kullanılmıştır. Delme sıcaklığı, iş parçasının altına yerleştirilen ısı çifti tarafından ölçülmüş, eşzamanlı olarak kişisel bilgisayarda kullanılan ara yüz vasıtası ile görüntülenmiş ve depolanmıştır. Her üç sonlu elemanlar yazılımı ile elde edilen maksimum sıcaklık sonuçları deneylerle karşılaştırılmış ve sonuçların uyum içerisinde olduğu görülmüştür. Deneylerden elde edilen sonuç ile kullanılan sonlu elemanlar yazılımından elde edilen sonuç arasındaki hatanın Abaqus'de %10, Deform 2D'de %15 ve Third Wave Systems AdvantEdge'de %8 olduğu bildirilmiştir. Matkabın kesici kenarlarını etkileyen maksimum sıcaklığın, matkabın keski kenarından yaklaşık olarak %20 daha büyük olduğu belirtilmiştir. Hem delme testlerinden hem de sonlu elemanlar yazılımlarından elde edilen sonuçlar, delme hızı veya ilerleme hızı arttığında, delme sıcaklığının arttığını göstermiştir. İlerleme hızının artmasıyla kesme derinliğinin artmasına bağlı olarak harcanan gücünde arttığı, bu sebeple de sıcaklıkta bir artış meydana geldiği ifade edilmiştir. Kesme hızına bağlı olarak sıcaklıktaki artış, kesme hızıyla beraber sürtünme için harcanan gücün artışına bağlanmıştır.

Bhowmick ve diğerleri, (2010) tarafından, AM60 magnezyum döküm alaşımlarının delinmesinde oluşan sıcaklıklar kızılötesi termometre kullanılarak ölçülmüştür [72]. Sıcaklık ölçümleri için temassız kızılötesi termometre kullanımının pratik ve etkili sıcaklık ölçme yöntemi olduğu ifade edilmiştir. Magnezyum alaşımının sıcaklığını ölçmek için, bu malzemeye ait emisivite değerine ihtiyaç olduğu ve bu değer önceden ısıtılan bir fırın içerisindeki magnezyum üzerinden aynı sıcaklık değeri elde edilinceye kadar ayarlamaların yapıldığı ve bu sayede emisivite değerinin belirlendiğini belirtilmiştir. Minimum miktarda soğutma sıvısı kullanımı süresince iş parçasında üretilen maksimum sıcaklık, kuru delmede gözlemlenenden daha düşük olduğu ve bol soğutma sıvısı kullanarak yapılan delme işlemi süresince üretilen sıcaklığı aşmadığı bildirilmiştir.

Coz ve diğerleri, (2012) tarafından, minimum miktarda soğutma sıvısı kullanılarak Ti6Al4V titanyum alaşımlarının delinmesi esnasında oluşan sıcaklıkları ölçmek için, takım tutucu içerisine yerleştirilen kablosuz verici ve takım tutucu yakınına yerleştirilen radyo frekans anteni sistemi kullanılmıştır [73]. Deneyler süresince, 20 mm kalınlığındaki Ti6Al4V plakaların delinmesinde 10 mm çapında ve 130° uç açısına sahip K40 karbür matkaplar kullanılmıştır. Ti6Al4V plakaların delinmesinde 0,1 mm/dev, 0,12 mm/dev, 0,14 mm/dev

ve 0,16 mm/dev ilerleme hızı, 30 m/dak ve 35 m/dak kesme hızı kullanılmıştır. Delme esnasında oluşan matkap sıcaklıkları K40 karbür matkapların kesme yüzeyi üzerinde ve köşesine yakın bir noktada içine gömülen K tipi ısıl çiftler ile ölçülmüş, özel olarak geliştirilen takım tutucu içerisine yerleştirilen veri işleme sistemi ve kablosuz verici ile takım tutucu yakınına yerleştirilen radyo frekans anteni sistemine iletilmiştir. Sonuçta, Ti6Al4V alaşımlarının minimum miktarda soğutma sıvısı kullanılarak delinmesinde elde edilen delme sıcaklığının 590 ila 640 °C arasında ölçüldüğü ifade edilmiş ve bu değerlerin Zeilmann ve Weingaertner tarafından ölçülen sıcaklık değerlerinden (450 °C – 550 °C) yüksek olmasının sebebi, ısıl çiftlerin delik yüzeyinden 0,2 mm mesafede yerleştirmiş olmalarına bağlanmıştır. Kesme hızındaki artışın, sıcaklık artışına neden olduğu bildirilmiştir. Aynı kesme hızında ilerleme hızının 0,1 mm/dev'den 0,12 mm/dev'e artmasıyla sıcaklığın arttığı, ilerleme hızının 0,12 mm/dev'den 0,14 mm/dev'e artmasıyla sıcaklığın azaldığı, ilerleme hızının 0,14 mm/dev'den 0,16 mm/dev'e artmasıyla sıcaklığın tekrar bir miktar daha artış gösterdiği belirtilmiştir.

## **2.5. Literatür Araştırmalarının Değerlendirilmesi**

### **2.5.1. MMK üretim yöntemleri ve mekanik özellikleri ile ilgili literatür değerlendirmesi**

Bu zamana kadar, birçok yazar tarafından MMK'ların üretimi ve mekanik özellikleri ile ilgili literatürde öne çıkan sonuçlar özetlenirse, parçacık takviyeli MMK'larda takviye elemanı olarak genelde oksit, karbür veya bor bileşenleri kullanılmakta olup [50], bor karbür takviyeli kompozitler radyasyondan korunma amaçlı kullanımlar için tercih edilmektedir [43]. Bununla birlikte, B<sub>4</sub>C takviyeli kompozitlerin mekanik özellikleri, saf haldeki matris malzemesine göre önemli derecede artmaktadır [37, 39]. MMK'ların üretiminde genelde TM ve sıvı metal karıştırma yöntemi kullanıldığı görülmektedir [50]. Sıvı metal karıştırma tekniği, matris içerisine ilave edilen takviye parçacıklarının topaklanmasına neden olması ve gözenekli bir yapı oluşturması sebebiyle bir dezavantaj oluşturmaktadır [50, 51]. Fakat TM yönteminin hem düşük maliyetli olması ve matris içerisinde takviye parçacıklarının homojen bir şekilde dağılması, hem de üretilen kompozitlerin yüksek mekanik özellikler göstermesi sebebiyle, MMK'ların üretilmesi için daha uygun olduğu sonucu ortaya çıkmaktadır [37]. Al7XXX serisi matris alaşımı, yüksek mekanik özelliklere sahip bir malzemedir [49, 57]. Ayrıca, kompozit malzeme içerisine ilave edilen takviye oranındaki artış, kompozit

malzemenin sertliğini artırırken [40-42, 48, 49, 51, 53, 56-58], takviye malzemesinin matris malzeme içerisinde çentik etkisi yaptığından dolayı akma ve çekme mukavemeti ile % uzama değerini düşürdüğü görülmektedir [48].

### **2.5.2. Delme esnasında oluşan kesme kuvvetleri ve modelleme ile ilgili değerlendirme**

MMK'ların delinmesi ile ilgili şimdiye kadar yapılan çalışmalar incelendiğinde,  $B_4C_p$  içerikli alüminyum kompozitlerin delinmesi ile ilgili yeterince çalışma olmadığı, çoğunlukla alüminyum kompozit malzemelerinde takviye elemanı olarak  $Al_2O_3$  ve  $SiC_p$  takviyelerinin kullanıldığı görülmektedir [3, 4, 6, 11, 16, 23, 24, 30, 74-76]. Fakat daha önceden yapılan çalışmalarda, % 20  $B_4C_p$  içerikli alüminyum kompozit malzemelerin frezede işlenebilirlikleri incelenmiştir [77-80].

Önceki çalışmalardan, ilerleme kuvvetini ve kesme momentini artıran en önemli faktörün ilerleme hızı olduğu [3, 6, 10, 16, 20, 21, 23], ayrıca kesme hızındaki artışın, ilerleme kuvveti üzerindeki etkisinin önemsenmeyecek kadar az olduğu [3, 6, 10, 20, 21, 23] görülmektedir.

MMK'ların delme deneylerinde, PCD (polycrystalline diamond) elmas matkaplar, kaplamalı ve kaplamasız karbür matkaplar ve HSS matkaplar kullanılmıştır. [23]. En düşük kesme kuvvetleri, PCD matkaplar kullanıldığı zaman elde edilmiş, daha sonra karbür matkaplarda ve en sonunda da HSS matkaplarda gözlemlenmiştir [19, 23]. Deneylerde kullanılan kaplamalı karbür matkaplar, kaplamasız karbür matkaplardan daha fazla ilerleme kuvveti üretmiştir [6]. PCD ve karbür matkaplar için hem kesme momenti hem de ilerleme kuvveti değerlerinin, HSS matkaplarla elde edilenin yaklaşık üçte biri olması, delme süreçlerinin verimini etkileyen en önemli faktörün takım sertliği olduğunu açıkça göstermiştir [19]. Alüminyum metal matris kompozitlerin delinmesinde, takviyenin hacimsel oranının artırılmasından dolayı delme kuvvetleri önemli derecede artmakta [21, 23], bu nedenle kompozit malzeme içerisindeki takviye oranı ve delici takım malzemesi önem kazanmaktadır [23].

İlerleme kuvveti, kesici takım üzerindeki serbest yüzey aşınmasına bağlı olarak artmış, kesme momenti ise kesici takım üzerindeki serbest yüzey aşınmasına karşı nispeten duyarsız kalmıştır [9, 10]. Ayrıca, delme derinliği arttıkça kesici takım üzerinde oluşan aşınma miktarı artmış, bunun sonucunda hem ilerleme kuvveti hem de kesme momenti artmıştır

[20]. Kesme momenti ve ilerleme kuvveti tahmininde aşınmanın da hesaba katılması gerektiği bildirilmiştir [20]. Diğer taraftan, Al356/20/SiC<sub>p</sub>-T6 MMK'in PCD matkapla soğutma sıvısı kullanılarak delinmesinde [9-11], matkaplarda meydana gelen serbest yüzey aşınmasının kesme momentini etkilemediği ve ilerleme kuvvetini arttırdığı belirtilmiştir. Delinen delik sayısı artıkça, ilerleme kuvveti artmıştır [4, 23].

Kompozit malzemelere yapılan grafit ilavesi, işlenebilirliği olumlu yönde etkilerken, kesme kuvvetlerini azaltmış ve kompozit malzemenin dayanımını olumsuz yönde etkilemiştir [3, 6, 75, 76]. Benzer şekilde, hem kesici takım ile iş parçası arasındaki sürtünme katsayısını azaltan az miktardaki magnezyum oranının hem de alaşım içerisindeki bakır oranının artırılması, kesme momenti ve ilerleme kuvvetini azaltmıştır [2].

Kesici takım içerisinde soğutma yapıldığında daha düşük ilerleme kuvveti değeri ortaya çıkarken, geleneksel soğutma yapıldığında üretilen kesme momenti değeri, takım içerisinde soğutmalı ve kuru delmede üretilen tork değerinden daha düşük çıkmıştır [4]. Aksine, diğer bir çalışmada ise kuru işleme şartları altında gerçekleştirilen deneylerle, soğutma sıvısının kullanıldığı deneyler arasında ölçülen ilerleme kuvveti ve kesme momenti değeri açısından ayırt edilebilir bir fark olmadığı ifade edilmiştir [14].

Cam elyaf takviyeli kompozit malzemelerin delinmesinde, metal matris kompozitlerin delinmesinde ortaya çıkan sonuçlara benzer sonuçların ortaya çıktığı görülmektedir [81]. Karbon elyaf takviyeli kompozit malzemenin delinmesinde ise, ilerleme kuvvetini etkileyen en önemli faktörlerin, kesme hızı, ilerleme hızı ve takım aşınması olduğu sonucuna ulaşılmıştır [82].

MMK malzemelerin delinmesinde, işleme parametrelerinin etkisi ve anlamlılık seviyeleri belirlenirken, Taguchi tasarımı kullanılmış ve deney sonuçları ANOVA ile analiz edilmiştir [5, 8, 15, 27]. Bu analiz sonuçlarına göre, ilerleme kuvveti için ilerleme hızının % 99'luk bir öneme sahip olduğu, devir sayısındaki artışın ilerleme kuvvetini etkilemediği ve matkap malzemesinin ilerleme kuvvetine herhangi bir etkisinin olmadığı ifade edilmiştir [5]. Diğer bir analiz sonucuna göre, kesme basıncı üzerinde en büyük etkiye ilerleme hızının sahip olduğu, ilerleme hızından sonra kesme hızının ve kesme zamanının etkili olduğu bildirilmiştir [8]. Taguchi metodunda gri ilişki analizinin, kesme kuvveti ve kesme momenti değerlerini tahmin edilmesinde kullanışlı bir araç olduğu rapor edilmiş ve kompozit malzemenin

delinmesini etkileyen önemli faktörlerin sırasıyla uç açısı, kesme hızı ve ilerleme hızı olduğu bildirilmiştir [15].

### **2.5.3. Yüzey pürüzlülüğü, takım aşınması, talaş formu, çapak yüksekliği ve delik ölçüsü ile ilgili literatür değerlendirmesi**

Delinen deliğin yüzey pürüzlülüğü, kesme hızındaki artışla azalmakta ve ilerleme hızının artmasıyla artmaktadır [3, 6, 8, 11, 23, 59, 83]. Bununla birlikte, diğer araştırmacılar tarafından yapılan çalışmalar çelişkilidir [1, 28, 29]. Yüzey pürüzlülüğünü etkileyen en önemli anahtar faktörün kesme hızı olduğunu, ilerleme hızı hesaba katılmadan kesme hızındaki artışla, yüzey pürüzlülüğünün arttığı ifade edilmiştir [1]. %17 SiC içerikli Al2124 matris alaşımli kompozitin delinmesinde, ilerleme hızı, matkap uç açısı ve matkap sertliğindeki artışa bağlı olarak işlenmiş yüzeyin yüzey pürüzlülüğünün azaldığı tespit edilmiştir [28, 29]. TiN kaplı ve kaplamasız karbür matkaplar kullanıldığında, devir sayısı arttıkça yüzey pürüzlülük değerlerinin azaldığı, bunun aksine HSS matkaplar kullanıldığında devir sayısı arttıkça yüzey pürüzlülük değerlerinin arttığı görülmüştür [28, 29]. Yapılan ANOVA sonucuna göre, iş parçası yüzey pürüzlülüğü üzerinde en çok etkili olan parametrelerin sırasıyla matkap tipi ve ilerleme hızı olduğu ve devir sayısı, matkap uç açısı ve ısıl işlem parametrelerinin yüzey pürüzlülüğü üzerinde etkili olmadığı tespit edilmiştir [27]. Yüzey pürüzlülüğünün, ilerleme hızının artmasına bağlı olarak arttığı, kesme hızındaki artışla beraber yüzey pürüzlülüğünde önemli bir değişimin olmadığı da belirtilmiştir [9]. Her bir kesme hızında ilerleme hızının artmasıyla, yüzey pürüzlülüğünün arttığı bildirilmiştir [19]. Devir sayısı 50 dev/dak'dan 102 dev/dak'ya arttırıldığında, yüzey pürüzlülüğünün bir miktar arttığı, fakat 198 dev/dak'da azaldığı belirtilmiştir [19]. Neredeyse diğer tüm araştırmacılar, yüzey pürüzlülüğü açısından, ilerleme hızının kesme hızına göre daha çok etkili olduğu sonucuna varmışlardır.

Yüzey pürüzlülük değeri üzerinde etkili olan diğer faktör ise kesici takım malzemesidir. Takım sertliğinin yüzey pürüzlülüğünü etkileyen önemli bir faktör olduğu bildirilmiştir [19]. Sert karbür takımlarla, HSS takımlardan daha iyi yüzey kalitesine ulaşılmıştır [19, 28, 29]. Deliğin kalitesi açısından bakıldığında, PCD elmas matkapların, diğer matkaplardan daha iyi performans gösterdiği bulunmuştur [5, 23]. Sert maden uçlu matkaplar, elmas matkaplara göre daha ciddi YT'ye sahip olduğu ve YT'nin bitirme yüzeyinin daha pürüzlü olmasına neden olduğu tespit edilmiştir [23]. Genellikle, kaplamalı karbür takımlar, kaplamasız karbür



takımlara göre daha iyi yüzey kalitesi üretmiştir [6]. Oldukça yüksek takım aşınması ve düşük yüzey kalitesi sebebiyle, HSS matkapların MMK'ların delinmesi için uygun olmadığı sonucuna ulaşılmıştır [23, 28, 29]. Bununla birlikte, PCD elmas takımların yüksek maliyetli olması tercih edilmesini engellemektedir [4]. Elmasımsı karbon takımlar, yüzey pürüzlülüğü üzerine, PCD takımlara benzer sonuçlar sergilemiştir [3]. Al-5%SiC-5%B<sub>4</sub>C kompozitlerin HSS matkaplarla, düşük hız ve düşük ilerleme kombinasyonu ile delinebileceği sonucuna ulaşılmıştır [1]. Matkap çapındaki artışın yüzey pürüzlülüğü üzerinde hiçbir etkiye sahip olmadığı sonucuna ulaşılmıştır [59]. Isıl işlem görmüş MMK'lar delinirken, yüzey kalitesinin ısıl işlemden olumsuz yönde etkilendiği bildirilmiştir [74].

MMK'ya yapılan grafit ilavesi yüzey pürüzlülük değerini arttırmış, yüzey pürüzlülüğünün daha fazla olmasının nedeni, grafit tanelerinin yüzeyden kopartılmasına bağlanmıştır [3, 6]. Bakır ve magnezyum ilavesinin alaşım sertliğini artırırken, işlenen yüzeyin pürüzlülüğünü iyileştirmiştir [2]. Benzer şekilde, alaşım içerisindeki takviye oranının artırılması, yüzey pürüzlülük değerlerini azaltmış ve işlenebilirlikte iyileşme sağlamıştır [2]. Aynı şekilde, kompozit malzeme içeriğindeki seramik parçacıkların oranındaki artışın, yüzey pürüzlülüğünü azalttığı ifade edilmiştir [22, 59].

Literatür çalışmaları incelendiğinde, MMK malzemelerin delinmesinde kesici takım üzerinde meydana gelen ana aşınma tipinin serbest yüzey aşınması olduğu [1, 4, 7-11, 17, 19, 20, 23, 24, 74, 84] ve takım üzerinde genellikle abrazyon [1, 4, 7-11, 17, 19, 20, 23, 24, 74, 84] ve adhesiyon [1, 11, 17] aşınma mekanizmalarının hâkim olduğu ifade edilmiştir. Daha yüksek hızlarda krater aşınmasının olduğu da belirtilmiştir [1]. Aksine, başka bir çalışmada, çeliklerin işlenmesinde yaygın olarak görülen krater etkisinin görülmediği bildirilmiştir [10]. Diğer çalışmalarda da, kompozit malzemenin işlenmesinde hâkim olan aşınma mekanizmasının, kesici takımın serbest yüzeyinde meydana gelen abrazyon aşınma mekanizması olduğu ifade edilmiştir [9, 10]. Optimum takım ömrünün, kesici takım üzerinde oluşan aşınmadan ve yüzey pürüzlülüğünden kuvvetli bir şekilde etkilendiği bildirilmiştir [9]. Kompozit malzeme içerisine ilave edilen seramik takviyesinin takım aşınmasını hızlandırdığı belirtilmiştir [7, 59]. Sonuçta, alüminyum MMK malzemelerin içerisine grafit eklenmesinin ve sert parçacıkların oranının azaltılmasının, takım aşınma oranını azalttığı ve bu kompozit malzemelerin işlenebilirliğini iyileştirdiği görülmüştür [24].

Önceki çalışmaların çoğunda, kesici takım üzerinde oluşan serbest yüzey aşınmasının, ilerleme hızının artmasıyla azaldığı iddia edilmektedir [1, 7, 10, 11, 20, 23, 84]. İlerleme hızının artmasıyla birlikte, kesici takımla iş parçası arasındaki temas süresi azaldığı ve bu nedenle takım aşınma oranının azaldığı düşünülmektedir [1, 7, 19, 23, 84]. Diğer yazarlar tarafından, ilerleme hızının düşürülmesiyle matkabın sert SiC ve B<sub>4</sub>C parçacıkları ile temas alanının arttığı, bu nedenle abraziv aşınmanın neden olduğu matkap aşınmasının arttığı bildirilmiştir [1]. TiN kaplamalı ve kaplamasız HSS takımlar için, ilerleme hızının artmasıyla serbest yüzey aşınmasının azaldığı, fakat karbür takımlar için ilerleme hızının artmasıyla serbest yüzey aşınmasının bir miktar arttığı belirtilmiştir [19]. Kesme hızının takım ömrünü etkileyen önemli bir faktör olmadığı ifade edilmiştir [7]. Kesme hızındaki artışla birlikte takım aşınmasının arttığı, fakat bu artışın önemsiz olduğu vurgulanmıştır [10, 20]. Kompozit malzemelerin frezelenmesi çalışmasında ise, kesme hızının artmasıyla takım aşınmasının arttığı sonucuna varılmıştır [17].

Kuru ve geleneksel soğutma ile yapılan delme operasyonları sonunda ölçülen serbest yüzey aşınması değerlerinin oldukça benzer olmasına karşılık, takım içerisinden soğutma yapıldığında diğerlerine nazaran daha az serbest yüzey aşınması oluşmuştur [4].

Ayrıca delme derinliğinin artmasıyla, takım aşınması lineer bir şekilde artmıştır [20]. Matkap üzerinde oluşan aşınma 10 mm derinliğe kadar hızlı bir şekilde artmış ve bu mesafeden sonra daha yavaş bir artış göstermiştir [20]. Üretilen delik sayısı artışına bağlı olarak aşınma da lineer bir şekilde artmıştır [4, 74].

Literatürde çalışılan üç takım malzemesi (PCD, Karbür, HSS) arasında, PCD elmas matkapların en yüksek aşınma direncine sahip olduğu ve karbür matkapların kabul edilebilir delik kalitesi gösterdiği ifade edilmiştir [19, 23]. Yatırım maliyeti açısından küçük parti üretimlerinde WC matkapların kullanılabilmesi, büyük parti üretimlerinde ise PCD uçlu delme ve delik büyütme takımlarının kullanılabilmesi ifade edilmiştir [7]. Fakat PCD matkapların pahalı olması onların tercih edilmesini sınırlamaktadır [4]. Oldukça yüksek takım aşınması ve deliğin yüzey kalitesinin düşük olması sebebiyle HSS matkapların metal matris kompozitlerin delinmesi için uygun olmadığı belirtilmiş ve HSS üzerindeki TiN kaplamanın, kaplamasız HSS takımlara göre önemli derecede performansını arttırmadığı vurgulanmıştır [7, 19, 23]. Aksine, kompozit malzemelerin frezelenmesinde kesici takım

malzemeleri içinde en iyi performansı üç kaplı karbür takımın gösterdiği ve kaplamasız karbür takımın en fazla aşınan takım olduğu belirtilmiştir [17].

ANOVA analizi sonucuna göre takım aşınması üzerinde, kesme zamanının etkisinin %'50 ve ilerleme hızının etkisinin %24 olduğu ortaya çıkmıştır [8]. Yüzey pürüzlülüğü üzerinde ilerleme hızının etkisinin %43 ve kesme hızının etkisinin %41 olduğu ortaya çıkmıştır. Ayrıca, yüzey pürüzlülüğü üzerinde etkili olan en önemli etkileşimin %14'lük oranla kesme hızı/ilerleme hızı etkileşiminin olduğu ifade edilmiştir.

Aşındırıcı sert parçacıkların takım kesici kenarı üzerinde küçük oluklar meydana getirdiği ve kesme hızının artmasıyla bu olukların genişlediği ve bu olukların ezilen iş parçası malzemesi ile doldurulmasıyla YT'nin oluştuğu belirtilmiştir [1]. YT katmanının, takımın talaş yüzeyinin korunmasında önemli bir rol oynadığı bazı yazarlar tarafından iddia edilmiştir [1, 17]. Fakat bu durumun aksini iddia eden bir çalışmada, çok sayıda kırılmış SiC parçacıkları içeren gergin haldeki YT malzemesinin, aşınan takım üzerinden akarken aşınmayı arttırdığı belirtilmiştir [4, 85]. Kesme hızındaki artışın, takım üzerine yapışan malzemenin azalmasına ve yumuşamasına yol açan daha büyük sıcaklıklara neden olduğu ifade edilmiştir [1]. Alüminyumun, kesici takım ile yüksek derecede birleşme eğilimine sahip olmasından dolayı, kolay bir şekilde YT katmanına dönüştüğü ifade edilmiştir [2]. Bakır ve magnezyum ilavesinin alaşım sertliğini artırdığı ve kesici takım üzerindeki YT oluşumunu azalttığı bildirilmiştir [2]. Geleneksel soğutma ve kuru delme şartları altında yapılan delme sonrası önemli derecede YT oluştuğu, takım içerisinden yapılan soğutmanın matkabın köşe aşınmasını azalttığı ve YT oluşumunu önlediği ifade edilmiştir. [4]. Kompozit malzemelerin frezelenmesinde, kesme hızının artmasıyla YT'nin azaldığı bildirilmiştir [17].

Al/%4Mg alaşımını işlendiğinde, sürekli talaş oluştuğu bildirilmiştir [2]. Üretilen talaşların çoğunluğunun sürekli talaş olduğu, Al/%4Mg–Cu içerisine katılan SiC<sub>p</sub> parçacıkların kırılma etkisinden dolayı, kısa helis konik talaş üretildiği bildirilmiştir [2]. Alüminyum matris kompozitler delinirken oluşan kısa talaş tipinin, bu malzemeleri sürekli operasyonlar için tercih edilmesini sağladığı ifade edilmiştir [11]. Grafit ilavesi ile talaş boyunun kısaldığı ve kıvrık talaş oluşmadığı bulunmuştur [6].

Al/SiC<sub>p</sub>, Al/SiC<sub>p</sub>–Gr ve Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–Gr kompozit malzemelerin delinmesi ve frezelenmesinde, matris içerisindeki SiC veya Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> sert seramik parçacıklarla, yumuşak grafitin talaş kırıcı

olarak rol oynadığı ve testere dişine benzer talaşların oluşmasına yardımcı olduğu bildirilmiştir [24]. Dolayısıyla, kompozit malzeme içerisindeki seramik parçacıkların azaltılması, testere dişine benzer talaşların oluşumunu azaltarak uzun talaşların üretilmesini sağlamıştır. Diğer bir çalışmada da kompozit malzeme içerisindeki  $SiC_p$  parçacıkların kompozit malzemelerin gevrekliğini artırdığı ve testere dişine benzer tipli talaşların oluşmasına yol açtığı bildirilmiştir [6]. HSS ve kaplamasız karbür matkapların talaşları istenildiği gibi kırılmadığı ve üretilen bazı talaşların sürekli talaş olduğu ve iş parçasına zarar vermesi muhtemel olduğundan arzu edilmeyen talaş türü olduğu ifade edilmiştir [23]. PCD matkapların üretilen talaşları kırabildiği ve üretilen talaşların birçoğunun birbirine benzeyen tek konik helisel talaş formunda olduğu bildirilmiştir [23].

Tüm soğutma şartları altında yapılan soğutma işlemi sonunda oluşan çapak yüksekliğinin, delik sayısındaki artışta bağlı olarak arttığı belirtilmiştir [4]. Takım içerisinde yapılan soğutma işleminde elde edilen çapak yüksekliğinin, kuru işleme şartları altında elde edilenden %38 ve geleneksel soğutma şartları altında elde edilenden %25 daha az olduğu bildirilmiştir [4]. Ayrıca, çapak yüksekliğinin kesici takım üzerinde oluşan aşınmanın artmasıyla arttığı ifade edilmiştir [4]. Kesme hızı ve ilerleme hızının etkileşiminin, çapak yüksekliği üzerinde herhangi bir etkiye sahip olmadığı ifade edilmiştir [6]. Çapak yüksekliğindeki azalma, grafit parçacıklarının katı yağlama özelliğine bağlanmıştır [6]. Delinen deliklerin sayısının artmasıyla çapak oluşumunun arttığı ifade edilmiştir [6]. İlerleme hızı arttıkça ilerleme kuvvetinin arttığı ve böylece artan ilerleme kuvvetinin daha büyük çapak oluşumu ile sonuçlandığı ifade edilmiştir [6, 23]. Delik çıkışında oluşan çapak yüksekliğinin, ilerleme hızının artmasıyla arttığı ve devir sayısındaki artışla çapak yüksekliğindeki artışın azaldığı bildirilmiştir [22]. Al 356/SiC kompozite mika ilave edilmesinin çapak yüksekliğini azaltmaya yardımcı olduğu bildirilmiştir [22]. Takımda meydana gelen aşınmanın bir sonucu olarak, çapak oluşumunun da arttığı gözlemlenmiştir [23].

Üretilen deliğin ölçüsel tamlığı ve profili de araştırma konusu olmuştur [4, 74, 86-89]. Kuru ve geleneksel soğutmada matkap üzerindeki YT'nin boyutunun arttığı ve bunun kesici kenarın genişlemesine neden olduğu, bu nedenle üretilen deliğin çapının arttığı belirtilmiştir [4]. Buna ek olarak, kuru ve geleneksel soğutmada üretilen deliklerin üst noktasından tabanına doğru delik çapının, takım içerisinde soğutma yapılarak delinen deliklerden daha az tutarlı olduğu ifade edilmiştir. Diğer bir çalışmada, birinci ve yirminci delik arasında

matkaptaki aşınmaya bağlı olarak, delik çapında hafif bir azalma olduğu, fakat delik sayısındaki artışa bağlı olarak, önemli derecede delik çapında artış olduğu ifade edilmiştir [74]. Onlar tarafından, iş parçası malzemesinin sertliğine bağlı olarak delik çapının çözeltiye alınarak yaşlandırılmış malzemenin 60. delikte 0,36 mm artış gösterdiği ve herhangi bir yaşlandırma işlemine tabi tutulmamış malzemenin 100. delikte 0,35 mm artış gösterdiği bildirilmiştir. Esasında bu sonuç oldukça ilginçtir. Çünkü matkap üzerinde oluşan köşe aşınmasının, delik sayısına bağlı olarak arttığını daha önce ifade etmişlerdi. Üretilen deliğin ölçüsü matkabın köşe aşınmasına bağlıdır. Dolayısı ile matkabın köşeleri aşındığında matkap çapında küçülme meydana geleceğinden, delik çapında küçülme olması beklenirdi. Kesme sıvısının varlığında TiAlN/TiN kaplamalı HSS matkapların, kaplama malzemesinin matkap alt tabakasının genişlemesini engellediğinden dolayı, kaplamasız matkaplara göre daha ideal çapta delikler ürettiği ifade edilmiştir [86]. Soğutma sıvısı kullanılmadan yapılan delme işlemi sonrasında, delik yüzeyi boyunca oluşan termo-elastik deformasyondan dolayı, deliğin üst kısmının alt kısmına göre daha geniş olduğu bildirilmiştir.

Delik ölçüsü açısından, % 5 kobalt içerikli HSS matkapların, TiN, TiAlN kaplamalı ve kaplamasız matkaplarla karşılaştırıldığında daha iyi bir performans gösterdiği bildirilmiştir [87]. Kesme parametrelerinin artan değerlerinde, üretilen deliğin ölçüsünün arttığı belirtilmiştir. Ancak delik ölçüsü üzerine kesme parametrelerinin küçük bir etkiye sahip olduğu ve matkap uç açısının etkisinin önemli olduğu ifade edilmiştir.

Kesme ortamının deliğin kalite/tamlığını etkilediği ve matkap içerisinden geçen yüksek basınçlı kesme sıvısı kullanımı ile oluşturulan kesme ortamının, dışarıdan püskürtme ile yapılan soğutma ortamına göre daha iyi sonuçlar verdiği belirtilmiştir [89]. Ayrıca, üretilen deliğin profilini önceden tahmin etmek amacıyla matematiksel model geliştirme çalışmaları da yürütülmektedir. Al7039 iş parçasına 7,7 mm çapında tek ve çift kesici kenarlı karbür matkaplarla delikler delinmiştir [88]. Delik profilleri koordinat ölçme tezgahında (CMM, Coordinate Measuring Machine) ölçülerek, deliğin silindirikliği, daireselliği ve dikliği belirlenmiş ve matematiksel model tahminleri ile karşılaştırılmıştır. Sonuçların uyum içinde olduğu bildirilmiştir.

#### 2.5.4. Delme esnasında oluşan sıcaklık ile ilgili çalışmaların değerlendirilmesi

Literatürde delme ile ilgili yapılan sıcaklık ölçümlerinin çoğunun alüminyum alaşımları [60, 62, 63, 65-67, 70], AISI 1040 çeliği [63, 65, 67, 68], AISI 1045 çeliği [70, 71] ve Ti6Al4V alaşımları [61, 69, 73] üzerine olduğu, plastik kompozitler [64] ve magnezyum alaşımları [72] ile ilgili olarak da sınırlı sayıda çalışma olduğu görülmüştür. Yapılan bu çalışmaların çoğunda temaslı ölçüm tekniği olan ısı çifti kullanılırken [60-69, 71, 73], bir kısmında ise temasız ölçme yapabilen iki renkli pirometre [70] ve kızılötesi termometre [72] kullanılmıştır.

Al 319 plakaların [62], AISI 1040 çeliği ile Al 7075-T651 malzemelerin [63], karbon çeliği (AISI 1045) [70, 71], dökme demir (AISI 100/70/03) ile alüminyum pres döküm alaşımının [70] ve % 70 karbon elyaf takviyeli polimer kompozit malzemelerin delinmesinde [64] delme sıcaklığı, hem ilerleme hızı hem de devir sayısındaki (veya kesme hızı) artışla birlikte artmıştır. İlerleme hızına bağlı olarak sıcaklıktaki artış, kesme derinliğinin artmasına bağlı olarak harcanan gücün artışına, kesme hızına bağlı olarak sıcaklıktaki artış, kesme hızıyla beraber sürtünme için harcanan gücün artışına bağlanmıştır [71]. Ayrıca, ilerleme hızındaki artışa bağlı olarak sıcaklıktaki artışın azaldığı belirtilmiştir [63]. Aksine, AISI 1040 çeliği ile Al 7075-T651 malzemelerinin sürekli delme operasyonunda, ilerleme hızındaki artışla matkap üzerindeki sıcaklık azalmıştır [65]. Aynı yazarlar tarafından, başarısız delme operasyonunda, AISI 1040 çelik malzemenin delinmesinde devir sayısındaki artışla matkap üzerindeki sıcaklığın arttığı, Al 7075-T651 alaşımı için devir sayısındaki artışla matkap üzerindeki sıcaklığın azaldığı ifade edilmiştir [65].

Ti6Al4V alaşımının delinmesinde, kesme hızının azaltılması ve ilerleme hızının artırılması ile matkap sıcaklığının azaltılabileceğini ifade edilmiştir [61]. Ti6Al4V titanyum alaşımlarının delinmesi üzerine yapılan diğer bir çalışmada ise, kesme hızındaki artış sıcaklık artışına neden olmuştur [73]. Aynı kesme hızında, ilerleme hızının 0,1 mm/dev'den 0,12 mm/dev'e artmasıyla sıcaklık artmış, ilerleme hızının 0,12 mm/dev'den 0,14 mm/dev'e artmasıyla sıcaklık azalmış, ilerleme hızının 0,14 mm/dev'den 0,16 mm/dev'e artmasıyla sıcaklık tekrar bir miktar daha artmıştır.

Al 7075-T651 malzemenin delinmesiyle oluşan delme sıcaklıkları üzerinde, delme derinliğinin etkisinin büyük olduğu, ilerleme hızının ve devir sayısının etkisinin önemsiz

olduğu bildirilmiştir [66]. Ti6Al4V alaşımlarının delinmesinde de, delme derinliği arttıka sıcaklığın arttığı ifade edilmiştir [69]. AISI 1040 eliği ile Al 7075-T651 malzemelerinin sürekli ve gagalamalı (step by step) olarak delinmesinde, sürekli delme operasyonunda delme derinliği ile birlikte, gagalamalı delme operasyonunda ise delme adımındaki artışla delme sıcaklığının arttığı belirtilmiştir [65]. AISI 1040 eliği ve Al 7075-T651 malzemelerinin ardışık olarak delinmesinde, delik sayısındaki artışla birlikte sıcaklığın arttığı ifade edilmiştir [67].

Kesici kenar üzerindeki sıcaklık dağılımlarını ölçmek amacıyla, matkabın merkezinden 2 mm, 3 mm, 4 mm ve 5 mm mesafede ölçümler gerçekleştirilmiş ve matkabın merkezinden dışa doğru gidildikçe kesici kenar sıcaklığının arttığı ve nihayet köşe noktasında sıcaklığın maksimum olduğu ifade edilmiştir [70]. Matkabın kesici kenarlarını etkileyen maksimum sıcaklığın, matkabın keski kenarından yaklaşık olarak %20 daha büyük olduğu belirtilmiştir [71]. Aksine, matkap uç açısındaki artışla sıcaklığın arttığı ve özellikle keski kenarına yakın bölgede sıcaklıktaki artışın, kesme kenarlarındaki artışa göre daha fazla olduğu ifade edilmiştir [62].

Soğutma sıvılı kesme esnasında oluşan sıcaklık, soğutma sıvısız yapılan kesme esnasında oluşan sıcaklıkla mukayese edilmiş, sıcaklıktaki azalmanın yaklaşık olarak, tornalamada %5, frezede %10-15 ve delmede %20-25 olduğu bildirilmiştir [70]. Benzer şekilde matkabın soğutma kanalları ile yapılan kesme sıvısı ile soğutmanın matkap sıcaklığını azaltmada kritik bir öneme sahip olduğu belirtilmiştir [61]. Minimum miktarda soğutma sıvısı kullanımı süresince iş parçasında üretilen maksimum sıcaklığın, kuru delmede gözlemlenenden daha düşük olduğu ve bol soğutma sıvısı kullanarak yapılan delme işlemi süresince üretilen sıcaklığı aşmadığı bildirilmiştir [72]. Takım içinden minimum miktarda soğutma sıvısı kullanılarak yapılan delme işleminde ölçülen sıcaklık değerinin, dıştan nozul yardımı ile minimum miktarda soğutma sıvısı kullanılarak yapılan delme işleminde elde edilen sıcaklık değerinden %50 daha küçük olduğu bildirilmiştir [69].

Kuru delme şartları altında oluşan ve iş parçasına akan ısıyı tahmin etmek için bir model geliştirilmiş ve geliştirilen modelin doğruluğunu tespit etmek için iş parçasına ısılı çiftler yerleştirilmiştir [60]. Geliştirilen modelde ortaya çıkan ısının bir kısmının matkabın kesme yapmasıyla üretildiği ve bir kısmının da sürtünme ile üretildiği varsayılmıştır. Neticede üretilen iki ısının toplamı alınmış ve matkabın geometrisi, ilerleme kuvveti ve üretilen tork

değeri ile ilişkilendirilmiştir. Geliştirilen modelin hassas bir tahminde bulunduğu bildirilen çalışmada, ısı çiftin uç noktasının, yerleştirildiği delik içerisindeki yerinin belirsiz olmasının önemli bir problem olduğu bildirilmiştir [60]. AISI 1040 çeliği malzemenin delinmesinde, delme derinliği ile ilerleme hızının etkisi ve devir sayısı ile ilerleme hızının etkisi S/N oranı ve ANOVA kullanılarak karşılaştırılmıştır [68]. Matkap sıcaklığı üzerinde delme derinliğinin etkisinin % 91,31, ilerleme hızının etkisinin % 7,62 olduğu ifade edilmiştir. Diğer durumda devir sayısı ile ilerleme hızı karşılaştırıldığında ise, devir sayısının etkisinin % 75,47 ve ilerleme hızının etkisinin ise % 10,10 olduğu belirtilmiştir.

Karbonlu çeliklerin (AISI1045) delinmesinde maksimum kesici takım sıcaklığı gözlemlenirken, alüminyum pres döküm alaşımlarının delinmesinde ise en düşük kesici takım sıcaklığı gözlemlenmiştir [70]. Delik delmede matkap ucunda oluşan sıcaklık delik içerisine hapsoldüğünden dolayı yükselmekte, bunun neticesinde takım malzemesi yumuşamakta ve takım ömrü azalmaktadır [61, 71]. Delme esnasında ortaya çıkan kesme sıcaklığı delik hassasiyetini, yüzey pürüzlülüğünü, takım aşınmasını [60-68, 70, 71, 73] ve delme kuvvetlerini [64, 73] etkilemektedir. Sıcaklık ölçme yöntemlerine bakıldığında ısı çiftlerin, genelde matkabın kesici ağzına yakın bir noktada yerleştiği [61, 63-68, 73], diğer çalışmalarda ise iş parçasına yerleştirildiği [69, 71] görülmekte, fakat kesme bölgesine belli bir mesafede konumlandırıldığı için sıcaklık ölçmede yetersiz kalmaktadır [70]. Bu sebeple temassız sıcaklık ölçme yöntemlerinin kullanıldığını görmek mümkündür [70, 72]. Genellikle, yazarlar kesme sıcaklığının ölçülmesinde kullanılan cihazın tepki süresinin önemli olduğunu vurgulamışlardır [63, 65-69, 73].

Karbon fiber takviyeli polimer kompozitlerin delinmesinde, kesme şartlarına bağlı olarak takım sıcaklıklarının 200-350 °C'ye ulaştığı, oluşan ısı yüklerin delinen delik üzerinde işleme kusurlarına yol açtığı bildirilmiştir [64].

### 2.5.5. Genel değerlendirme

MMK'ların delinmesi üzerine, bu zaman kadar yapılan çalışmalar incelendiğinde, çoğunlukla alüminyum kompozit malzemelerinde takviye elemanı olarak  $Al_2O_3$  ve  $SiC_p$  takviyelerinin kullanıldığı görülmektedir. MMK içersine ilave edilen seramikler arasında  $B_4C_p$ , diğerlerine nazaran daha düşük yoğunluğa ve daha yüksek mukavemet özelliklerine



sahiptir. Ayrıca, nükleer enerjiye olan talep ve ihtiyaç, nötron emme kapasitesine sahip olan B<sub>4</sub>C seramiklerinin nükleer reaktörlerde yaygın olarak kullanılmasını sağlamaktadır.

MMK'ların üretiminde kullanılan sıvı faz sinterleme metodu, matris içerisinde takviye parçacıklarının homojen bir şekilde dağılması, bu yöntemle üretilen kompozitlerin yüksek mekanik özellikler göstermesi ve düşük maliyetli olması nedeniyle, diğer üretim yöntemleri arasında en çok tercih edilen üretim yöntemidir.

MMK'ların işlenebilirliği ile ilgili yapılan çalışmaların tornalama ve frezeleme operasyonları üzerine yoğunlaştığı ve MMK'ların delinebilirliği ile ilgili yeterince çalışma olmadığı görülmektedir. Doğada elmadan sonra en yüksek ikinci sertliğe sahip olan B<sub>4</sub>C parçacıkları, kesici takım hızlı bir şekilde aşındırmakta ve üretim maliyetlerini artırmaktadır.

İşlenebilirlik ile ilgili yapılan çalışmaların yüksek emek, zaman ve maliyetlere yol açması, bu çalışmaların sonucunun matematiksel veya istatistiki olarak değerlendirilmesini gerektirmektedir. Bu şekilde kompozitlerin üretiminde kullanılan faktörlerin etkisi anlaşılabilen ve sonradan yapılacak üretimler için fikir vermektedir. Delme operasyonunun üç boyutlu kesme mekaniğine sahip olması, matematiksel olarak modellenmesini zorlaştırmaktadır. Bunun yerine daha kolay ve kullanışlı olan istatistiki yöntemlerin kullanıldığı görülmektedir.

Bu çalışmada, sıvı faz sinterleme yöntemi ile üretilen B<sub>4</sub>C<sub>p</sub> içerikli MMK'ların işlenmesinde, kesme parametrelerinin, takviye oranının ve kesici takım malzemesinin delme kuvvetleri, takım aşınması, yüzey pürüzlülüğü ve delme sıcaklığı üzerine etkisi araştırılmıştır. Bu amaçla öncelikli olarak farklı takviye oranına sahip (%10, %15 ve %25) B<sub>4</sub>C<sub>p</sub> içerikli MMK'lar, sıvı faz sinterleme metodu ile üretilmiştir. Daha sonra takviye oranı, kesme parametreleri ve kesici takım malzemesi gibi kontrol faktörleri ve seviyelerinin delme kuvvetleri, takım aşınması, yüzey pürüzlülüğü ve delme sıcaklığı üzerine etkisi deneysel olarak incelenmiş ve sonuçlar kayıt edilmiştir. Son aşamada, delme kuvvetleri ile ilgili olarak bir matematiksel yöntem geliştirilmiş, ayrıca Taguchi yöntemi ve ANOVA kullanılarak delme kuvvetleri, takım aşınması, yüzey pürüzlülüğü ve delme sıcaklığı açısından sistemin optimizasyonu yapılmış ve her bir kontrol faktörü ve seviyesinin etkisi istatistiki olarak belirlenmiştir.

### 3. MATERYAL VE METOT

Bu çalışmada, sıvı faz sinterleme yöntemi ile üretilen  $B_4C_p$  içerikli MMK'ların HSS, TiAlN kaplamalı ve kaplamasız karbür matkaplarla delinmesinde, kesme parametrelerinin, takviye oranının ve kesici takım malzemesinin delme kuvvetleri, takım aşınması, yüzey pürüzlülüğü ve delme sıcaklığı üzerine etkisi incelenerek, delme şartlarının optimize edilmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla öncelikli olarak  $B_4C_p$  içerikli MMK'lar sıvı faz sinterleme metodu ile üretilmiş, daha sonra delme deneyleri gerçekleştirilmiş ve sonuçlar kayıt edilmiştir. Bu bölümde Al7XXX serisi MMK malzemelerin üretimi, üretildikten sonraki karakterizasyonu ve delme deneyleri anlatılmıştır. İlaveten delme sonrasında oluşan delme kuvvetleri, takım aşınması, yüzey pürüzlülüğü ve kesici takım sıcaklığının ölçümü anlatılmıştır. Ayrıca, deney sonuçlarının değerlendirilmesinde kullanılan istatistikî yöntemler (Taguchi, ANOVA ve Gri ilişki analizi) açıklanmıştır.

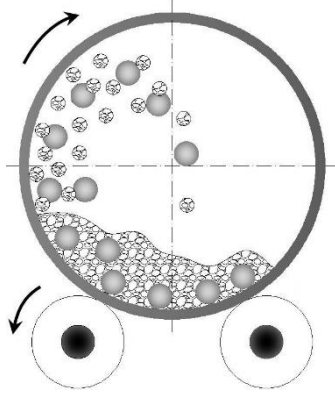
#### 3.1. MMK Malzemelerin Üretimi

$B_4C$  takviyeli alüminyum kompozit malzemelerin işlenebilirliğini tespit etmek amacıyla parçacık takviyeli MMK malzemeler üretilmiştir. Bu amaç için 325 mesh altı Al, Cu, Zn ve Mg tozları metal matrisin üretiminde kullanılmıştır. Takviye elemanı olarak 325 mesh altı  $B_4C$  seramik tozları kullanılmıştır.

Farklı takviye oranlarının işlenebilirlik üzerindeki etkisini araştırmak için  $B_4C$  takviye oranları, %10, %15 ve %25 olarak seçilmiştir. Çizelge 3.1'de Al7XXX serisi kompozit malzemenin kimyasal bileşimi (%) görülmektedir. Ağırlıkları önceden belirlenmiş metal ve seramik tozları, 0,1 g hassasiyetindeki Symmetry EC4000 elektronik terazide tartılmış ve malzeme karıştırma kabına konulmuştur. Metal ve seramik tozlarının homojen bir yapıda karışmasını sağlamak amacıyla 36 adet zirkonya bilyeli karıştırma kabı kullanılmıştır. Malzeme karıştırma kabı, kendi eksenini etrafında dönen iki silindir arasına konulmuş ve bilyalı öğütme yöntemi ile uygun devirde iki saat süreyle karıştırılmıştır (Şekil 3.1).

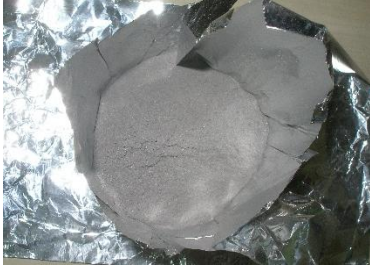
Çizelge 3.1. Al7XXX sersisi kompozit malzemenin kimyasal bileşimi (%)

	Al	B <sub>4</sub> C	Zn	Cu	Mg
%10 MMK	79	10	5	3,5	2,5
%15 MMK	74	15	5	3,5	2,5
%25 MMK	64	25	5	3,5	2,5



Şekil 3.1. Bilyalı öğütme yöntemi ile seramik ve metal tozların karıştırılması

Karıştırılan tozlar önceden hazırlanmış alüminyum folyo içerisine konulmuş ve ağzı kapatılmıştır (Resim 3.1). Paket halindeki alüminyum folyoya sarılı metal ve seramik toz karışımı, Resim 3.2a'daki kalıp içerisine konularak, fırına yerleştirilmiştir (Resim 3.2b). Sıcaklığı kontrol etmek amacı ile kalıp üzerine ısılıçift yerleştirilmiştir. Karışım öncelikli olarak fırın içerisinde 25 MPa basınç altında kalıplanmak suretiyle soğuk olarak sıkıştırılmıştır. Daha sonra fırın, içerisindeki sıcaklık 540 °C dereceye ulaşınca kadar ısıtılmıştır. Fırın içi sıcaklık 540 °C derecede sabitlenmiş ve 25 MPa basınç altında yarım saat süreyle sıvı faz sinterleme metodu uygulanarak kompozit malzeme üretilmiştir (Resim 3.3). Bu süre sonunda kalıbın fırın içerisindeki sıcaklığı 250 °C dereceye düşünceye kadar beklenilmiştir. Daha sonra kalıp fırın içerisinde alınarak tamamen soğuması için açık havada bekletilmiştir. Bu şekilde, %10, %15 ve %25 B<sub>4</sub>C içerikli kompozit malzemeler, 50x70x12 mm ebatlarında üretilmiştir (Resim 3.3b). Şekil 3.2'de sinterleme yöntemi, Şekil 3.3'de ise sinterleme işleminde kullanılan sıcak presleme metodunun safhaları görülmektedir.



Resim 3.1. Alüminyum folyo içerisine konulmuş metal ve seramik tozu karışımı



(a)



(b)

Resim 3.2. Kompozit üretiminde kullanılan (a) kalıp ve (b) kalıbın fırın içerisine yerleştirilmesi

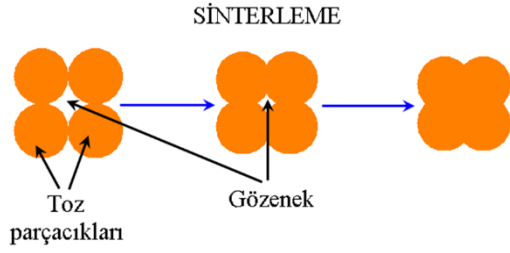


(a)

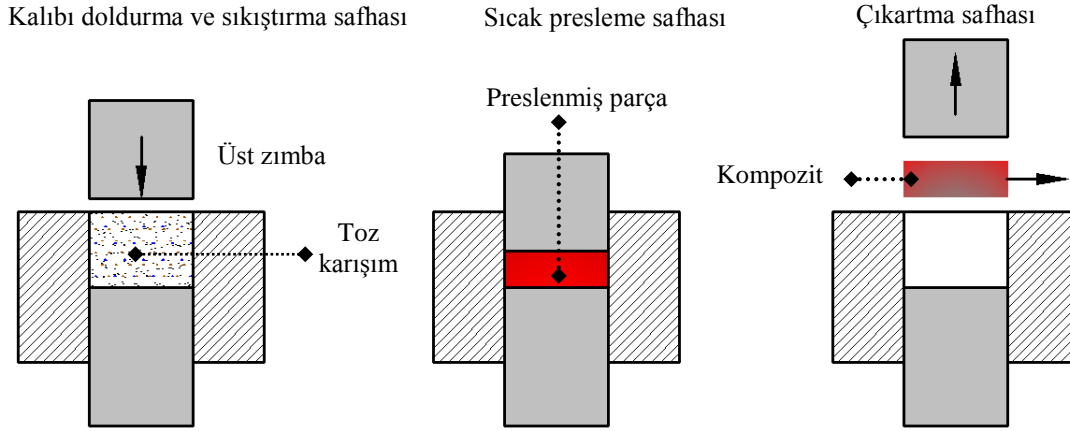


(b)

Resim 3.3. (a)  $B_4C_p$  içerikli alüminyum matris kompozitin sıcak preslenmesi ile üretimi  
(b) Üretilen kompozit malzeme



Şekil 3.2. Sinterleme



Şekil 3.3. Sıcak presleme yöntemi

## 3.2. Metal Matris Kompozitlerin Karakterizasyonu

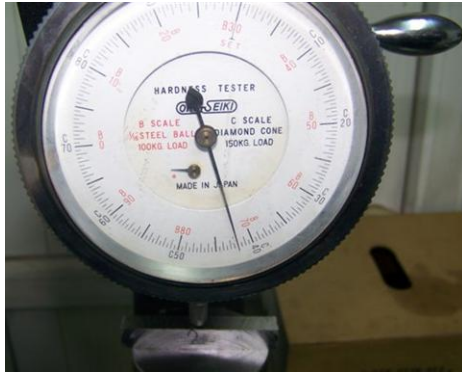
### 3.2.1. Mikroyapı incelemeleri

Üretilen kompozit malzemelerin yapısal özelliklerinin, üretilen malzeme üzerindeki her noktada aynı olabilmesi, seramik takviyelerin anayapı içerisinde homojen bir şekilde dağılmasına bağlıdır. Farklı takviye oranına sahip kompozit malzemelerin işlenebilirlik deneylerine geçmeden önce, anayapı içerisindeki seramik takviyelerin homojen olarak dağılıp dağılmadığı SEM cihazında incelenmiştir. Bu nedenle, farklı takviye oranına sahip (%10, %15 ve %25) her bir kompozit malzemedan tel erezyon tezgâhında kesilmek suretiyle numuneler alınmıştır. Bu numunelerden iyi bir görüntü almak amacıyla yüzeyleri zımpara tezgâhında parlatılmış ve son olarak çözelti kullanılarak yüzeyleri dağlanmıştır. Dağlayıcı olarak; içerisinde suda çözdürülmüş NaOH ile  $\text{NH}_3$  ve HF bileşikleri bulunan Modified Keller çözeltisi kullanılmıştır. 100 ml saf su içine 10 mg NaOH katılmış ve elde edilen karışıma 2-3'er ml  $\text{NH}_3$  ve HF bileşikleri ilave edilmiştir. TOBB Ekonomi ve Teknoloji

Üniversitesi Makina Mühendisliği laboratuvarında bulunan optik mikroskopta, numunelerin görüntüleri alınmıştır.

### 3.2.2. Sertlik ölçme deneyi

Sertlik testlerini yapmak amacıyla TM yöntemi ile üretilen numunelerin yüzeyleri taşlanmak suretiyle teste uygun hale getirilmiştir. Daha sonra sertlik testi için, her bir numune üzerinde ISO 6508 standardına uygun aralıklarla üç adet sertlik ölçümü yapılmış ve sonuçlar kaydedilmiştir. Sertlik ölçümünde OKO SEIKI sertlik ölçüm cihazı kullanılmıştır. Resim 3.4'de OKO SEIKI sertlik ölçüm cihazında gerçekleştirilen sertlik ölçme işlemi görülmektedir.



Resim 3.4. OKO SEIKI sertlik ölçme tezgahında sertlik ölçme işlemi

### 3.2.3. Çekme deneyi

Deney numuneleri, bloklardan alınan kesitlerin torna tezgahında EN 10002-1 metalik malzemeler için çekme deneyi standardına uygun çekme test numunesi haline getirilmesiyle hazırlanmıştır. Resim 3.5a'da kesilen blokların çekme testine uygun hale getirilmesi amacı ile tornalanmış numuneler görülmektedir. Hazırlanan her bir çekme numunesi 60 ton kapasiteli Tinius Olsen çekme testi cihazına yerleştirilerek çekme testleri gerçekleştirilmiştir (Resim 3.6). Her bir numune için sonuçlar, akma mukavemeti (MPa), Çekme Mukavemeti (MPa), uzama % ve kesit daralması % cinsinden kaydedilmiştir.



(a)



(b)

Resim 3.5. (a) Çekme ve (b) darbe testi için hazırlanmış deney numuneleri 1) %10 B<sub>4</sub>C, 2) %15 B<sub>4</sub>C, 3) %25 B<sub>4</sub>C içerikli alüminyum kompozit malzeme



Resim 3.6. Tinius Olsen çekme testi cihazına çekme testi numunesinin yerleştirilmesi

### 3.2.4. Darbe deneyi

Darbe testleri için, numuneler, EN 10045-1 metalik malzemeler için çentik darbe standardına uygun V çentikli darbe test numunesi haline getirilmesiyle hazırlanmıştır (Resim 3.5b). Hazırlanan her bir numune 400 J kapasiteli Tinius Olsen darbe testi cihazına yerleştirilerek darbe testleri oda sıcaklığında gerçekleştirilmiş ve sonuçlar kaydedilmiştir.

### 3.3. Matkapla Yapılan Delme Deneyleri

#### 3.3.1. Delme deneylerinde kullanılan kesici takımlar

Kompozit malzemeler için bu zamana kadar yapılan delme deneylerinde HSS, karbür, kaplamalı karbür ve PCD matkaplar kullanılmıştır. Delme deneylerinde en iyi sonuçlar PCD matkaplarla elde edilmesine karşılık, delme maliyetleri açısından bakıldığında, PCD matkapların pahalı olmaları kullanımlarını sınırlandırmaktadır.

Üretimi yapılan Al7XXX serisi kompozit malzemenin işlenmesinde değişik kesici takımların etkisini tayin edebilmek amacıyla ticari olarak elde edilebilen, %5 kobalt içerikli HSS, karbür ve TiAlN kaplamalı karbür matkaplar seçilmiştir. Bu matkaplar, PCD matkaplara göre ucuz olmaları ve elde edilebilirliklerinin kolay olması sebebiyle tercih edilmiştir. Ayrıca 2100-2800 HV sertliğine sahip TiAlN filmler, 800 °C okside olmaya başlaması ve delme uygulamalarındaki kesme performanslarından dolayı tercih edilen kaplama malzemeleridir. Yapılan deneylerde 135° uç açısına ve 30° helis açısına sahip 8 mm çapında %5 kobalt içerikli HSS matkap (FORMAT) ve 140° uç açısına ve 30° helis açısına sahip 8 mm çapında karbür ve TiAlN kaplı karbür matkap (KENNAMETAL) kullanılmıştır. Delme deneylerinde kullanılan matkap uçları ve özellikleri Çizelge 3.2’de verilmiştir.

Çizelge 3.2. Deneylerde kullanılan matkaplar ve özellikleri

Matkap malzemesi	Matkap Çapı (mm)	Tip	Uç Açısı (°)	Helis açısı (°)	Boşluk açısı (°)	Üretici Firma
HSS	8	Spiral	135	30	10	Format Professional Quality
Karbür	8	Spiral	140	30	10	KENNAMETAL
TiAlN kaplamalı karbür	8	Spiral	140	30	10	KENNAMETAL



### 3.3.2. Delme deneylerinde kullanılan takım tezgâhı ve işleme parametreleri

Üretilen MMK malzemelerin delme deneyleri için, 15 kW gücü ve 3500 dev/dak işleme kapasitesine sahip bilgisayarlı sayısal kontrollü düşey işleme merkezi (Johnford VMC-550 Fanuc Serisi O-M) kullanılmıştır, (Resim 3.7). Farklı kesme hızları ve farklı ilerleme oranları kullanılan deneylerde, kesme parametreleri takım üreticilerinin tavsiye ettiği ve önceden yapılmış çalışmalar dikkate alınarak seçilmiştir. 1000 dev/dak ile 2500 dev/dak arasında ve artış oranı 500 dev/dak olacak şekilde dört farklı devir sayısı belirlenmiştir. Delme operasyonları 0,1 mm/dev, 0,2 mm/dev ve 0,3 mm/dev ilerleme hızında gerçekleştirilmiştir. Delme deneyleri kuru işleme şartları altında ve oda sıcaklığında yapılmıştır. Çizelge 3.3’de bu çalışmada kullanılan işleme şartları verilmiştir. EK-1’de HSS, karbür ve TiAlN kaplamalı karbür matkapla yapılan delme işleminde kullanılan işleme parametreleri, deney numarasına göre verilmiştir.



Resim 3.7. Deneylerin yapıldığı Johnford VMC-550 düşey işleme merkezi

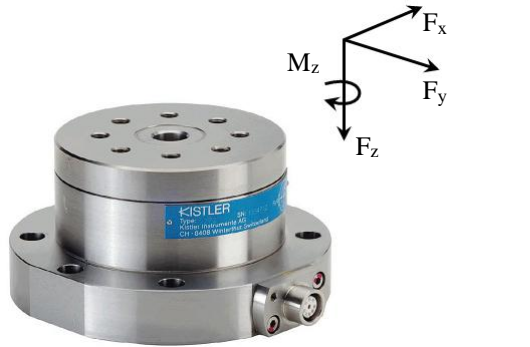
Çizelge 3.3. Çalışmada kullanılan işleme şartları

<b>Makine</b>	Johnford VMC-550 Fanuc Serisi O-M Bilgisayarlı sayısal kotrollü (CNC, Computer Numerical Control) düşey işleme merkezi
<b>Matkaplar</b>	Ø 8 HSS matkap, Ø 8 karbür matkap, Ø 8 TiAlN kaplamalı karbür matkap
<b>İş Parçası Malzemesi</b>	Al-%10 B <sub>4</sub> C, Al-%15 B <sub>4</sub> C ve Al-%25 B <sub>4</sub> C
<b>Devir sayısı</b>	1000 dev/dak, 1500 dev/dak, 2000 dev/dak ve 2500 dev/dak
<b>İlerleme hızı</b>	0,1 mm/dev, 0,2 mm/dev ve 0,3 mm/dev
<b>Soğutucu</b>	Kullanılmadı

Deneyleerde, devir sayısı ve ilerleme hızı gibi girdi parametreleri kullanılarak, bu parametrelerin kesme kuvvetleri, yüzey pürüzlülüğü, takım aşınması ve delme sıcaklığı gibi çıktı parametrelerinin üzerine etkisi araştırılmıştır.

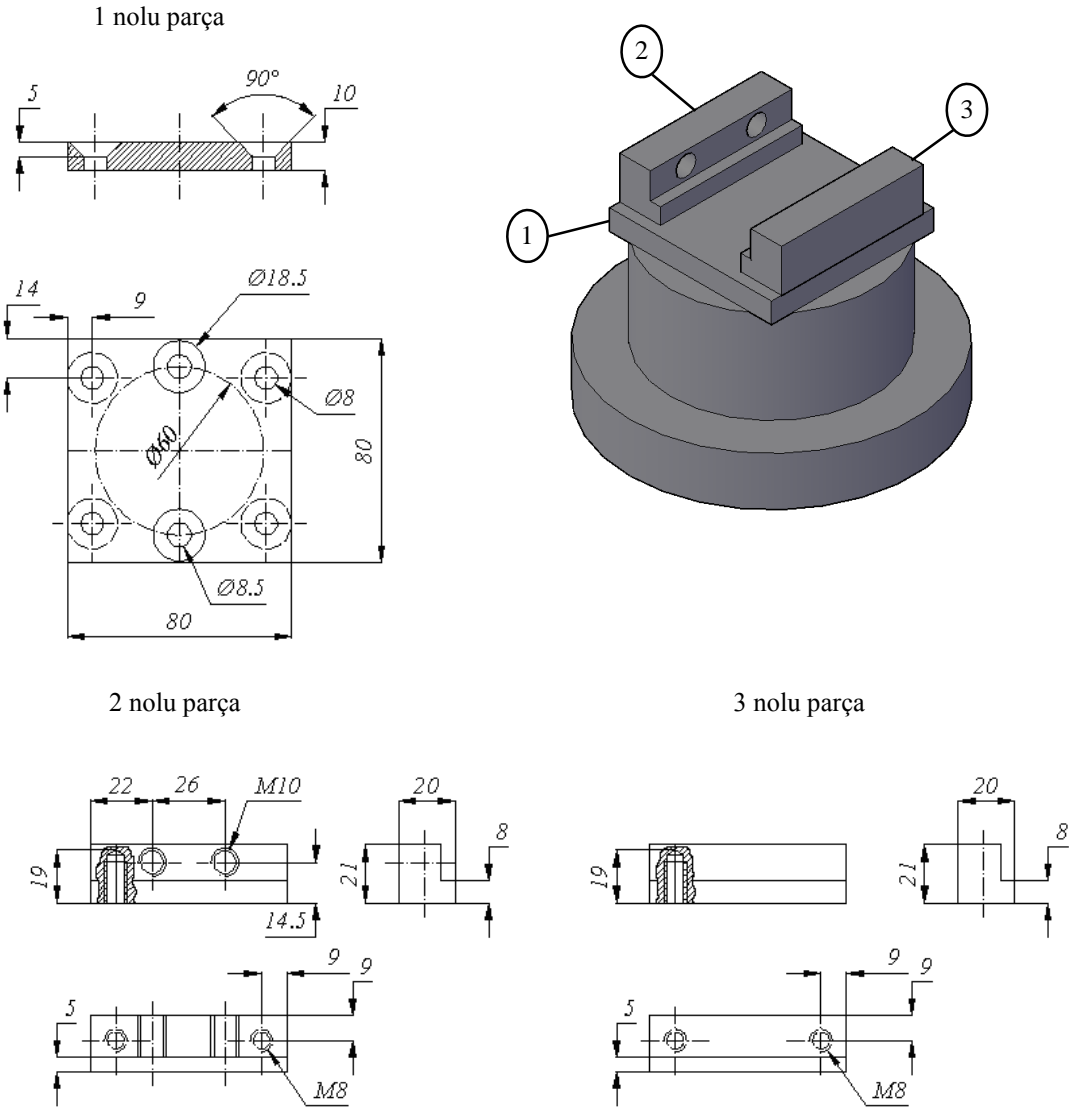
### 3.3.3. İlerleme kuvveti ve kesme momentinin ölçümü

Delme esnasında oluşan ilerleme kuvvetini ve kesme momentini ölçmek için KISTLER 9272 dinamometre kullanılmıştır (Resim 3.8).

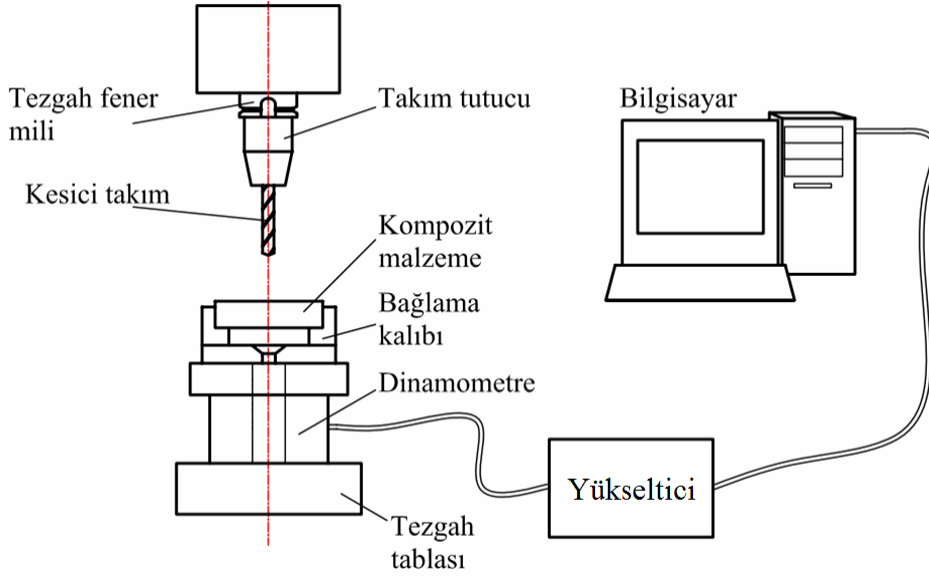
	Ölçme Aralığı Fx, Fy	(kN)	-5...5
	Fz	(kN)	-5...20
Mz	(kNm)	-0,2...0,2	
Eksen Sayısı			4
Çalışma Sıcaklık Aralığı	(°C)		0...70
Yükseklik	(mm)		70
Dış Çapı	(mm)		100
Ağırlık	(kg)		4,2

Resim 3.8. Kistler 9272 dinamometre ve teknik özellikleri

Kistler 9272 dinamometre üzerine üretilen kompozit malzemeyi bağlamak için bağlama kalıbı tasarlanmış ve üretilmiştir (Şekil 3.4). Tasarlanan bağlama kalıbı, tezgâh tablasına monte edilen dinamometre üzerine bağlanmıştır (Bkz. Resim 3.7). Kistler Dynoware yazılımı aracılığı ile farklı devir sayısı ve ilerleme hızı gibi girdi parametreleri kullanılarak oluşan ilerleme kuvveti ve kesme momenti değerleri ölçülmüş ve bilgisayar ortamında kaydedilmiştir. Şekil 3.5’de delme deneylerinde kullanılan sistemin kurulumu, şematik olarak anlatılmıştır.

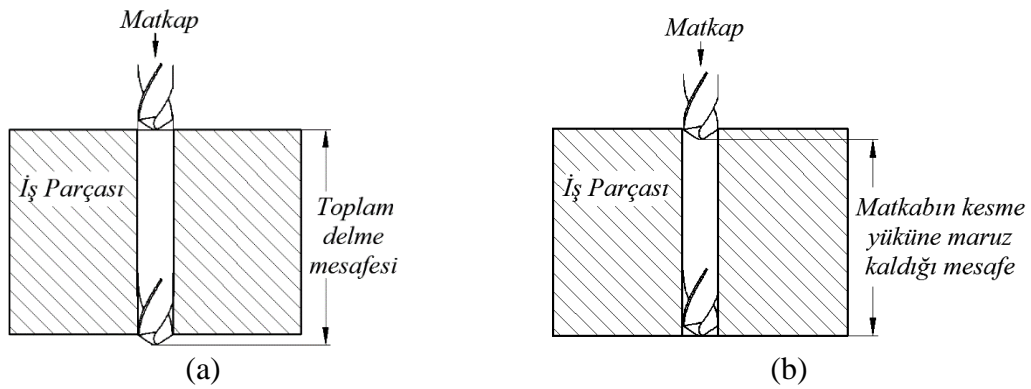


Şekil 3.4. Kompozit malzemeyi dinamometre üzerine tespit etmek için tasarlanmış bağlama kalıbı ve ölçüleri



Şekil 3.5. Kesme kuvvetlerini ölçme düzeneğinin şematik gösterimi

Yapılan ölçüm değerlerinin ortalama değeri alınırken, matkap uçunun tamamen kompozit malzeme içerisinde olması dikkate alınmıştır. Bunun için her bir devir sayısında ve ilerleme hızında, matkap ucundaki konik kısmın parçaya girmesi ve çıkması için geçen süreler toplam kesme süresinden çıkartılmıştır. Şekil 3.6a'da, hesaplanan toplam delme süresine ait mesafe görülmektedir. Şekil 3.6b'de ise her bir devir sayısında ve ilerleme hızında, ortalama ilerleme kuvveti ve kesme momenti değerlerinin hesaplanmasında kullanılan süreye ait mesafe görülmektedir.



Şekil 3.6. (a) Toplam delme mesafesi (b) matkabın kesme yüküne maruz kaldığı mesafe

### 3.3.4. Yüzeý pürüzlülüğünün ölçümü

Deliklerin yüzeý pürüzlülük değerlerini ölçmek için Mitutoyo SJ-201 pürüzlülük ölçüm cihazı kullanılmıştır (Resim 3.9). Delinen her bir delik için delik ekseninde dört farklı noktadan ölçüm yapılmıştır. Ölçüm sonuçları ve grafikleri bilgisayar ortamında kayıt edilmiştir. Delinen deliklerin yüzeýleri SEM’de incelenmiştir.

	Hız	Ölçme: 0,25 mm/s, 0,5 mm/s Geri dönme hızı: 0,8 mm/s
	Ölçme Aralığı (X eksenini)	12,5 mm
	Ölçme Aralığı ( $\mu\text{m}$ )	350 $\mu\text{m}$ (-200 $\mu\text{m}$ -150 $\mu\text{m}$ )
	Ölçme İğnesi	Elmas koni
	Ölçme Kuvveti	0,75 mN
	Pürüzlülük Standardı	JIS, DIN, ISO, ANSI
	Değerlendirme Uzunluğu (L)	0,25 mm; 0,8 mm; 2,5 mm

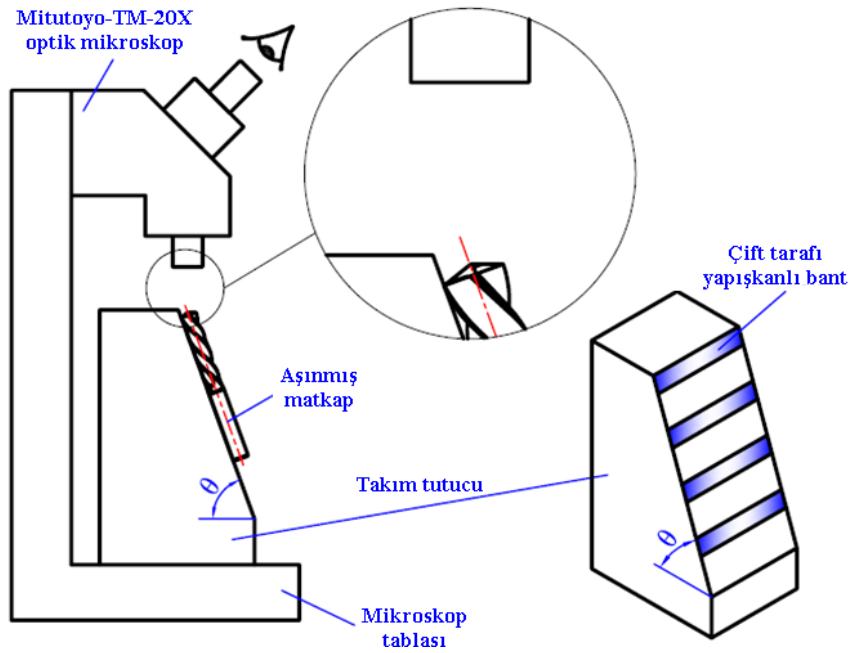
Resim 3.9. Mitutoyo SJ-201 yüzeý pürüzlülük ölçüm cihazı ve teknik özellikleri

### 3.3.5. Takım aşınmasının ve delik ölçüsünün ölçümü

Yüzeý pürüzlülüğü değerleri ölçüldükten sonra, matkap üzerinde oluşan serbest yüzeý aşınması değerleri ölçülmüştür. Kesici takımında oluşan aşınma değerlerinin ölçümü için, 0,005 mm hassasiyetinde Mitutoyo TM-505 takım üretici mikroskobu kullanılmıştır. Matkabın kesici ağızları boyunca oluşan serbest yüzeý aşınmasını doğru olarak ölçebilmek için, kesici ağızların yatayla paralel hale getirilmesi gerekmektedir. Bu amaçla, HSS matkap için 67,5° ve karbür matkaplar için 70°’lik özel bir takım tutucu sistem geliştirilmiştir (Şekil 3.7). Bu platformun üzerine matkabı tutması için çift taraflı bant yapıştırılmıştır (Resim 3.10 ve Şekil 3.7). Benzer bir yöntem, Ahamed ve diğerleri, (2010) tarafından da kullanılmıştır [1]. Her bir matkapta oluşan serbest yüzeý aşınması ile köşe aşınması değerleri ölçülmüş ve kayıt edilmiştir. Matkapta oluşan aşınma mekanizmaları SEM’de incelenmiştir.



Resim 3.10. TiAlN kaplamalı karbür matkapta oluşan aşınma değerinin ölçümü



Şekil 3.7. Matkapta, serbest yüzey aşınma miktarının ölçülmesi, (HSS takımlar için  $\theta = 67,5^\circ$ ), (Karbür takımlar için  $\theta = 70^\circ$ )

Delik çapı ölçülerini kontrol etmek amacıyla, ilk kez kullanılan matkaplarla delinen tüm delikler ABERLINK-AXIOM II 965 CNC CMM tezgâhında ölçülmüştür. Ölçme işlemi yapılırken, matkabin deliğe girişinde dalma yapması ve çıkışında deliği patlatarak çıkması nedeniyle, bu kısımlar ölçme hatasına neden olacağından ihmal edilmiştir. Bu nedenle 12

mm uzunluğundaki deliğin giriş kısmından 5 mm ve çıkış kısmından 5 mm mesafede olmak üzere, her delik için iki adet ölçüm gerçekleştirilmiş ve kaydedilmiştir.

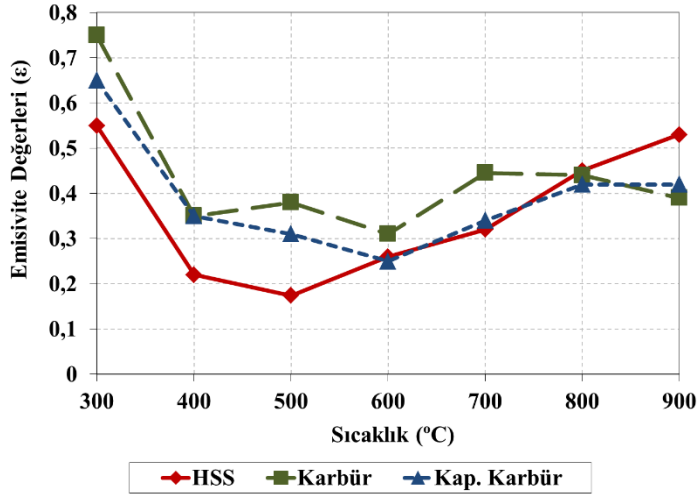
### 3.3.6. Kesici takım üzerinde oluşan sıcaklıkların ölçülmesi

Soğutma sıvısı kullanılmadan yapılan talaş kaldırma işleminde, kesme parametreleri, kesici takım ve iş parçası malzemesi gibi değişkenlerin, işleme süreçlerinin performansında önemli rol oynayan kesme sıcaklıkları üzerindeki etkisini anlamak için iki tür ölçme yöntemi kullanılır. Bunlardan ilki temaslı ölçüm tekniği, diğeri ise temassız ölçme tekniğidir [90].

Sıcaklık ölçümünde kullanılan en yaygın temaslı ölçüm cihazları ısı çiftleridir. Bu tarz ölçme yönteminde ısı çiftler, kesici kenara mümkün olduğu kadar yakın yerleştirilebilecek şekilde, iş parçasına veya kesici takıma delinen küçük çaplı deliğe yerleştirilir. Bu türden ölçme yönteminin başarıya ulaşması, ısı çiftin yerleştirileceği deliğin doğru bir şekilde konumlandırılmasına bağlıdır [90]. Özellikle seramik gibi bazı kesici takım malzemelerinin kırılabilirliği ve temaslı tip ısı çiftlerin sıcaklığı ölçmek amacıyla gömülebilmesini zorlaştırması, bu yöntemin kullanımını sınırlandırmaktadır [90].

Yukarıda anılan nedenlerden dolayı, kızıl ötesi algılama yöntemiyle sıcaklık ölçen sistemler geliştirilmiştir. Bu tarz ölçme yönteminde, sıcaklık ölçüm cihazı belirli bir mesafeden cismin yaydığı termal enerjiye göre sıcaklık ölçümünü gerçekleştirebilir ve bu sayede ısı çiftler gibi sıcaklığı ölçülecek olan kesici takıma temas etmesine gerek kalmaz [90].

B<sub>4</sub>C<sub>p</sub> esaslı alüminyum kompozit malzemeler farklı kesme parametreleri altında delinirken oluşan sıcaklıkların lazer pirometre ile ölçülebilmesi için, kesici takım malzemelerinin emisivite değerlerinin önceden belirlenmesi gerekmektedir. Her malzeme farklı emisivite değerlerine sahiptir. Emisivite, verilen sıcaklıkta cisim tarafından yayınlanan enerjinin, aynı sıcaklıkta mükemmel ışığı (kara cisim) tarafından yayınlanan enerjiye oranı olarak tanımlanmaktadır [90]. Temassız ölçüm cihazı olan pirometreler, farklı malzemelerin sahip olduğu farklı emisivite değerlerine göre sıcaklık ölçme işlemini gerçekleştirmektedirler [90]. Bu sebeple 300-900 °C sıcaklıkları arasında önceden ısıtılmış elektrik fırınında HSS, karbür ve TiAlN kaplamalı karbür matkapların emisivite değerleri ölçülmüş ve kaydedilmiştir. Şekil 3.8'de HSS, karbür ve TiAlN kaplamalı matkapların emisivite değerleri grafik halinde görülmektedir.

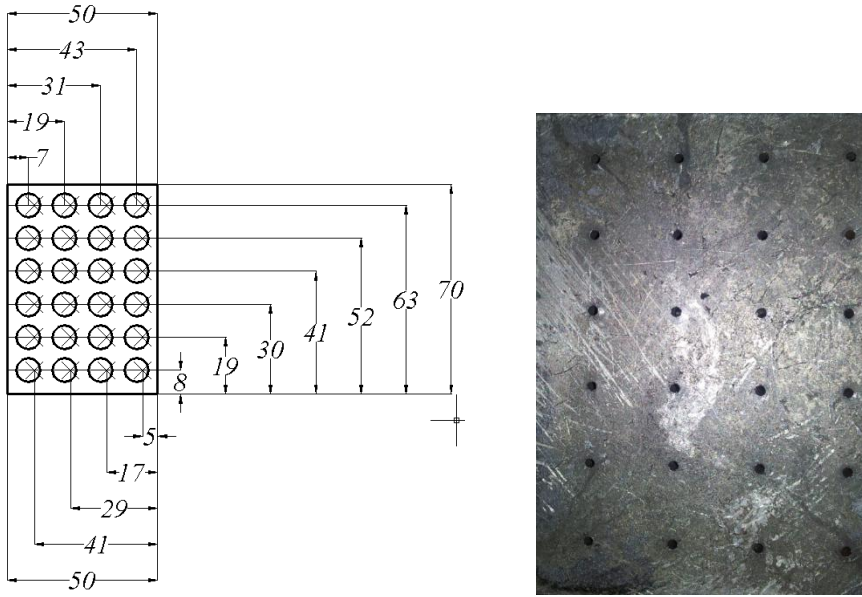


Şekil 3.8. HSS, karbür ve TiAlN kaplamalı karbür matkapların emisivite değerleri

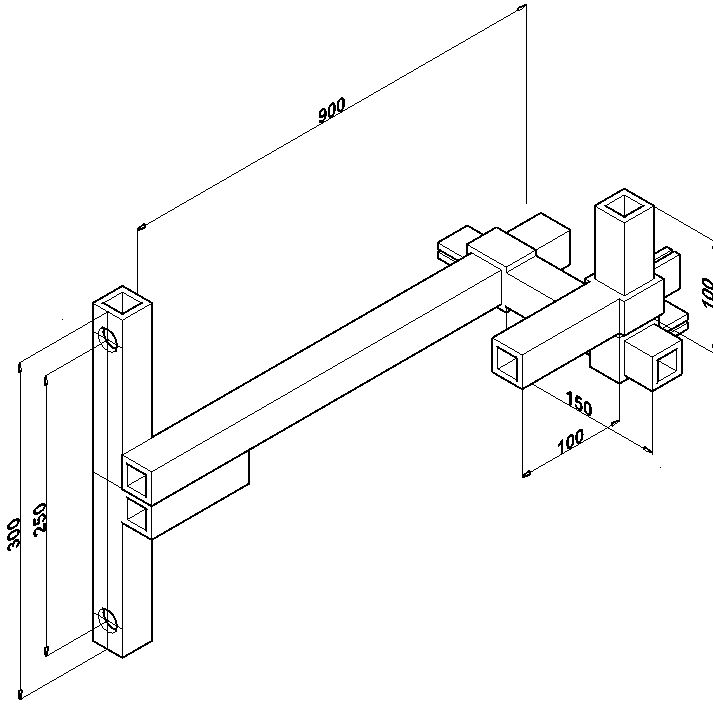
Lazer pirometrenin kesme esnasında oluşan sıcaklığı ölçebilmesi için, belirli bir mesafede sabitlenip, sıcaklığı ölçülecek olan noktaya odaklanması gerekmektedir. Delme esnasında matkap iş parçasına dalma yapmakta ve kesme sıcaklığının ölçüleceği kesici kenarlar parçanın içerisinde kalmaktadır. Bu nedenle kompozit malzemeye boydan boya delik delinmesi gerekmektedir. Bunun için öncelikli olarak 1,2 mm çapında karbür matkaplar kullanılmıştır. Fakat kompozit malzeme içeriğindeki  $B_4C_p$  seramik takviyeleri sebebiyle, kompozit malzemelere karbür matkaplarla delik delinememiştir. Bu durum temaslı ölçme tekniği ile çalışan ısı çiftlerinin kullanımını imkânsız hale getirmiştir. Çünkü ısı çiftlerinin sağlıklı bir ölçüm yapabilmeleri, onların hassas bir şekilde yerleştirilmelerine olanak sağlayacak olan deliğin delinmesine bağlıdır. Daha sonra deliklerin delinebilmesi için su jeti kullanılmıştır. Kompozit malzemeler su jeti ile 1,1 mm çapındaki nozul kullanılarak delindiğinde, kompozit malzeme üzerinde 1,8 mm ile 2,1 mm aralığında delikler üretilmiştir. Delinecek olan deliğin 8 mm çapında olması ve 2 mm çapındaki malzemenin önceden boşaltılması sebebiyle, bu durumun delme esnasında oluşacak sıcaklığın azalmasına neden olacağı düşünülmüştür. Kullanılan pirometrenin odak çapı 0,5 mm olduğundan dolayı, kompozit malzeme üzerine 0,5 mm çapında delik delinmesi yeterli olmaktadır. Su jeti ile kompozit malzeme üzerinde 20 s gibi kısa bir sürede delik delinmesine rağmen, delinen deliklerin çaplarının büyük olması nedeniyle deliklerin delinmesinde su jeti tercih edilmemiştir. Son olarak hızlı delik delme tezgâhında, tel elektrot kullanılarak delikler delinmeye çalışılmıştır. Bu yöntemde ise deliğin delinebilmesi için iş parçasının metal veya metal alaşımlı olması gerekmektedir. Elektrot kullanılarak deliklerin delinmesinde, kompozit malzemenin alüminyum alaşımlı matristen üretilmesi bir avantaj, fakat



içeriğindeki takviyenin seramik olması ise bir dezavantajdı. Kompozit malzeme içeriğindeki seramikler birer yalıtkan vazifesi gördüğü için delme işlemini hem zorlaştırmış hem de yavaşlatmıştır. Elektrot kompozit malzemeye daldığında, seramiklerin etrafını çevreleyen matrisi, elektriksel ark yöntemiyle boşaltmış ve seramikler kesilmeden deliğin üzerinde birikmiştir. Elektrodun içerisinden geçen basınçlı soğutma sıvısı, boşta kalan seramik tozlarını deliğin içerisinden, deliğin dışına doğru iterek uzaklaştırmıştır. Elektrodun içerisinden geçen basınçlı soğutma sıvısının seramik tozlarını delik içerisinden uzaklaştırması ile kompozit malzemeler delinebilmiştir. Bu yöntemle, pirometrenin delme esnasında matkabın kesici kenarlarını görebilmesi amacıyla, kompozit malzemeye hızlı delik delme tezgâhında 1 mm çapında yirmidört adet ön delik delinmiştir (Şekil 3.9). Daha sonra deneylerin gerçekleştirileceği bağlama sistemi tasarlanmış ve üretilmiştir. Şekil 3.10'da sıcaklık ölçümlerinin gerçekleştirilebilmesi için üretilen bağlama sistemi görülmektedir.

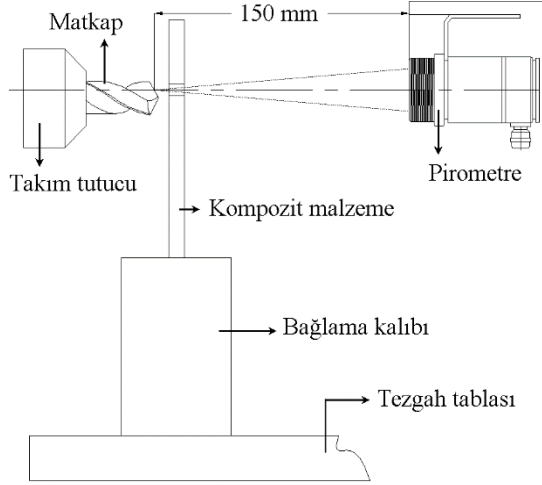


Şekil 3.9. Hızlı delik delme tezgâhında 24 adet delik delinmiş kompozit malzeme



Şekil 3.10. Pirometreyi tezgâh gövdesine bağlama sistemi

Şekil 3.10'da görülen bağlama sistemi, DEFUM DBM-100 CNC borvek tezgahının gövdesine bağlanmıştır. Bağlama sisteminin sol tarafı tezgâh gövdesine monte edilmiş, sağ tarafına ise lazer pirometre takılmıştır. Pirometreye ait Compact Connect yazılımı kişisel bilgisayara yüklenmiştir. Pirometre ile kişisel bilgisayar arasındaki USB (Universal Serial Bus, evrensel seri veriyolu) bağlantısı yapılmıştır. Şekil 3.11'de görüldüğü gibi pirometre ile matkabın kesici kenarının orta noktası arası 150 mm olacak şekilde mesafe ayarı yapılmıştır. Daha sonra lazer pirometreden çıkan iki adet kızılötesi ışının, kompozit malzeme üzerindeki ön deliklerden geçerek, matkabın kesici ağzının orta noktasını görecek biçimde gönye ayarı yapılmıştır (Şekil 3.11).

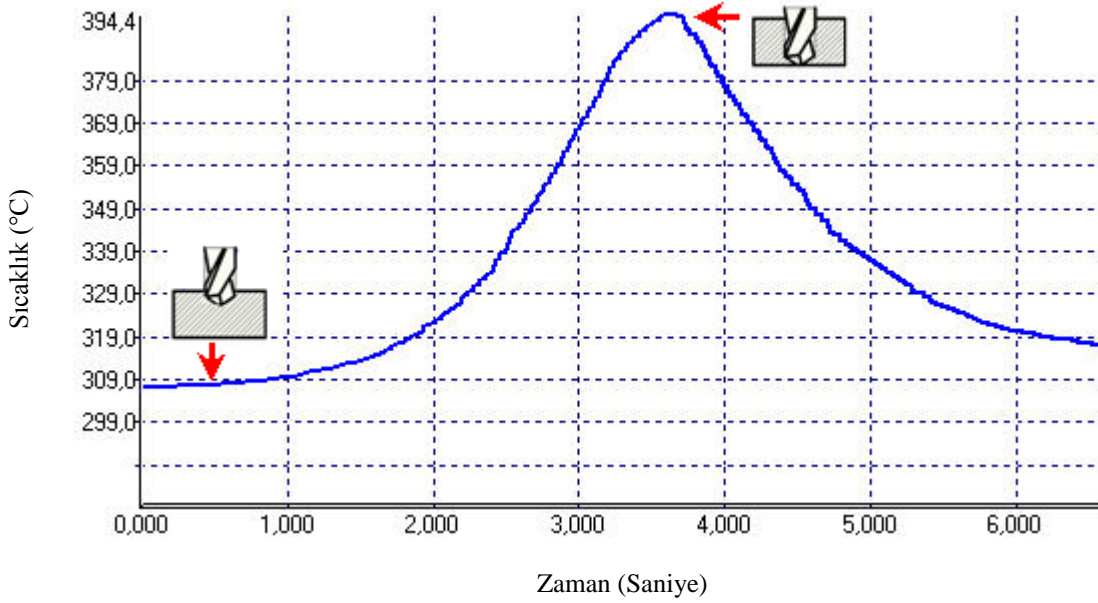


Şekil 3.11. Pirometre ile matkap arasındaki mesafenin ayarlanması

Sistem hazır hale getirildikten sonra, Şekil 3.9’da verilen kompozit malzemenin CNC programı, DEFUM DBM-100 CNC borvek tezgahının bilgisayarına girilmiştir. Tezgâh kapasitesi 1600 dev/dak olduğundan dolayı, 1000 dev/dak ve 1500 dev/dak’da delme deneyleri gerçekleştirilmiş ve ölçülen sıcaklıklar kaydedilmiştir. Kalan deneyler (2000 dev/dak ve 2500 dev/dak) Focus Seiki DL (5) 450 CNC kontrollü 5 eksenli dikey işleme merkezinde tamamlanmıştır. Herbir ölçme işlemi öncesinde emisivite değerleri pirometreye girilmiş ve daha sonra sıcaklık ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Resim 3.11’de %25 B<sub>4</sub>C<sub>p</sub> kompozitin karbür matkap ile 1000 dev/dak devir sayısında 0,1 mm/dev ilerleme hızında delinmesi ile elde edilen sıcaklık ölçümü sonuç grafiğinin ekran görüntüsü görülmektedir. Çizelge 3.4’de kullanılan lazer pirometrenin, teknik özellikleri verilmiştir.

Çizelge 3.4. Optris 3MH2 temassız sıcaklık ölçüm cihazı teknik özellikleri

Sıcaklık ölçüm aralığı	200-1200 °C
Ek soğutma gerektirmeden çalıştığı sıcaklık	-20-85 °C
Dalga bandı aralığı	2,3 µm
Optik çözünürlük	300:1
Sistem güvenilirliği*	±( Okunan değerin %0,3 + 2 °C)
Tekrarlanabilirlik*	±( Okunan değerin %0,1 + 1 °C)
Sıcaklık çözünürlüğü	0,1 °C
Tepki süresi	1 ms
Emisivite aralığı	0,1-1,1
Yazılım	Optris Compact Connect
*( 23±5 °C ortam sıcaklığında)	

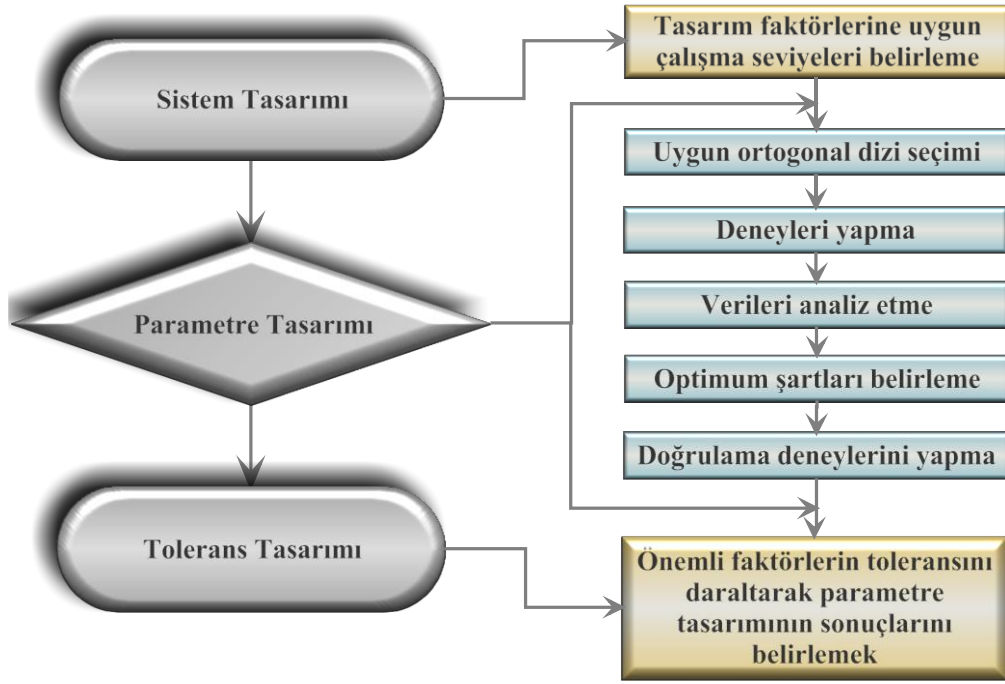


Resim 3.11. %25 B<sub>4</sub>C<sub>p</sub> kompozitin karbür matkap ile 1000 dev/dak devir sayısında 0,1 mm/dev ilerleme hızında delinmesi ile elde edilen sıcaklık ölçümü sonuç grafiğinin ekran görüntüsü

### 3.4. Taguchi Metodu

Performans, kalite ve maliyet açısından önemli avantajlar sağlayan Taguchi metodu, deneysel çalışmalarda sonuca etki eden faktörlerin optimize edilmesinde kullanılmaktadır [91]. Dr. Genichi Taguchi tarafından ileri sürülen bu sistematik yaklaşım üç aşamadan oluşmaktadır [27]. Bu aşamalar sırasıyla sistem tasarımı, parametre tasarımı ve tolerans tasarımıdır (Şekil 3.12).

Çalışmanın bu kısmında Taguchi deneysel tasarımı yardımıyla, devir sayısının, ilerleme hızının, farklı takviye oranına sahip kompozit malzemenin, kesici takım malzemesinin ve bunların etkileşimlerinin delme kuvvetleri, serbest yüzey aşınması, yüzey pürüzlülüğü ve kesici takım sıcaklığı üzerindeki etkileri belirlenmiş ve sistemin optimizasyonu gerçekleştirilmiştir. Bu nedenle, Taguchi deneysel tasarımının ilk aşamasında seçilen faktörler ve bu faktörlere ait seviyeler Çizelge 3.5’de görülmektedir.



Şekil 3.12. Taguchi tasarım süreci [27]

Çizelge 3.5. Deneyleerde kullanılan faktörler ve seviyeleri

İşleme Parametreleri	Birimler	Seviyeler		
		Seviye 1	Seviye 2	Seviye 3
Takviye Oranı	(%)	% 10	% 15	% 25
İlerleme Hızı	(mm/dev)	0,1	0,2	0,3
Devir sayısı	(dev/dak)	1000	1500	2000
Matkap Malzemesi		HSS	Karbür	TiAlN kaplamalı karbür

İkinci aşamada, belirlenmiş olan faktör ve seviyelere uygun Taguchi ortogonal dizisinin seçilmesi yer almaktadır. Eğer faktörlerin etkileşimleri söz konusu olmasaydı, 9 satırlı, 4 faktörlü ve üçüncü seviyeden, Taguchi'nin  $L_9 (3^4)$  ortogonal dizisi seçilecekti [92]. Fakat faktörlerin etkileşimleri de söz konusu olduğu için, 27 satırlı, 4 faktörlü ve üçüncü seviyeden, Taguchi'nin  $L_{27} (3^{13})$  ortogonal dizisi seçilmiştir [93]. Taguchi tarafından önceden belirlenmiş olan bu dizi 13 sütundan oluşmaktadır. Çizelge 3.6'da Taguchi'nin  $L_{27}$  ortogonal dizisine ait tablo görülmektedir. Dizinin sütunlarına deneyde kullanılan faktörler ile etkileşimleri, satırlarına ise her bir faktörün seviyeleri atanmaktadır. Böylece Taguchi yöntemine ait deney planı ortaya çıkmaktadır.

Çizelge 3.6. Deneyde kullanılan Taguchi'nin  $L_{27}$  ortogonal dizisi [91]

Deney No	Sütun No												
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
	A	B	AxB	AxB	C	AxC	AxC	BxC	D	AxD	BxC	BxD	CxD
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2
3	1	1	1	1	3	3	3	3	3	3	3	3	3
4	1	2	2	2	1	1	1	2	2	2	3	3	3
5	1	2	2	2	2	2	2	3	3	3	1	1	1
6	1	2	2	2	3	3	3	1	1	1	2	2	2
7	1	3	3	3	1	1	1	3	3	3	2	2	2
8	1	3	3	3	2	2	2	1	1	1	3	3	3
9	1	3	3	3	3	3	3	2	2	2	1	1	1
10	2	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
11	2	1	2	3	2	3	1	2	3	1	2	3	1
12	2	1	2	3	3	1	2	3	1	2	3	1	2
13	2	2	3	1	1	2	3	2	3	1	3	1	2
14	2	2	3	1	2	3	1	3	1	2	1	2	3
15	2	2	3	1	3	1	2	1	2	3	2	3	1
16	2	3	1	2	1	2	3	3	1	2	2	3	1
17	2	3	1	2	2	3	1	1	2	3	3	1	2
18	2	3	1	2	3	1	2	2	3	1	1	2	3
19	3	1	3	2	1	3	2	1	3	2	1	3	2
20	3	1	3	2	2	1	3	2	1	3	2	1	3
21	3	1	3	2	3	2	1	3	2	1	3	2	1
22	3	2	1	3	1	3	2	2	1	3	3	2	1
23	3	2	1	3	2	1	3	3	2	1	1	3	2
24	3	2	1	3	3	2	1	1	3	2	2	1	3
25	3	3	2	1	1	3	2	3	2	1	2	1	3
26	3	3	2	1	2	1	3	1	3	2	3	2	1
27	3	3	2	1	3	2	1	2	1	3	1	3	2

Taguchi tasarım sürecinin dördüncü aşaması, Taguchi'nin  $L_{27}$  ( $3^{13}$ ) ortogonal dizisine göre yapılan deneylerden elde edilen verilerin analiz edilmesidir. Taguchi metodunda iki analiz yöntemi kullanılmaktadır. Bunlardan ilki S/N oranı, diğeri ise ANOVA istatistiksel hesaplama yöntemidir. Taguchi metodunda, deneysel değerler ve arzu edilen değerler arasındaki sapmayı hesaplamak için kayıp fonksiyonu kullanılmaktadır [27]. Bu kayıp fonksiyonu daha sonra S/N oranına çevrilmektedir. Üç değişik S/N oranı mevcuttur. Bunlar sırasıyla, “en düşük daha iyidir”, “nominal daha iyidir” ve “en büyük daha iyidir” [27]. Yapılan bu çalışmada en düşük, delme kuvvetleri, serbest yüzey aşınması, yüzey pürüzlülüğü ve kesici takım sıcaklığı değerinin elde edilmesi arzu edildiğinden dolayı, S/N oranlarının hesaplanmasında “en düşük daha iyidir” hesaplama yöntemi seçilmiştir. Yukarıda bahsedilen üç tip kayıp fonksiyonu aşağıda açıklanmıştır.

En düşük daha iyidir

Eş. 3.1’de seçilen bu yöntemde S/N oranının hesaplanmasında kullanılan formül verilmiştir [94]. Eşitlikte verilen n değeri hesap edilen seviyedeki ölçüm sayısını,  $y_{ij}$  değeri ise ölçülen karakteristik değeri (İlerleme kuvveti veya kesme momenti) ifade etmektedir.

$$S/N \text{ oranı } (\eta) = -10 \log_{10} \left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_{ij}^2 \right) \quad (3.1)$$

Nominal daha iyidir

Eş. 3.2’de seçilen bu yöntemde S/N oranının hesaplanmasında kullanılan formül verilmiştir [94]. Eşitlikte verilen  $\mu$  değeri hesap edilen seviyedeki aritmetik ortalamayı,  $\sigma$  değeri ise ortalama kareler toplamını ifade etmektedir. Eş. 3.3’de aritmetik ortalamanın, Eş. 3.4’de ise ortalama kareler toplamının hesaplanmasında kullanılan formül verilmiştir.

$$S/N \text{ oranı } (\eta) = 10 \log_{10} \left( \sum \frac{\mu^2}{\sigma^2} \right) \quad (3.2)$$

$$\mu = \frac{y_1 + y_2 + y_3 + \dots + y_n}{n} \quad (3.3)$$

$$\sigma = \frac{\sum (y_i - \bar{y})^2}{n-1} \quad (3.4)$$

En büyük daha iyidir

Eş. 3.5’de seçilen bu yöntemde S/N oranının hesaplanmasında kullanılan formül verilmiştir [94].

$$S/N \text{ oranı } (\eta) = -10 \log_{10} \left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_{ij}^2} \right) \quad (3.5)$$

Bu aşamada, 27 adet deney sonucu “En düşük daha iyidir” hesaplama yöntemi ile hesaplanır ve herbir deney sonucuna ait S/N oranları elde edilir. Kontrol faktörleri için her bir seviyenin S/N oranlarının aritmetik ortalaması alınır ve her bir kontrol faktörünün seviyelerine ait ortalama S/N oranı elde edilir. Her bir faktörün maksimum S/N oranı ile minimum S/N

oranı birbirinden çıkartılarak fark değerleri elde edilir. Sonuçta elde edilen fark değerleri büyükten küçüğe doğru sıralanır, her bir faktörün, delme kuvvetleri, serbest yüzey aşınması, yüzey pürüzlülüğü ve kesici takım sıcaklığı üzerindeki etki derecesi ortaya çıkar.

Beşinci aşamada optimum şartların belirlenmesi gerekmektedir. Optimum işleme parametreleri, her faktörün en büyük S/N oranına sahip olduğu seviyedir [27].

Altıncı aşamada doğrulama deneylerinin yapılması gerekmektedir. Bu sebeple daha önceden yapılan deney sonuçları ile MİNİTAB programı kullanılarak Taguchi metodu ile tahmin edilen veriler kıyaslanmış ve hata oranları elde edilmiştir. MİNİTAB programının “Taguchi sonuçlarını tahmin et” (Predict Taguchi Results) kısmından, her bir deney için S/N oranları elde edilmiştir. MİNİTAB programı ile tahmin edilen S/N oranları, Eş. 3.6 yardımıyla da elde edilebilmektedir [27, 92, 94, 95]. Formüldeki  $\hat{\eta}$  optimum seviyede tahmin edilen S/N oranı sonucunu,  $\eta_m$  S/N oranlarının toplamının ortalamasını,  $\bar{\eta}_i$  optimum seviyedeki S/N oranının ortalamasını, k ise performans karakteristiğini önemli derecede etkileyen işleme parametrelerinin sayısını ifade etmektedir.

$$\hat{\eta} = \eta_m + \sum_{i=1}^k (\bar{\eta}_i - \eta_m) \quad (3.6)$$

Daha sonra, her bir deneye ait tahmin edilen S/N oranları, Eş. 3.7 yardımıyla deney sonuçlarının hesaplanmasında kullanılmıştır [94]. Formüldeki “ $Y_{\text{tahmin}}$ ” değeri, S/N değerine karşılık gelen deney sonucunu (delme kuvvetleri, serbest yüzey aşınması, yüzey pürüzlülüğü ve kesici takım sıcaklığı değeri) ifade etmektedir.

$$Y_{\text{tahmin}} = 10^{\left(\frac{-(S/N)}{20}\right)} \quad (3.7)$$

### 3.5. Varyans Analizi (ANOVA)

Çalışmanın bu kısmında her bir faktörün ve etkileşimlerinin anlamlı olup olmadıkları ve anlamlılık seviyeleri belirlenmiştir [96]. Taguchi deneysel tasarımına ait ANOVA tablolarının oluşturulmasına, her bir faktörün Sd’lerinin (Serbestlik derecesi) belirlenmesi



ile başlanmaktadır. Serbestlik derecesi, Eş. 3.8 yardımı ile hesaplanmaktadır [94, 97]. Formüldeki “n” değeri her bir faktörün sahip olduğu seviyeyi ifade etmektedir.

$$Sd_A = n - 1 \quad (3.8)$$

Her bir faktörün birbiri ile etkileşiminin sahip olduğu serbestlik derecesi ise, Eş. 3.9 yardımı ile hesaplanmaktadır [94, 97].

$$Sd_{AxB} = Sd_A \cdot Sd_B \quad (3.9)$$

Toplam serbestlik derecesi, Eş. 3.10 yardımı ile hesaplanmaktadır [94, 97]. Formüldeki “N” yapılan gözlem sayısını ifade etmektedir.

$$Sd_T = N - 1 \quad (3.10)$$

Hatanın serbestlik derecesi ( $Sd_e$ ), Eş. 3.11 yardımı ile hesaplanmaktadır [94, 97].

$$Sd_e = Sd_T - Sd_A - Sd_B - Sd_C - Sd_{AxB} - Sd_{AxC} - Sd_{BxC} \quad (3.11)$$

Her bir faktör için kareler toplamı (KT), Eş. 3.12 yardımı ile hesaplanmaktadır [94, 97]. Formüldeki “a” A faktörü için yapılan gözlem sayısını, “ $n_{Ai}$ ” A faktörü içerisindeki her bir seviyeye ait kademe sayısını, “T” yapılan gözlemlerin toplamını ifade etmektedir.

$$KT_A = \left[ \sum_{i=1}^a \frac{A_i^2}{n_{Ai}} \right] - \frac{T^2}{N} \quad (3.12)$$

Faktörlere ait etkileşimlerin kareler toplamı, Eş. 3.13 yardımı ile hesaplanmaktadır [94, 97]. Formüldeki “ab” AxB etkileşimi için yapılan gözlem sayısını, “ $n_{AxBi}$ ” AxB etkileşimi içerisindeki her bir seviyeye ait kademe sayısını ifade etmektedir.

$$KT_{AxB} = \left[ \sum_{i=1}^{ab} \frac{AxB_i^2}{n_{AxBi}} \right] - \frac{T^2}{N} - KT_A - KT_B \quad (3.13)$$

Toplama ait genel kareler toplamı (GKT), Eş. 3.14 yardımı ile hesaplanmaktadır [94, 97]. Formüldeki “ $y_i$ ” i. gözlem değerini ifade etmektedir.

$$GKT = \left[ \sum_{i=1}^N y_i^2 \right] - \frac{T^2}{N} \quad (3.14)$$

Hata değerine ait kareler toplamı ( $KT_e$ ), Eş. 3.15 yardımı ile hesaplanmaktadır [94, 97].

$$KT_e = GKT - KT_A - KT_B - KT_C - KT_{AxB} - KT_{AxC} - KT_{BxC} \quad (3.15)$$

Her bir faktörün varyansı (Var), Eş. 3.16 yardımı ile hesaplanmaktadır [94, 97].

$$Var_A = \frac{KT_A}{Sd_A} \quad (3.16)$$

Faktörlere ait etkileşimlerin varyansı, Eş. 3.17 yardımı ile hesaplanmaktadır [94, 97].

$$Var_{AxB} = \frac{KT_{AxB}}{Sd_{AxB}} \quad (3.17)$$

Hata değerine ait varyans, Eş. 3.18 yardımı ile hesaplanmaktadır [94, 97].

$$Var_e = \frac{KT_e}{Sd_e} \quad (3.18)$$

Her bir faktöre  $F_{test}$  değeri, faktöre ait varyans değerinin hataya ait varyans değerine bölünmesi ile elde edilmektedir. Etkileşime ait  $F_{test}$  değeri ise, etkileşime ait varyans değerinin hataya ait varyans değerine bölünmesi ile elde edilmektedir. Eş. 3.19’da faktöre ait  $F_{test}$  değerinin hesaplanmasında kullanılan formül, Eş. 3.20’de ise etkileşime ait  $F_{test}$  değerinin hesaplanmasında kullanılan formül görülmektedir [94, 97].

$$F_{test_A} = \frac{Var_A}{Var_e} \quad (3.19)$$

$$F_{\text{test}_{AxB}} = \frac{\text{Var}_{AxB}}{\text{Var}_e} \quad (3.20)$$

Her bir faktöre ve etkileşimlerine ait  $F_{\text{test}}$  değerleri hesaplandıktan sonra, F-tablo değeri ile karşılaştırılır. F-tablo değeri  $f_{\alpha;sa;sa_e}$  ile gösterildiğinde, “ $\alpha$ ” anlamlılık düzeyini, “Sd” her faktörün veya etkileşimlerinin serbestlik derecesini ve  $Sd_e$  ise hatanın serbestlik derecesini ifade etmektedir. Buna göre hatanın serbestlik derecesi 6 ise, serbestlik derecesi 2 olan faktörlerin 0,05 anlamlılık düzeyinde F-tablo değeri 5,14 ve serbestlik derecesi 4 olan etkileşimlerin 0,05 anlamlılık düzeyinde F-tablo değeri 4,53 olarak tespit edilmiştir.

Elde edilen ANOVA tablosunun en sağındaki sütun değerinde bulunan yüzde dağılım (YD), Eş. 3.21 yardımı ile hesaplanmaktadır [94]. Etkileşimlerin YD’ları hesaplanması istendiğinde Eş. 3.21’deki  $KT_A$  değerinin yerine etkileşime ait KT değeri yazılmaktadır. Örneğin AxB etkileşimi için,  $KT_A$ ’nın yerine  $KT_{AxB}$  değeri yazılmaktadır.

$$YD = \frac{KT_A \cdot 100}{GKT} \quad (3.21)$$

Herhangi bir parametrenin anlamlı olup olmadığı, o parametreye ait  $F_{\text{test}}$  değeri sonuçlarının, F-tablo değeri ile karşılaştırılmasıyla elde edilmektedir [98]. Hesaplamalar sonucu elde edilen  $F_{\text{test}}$  değerinin, F-tablo değerinden büyük olması, o parametrenin etkisinin anlamlı olduğunu göstermektedir.

### 3.6. Gri İlişki Analizi

Gri ilişki analizi iki veya daha fazla sistem arasındaki ilişkiyi ölçmek için kullanılır [98, 99]. Bu sebeple çoklu performans karakteristiklerine dayalı sistemin optimizasyonu yapılırken, Taguchi tabanlı gri ilişki analizi kullanılmıştır. Buradaki amaç, iki veya daha fazla sistem için minimum değerleri elde edebilmek amacıyla, deneylerde kullanılan devir sayısı, ilerleme hızı, takviye oranı ve kesici takım malzemesi gibi faktörlere ait seviyelerin optimum değerlerini belirlemektir.

Gri ilişki analizine geçmeden önce uygun ortogonal dizinin seçilmesi gerekmektedir. Bu çalışmada faktörlerin etkileşimi söz konusu olduğundan, 27 satırlı, 4 faktörlü ve üçüncü seviyeden, Taguchi'nin  $L_{27} (3^{13})$  ortogonal dizisi seçilmiştir [93], (Bkz. Çizelge 3.6).

Birinci adım,  $L_{27} (3^{13})$  ortogonal dizisindeki çoklu performans karakteristiklerine dayalı sisteme ait değerlerin normalleştirilmesidir [15, 83, 98-100]. Normalizasyon işleminde kullanılan formüller Eş. 3.22-3.24'de verilmiştir [15, 98-100]. Bu çalışmada, optimizasyon amacıyla, en düşük delme kuvvetleri, serbest yüzey aşınması, yüzey pürüzlülüğü ve kesici takım sıcaklığı değerlerinin elde edilmesi arzu edildiğinden, normalizasyon işleminde, "En düşük daha iyidir" hesaplama yöntemi (Eş. 3.23) seçilmiştir [15, 98-100].

"En yüksek daha iyidir" durumunda normalizasyon işlemi;

$$x_i(k) = \frac{x_i^0(k) - \min x_i^0(k)}{\max x_i^0(k) - \min x_i^0(k)} \quad (3.22)$$

"En düşük daha iyidir" durumunda normalizasyon işlemi;

$$x_i(k) = \frac{\max x_i^0(k) - x_i^0(k)}{\max x_i^0(k) - \min x_i^0(k)} \quad (3.23)$$

"İdeal değer daha iyidir" durumunda normalizasyon işlemi

$$x_i(k) = 1 - \frac{|x_i^0(k) - x^0|}{\max x_i^0(k) - x^0} \quad (3.24)$$

Formülde kullanılan,  $x_i(k)$ , k. performans karakteristiğinin i. deneyine ait normalleştirme sonucunu,  $x_i^0(k)$  k. performans karakteristiğinin i. deneyine ait normalleştirilecek değeri,  $x^0$  istenilen ideal değeri,  $\max x_i^0(k)$  ve  $\min x_i^0(k)$ , k. performans karakteristiğine ait i serisindeki maksimum ve minimum değerleri ifade etmektedir [15, 98-100].

İkinci adımda, gri ilişki katsayısının hesaplanması gerekmektedir. Gri ilişki katsayısı ( $\varepsilon$ ), normalleştirilmiş ideal ve gerçek deney sonuçları arasındaki ilişkinin hesaplanmasında kullanılmaktadır. Gri ilişki katsayısı ( $\varepsilon$ ) Eş. 3.25'de verilmiştir [15, 98-100].

$$\varepsilon(x_0(k), x_i(k)) = \frac{\min_j \min_k |x_0(k) - x_j(k)| + \xi \max_j \max_k |x_0(k) - x_j(k)|}{|x_0(k) - x_j(k)| + \xi \max_j \max_k |x_0(k) - x_j(k)|} \quad (3.25)$$

Formüldeki;  $\varepsilon(x_0(k), x_i(k))$ , k. performans karakteristiğinin i. deneyine ait gri ilişki katsayısını,  $j=1,2,\dots,n$ ;  $k=1,2,\dots,m$ , n sayısı deneysel veri sayısını ve m ise gözlemlenen performans karakteristiğinin sayısını  $x_0(k)$ , referans serisini (1 alınmıştır),  $x_j(k)$ , özgül karşılaştırma serisini ifade etmektedir [15, 98-100]. Ayırt etme katsayısı  $\xi$ ,  $0 \leq \xi \leq 1$  arasında tanımlanır ve gri ilişkisel derece sonrasında oluşacak sıralamayı etkilememektedir [15, 100]. Ayırt etme katsayısı küçükse, ayırt etme kabiliyeti daha büyüktür.  $\xi$  değeri genellikle 0,5 olarak kullanılmaktadır [15, 98-100].

Gri ilişki derecesinin üçüncü adımı, gri ilişki derecesinin hesaplanmasıdır.  $\gamma(x_0, x_i)$  gri bir sistemdeki  $x_i$  serisi ile  $x_0$  serisi arasındaki geometrik benzerliğin bir ölçüsüdür [99]. Gri ilişki derecesinin hesaplanmasında kullanılan Eş. 3.26'da verilmiştir [15, 98-100].

$$\gamma(x_0, x_i) = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \varepsilon(x_0(k), x_i(k)) \quad (3.26)$$

Dördüncü adımda, kontrol faktörleri için her bir seviyenin gri ilişki derecelerinin aritmetik ortalaması alınır ve her bir kontrol faktörünün seviyelerine ait ortalama gri ilişki dereceleri elde edilir. Her bir faktörün maksimum gri ilişki derecesi ile minimum gri ilişki derecesi birbirinden çıkartılarak fark değerleri elde edilir [15, 98-100]. Sonuçta elde edilen fark değerleri büyükten küçüğe doğru sıralanır, her bir faktörün, çoklu performans karakteristiklerine dayalı sistem üzerindeki etki derecesi ortaya çıkar.

Beşinci adımda ise gri ilişki dereceleri için, optimum işleme parametreleri belirlenmiştir. Gri ilişki dereceleri için optimum işleme parametreleri, her faktörün en büyük gri ilişki derecesine sahip olduğu seviyedir [15, 98-100].

Altıncı adımda, çoklu performans karakteristiklerine dayalı sistem üzerinde her bir faktörün ve etkileşimlerinin anlamlı olup olmadıkları ve anlamlılık seviyeleri belirlenmiştir [15, 98-100].

Yedinci adımda optimum şartlara ait gri ilişki derecesi ( $\hat{\gamma}$ ) tahmin edilmiştir. Optimum şartlara ait gri ilişki derecesinin tahmin edilmesinde Eş. 3.27 kullanılmıştır [15]. Formüldeki  $\hat{\gamma}$  optimum seviyede tahmin edilen gri ilişki derecesi sonucunu,  $\gamma_m$  gri ilişki derecelerinin

toplaminin ortalamasını,  $\bar{\gamma}_i$  optimum seviyedeki gri ilişki derecesi ortalamasını, k ise performans karakteristiğini önemli derecede etkileyen işleme parametrelerinin sayısını ifade etmektedir [15].

$$\hat{\gamma} = \gamma_m + \sum_{i=1}^k (\bar{\gamma}_i - \gamma_m) \quad (3.27)$$

Güven aralığının (C.I.) hesaplanmasında kullanılan formül Eş. 3.28'de verilmiştir [15]. Formüldeki  $f_e$  hatanın serbestlik derecesini,  $\text{Var}_e$  hatanın varyansını,  $n_{\text{eff}}$  etkili olan toplam deney sayısını ve R doğrulama deneylerinin tekrar sayısını ifade etmektedir [15].  $n_{\text{eff}}$  etkili olan toplam deney sayısı olup, Eş. 3.29 yardımı ile hesaplanmaktadır [15].

$$\text{C.I.} = \sqrt{F_{\alpha}(1, f_e) \cdot \text{Var}_e \cdot \left[ \frac{1}{n_{\text{eff}}} + \frac{1}{R} \right]} \quad (3.28)$$

$$n_{\text{eff}} = \frac{\text{Toplam deney sayısı}}{1 + (\text{Gri ilişki analizinin tahmin edilmesinde kullanılan faktörlerin toplam serbestlik derecesi})} \quad (3.29)$$

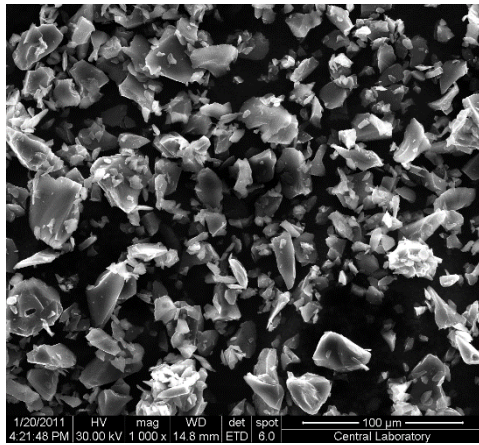


## 4. DENEY SONUÇLARI ve TARTIŞMA

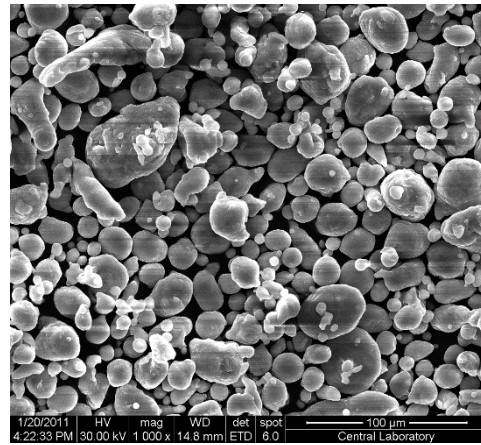
Bu bölümde, deneylerin sonuçları sunulmuş ve elde edilen bulgular literatürle karşılaştırılmıştır.

### 4.1. Mikroyapı ve Mekanik Özellikler

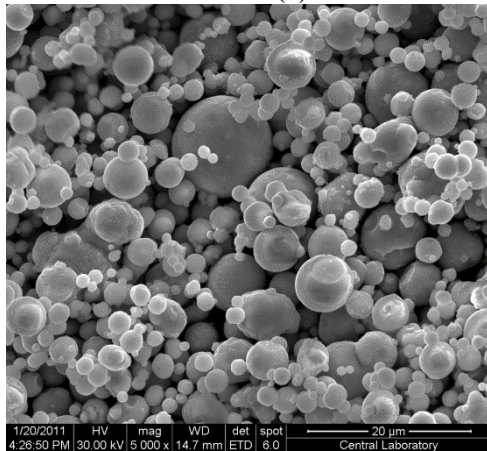
Kompozit malzemelerin üretimi için kullanılan tozların morfolojisi Resim 4.1'de görülmektedir. İncelenen morfoloji sonuçlarına göre, alüminyum ve çinko tozların küresel biçimli, sırasıyla B<sub>4</sub>C seramik ve bakır tozlarında köşeli ve süngerimsi bir yapıya sahip olduğu söylenebilir. Toz boyutlarının ise, B<sub>4</sub>C için 15 µm ile 30 µm arasında, Al için 15 µm ile 40 µm arasında, Zn için 4 µm ile 10 µm arasında ve Cu için 10 µm ile 20 µm arasında olduğu gözlenmiştir.



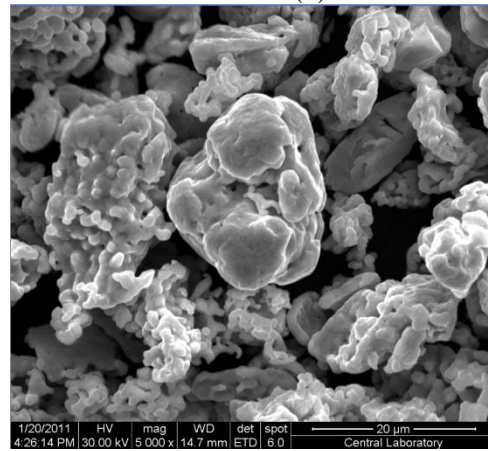
(a)



(b)



(c)

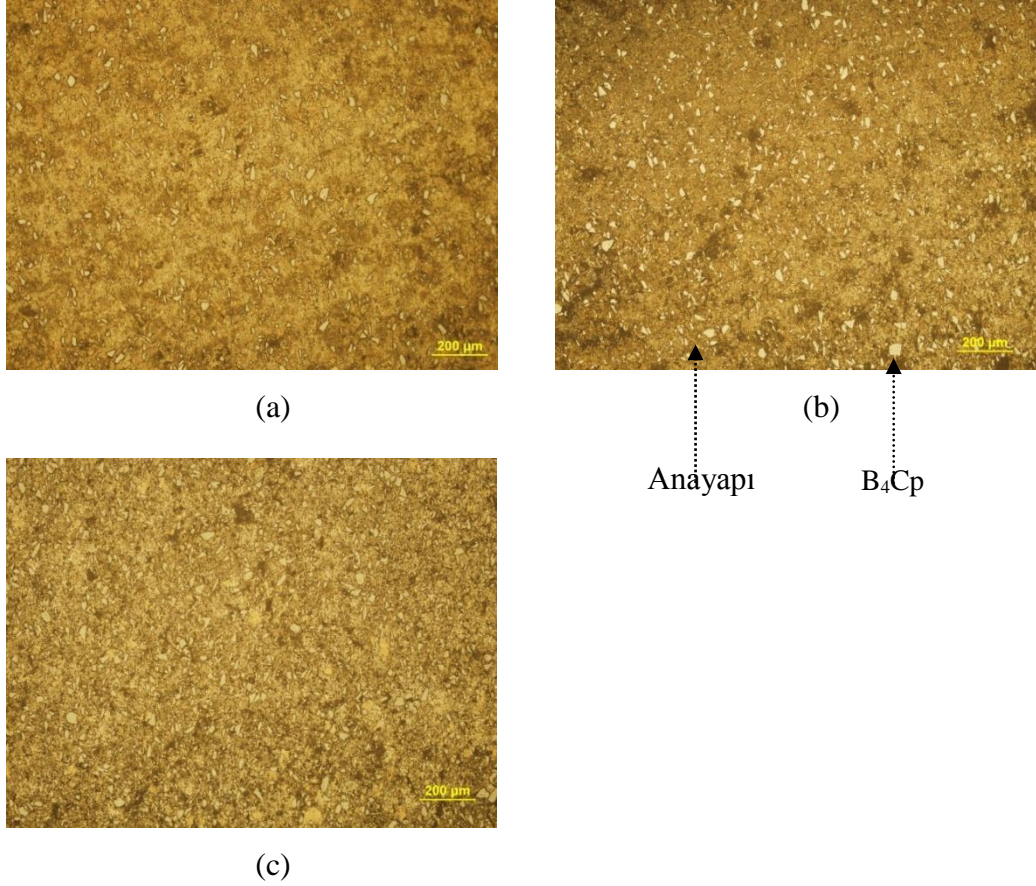


(d)

Resim 4.1. MMK'ların üretiminde kullanılan tozların morfolojisi (a) B<sub>4</sub>C, (b) Al, (c) Zn, (d) Cu



Resim 4.2a-c'de  $B_4C_p$  seramik taneleri ve anayapı görülmektedir. Elde edilen görüntüler incelendiğinde, seramik parçacıkların anayapı içerisinde homojen bir şekilde dağıldığı görülmektedir. Ayrıca, Resim 4.2a'dan Resim 4.2c'ye doğru gidildikçe, anayapı içerisinde seramik parçacıkların hacimsel oranının arttığı da ayrıntılı bir şekilde görülmektedir.

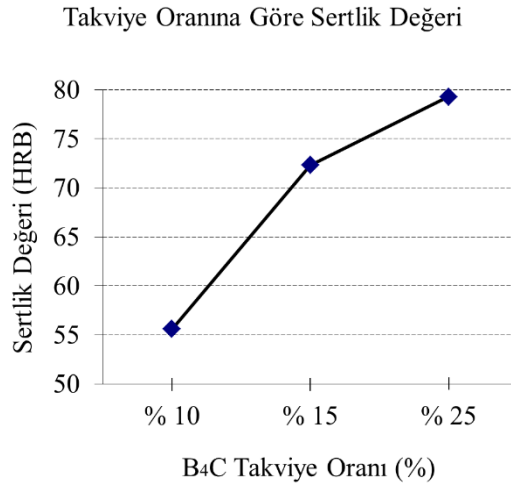


Resim 4.2. Sıvı faz sinterleme metodu ile üretilmiş (a) %10, (b) %15 ve (c) %25  $B_4C_p$  içerikli MMK'nın optik mikroskop görüntüsü

Sertlik ölçüm sonuçlarına göre %10, %15 ve %25 oranındaki malzemelerin ortalama sertlik değerleri sırasıyla, 55,6 HRB, 72,3 HRB ve 79,3 HRB çıkmıştır (Çizelge 4.1). Sertlik sonuçlarına göre, alüminyum matris içerisindeki  $B_4C_p$  seramik takviye oranının artırılmasının, kompozit malzemenin sertliğini arttırdığı görülmüştür (Şekil 4.1).

Çizelge 4.1. MMK numunelerin ölçülen ortalama sertlik değerleri

NUMUNE ADI	1.ÖLÇÜM SERTLİK DEĞERİ (HRB)	2.ÖLÇÜM SERTLİK DEĞERİ (HRB)	3.ÖLÇÜM SERTLİK DEĞERİ (HRB)	ORTALAMA SERTLİK DEĞERİ HRB
%10 B <sub>4</sub> C içerikli MMK	54	56	57	55,6
%15 B <sub>4</sub> C içerikli MMK	72	72	73	72,3
%25 B <sub>4</sub> C içerikli MMK	78	79	81	79,3

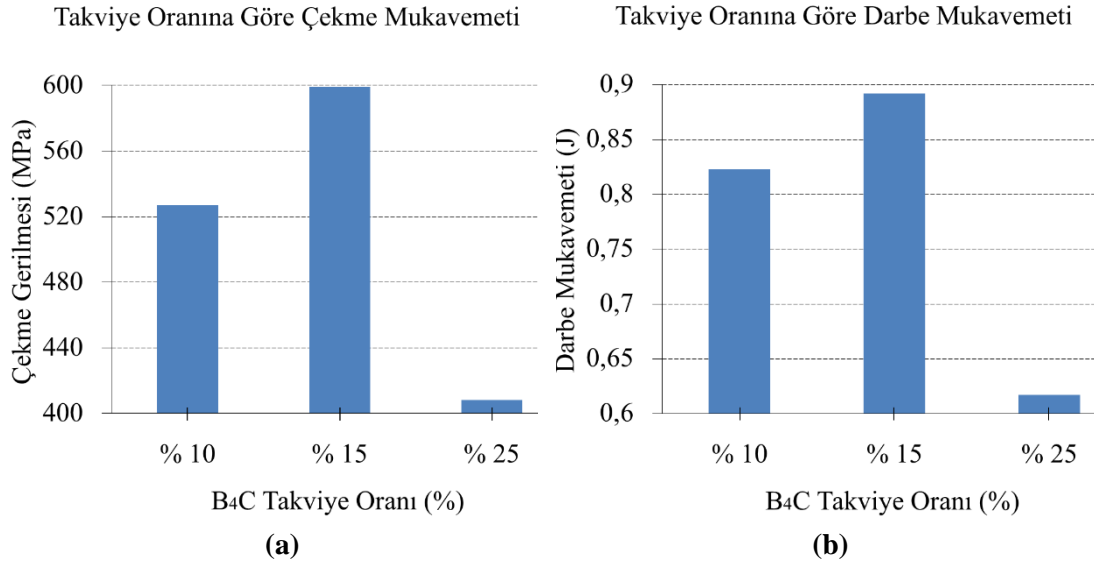
Şekil 4.1. Farklı takviye oranlarına sahip B<sub>4</sub>C<sub>p</sub> içerikli MMK'ların sertlik ölçüm sonuçları

Çizelge 4.2'de üretilen kompozit malzemelere ait akma mukavemeti (MPa), çekme mukavemeti (MPa), uzama (%) ve kesit daralması (%) verilmiştir. Sonuçta, alüminyum içerisine katılan B<sub>4</sub>C seramik takviyelerinin değeri %15 olduğu anda, akma ve çekme mukavemeti değeri için en yüksek değerler elde edilmiştir. Alüminyum matrise ilave edilen seramik takviyesinin kompozit malzemenin sünekliğini azalttığı ve kompoziti daha kırılğan hale getirdiği görülmüştür. Dolayısıyla takviye oranının malzeme mukavemetine etkisinin oldukça fazla olduğu görülmüştür (Şekil 4.2a).

Çizelge 4.2'de verilen darbe mukavemet sonuçları incelendiğinde, akma ve çekme mukavemetine paralel olarak, darbe testi sonuçlarının da benzer davranışlar sergilediği görülmüştür. Alüminyum matris içerisindeki B<sub>4</sub>C seramik takviye oranının %10'dan %15'e artırılması, kompozit malzemenin darbe dayanımını arttırmıştır. Ancak, takviye oranının %15 den %25 e artırılması ile darbe dayanımının azaldığı görülmüştür (Şekil 4.2b).

Çizelge 4.2. Değişik takviye oranlarına sahip B<sub>4</sub>C içerikli MMK'ların çekme ve darbe testi sonuçları

Numune Adı	Akma Mukavemeti, (MPa)	Çekme Mukavemeti, (MPa)	Uzama, (%)	Kesit Daralması, (%)	Darbe Mukavemeti, (J)
%10 B <sub>4</sub> C	491	527	22,2	1,113	0,823
%15 B <sub>4</sub> C	532	599	6,87	2,11	0,892
%25 B <sub>4</sub> C	328	408	4,8	3,87	0,617



Şekil 4.2. (a) Çekme mukavemeti ve (b) Darbe mukavemeti sonuçları

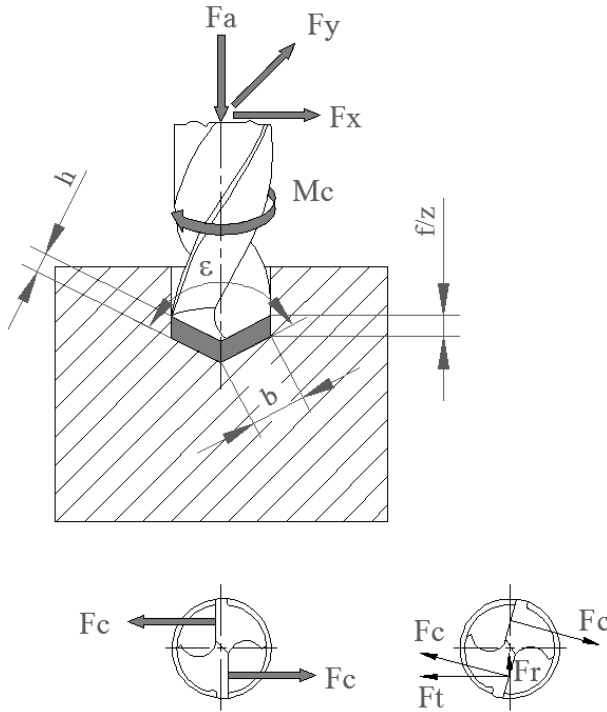
## 4.2. B<sub>4</sub>C Takviyeli MMK'nın Delinebilirlik Özellikleri

### 4.2.1. İlerleme kuvveti ve kesme momentinin değerlendirilmesi

B<sub>4</sub>C içerikli MMK'ların işlenmesinde, devir sayısı, ilerleme hızı, takviye oranı ve kesici takım malzemesi gibi kontrol faktörlerinin delme kuvvetleri ve momentleri üzerine olan etkisi değerlendirilmiştir. Bu amaç için Taguchi yöntemi kullanılmış ve her bir faktörün anlamlılık seviyeleri ANOVA ile belirlenmiştir. Taguchi yöntemi ile tahmin edilen değerlerle, deneylerden elde edilen veriler kıyaslanmış ve delme kuvvetleri ve momentleri bakımından sistemin optimizasyonu gerçekleştirilmiştir.

Matkaba gelen kuvvetler, Şekil 4.3'de verilmiştir. Kistler Dynoware yazılımı ile ilerleme kuvveti ve kesme momentine ait kayıt edilen grafiklerden, delme esnasında x eksen ve y eksen doğrultusunda oluşan F<sub>x</sub> ve F<sub>y</sub> tepki kuvvetlerinin önemsenmeyecek kadar küçük bir

değere sahip olduğu görülmüştür. İş mili ekseninde oluşan ilerleme kuvveti ( $F_a$ ), ilerleme hızına bağlıdır (Bkz. Şekil 4.3). Ayrıca matkap kesme yaptığı zaman oluşan kesme momenti değeri, matkabın kesici ağzına gelen radyal ve aksel kesme kuvvetlerinin bileşkesi olan kesme kuvveti ( $F_c$ ) değerine bağlıdır (Bkz. Şekil 4.3). EK-1’de HSS, karbür ve TiAlN kaplamalı karbür matkapla yapılan delme işlemi sonucunda Kistler DynoWare programı ile elde edilen, ilerleme kuvveti ( $F_a$ ) ve kesme momenti ( $M_c$ ) değerleri verilmiştir.

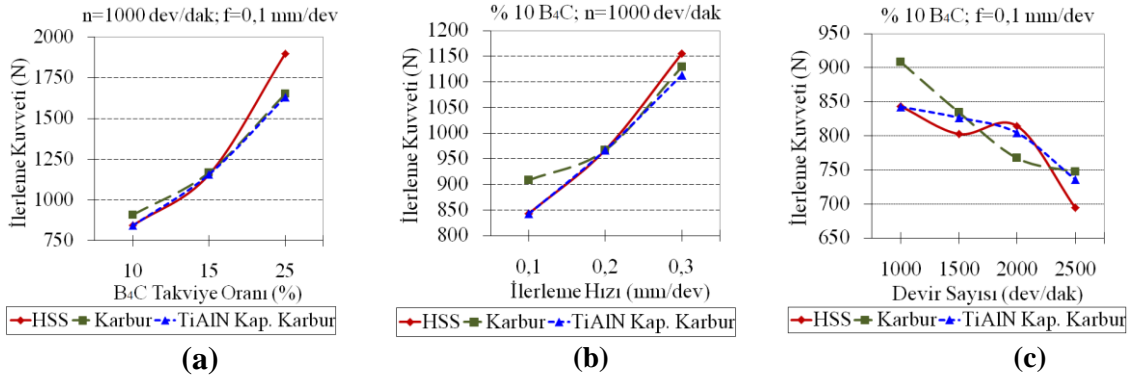


Şekil 4.3. Delme esnasında matkaba gelen kuvvetler [101, 102]

Genelde, HSS takımlar kullanılarak ölçülen ilerleme kuvveti, kaplamalı ve kaplamasız karbür takımlara göre, % 10 ve % 15  $B_4C_p$  takviyeli MMK'nın işlenmesinde daha düşükken, % 25  $B_4C_p$  takviyeli MMK'nın işlenmesinde daha yüksek çıkmıştır (Şekil 4.4). Genel olarak, kaplamalı takımlar ile kaplamasız takımlar kullanıldığında ölçülen ilerleme kuvveti değeri birbirine yakındır. Yapılan deneylerde en yüksek ilerleme kuvveti 1898 N değeri ile % 25  $B_4C$  içerikli MMK'nın 1000 dev/dak devir sayısında 0,2 mm/dev ilerleme hızında HSS matkapla delinmesi ile elde edilmiştir. En yüksek kesme momenti değeri ise 744,8 N değeri ile % 25  $B_4C$  içerikli MMK'nın 1000 dev/dak devir sayısında 0,3 mm/dev ilerleme hızında kaplamalı karbür matkapla delinmesi ile elde edilmiştir. En düşük ilerleme kuvveti 694,3 N değeri ile % 10  $B_4C$  içerikli MMK'nın 2500 dev/dak devir sayısında 0,1 mm/dev ilerleme hızında HSS matkapla delinmesi ile elde edilmiştir. En düşük kesme momenti değeri ise 197,3 N değeri

ile %10 B<sub>4</sub>C içerikli MMK'nın 2000 dev/dak devir sayısında 0,1 mm/dev ilerleme hızında HSS matkapla delinmesi ile elde edilmiştir.

Deney sonuçlarına göre, takviye oranı, devir sayısı, ilerleme hızı ve kesici takım malzemesi gibi kesme parametrelerinin ilerleme kuvveti ve kesme momentine etkileri, grafik halinde Şekil 4.4 ve Şekil 4.5'de görülmektedir. Alüminyum matris içerisindeki B<sub>4</sub>C seramik parçacıklarının ağırlıkça oranının artırılması, kompozit malzemenin sertliğini artırmış ve aynı zamanda matkabın kesici kenarının daha yoğun bir şekilde seramik parçacıklarla temas ederek daha fazla aşınmasına sebep olmuştur. Hem takviyenin hacimsel oranının artması hem de aşınmadan dolayı kesici kenarın parçaya temas ettiği yüzey alanının artması, iş parçası-kesici takım ve kesici takım-talaş ara yüzeyindeki sürtünme ve kesme akış mukavemetini artırmıştır. Bu sebeple takviye oranındaki artış, hem ilerleme kuvvetinin hem de kesme momentinin artmasına sebep olmuştur. Seramik takviyesinin hacimsel oranının artırılmasından dolayı, delme kuvvetlerinin önemli derecede arttığı bildirilmiştir [21, 23]. Ayrıca yaşlandırma işlemi uygulanmış MMK'ların delinmesinde, ilerleme kuvvetinin iki kata yakın artış gösterdiği ve takım aşınmasının da arttığı ifade edilmiştir [11, 74].

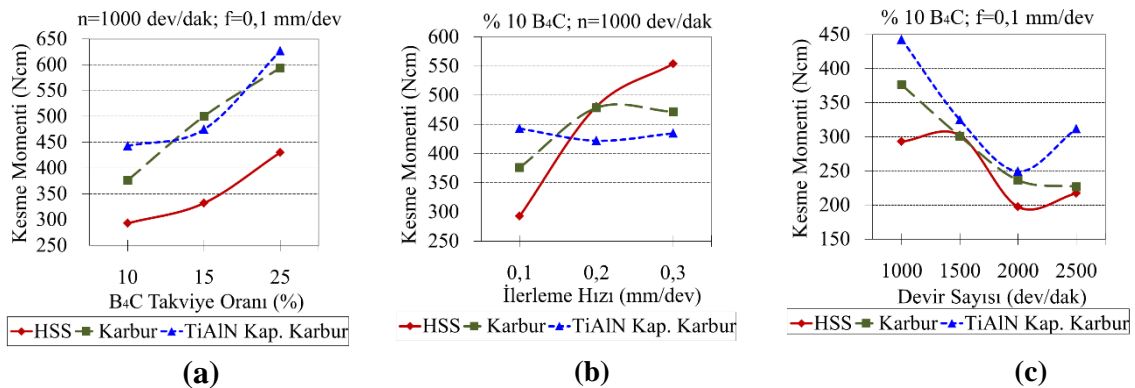


Şekil 4.4. (a) Takviye oranı (b) İlerleme hızı ve (c) Devir sayısına bağlı ilerleme kuvveti değişimleri

Diğer yandan, ilerleme hızındaki artışla, ilerleme kuvvetinin ve kesme momentinin arttığı, devir sayısının artmasıyla, ilerleme kuvvetinin ve kesme momentinin azaldığı görülmektedir, Şekil 4.4 ve Şekil 4.5. Önceki çalışmalarda, hem ilerleme kuvvetini hem de kesme momentini artıran en önemli faktörün ilerleme hızı olduğu belirtilmektedir [3, 6, 11, 23]. Bu çalışmada da, ilerleme hızının delme esnasında oluşan kuvvetleri artıran önemli bir faktör olduğu görülmüştür. İlerleme hızının artmasıyla kesici takımın bir devrinde kaldırılan

talaş hacmi arttığından dolayı, kesme esnasında oluşan ilerleme kuvveti ve kesme momenti artmaktadır [25].

Kesici takım malzemesi bakımından deney sonuçları irdelendiğinde, %25 B<sub>4</sub>C içerikli MMK'nın HSS takım ile delinmesinde karbür takımlara göre 150N-250N arasında değişen oranda daha fazla ilerleme kuvveti oluşmuştur (Şekil 4.4a). Bu durum kesici takım sertliği ve takım üzerinde oluşan aşınma mekanizmalarına atfedilebilir. HSS takımların, kaplamalı ve kaplamasız karbür takımlara göre sertliği daha düşüktür. Bu sebeple, özellikle yüksek parçacık oranına sahip kompozitlerde, serbest yüzey aşınmasına bağlı olarak HSS matkaplar ile daha fazla ilerleme kuvveti oluşmuştur (Şekil 4.4a ). Parçacık oranı %25'ten düşük olduğu durumlarda genelde HSS takımlar ile üretilen ilerleme kuvveti, karbür takımların ürettiği kuvvetlerden 20N-40N daha az çıkmıştır. Benzer şekilde, Şekil 4.5'de görüldüğü gibi, HSS matkaplar karbür matkaplara göre daha az kesme momenti üretmişlerdir. Bu durum, uç açısındaki değişime atfedilebilir. Matkabın uç açısının artmasıyla ilerleme kuvveti ve kesme momenti artmaktadır [103]. HSS matkapların karbür matkaplara göre daha az ilerleme kuvveti ve kesme momenti üretmesinin sebebinin, uç açısının karbür matkaplara göre 5° daha düşük olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Literatürde PCD elmas takımlarla yapılan çalışmalarda, daha düşük kesme kuvvetlerinin üretildiği görülmektedir [23]. Fakat PCD takımların pahalı olmasından dolayı, üretim-maliyet dengesi açısından, karbür takımların kompozit malzemelerin işlenmesinde tercih edilebileceği söylenebilir.



Şekil 4.5. (a) Takviye oranı (b) İlerleme hızı ve (c) Devir sayısına bağlı kesme momenti değişimleri

Anizotropik olan kompozit malzemelerin kesilmesi esnasında kararlı bir davranış sergileyememeleri ve delme operasyonunun üç boyutlu kesme geometrisine sahip olması,

delme esnasında oluşan kesme kuvvetlerinin matematiksel modellenmesini oldukça zorlaştırmaktadır [18].

Bu zamana kadar birçok araştırmacı tarafından, delme esnasında oluşan ilerleme kuvveti ve kesme momentini tahmin edebilmek için çalışma yapılmış [5, 8, 9, 12, 14-16, 18, 20, 21] ve kompozit malzemelerin anizotropik doğasından dolayı, net bir matematiksel model ortaya konulamamıştır. Önceki çalışmalarda, ilerleme kuvvetini ve kesme momentini tahmin edebilmek için genellikle Taguchi metodu ve istatistiksel modeller üzerinde durulmuştur [5, 8, 15, 20, 21].

#### **4.2.2. İlerleme kuvveti ve kesme momenti için Taguchi metodu ve ANOVA**

Bu kısımda, Taguchi deneysel tasarımı yardımıyla, devir sayısının, ilerleme hızının, farklı takviye oranına sahip kompozit malzemenin, kesici takım malzemesinin ve bunların etkileşimlerinin delme kuvvetleri ve momentleri üzerindeki etkileri belirlenerek, delme kuvvetleri ve momentleri bakımından sistemin optimizasyonu gerçekleştirilmiştir. Çizelge 4.3’de, her bir faktörün ve seviyelerinin (Bkz. Çizelge 3.5) Taguchi’nin  $L_{27}$  ortogonal dizisine ait tabloya (Bkz. Çizelge 3.6) yerleştirilmiş hali ile yapılan her bir deneye karşılık gelen ilerleme kuvveti ve kesme momenti değerleri verilmiştir. Çizelge 4.3’de, Taguchi tasarım sürecinin dördüncü aşamasında “En düşük daha iyidir” hesaplama yöntemi ile hesaplanmış ilerleme kuvveti ve kesme momentine ait S/N oranları verilmiştir.

Taguchi tasarım sürecinin beşinci aşamasında, optimum şartlar belirlenmiştir. Bu amaçla takviye oranı, ilerleme hızı, devir sayısı ve matkap malzemesi için her bir seviyenin S/N oranlarının aritmetik ortalaması alınmış, ilerleme kuvveti için Çizelge 4.4 ve kesme momenti için Çizelge 4.5 elde edilmiştir. Her bir faktörün ilerleme kuvveti veya kesme momenti üzerindeki etkileme derecesi sırasıyla Çizelge 4.4 ve Çizelge 4.5’in en son satırında verilmiştir. Buna göre ilerleme kuvveti üzerinde etkili olan kontrol faktörleri etki derecesine göre sıralandığında, 1. sırayı takviye oranı, 2. sırayı ilerleme hızı, üçüncü sırayı devir sayısı ve dördüncü sırayı matkap malzemesi almıştır. Aynı işlem kesme momenti içinde yapıldığında, 1. sırayı takviye oranı, 2. sırayı devir sayısı, üçüncü sırayı ilerleme hızı ve dördüncü sırayı matkap malzemesi almıştır. Her bir faktörün ortalama S/N oranına göre etki grafiği çizildiğinde, Şekil 4.6’da ilerleme kuvveti için, Şekil 4.7’de ise kesme momenti için S/N oranı etki grafiği elde edilmiştir. Grafiklerdeki ince yatay çizgi S/N oranına ait aritmetik

ortalamayı ifade etmektedir. Bu şekillerdeki faktörlere ait her bir seviye ile yatay çizgi arasındaki mesafenin büyüklüğü, o faktörün etki derecesini göstermektedir. Şekil 4.6 incelendiğinde, takviye oranı ve ilerleme hızı artarken ilerleme kuvvetinin arttığı, devir sayısındaki artışla ilerleme kuvvetinin azaldığı ve matkap malzemesinin ilerleme kuvveti üzerine etkisinin önemsenmeyecek kadar az olduğu görülmektedir. Şekil 4.7 incelendiğinde, takviye oranı ve ilerleme hızı artarken kesme momentinin arttığı, devir sayısındaki artışla kesme momentinin azaldığı ve matkap malzemesi açısından bakıldığında 135° uç açısına sahip HSS matkapların en düşük kesme momenti değeri için tercih edilebileceği görülmektedir.

Çizelge 4.3. Delme kuvvetleri için kullanılan faktör ve seviyelerin Taguchi'nin L<sub>27</sub> ortogonal dizisine yerleştirilmiş hali ve S/N oranları

Deney No	Takviye Oranı (A) (%)	İlerleme Hızı (B) (mm/dev)	Devir sayısı (C) (dev/dak)	Matkap Malzemesi (D)	İlerleme Kuvveti (F <sub>a</sub> ) (N)	Kesme Momenti (M <sub>c</sub> ) (Ncm)	İlerleme Kuvveti için S/N oranı	Kesme Momenti için S/N oranı
1	10	0,1	1000	HSS	843,23	292,99	-58,519	-49,337
2	10	0,1	1500	Karbür	834,26	300,91	-58,426	-49,569
3	10	0,1	2000	TiAlN	804,31	249,30	-58,108	-47,934
4	10	0,2	1000	Karbür	966,83	478,44	-59,707	-53,596
5	10	0,2	1500	TiAlN	924,10	343,97	-59,314	-50,730
6	10	0,2	2000	HSS	880,74	293,95	-58,897	-49,365
7	10	0,3	1000	TiAlN	1113,26	434,66	-60,932	-52,763
8	10	0,3	1500	HSS	1047,97	446,64	-60,407	-52,999
9	10	0,3	2000	Karbür	1096,14	291,28	-60,797	-49,286
10	15	0,1	1000	Karbür	1168,44	500,31	-61,352	-53,985
11	15	0,1	1500	TiAlN	1062,46	398,53	-60,526	-52,009
12	15	0,1	2000	HSS	973,33	309,14	-59,765	-49,803
13	15	0,2	1000	TiAlN	1244,12	496,66	-61,897	-53,921
14	15	0,2	1500	HSS	1131,54	370,64	-61,073	-51,379
15	15	0,2	2000	Karbür	1088,55	339,98	-60,737	-50,629
16	15	0,3	1000	HSS	1313,43	578,31	-62,368	-55,243
17	15	0,3	1500	Karbür	1310,46	328,03	-62,348	-50,318
18	15	0,3	2000	TiAlN	1218,18	388,47	-61,714	-51,787
19	22	0,1	1000	TiAlN	1630,85	627,11	-64,248	-55,947
20	25	0,1	1500	HSS	1654,51	434,06	-64,373	-52,751
21	25	0,1	2000	Karbür	1374,09	415,35	-62,760	-52,368
22	25	0,2	1000	HSS	1825,54	496,15	-65,228	-53,912
23	25	0,2	1500	Karbür	1477,21	492,76	-63,389	-53,853
24	25	0,2	2000	TiAlN	1378,53	547,77	-62,788	-54,772
25	25	0,3	1000	Karbür	1834,23	674,05	-65,269	-56,574
26	25	0,3	1500	TiAlN	1629,45	641,02	-64,241	-56,137
27	25	0,3	2000	HSS	1440,81	492,23	-63,172	-53,843

Optimum şartların belirlenmesi amacıyla Çizelge 4.4'de ilerleme kuvveti için ve Çizelge 4.5'de kesme momenti için her faktörün sahip olduğu en büyük S/N oranı (\* ile işaretlenmiş olan) tespit edilmiştir. Sonuçta ilerleme kuvveti ve kesme momenti için elde edilen optimum şartlar Çizelge 4.6'da verilmiştir.



Çizelge 4.4. İlerleme kuvvetine ait her bir faktör ve seviye için ortalama S/N oranları

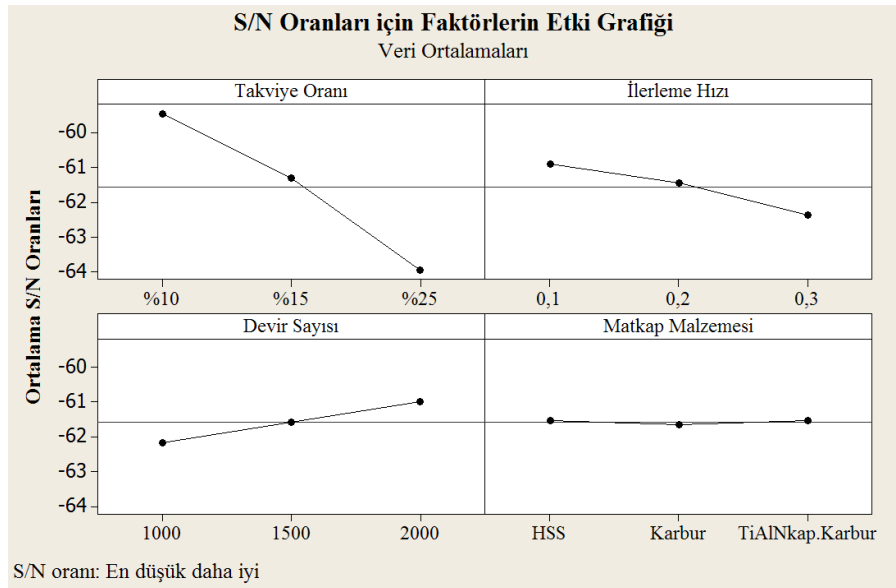
Seviye	Takviye Oranı	İlerleme Hızı	Devir Sayısı	Matkap Malzemesi
1	-59,4564*	-60,8976*	-62,1689	-61,5337
2	-61,3091	-61,4479	-61,5665	-61,6429
3	-63,941	-62,361	-60,9711*	-61,53*
Fark	4,4846	1,4634	1,1978	0,1092
Sıralama	1	2	3	4

Çizelge 4.5. Kesme momentine ait her bir faktör ve seviyeye için ortalama S/N oranı

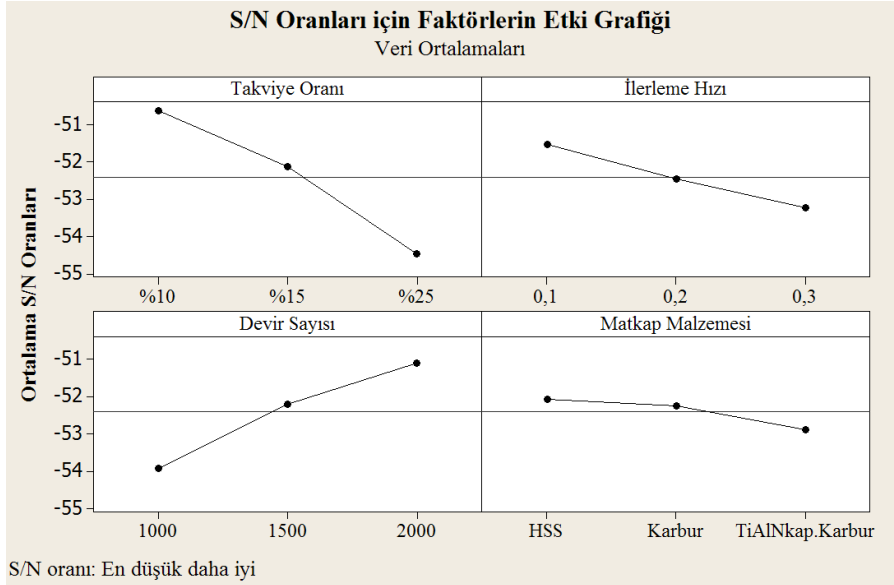
Seviye	Takviye Oranı	İlerleme Hızı	Devir Sayısı	Matkap Malzemesi
1	-50,6201*	-51,5226*	-53,9199	-52,0704*
2	-52,1194	-52,4621	-52,194	-52,2421
3	-54,462	-53,2168	-51,0877*	-52,8891
Fark	3,8419	1,6942	2,8322	0,8187
Sıralama	1	3	2	4

Çizelge 4.6. İlerleme kuvveti ve kesme momenti için belirlenmiş olan optimum şartlar

İlerleme Kuvveti için Optimum Şartlar			
Takviye Oranı	İlerleme hızı	Devir sayısı	Matkap Malzemesi
% 10 B <sub>4</sub> C <sub>p</sub>	0,1	2000	TiAlN Kaplamalı Karbür
Kesme Momenti için Optimum Şartlar			
Takviye Oranı	İlerleme hızı	Devir sayısı	Matkap Malzemesi
% 10 B <sub>4</sub> C <sub>p</sub>	0,1	2000	HSS



Şekil 4.6. İlerleme kuvvetine ait kontrol faktörlerinin, “En düşük daha iyidir” yöntemi ile hesaplanmış S/N oranı etki grafiği



Şekil 4.7. Kesme momentine ait kontrol faktörlerinin, “En düşük daha iyidir” yöntemi ile hesaplanmış S/N oranı etki grafiği

Şekil 4.6’da verilen grafiklerden matkap malzemesi grafiği incelendiğinde ve Çizelge 4.4’de verilen sıralamada etki derecesine bakıldığında matkap malzemesinin ilerleme kuvvetine olan etkisinin ihmal edilebilir bir seviyede olduğu görülmektedir. Dolayısı ile hem ilerleme kuvveti hem de kesme momenti göz önünde bulundurulduğunda, optimumum şartları elde etmek için  $135^\circ$  uç açısına sahip HSS matkapların seçilebileceği söylenebilir. Eğer HSS matkap  $140^\circ$  uç açısına sahip olsaydı, bu durumda matkap malzemesi olarak TiAlN kaplamalı karbür matkabın seçilebileceği söylenebilir. Çünkü daha önceden yapılan çalışmada, matkap uç açısının artmasıyla ilerleme kuvveti ve kesme momentinin arttığı bildirilmiştir [103].

Çizelge 4.7’de ilerleme kuvvetine ait, Çizelge 4.8’de ise kesme momentine ait ANOVA sonuçları verilmiştir. Çizelge 4.7’deki  $F_{test}$  sonuçları incelendiğinde, ilerleme kuvveti üzerine takviye oranının, ilerleme hızının ve devir sayısının etkisi anlamlı olmuştur. İlerleme kuvveti üzerine, matkap malzemesinin, takviye oranı ile ilerleme hızı etkileşiminin ve ilerleme hızı ile devir sayısı etkileşiminin etkisi anlamlı olmamıştır. Takviye oranı ile devir sayısı etkileşiminin ilerleme kuvveti üzerine etkisi, F-tablo değerine yakın olduğu için anlamlı kabul edilmiştir. Çizelge 4.7’nin son sütunu her bir faktörün ve etkileşimlerinin anlamlılık seviyelerini yüzdelikli olarak göstermektedir. Buna göre takviye oranı, %80,226 ile en fazla etkiye sahip olmuştur. Devir sayısının ve ilerleme hızının etkisinin yüzde dağılımına bakıldığında birbirine yakın olduğu görülmektedir. Hatta devir sayısının etkisi 2.

seviyede olurken, ilerleme hızının etkisi 3. seviyede kalmıştır. Fakat bu sonuç S/N oranı ile çelişmektedir. S/N oranına bakıldığında ise durum tam tersidir. Yani ilerleme hızının etkisi 2. seviyede iken, devir sayısının etkisi 3. seviyede kalmıştır. Her iki faktörün yüzde dağılım değerlerine bakıldığında aradaki farkın önemsenmeyecek kadar küçük olduğu görülmektedir. Fakat S/N oranları için, her iki faktörün Çizelge 4.4'deki fark değerlerine bakıldığında aradaki farkın daha belirgin olduğu görülmektedir. Bu sebeple sonuçta ilerleme kuvveti üzerine etki eden faktörlerin önem sırası, takviye oranı, ilerleme hızı, devir sayısı ve takviye oranı ile devir sayısı etkileşimi olarak belirlenmiştir.

Çizelge 4.8'deki  $F_{test}$  sonuçları incelendiğinde ise, kesme momenti üzerine takviye oranının ve devir sayısının etkisi anlamlı olmuştur. Kesme momenti üzerine, ilerleme hızının, matkap malzemesinin ve faktörlerin etkileşimlerinin etkisi anlamlı olmamıştır. Çizelge 4.8'in son sütunu her bir faktörün ve etkileşimlerinin anlamlılık seviyelerini yüzdelikli olarak göstermektedir. Buna göre takviye oranı %45,992 ile en fazla etkiye sahip olmuştur. Sonuçta, Çizelge 4.5'deki fark değerleri ile Çizelge 4.8'deki yüzde dağılım değerleri göz önünde bulundurulduğunda, kesme momenti üzerine etki eden faktörlerin önem sırası, takviye oranı, devir sayısı ve ilerleme hızı olarak belirlenmiştir.

Çizelge 4.7. İlerleme kuvvetine ait ANOVA sonuçları

Faktörler	SD	KT	Var	$F_{test}$	YD
Takviye Oranı (A)	2	1882587,144	941293,572	210,468	80,226
İlerleme Hızı (B)	2	157716,424	78858,212	17,632	6,7211
Devir sayısı (C)	2	157829,114	78914,557	17,645	6,726
Matkap Malzemesi (D)	2	1249,711	624,856	0,1397	0,0533
AxB	4	25504,624	6376,156	1,4257	1,087
AxC	4	79868,218	19967,054	4,4645	3,4036
BxC	4	15005,507	3751,377	0,8388	0,6395
Hata	6	26834,336	4472,389		1,1435
<b>Toplam</b>	<b>26</b>	<b>2346595,077</b>			<b>100</b>

**SD:** Serbestlik derecesi, **KT:** Kareler Toplamı, **Var:** Varyans, **YD:** Yüzde Dağılım  
**F-table**<sub>(0,05;2;6)</sub>=5,14, **F-table**<sub>(0,05;4;6)</sub>=4,53

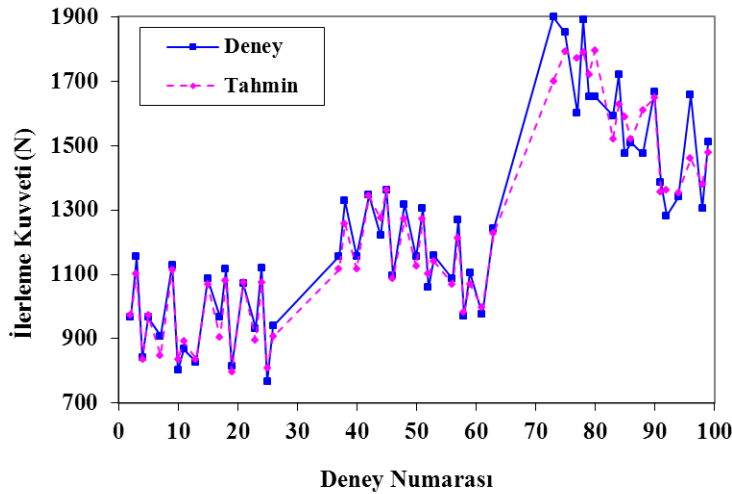
Çizelge 4.8. Kesme momentine ait ANOVA sonuçları

Faktörler	SD	KT	Var	F <sub>test</sub>	YD
Takviye Oranı (A)	2	163615,458	81807,729	15,921	45,992
İlerleme Hızı (B)	2	31123,43	15561,715	3,029	8,749
Devir sayısı (C)	2	89834,296	44917,148	8,742	25,252
Matkap Malzemesi (D)	2	10229,657	5114,828	0,995	2,876
AxB	4	11958,738	2989,685	0,582	3,362
AxC	4	12465,535	3116,384	0,607	3,504
BxC	4	5688,548	1422,137	0,277	1,599
Hata	6	30829,462	5138,244		8,666
<b>Toplam</b>	<b>26</b>	<b>355745,124</b>			<b>100</b>

SD: Serbestlik derecesi, **KT**: Kareler Toplamı, **Var**: Varyans, **YD**: Yüzde Dağılım  
**F-tablo**<sub>(0,05;2;6)</sub>=5,14, **F-tablo**<sub>(0,05;4;6)</sub>=4,53

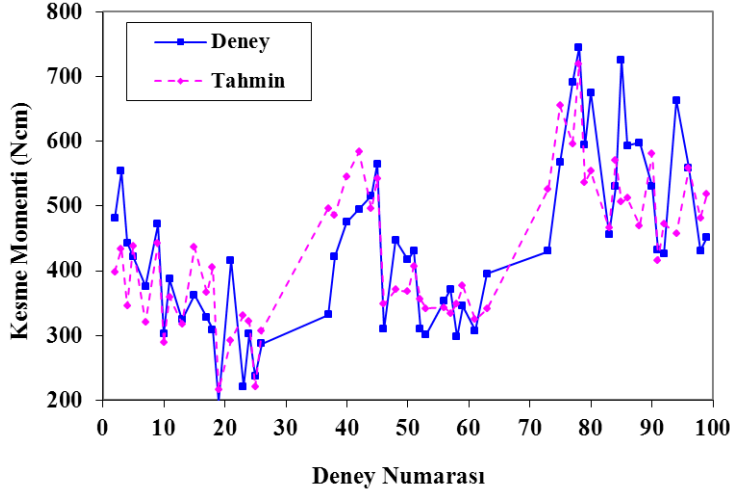
#### Deney sonuçları ile tahmin sonuçlarının karşılaştırılması

Deneylerden elde edilen ilerleme kuvveti ve kesme momenti sonuçları ile Taguchi metodu ile tahmin edilen sonuçlar kıyaslanmış, EK-2’de tablo halinde ve Şekil 4.8’de grafik halinde verilmiştir. Elde edilen sonuçlar, belirlilik katsayısı  $R^2=0,946$  ile ilerleme kuvvetinin tahmin edilmesinde Taguchi yönteminin başarı ile uygulandığını göstermiştir (Şekil 4.8a). Ancak,  $R^2=0,644$  ile kesme momenti için Taguchi metodunun yeterli olmadığı görülmüş, fakat her bir deney için elde edilen Taguchi tahmini ile deneysel değerler arasındaki hata hesaplandığında, tahmin edilen 54 adet deney sonucundan 36 tanesinin, deneylerden elde edilen değerlerle olan benzerliği % 85’in üzerinde çıkmıştır, Şekil 4.8b.



(a)

Şekil 4.8. Deney sonuçları ile tahmin sonuçlarının karşılaştırılması. (a) İlerleme Kuvveti, (b) Kesme momenti



(b)

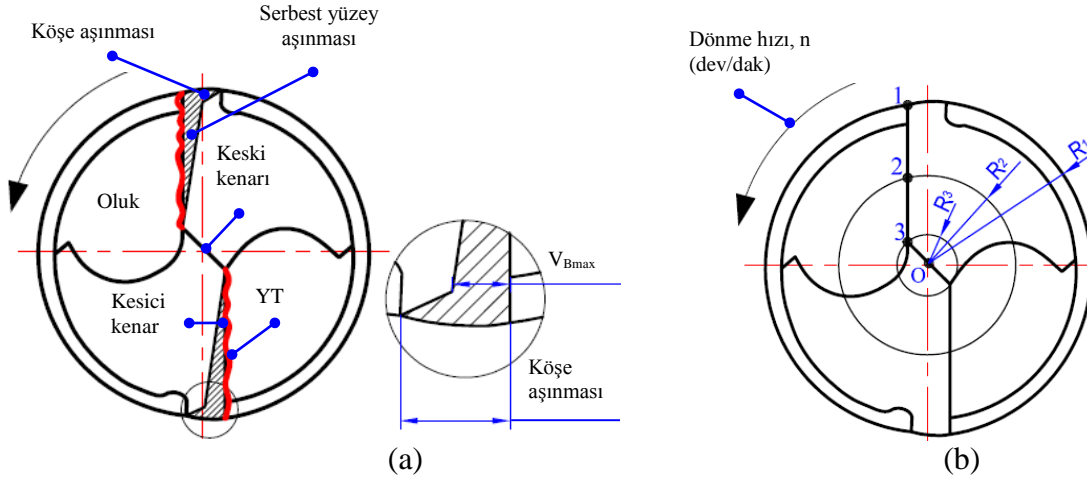
Şekil 4.8. (devam) Deneysel sonuçları ile tahmin sonuçlarının karşılaştırılması. (a) İlerleme Kuvveti, (b) Kesme momenti

#### 4.2.3. Delme sonrası oluşan takım aşınmasının ve delik ölçüsünün değerlendirilmesi

Bu bölümde,  $B_4C_p$  ile takviye edilmiş kompozit malzemelerin işlenmesinde, kesici takım üzerinde oluşan aşınma mekanizmaları incelenmiş, takviye oranı ve kesme parametrelerinin aşınma üzerindeki etkisi tespit edilmiştir. Ayrıca, üretilen deliğin ölçüsel tamlığı ve profili, matkap üzerinde oluşan aşınmaya ve kesici takım üzerindeki titreşimlere bağlı olduğundan dolayı, kesici takım üzerinde oluşan aşınma mekanizmasının delik ölçüsüne olan etkisi belirlenmeye çalışılmıştır.

Bu çalışmada, her bir matkap ile bir delik delinmesi sonucunda, deneylerin hiç birinde, matkapların kesici ağızlarında kenar çentiği ve krater aşınması görülmemiştir. Şekil 4.9a'da, MMK malzemelerin delinmesi esnasında, kesici takımda meydana gelen tipik aşınma biçimleri görülmektedir. Deneylerde gözlenen en önemli aşınma mekanizması abrazyon aşınma olmuştur. Kompozit malzeme içerisinde bulunan ve sertliği 4200 HV olan  $B_4C_p$  parçacıkları, matkabın kesici ağızları boyunca, matkabın keski kenarından (Chisel edge), köşesine doğru genişleyen serbest yüzey aşınması meydana getirmiştir, Şekil 4.9a. Matkabın kesici kenarından başlayan ve boşluk yüzeyine doğru gelişen serbest yüzey aşınmasına, aşındırıcı sert  $B_4C_p$  parçacıklarının artan kesme hızlarında meydana getirdiği taşlama [1, 23, 24] etkisi neden olmaktadır. Şekil 4.9a-b'de görüldüğü gibi, meydana gelen serbest yüzey aşınması, matkap çapına bağlı olarak kesme hızının artması ile matkabın merkezinden

köşesine doğru artarak gelişmekte ve matkabın köşe kısmında, köşe aşınmasıyla birleşmektedir.



Şekil 4.9. (a) Matkaptaki oluşan aşınma tipleri (b) Matkap çapına bağlı olarak çevresel kesme hızı ve kontak mesafesi

Şekil 4.9b’de, n (dev/dak) dönme hızı ile kesme yapan bir matkap üzerinde bulunan 1, 2 ve 3 noktaları görülmektedir. Bu noktalardan geçen O merkezli çemberlerin yarıçapları ( $R_i$ ) ve çevresel uzunlukları ( $L_i$ ) ise sırasıyla  $R_1, R_2, R_3$  ve  $L_1, L_2$  ve  $L_3$ ’tür. Her hangi bir noktanın kesme hızı ( $V_i$ ) Eş. 4.1’deki bağıntı ile elde edilir.

$$V_i = \frac{2\pi \cdot R_i \cdot n}{1000} \quad (4.1)$$

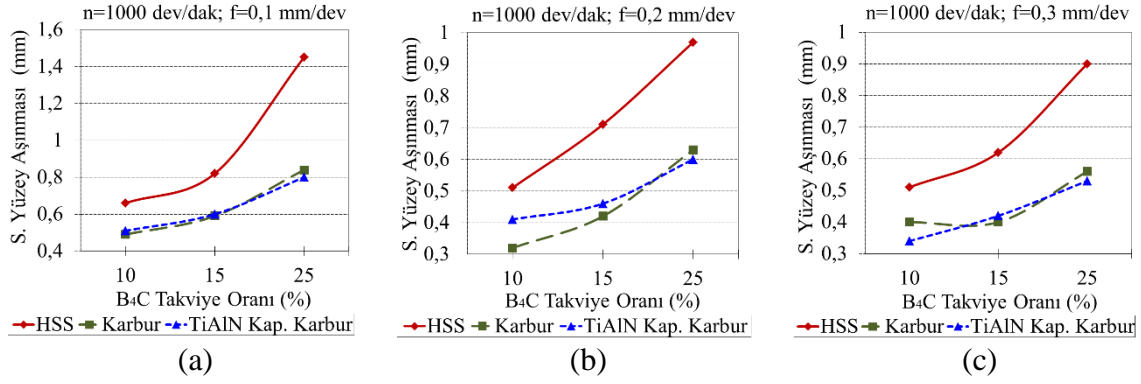
Dolayısıyla, bu noktaların kesme hızları ve çevresel uzunlukları arasında aşağıda verilen ilişkiler mevcuttur;

$$V_1 > V_2 > V_3 > V_0 \quad \text{ve} \quad L_1 > L_2 > L_3 > L_0$$

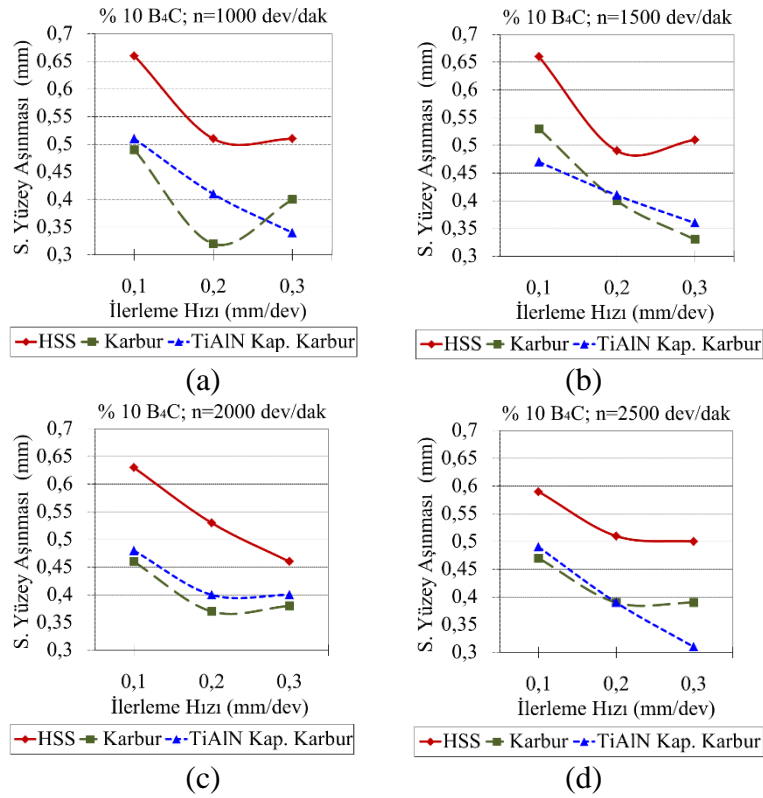
Şekil 4.9b’de görülen, matkabın köşe kısmı (1 noktası), delme esnasında hem alın kısmından hem de delik duvarı tarafından aşındırıcı yüklerin etkisi altında kalmaktadır. Bu durum aynı zamanda matkabın köşe noktasındaki sıcaklığın yükselmesine neden olmaktadır. Matkabın merkezinden (O noktası) köşesine doğru çevre uzunluğu değerindeki artışla birlikte, çevresel kesme hızı değeri de artar [104]. Dolayısı ile matkabın hem düşey ve yatay doğrultularda aşındırma etkisine maruz kalması, hem de çevresel kesme hızının ve kontak mesafesinin maksimum olması nedeniyle, en büyük ve en önemli aşınma, matkabın köşe kısmında meydana gelmektedir. Deney sonuçları da bu durumu desteklemektedir. EK-3’de HSS,

karbür ve TiAlN kaplamalı karbür matkapla yapılan delme işlemi sonucunda Mitutoyo TM-505 takım üretici mikroskobu ile elde edilen, serbest yüzey aşınması ( $V_B$ ) ve köşe aşınması değerleri verilmiştir.

Şekil 4.10 incelendiğinde, her üç ilerleme hızında da, takviye oranının artması ile serbest yüzey aşınmasının arttığı görülmektedir. Bunun sebebi, kompozit malzeme içeriğindeki aşındırıcı tanelerin hacimsel oranının artması ile matkabın kesici kenarının  $B_4C_p$  ile temas etme oranının artmasıyla açıklanabilir. Bu görüşü, sert parçacıkların yoğunluğundaki artışla beraber aşındırıcı yüklerin arttığı ve dolayısı ile aşınma oranının da arttığını ifade eden çalışma [24] desteklemektedir. İlerleme hızının takım aşınmasına etkisi ile ilgili olarak, ilerleme hızı arttıkça, kesici takım ile kompozit malzeme arasındaki temas süresine bağlı olarak kesme zamanının azalması sonucu aşınmanın da azaldığı bildirilmektedir [1, 7, 19, 23, 84]. İlerleme hızının etkisini gösteren Şekil 4.11'deki grafikler incelendiğinde, ilerleme hızının artmasıyla, serbest yüzey aşınmasının azaldığı görülmektedir. MMK'ların delinmesi ile ilgili literatürde bulunan bazı çalışmalarda [7, 9-11, 20, 84], kesme hızının takımdaki serbest yüzey aşınmasına etkisinin az olduğu belirtilirken, bazı çalışmalarda ise [1, 17] kesme hızı arttıkça takım aşınmasında artış olduğu belirtilmektedir. Şekil 4.12'de verilen grafikler incelendiğinde, kesme hızındaki artışın, serbest yüzey aşınması üzerinde küçük bir etkiye sahip olduğu anlaşılmaktadır. Bu sonuç, daha önce yapılan çalışmalarla uyum içerisindedir [7, 9-11, 20, 84]. Demir esaslı malzemeler ve yüksek mukavemetli alaşımlar işlendiği zaman, kesme hızının artmasıyla kesici takım iş parçası arayüzey sıcaklığı arttığı için serbest yüzey aşınması ve krater aşınması da artmaktadır [7]. Fakat alüminyum alaşımları gibi demir içermeyen malzemeler delindiğinde kesme hızındaki artış arayüzeydeki kesme sıcaklığını daha az etkilemektedir [7]. Dolayısıyla, kesme sıcaklığındaki minimum dalgalanmalar, serbest yüzey aşınması değerinin de daha az dalgalanmasına neden olur.

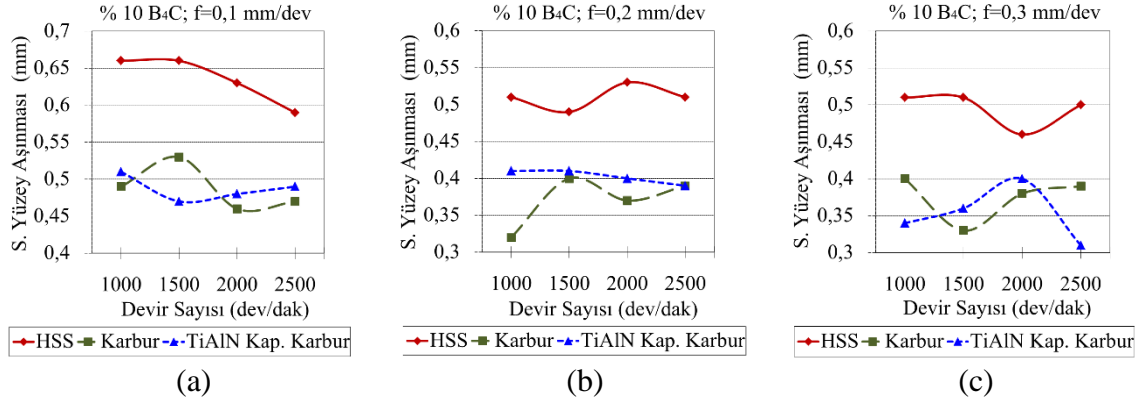


Şekil 4.10.  $n=1000$  dev/dak'da takviye oranına göre serbest yüzey aşınması (a)  $f=0,1$  mm/dev (b)  $f=0,2$  mm/dev (c)  $f=0,3$  mm/dev



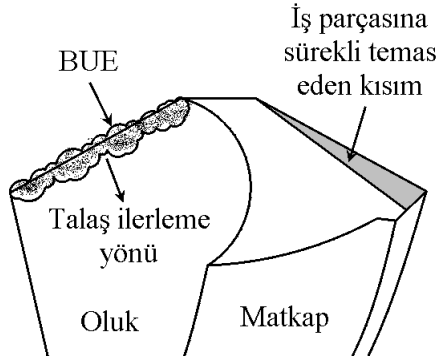
Şekil 4.11. İlerleme hızına göre serbest yüzey aşınması (a)  $n=1000$  dev/dak (b)  $n=1500$  dev/dak (c)  $n=2000$  dev/dak (d)  $n=2500$  dev/dak



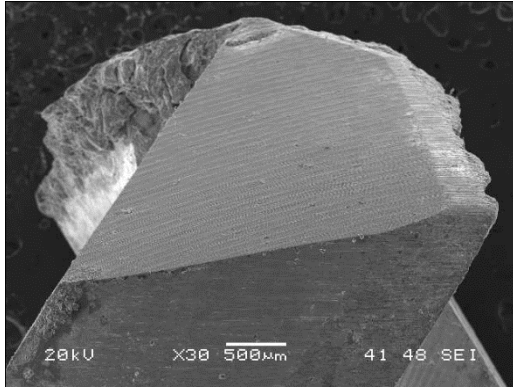


Şekil 4.12. Devir sayısına göre serbest yüzey aşınması (a)  $f=0,1$  mm/dev (b)  $f=0,2$  mm/dev (c)  $f=0,3$  mm/dev

Kesici takımlarda oluşan aşınma mekanizmalarını daha detaylı araştırmak amacıyla, tel erozyon tezgâhında, matkap uçları konik kısmın bitiminden 5 mm mesafeden kesilmiş ve SEM görüntüleri alınmıştır. Şekil 4.13 ve Resim 4.3’de matkap üzerinde oluşan YT mekanizması, Resim 4.4-4.10 arasındaki SEM fotoğraflarında ise delme sonrası matkapta oluşan aşınma tipleri görülmektedir. SEM görüntüleri genel olarak incelendiğinde, matkapta, serbest yüzey aşınması, köşe aşınması ve YT oluştuğu görülmektedir. YT, alüminyum, nikel, kobalt ve titanyum alaşımları gibi demir olamayan malzemelerin düşük kesme hızlarında ve düşük ilerleme oranlarında işlendiğinde meydana geldiği bilinmektedir [105]. İlâveten, sürtünme kuvvetine bağlı olarak artan delme kuvvetleri sonrası YT oluştuğu [106] ve kesici takım iş parçası ara yüzeyinde yükselen sıcaklıkların YT oluşumuna neden olduğu bildirilmiştir [107, 108]. Bu çalışmada da kullanılan her üç kesici takım malzemesi ile yapılan delme işleminde, ilerleme hızının artması ile delme kuvvetlerinin artmasına bağlı olarak YT artmıştır. HSS matkaplarda devir sayısındaki artışla YT artarken, kaplamalı ve kaplamasız karbür matkaplarda devir sayısındaki artışla YT azalmıştır. Benzer şekilde, alüminyum alaşımlarının karbür takımlarla tormalanmasında, düşük kesme hızlarının YT oluşumuna oldukça elverişli olduğu, kesme hızındaki artışla YT oluşumunun azaldığı bildirilmiştir [109-111].



Şekil 4.13. Matkap üzerinde YT'nin oluştuğu bölge



Resim 4.3. %10 B<sub>4</sub>C içerikli kompozit malzemenin HSS matkapla 2000 dev/dak devir sayısında, 0,3 mm/dev ilerleme hızında delinmesi sonucunda oluşan YT

Kesme esnasında takım aşındıkça matkabın kesici ağzının kompozit malzemeye temas eden alanı artar ve bu durum sürtünme kuvvetini ve kesme sıcaklığını artırır. Kesme bölgesinde maksimum noktaya ulaşan sıcaklığın etkisiyle kompozit malzeme, yumuşayarak kesici kenarın üzerinden matkabın oluklarına doğru akmaya başlar. Sıcaklığın etkisi ile yumuşayan katman kesme bölgesinden uzaklaştıkça soğuyarak, matkabın kesici ağzı üzerinde kompozit malzemenin bir kısmının yapışmasına ve YT oluşumuna yol açar. Bu zamana kadar yapılan çalışmaların bir kısmında YT katmanının kesici kenar üzerinde koruyucu bir tabaka oluşturduğu ve bu tabakanın aşınmayı önlediği iddia edilmiştir [1, 17]. Fakat bu durumun aksine, çok sayıda kırılmış SiC parçacıkları içeren gergin haldeki YT malzemesinin, aşınan takım üzerinden akarken aşınmayı arttırdığı da belirtilmiştir [4, 85]. Delme esnasında matkabın serbest yüzeyine doğru YT oluşmaya çalışsa da, bu kısım sürekli olarak kompozit malzeme ile temas halinde olduğundan, sıcaklığın etkisi ile yumuşayan malzeme bu araya giremez. Bu nedenle YT'nin matkabın serbest yüzeyi üzerinde oluşan aşınmayı önlediğinden bahsetmek zordur. Şekil 4.13 ve Resim 4.3'deki SEM grafikleri incelendiğinde, YT katmanının matkabın kesici ağızlarından başlayıp matkabın oluklarına doğru oluştuğu

görülmektedir. Yumuşayan YT katmanı, bir taraftan içerisindeki sert  $B_4C_p$  parçacıkları matkabın talaş yüzeyi üzerinden akarken bir miktar aşınmaya neden olurken, diğer taraftan içeriğindeki %75-90 oranındaki anayapı sayesinde kesici takımın talaş yüzeyi ile iş parçası arasında katı yağlayıcı vazifesi görerek koruyucu bir rol oynamaktadır. Lucchini ve diğerleri, (2003) tarafından [112], MMK'ların işlenmesinde YT katmanının, kesici takım üzerinde bir koruyucu olarak değil, bir yağlayıcı olarak rol oynadığı ifade edilmiştir. Ayrıca, bu katmanın kesici takımın talaş yüzeyini yüksek aşınmalara karşı biraz koruduğunu ve takımın serbest yüzeyinin sürekli aşınmaya maruz kaldığını belirtmişlerdir. Neticede kesici takımın talaş yüzeyi üzerinde oluşan aşınmanın, serbest yüzeyi üzerinde oluşan aşınmadan daha az olması, YT'nin katı yağlayıcı özelliğine atfedilebilir. Aynı zamanda kesici takım üzerinde oluşan abraziv aşınma mekanizması, matrisin aşındırıcı taneleri bir arada tutma kuvvetine bağlı olduğu söylenebilir.

Sert maden uçlu matkapların, elmas matkaplara göre daha ciddi YT'ye sahip olduğu ifade edilmiştir [23]. Resim 4.5 ve Resim 4.7'deki SEM grafikleri incelendiğinde, HSS matkapların karbür matkaplara göre daha fazla YT'ye sahip olduğu görülmektedir. Bunun nedeni takım sertliğine atfedilebilir. Resim 4.4 ve Resim 4.7'deki SEM grafikleri incelendiğinde, HSS matkaplar üzerinde  $B_4C_p$  parçacıkların oluşturduğu olukların, karbür matkaplarda oluşana göre daha derin olduğu ve bu oluklara yumuşak malzemenin sıvanmasıyla YT'nin oluştuğu görülmektedir. Literatürde bu ifadeyi destekler şekilde, HSS matkabın talaş yüzeyinde, seramik parçacıkların meydana getirdiği olukların, ezilen talaş tarafından doldurulmasıyla YT oluştuğu ifade edilmektedir [1].

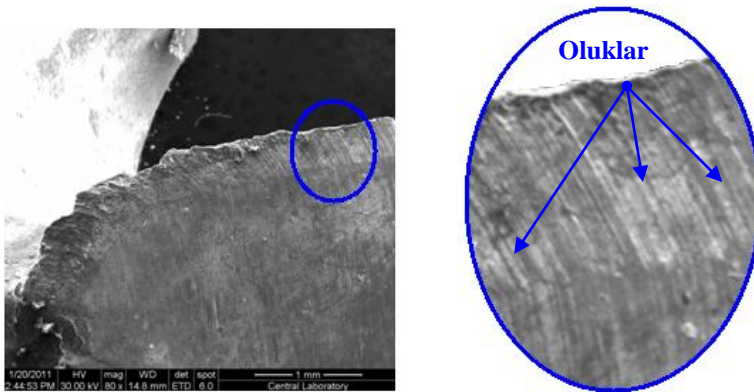
Resim 4.9 (%25  $B_4C_p$ ) ve Resim 4.10'daki (%10  $B_4C_p$ ) SEM grafikleri incelendiğinde takviye oranının artmasıyla birlikte YT miktarının da azaldığı görülmektedir. Benzer şekilde  $Al_4C_3$ -Al kompozitlerin işlenmesi ile ilgili bir çalışmada, kompozit malzeme içerisindeki takviye oranının artmasıyla, kompozit malzemenin sertliğinin arttığı ve YT'nin azaldığı bildirilmiştir [110].

Resim 4.5 ve Resim 4.6'da MMK malzemenin HSS matkapla işlenmesi sonucunda elde edilen en hassas ve en kötü yüzey pürüzlülük değerlerine göre, HSS matkapta meydana gelen aşınma biçimleri görülmektedir. Bu resimler incelendiğinde YT oluşumunun daha çok matkabın keski kenarında meydana geldiği görülmektedir. Resim 4.4'de aşındırıcı  $B_4C_p$  parçacıklarının HSS matkabın serbest yüzeyi üzerinde oluşturduğu küçük oluklar

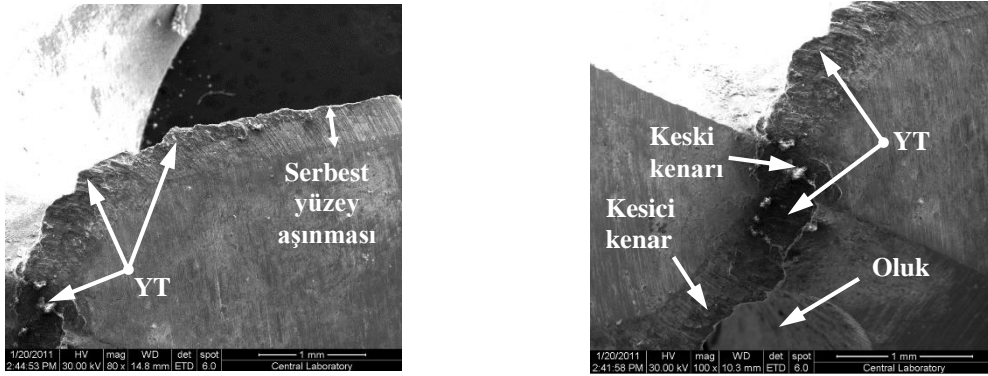
görülmektedir. Ayrıca yüzey pürüzlülüğü açısından en kötü yüzeyin oluştuğu HSS matkaba ait SEM görüntüsü incelendiğinde, serbest yüzey aşınma değerinin daha büyük olduğu görülmektedir.

Resim 4.7 ve Resim 4.8’de MMK malzemenin karbür matkapla işlenmesi sonucunda elde edilen en hassas ve en kötü yüzey pürüzlülük değerlerine göre, karbür matkapta meydana gelen aşınma biçimleri görülmektedir. Bu iki resim birlikte incelendiğinde YT oluşumunun, HSS matkaplara göre yok denecek kadar az olduğu görülmektedir. Ayrıca yüzey pürüzlülüğü açısından en kötü yüzey ile en hassas yüzeyin oluştuğu karbür matkap görüntüsünde, her iki matkapta da serbest yüzey aşınma değerinin hemen hemen aynı olduğu görülmektedir.

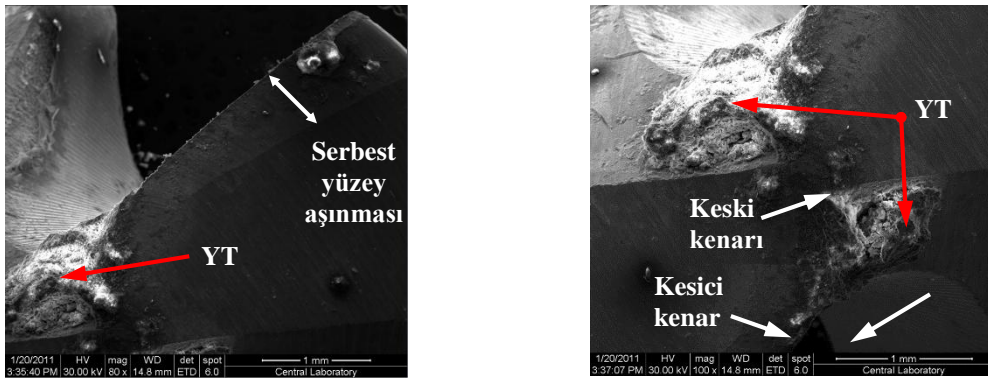
Resim 4.9 ve Resim 4.10’da ise, MMK malzemenin TiAlN kaplamalı karbür matkapla işlenmesi sonucunda elde edilen en hassas ve en kötü yüzey pürüzlülük değerlerine göre, matkapta meydana gelen aşınma biçimleri görülmektedir. Resimler incelendiğinde YT oluşumunun, HSS matkaplara göre daha az olduğu görülmektedir. Fakat kaplamasız karbür matkaplarla kıyaslandığında YT oluşumunun daha fazla olduğu görülmektedir. Bu durumun kaplama malzemesinin TiAlN olmasından ve Al kompozitler işlenirken YT oluşumuna meyilli olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Ayrıca en kötü yüzey ile en hassas yüzeyin oluştuğu TiAlN kaplamalı karbür matkap görüntüsünde, her iki matkapta da serbest yüzey aşınma değerinin neredeyse aynı olduğu görülmektedir. Aşındırıcı  $B_4C_p$  parçacıklarının kaplamalı ve kaplamasız karbür matkabın serbest yüzeyi üzerinde oluşturduğu küçük olukların, HSS matkapla kıyaslandığında takım sertliğine bağlı olarak daha belirsiz olduğu görülmektedir.



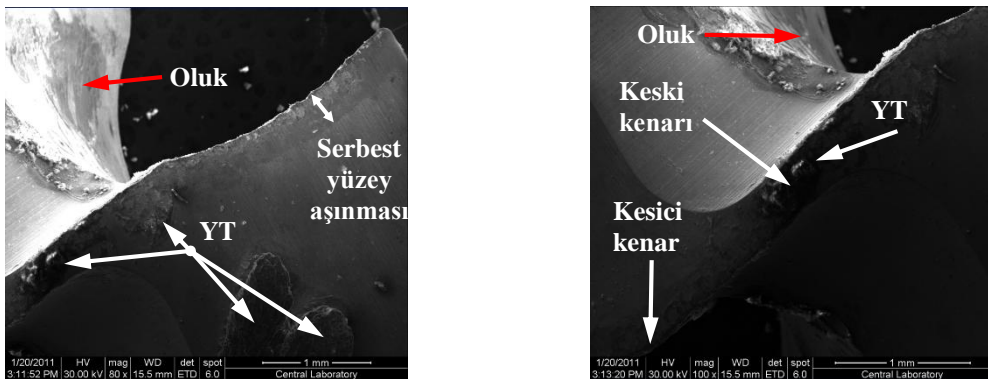
Resim 4.4. Aşındırıcı tanelerin matkabın kesici ağzında oluşturduğu küçük oluklar



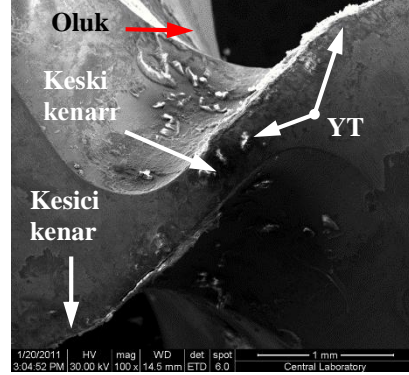
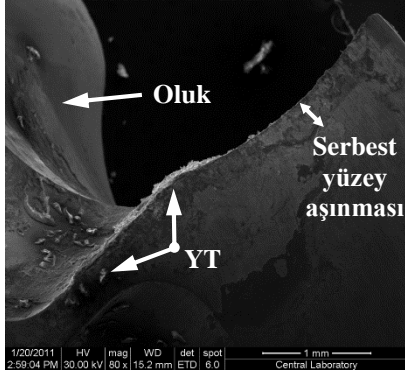
Resim 4.5. En hassas yüzey elde edilen HSS matkabın SEM görüntüsü (%10 B<sub>4</sub>C<sub>p</sub>, n=1000 dev/dak, f= 0,3 mm/dev)



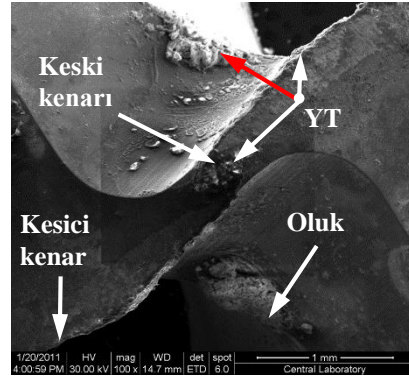
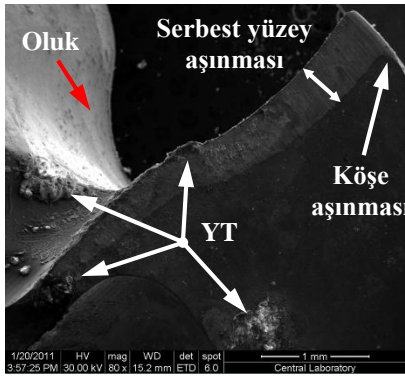
Resim 4.6. En kötü yüzey elde edilen HSS matkabın SEM görüntüsü (%15 B<sub>4</sub>C<sub>p</sub>, n=2500 dev/dak, f= 0,1 mm/dev)



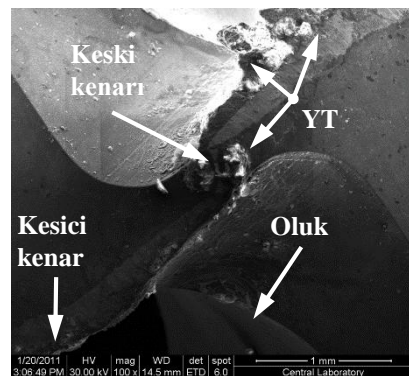
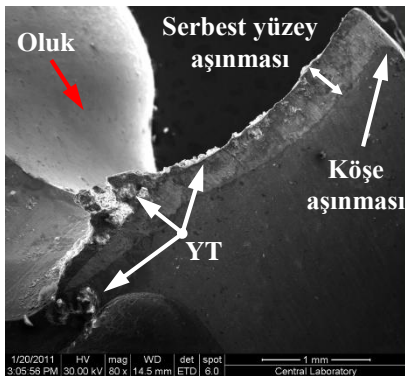
Resim 4.7. En hassas yüzey elde edilen karbür matkabın SEM görüntüsü (%15 B<sub>4</sub>C<sub>p</sub>, n=1000 dev/dak, f= 0,3 mm/dev )



Resim 4.8. En kötü yüzey elde edilen karbür matkabın SEM görüntüsü (%10 B<sub>4</sub>C<sub>p</sub>, n=2000 dev/dak, f= 0,3 mm/dev )



Resim 4.9. En hassas yüzey elde edilen kaplamalı karbür matkabın SEM görüntüsü (%25 B<sub>4</sub>C<sub>p</sub>, n=2500 dev/dak, f= 0,3 mm/dev )

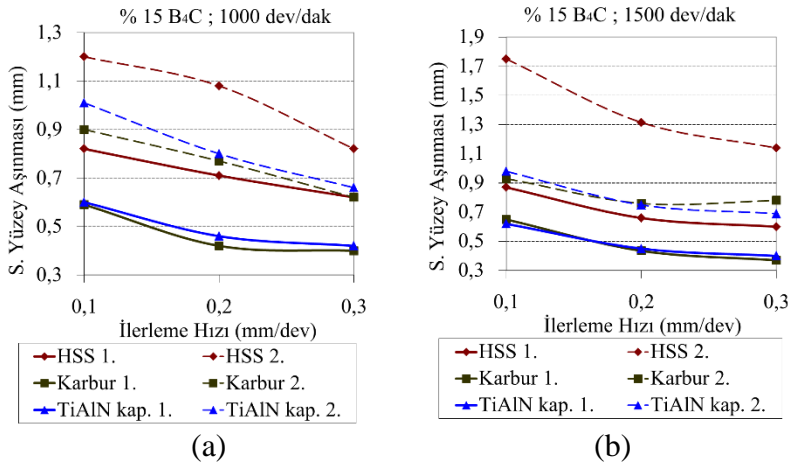


Resim 4.10. En kötü yüzey elde edilen kaplamalı karbür matkabın SEM görüntüsü (%10 B<sub>4</sub>C<sub>p</sub> MMK, n=2500 dev/dak, f= 0,1 mm/dev )

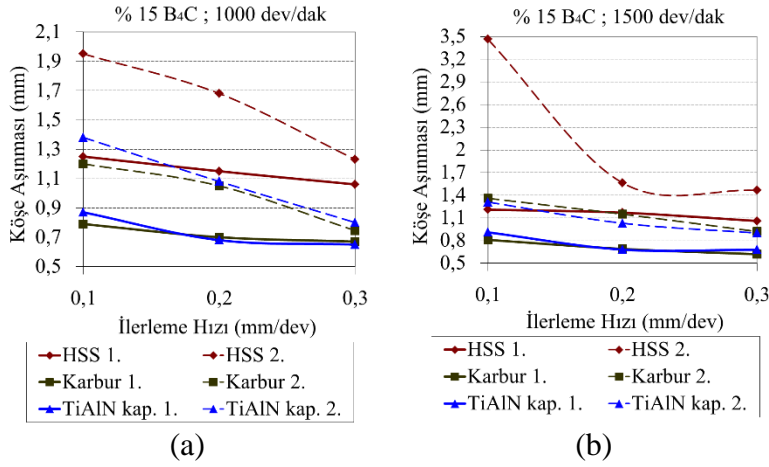
Ara verilmeksizin iki kez üst üste delik delindiğinde oluşan serbest yüzey aşınma değerlerindeki değişimi tespit etmek amacıyla, 1000 dev/dak ve 1500 dev/dak devir sayılarında ve 0,1 mm/dev, 0,2 mm/dev, 0,3 mm/dev ilerleme hızlarında her üç matkap malzemesi test edilmiştir. Belirtilen devir sayısı ve ilerleme hızlarında %25'lik kompozit malzeme, HSS matkaplarla üst üste iki kez delinememiştir. Şekil 4.14'de %15 MMK



malzeme 1000 dev/dak ve 1500 dev/dak'da delindiğinde, birinci ve ikinci delme sonucunda oluşan serbest yüzey aşınma değerleri görülmektedir. Grafikler incelendiğinde, hem birinci hem de ikinci delme sonucunda serbest yüzey aşınma değerinin,  $V_B=0,3$  mm değerini aştığı görülmektedir. İlâveten, birinci delme ile kıyaslandığında ikinci delme sonucunda oluşan serbest yüzey aşınma değerinin, HSS matkap için 1000 dev/dak'da %30-50, 1500 dev/dak'da ise %90-100 arasında artış gösterdiği görülmektedir. Kaplamalı ve kaplamasız karbür matkaplarda ise bu artış miktarı yaklaşık %50 -%75 olduğu görülmektedir. Şekil 4.15'de %15 MMK malzeme 1000 dev/dak ve 1500 dev/dak'da matkapla delindiğinde, birinci ve ikinci delme sonucunda oluşan köşe aşınma değerleri görülmektedir. Grafikler incelendiğinde birinci ve ikinci delme sonucunda oluşan köşe aşınma değerinin 0,5 mm'yi aştığı görülmektedir. Ayrıca, Şekil 4.14 ve Şekil 4.15 birlikte incelendiğinde ikinci delme sonucunda oluşan serbest yüzey ve köşe aşınma değerlerinin, ilerleme hızının artmasıyla azaldığı görülmektedir. Bu şekillerden, takım sertliğinin abraziv aşınma mekanizması için önemli olduğu ve HSS takımların  $B_4C_p$  içerikli MMK'nın delinmesi için uygun olmadığı görülmektedir. Ayrıca, ikinci delme sonucunda tüm matkap malzemelerinde YT oluşumunun arttığı tespit edilmiştir. Bunun nedeni, takım ilk kez kullanıldığında kesici ağızdaki serbest yüzey pürüzsüz olduğundan bu yüzeylere talaş sıvanması nispeten zor olmuştur. Fakat ikinci kez delme yapıldığında, sert  $B_4C_p$  seramik parçacıkları tarafından aşındırılan serbest yüzeyde küçük oluklar meydana gelmiş ve bu küçük olukların sıvanma eğiliminde olan talaş tarafından doldurulması, YT oluşumunu artırmıştır. Bir delik delindiğinde olduğu gibi kesici kenarlarda çentik veya kırılma meydana gelmemiştir.



Şekil 4.14. Birinci delmeye ve ikinci delme sonucunda matkapta oluşan serbest yüzey aşınma değerleri (a) n=1000 dev/dak (b) n=1500 dev/dak



Şekil 4.15. Birinci delme ve ikinci delme sonucunda matkapta oluşan köşe aşınma değerleri  
(a) n=1000 dev/dak (b) n=1500 dev/dak

Tüm deney şartları altında bir delik delindiğinde her üç matkap malzemesi için de,  $V_B=0,3$  mm serbest yüzey aşınma değeri aşılmıştır. Fakat her üç matkap malzemesi ile %10 B<sub>4</sub>C<sub>p</sub> içeren MMK malzeme delindiğinde  $V_{Bmax}=0,6$  mm'nin altında kalmıştır. Aynı durum %15 B<sub>4</sub>C<sub>p</sub> içeren MMK malzeme 0,2 mm/dev ve 0,3 mm/dev ilerleme hızında ve %25 B<sub>4</sub>C<sub>p</sub> içeren MMK malzeme 0,3 mm/dev ilerleme hızında delindiğinde de görülmüştür. Bu sonuç, takviye oranındaki artışın kesici takım üzerinde oluşturduğu serbest yüzey aşınma değeri üzerindeki etkisinin, ilerleme hızının artmasıyla azaldığını göstermektedir. Fakat ara verilmeksizin iki kez üst üste delik delindiğinde oluşan serbest yüzey aşınma değerleri  $V_{Bmax}$  değerini aşmış ve bütün matkapların takım ömrü dolmuştur.

#### 4.2.4. Serbest yüzey aşınması için Taguchi metodu ve ANOVA

Bu kısımda, Taguchi deneysel tasarımı yardımıyla, devir sayısının, ilerleme hızının, farklı takviye oranına sahip kompozit malzemenin, kesici takım malzemesinin ve bunların etkileşimlerinin serbest yüzey aşınması üzerindeki etkileri belirlenerek, serbest yüzey aşınması bakımından sistemin optimizasyonu gerçekleştirilmiştir. Çizelge 4.9'da, her bir faktörün ve seviyelerinin (Bkz. Çizelge 3.5) Taguchi'nin L<sub>27</sub> ortogonal dizisine ait tabloya (Bkz. Çizelge 3.6) yerleştirilmiş hali ile yapılan her bir deneye karşılık gelen serbest yüzey aşınması değerleri verilmiştir. Çizelge 4.9'da, Taguchi tasarım sürecinin dördüncü aşamasında "En düşük daha iyidir" hesaplama yöntemi ile hesaplanmış serbest yüzey aşınmasına ait S/N oranları verilmiştir.



Çizelge 4.9. Serbest yüzey aşınması için kullanılan faktör ve seviyelerin Taguchi'nin  $L_{27}$  ortogonal dizisine yerleştirilmiş hali ve S/N oranları

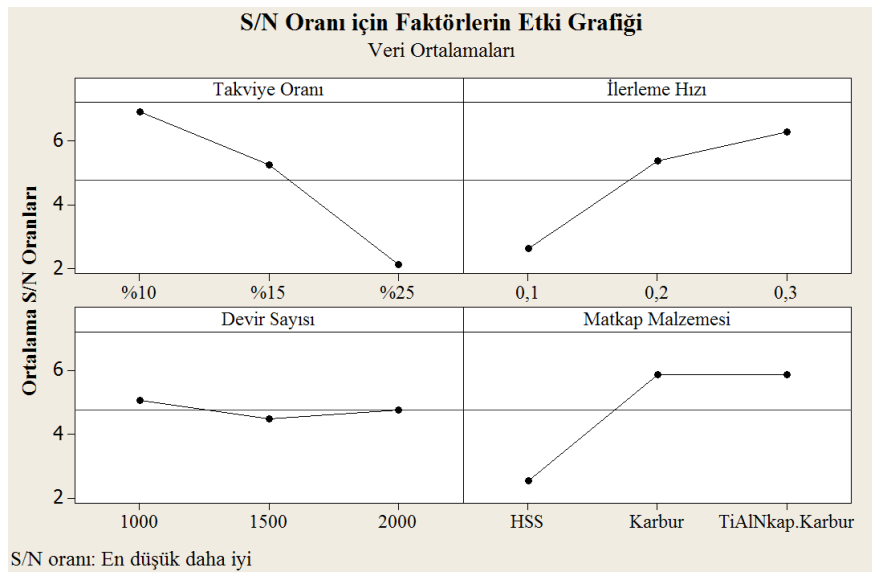
Deney No	Takviye Oranı (A)	İlerleme Hızı (B)	Devir sayısı (C)	Matkap Malzemesi (D)	Serbest Yüzey Aşınması (V <sub>B</sub> ) (mm)	Serbest Yüzey Aşınması için S/N oranı
1	10	0,1	1000	HSS	0,66	3,609
2	10	0,1	1500	Karbür	0,53	5,514
3	10	0,1	2000	TiAlN	0,48	6,375
4	10	0,2	1000	Karbür	0,32	9,897
5	10	0,2	1500	TiAlN	0,41	7,744
6	10	0,2	2000	HSS	0,53	5,514
7	10	0,3	1000	TiAlN	0,34	9,370
8	10	0,3	1500	HSS	0,51	5,849
9	10	0,3	2000	Karbür	0,38	8,404
10	15	0,1	1000	Karbür	0,59	4,583
11	15	0,1	1500	TiAlN	0,62	4,152
12	15	0,1	2000	HSS	0,90	0,915
13	15	0,2	1000	TiAlN	0,46	6,745
14	15	0,2	1500	HSS	0,66	3,609
15	15	0,2	2000	Karbür	0,45	6,936
16	15	0,3	1000	HSS	0,62	4,152
17	15	0,3	1500	Karbür	0,37	8,636
18	15	0,3	2000	TiAlN	0,425	7,432
19	22	0,1	1000	TiAlN	0,80	1,938
20	25	0,1	1500	HSS	1,54	-3,750
21	25	0,1	2000	Karbür	0,96	0,355
22	25	0,2	1000	HSS	0,97	0,265
23	25	0,2	1500	Karbür	0,67	3,479
24	25	0,2	2000	TiAlN	0,62	4,152
25	25	0,3	1000	Karbür	0,56	5,036
26	25	0,3	1500	TiAlN	0,56	5,036
27	25	0,3	2000	HSS	0,73	2,734

Taguchi tasarım sürecinin beşinci aşamasında, optimum şartlar belirlenmiştir. Bu amaçla takviye oranı, ilerleme hızı, devir sayısı ve matkap malzemesi için her bir seviyenin S/N oranlarının aritmetik ortalaması alınmış, serbest yüzey aşınması için Çizelge 4.10 elde edilmiştir. Her bir faktörün, serbest yüzey aşınması üzerindeki etkileme derecesi Çizelge 4.10'un en son satırında verilmiştir. Buna göre serbest yüzey aşınması üzerinde etkili olan kontrol faktörleri etki derecesine göre sıralandığında, 1. sırayı takviye oranı, 2. sırayı ilerleme hızı, üçüncü sırayı matkap malzemesi ve dördüncü sırayı devir sayısı almıştır. Her bir faktörün ortalama S/N oranına göre etki grafiği çizildiğinde, Şekil 4.16'daki serbest yüzey aşınması için S/N oranı etki grafiği elde edilmiştir. Grafiklerdeki ince yatay çizgi S/N oranına ait aritmetik ortalamayı ifade etmektedir. Bu şekillerdeki faktörlere ait her bir seviye ile yatay çizgi arasındaki mesafenin büyüklüğü, o faktörün etki derecesini göstermektedir. Şekil 4.16 incelendiğinde, takviye oranı artarken serbest yüzey aşınmasının arttığı, ilerleme hızı artarken serbest yüzey aşınmasının azaldığı ve devir sayısının serbest yüzey aşınması

üzerindeki etkisinin önemsenmeyecek kadar az olduğu görülmektedir. Matkap malzemesi açısından bakıldığında, kaplamalı ve kaplamasız karbür matkapların, HSS matkaplara göre daha az aşındığı ve karbür matkaplar için kullanılan TiAlN kaplama malzemesinin etkisinin olmadığı, yani kesici takım üzerinde oluşan serbest yüzey aşınmasını azaltmadığı görülmektedir.

Çizelge 4.10. Serbest yüzey aşınmasına ait her bir faktör ve seviyeye için ortalama S/N oranı

Seviye	Takviye Oranı	İlerleme Hızı	Devir Sayısı	Matkap Malzemesi
1	6,920*	2,632	5,066*	2,544
2	5,240	5,371	4,474	5,871
3	2,138	6,294*	4,757	5,883*
<b>Fark</b>	4,782	3,662	0,592	3,339
<b>Sıralama</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>4</b>	<b>3</b>



Şekil 4.16. Serbest yüzey aşınmasına ait kontrol faktörlerinin, “En düşük daha iyidir” yöntemi ile hesaplanmış S/N oranı etki grafiği

Optimum şartların belirlenmesi amacıyla Çizelge 4.10’da serbest yüzey aşınması için her faktörün sahip olduğu en büyük S/N oranı (\* ile işaretlenmiş olan) tespit edilmiştir. Sonuçta, serbest yüzey aşınması için optimum şartlar elde edilmiştir. Sonuçta elde edilen optimum şartlar Çizelge 4.11’de verilmiştir.

Çizelge 4.11. Serbest yüzey aşınması için belirlenmiş olan optimum şartlar

Serbest Yüzey Aşınması için Optimum Şartlar			
Takviye Oranı	İlerleme hızı	Devir Sayısı	Matkap Malzemesi
%10 B <sub>4</sub> C <sub>p</sub>	0,3	1000	TiAlN kaplamalı karbür

Çizelge 4.12’de serbest yüzey aşınmasına ait ANOVA sonuçları verilmiştir. Çizelge 4.12’deki  $F_{test}$  sonuçları incelendiğinde, serbest yüzey aşınması üzerine takviye oranının, ilerleme hızının ve matkap malzemesinin etkisi anlamlı olmuştur. Serbest yüzey aşınması üzerine, devir sayısının ve faktörlerin etkileşimlerinin etkisi anlamlı olmamıştır. Çizelge 4.12’nin son sütunu her bir faktörün ve etkileşimlerinin anlamlılık seviyelerini yüzdeliklik olarak göstermektedir. Buna göre takviye oranı, %36,72 ile en fazla etkiye sahip olmuştur. İlerleme hızı ve matkap malzemesi etkisinin yüzde dağılımına bakıldığında birbirine yakın olduğu görülmektedir. Hatta matkap malzemesinin etkisi 2. seviyede iken, ilerleme hızının etkisi 3. seviyede kalmıştır. Fakat bu sonuç S/N oranı ile çelişmektedir. S/N oranına bakıldığında ise durum tam tersidir. Yani ilerleme hızının etkisi 2. seviyede iken, matkap malzemesinin etkisi 3. seviyede kalmıştır. Her iki faktörün yüzde dağılım değerlerine bakıldığında aradaki farkın önemsenmeyecek kadar küçük olduğu görülmektedir. Fakat S/N oranları için, her iki faktörün Çizelge 4.10’daki fark değerlerine bakıldığında aradaki farkın daha belirgin olduğu görülmektedir. Bu sebeple sonuçta serbest yüzey aşınması üzerine etki eden faktörlerin önem sırası, takviye oranı, ilerleme hızı ve matkap malzemesi olarak belirlenmiştir.

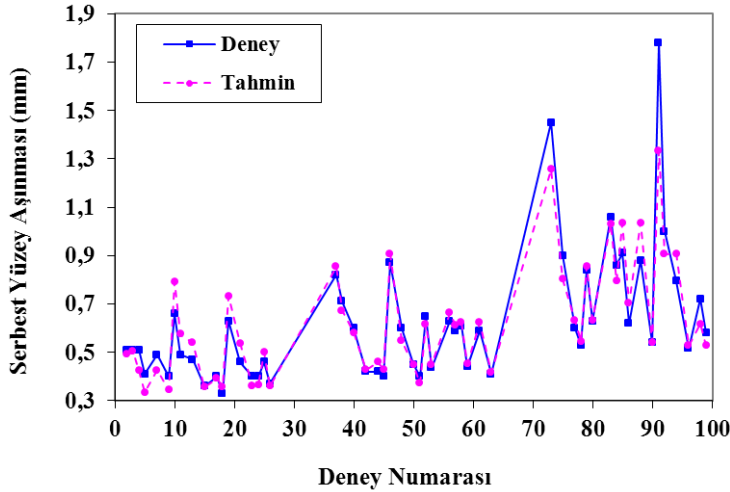
Çizelge 4.12. Serbest yüzey aşınmasına ait ANOVA sonuçları

Faktörler	SD	KT	Var	$F_{test}$	YD
Takviye Oranı (A)	2	0,6221	0,31105	34,832	36,72
İlerleme Hızı (B)	2	0,4073	0,20365	22,805	24,04
Devir sayısı (C)	2	0,0179	0,00895	1,002	1,06
Matkap Malzemesi (D)	2	0,4089	0,20445	22,895	24,14
AxB	4	0,0942	0,02355	2,637	5,56
AxC	4	0,033	0,00825	0,924	1,95
BxC	4	0,057	0,01425	1,596	3,37
Hata	6	0,0536	0,00893		3,16
<b>Toplam</b>	<b>26</b>	<b>1,694</b>			<b>100</b>

SD: Serbestlik derecesi, KT: Kareler Toplamı, Var: Varyans, YD: Yüzde Dağılım  
 $F_{-tablo(0,05;2;6)}=5,14$ ,  $F_{-tablo(0,05;4;6)}=4,53$

### Deney sonuçları ile tahmin sonuçlarının karşılaştırılması

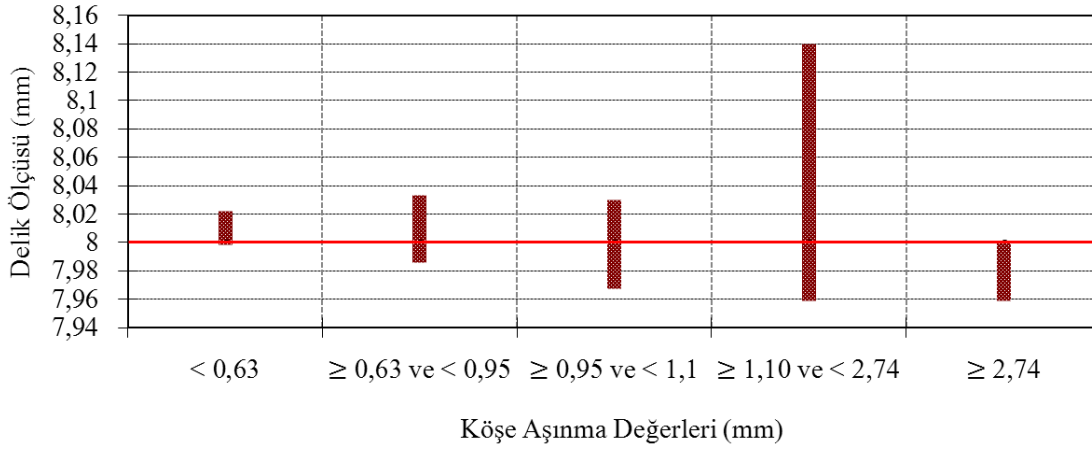
Deneylemlerden elde edilen serbest yüzey aşınması sonuçları ile Taguchi metodu ile tahmin edilen sonuçlar kıyaslanmış, EK-4’de tablo halinde ve Şekil 4.17’de grafik halinde verilmiştir. Elde edilen sonuçlar, belirlilik katsayısı  $R^2= 0,89$  serbest yüzey aşınmasının tahmin edilmesinde Taguchi yönteminin başarı ile uygulandığını göstermiştir (Şekil 4.17).



Şekil 4.17. Serbest yüzey aşınması için deney sonuçları ile tahmin sonuçlarının karşılaştırılması

### Delik çap ölçülerindeki değişimler

Kesici takımında oluşan köşe aşınması değerlerine göre delik çap ölçüsünün alt ve üst sınır değerleri Şekil 4.18’de verilmiştir. Tüm şartlar göz önünde bulundurulduğunda yapılan deneylerde delik çap ölçüsü, alt sınır değeri 7,959 mm ve üst sınır değeri 8,14 mm aralığında kalmıştır. Kesici takım aşınmasına bağlı olarak, üretilen deliğin çap ölçülerinin de genel olarak küçüldüğü görülmüştür. Üretilen deliğin çap ölçüsü, matkap üzerinde oluşan köşe aşınmasına ve delme esnasında oluşan tireşimlere bağlıdır. Köşe noktalarındaki aşınmaya bağlı olarak matkabın çapı küçülecektir. Bu açıdan bakıldığında, helisel oluklu matkaplarla delme yaparken takım ömrünün belirlenmesinde, üretilen deliğin çap ölçüsünde göz önünde bulundurulması önemlidir. Köşe aşınma değerleri 1,10 mm ile 2,74 mm arasında olduğunda, aynı zamanda delik çapında artış olduğu da görülmektedir. Bunun sebebi, kesici takım üzerinde biriken YT’nin, kesici kenarın genişlemesine neden olmasıyla açıklanabilir [4].



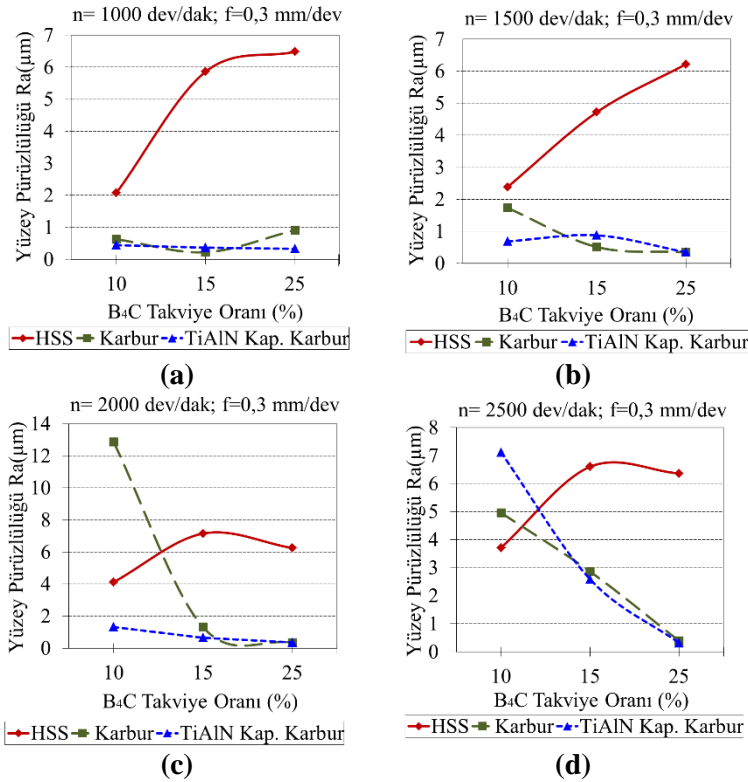
Şekil 4.18. Köşe aşınma değerlerine göre delik ölçüsündeki sapmalar

#### 4.2.5. Delme sonrası oluşan yüzey pürüzlülüğü ve talaş oluşumu

Talaşlı imalatta parçayı istenilen konum ve boyut toleransları içerisinde üretmenin yanı sıra, parçanın işleme tekniğine uygun yüzey kalitesi sınırları içerisinde üretilmesi gerekmektedir. Bu durum sağlanamadığı takdirde, üretilen parça hurdaya çıkmakta ve işçilik, enerji, kesici takım ve zaman kaybından dolayı üretim maliyetleri artmaktadır. İşleme tekniği, sistemdeki titreşimler, kesme parametreleri, kesici takım iş parçası ilişkisi, kesici takım geometrisi, talaş derinliği, talaş biçimi, soğutma sıvısı ve üretim esnasında oluşan sıcaklıklar gibi birçok faktörler işlenen yüzeyin kalitesini etkilemektedir. Tornalama ve frezeleme operasyonlarında çoğu kez iyi bir bitirme yüzeyi elde etmek için ince bir paso talaş bırakılır. Fakat delme operasyonlarında, delik ölçüleri matkap çapına eşit olduğundan, iyi bir bitirme yüzeyi elde etmek için gerekli olan ince paso talaş verilemez ve delme operasyonları genellikle tek aşamada bitirilir. Bu sebeple delme işleminde elde edilecek olan yüzey kalitesinin önceden tahmin edilmesi önemlidir.

Bu çalışmada delme deneylerinden sonra, delinen delik eksenlerine paralel ve dört farklı noktadan 8 mm uzunluğunda yüzey pürüzlülüğü ölçülmüş ve sonuçlar kayıt edilmiştir. Kayıt edilen dört farklı pürüzlülük değerinin ortalaması alınmıştır. İmalatta birçok deliğin giriş ve çıkışına genelde havşa açıldığından, bu kısımların yüzey pürüzlülük değeri ihmal edilebilir. Bu çalışmada, delik sonlarındaki kötü yüzeylerin pürüzlülük sonuçlarını etkilememesi için, delik girişinden ve çıkışından 2 mm içeride olacak şekilde, toplam ölçme mesafesi 8 mm olarak seçilmiştir. EK-3’de HSS, karbür ve TiAlN kaplamalı karbür matkapla yapılan delme

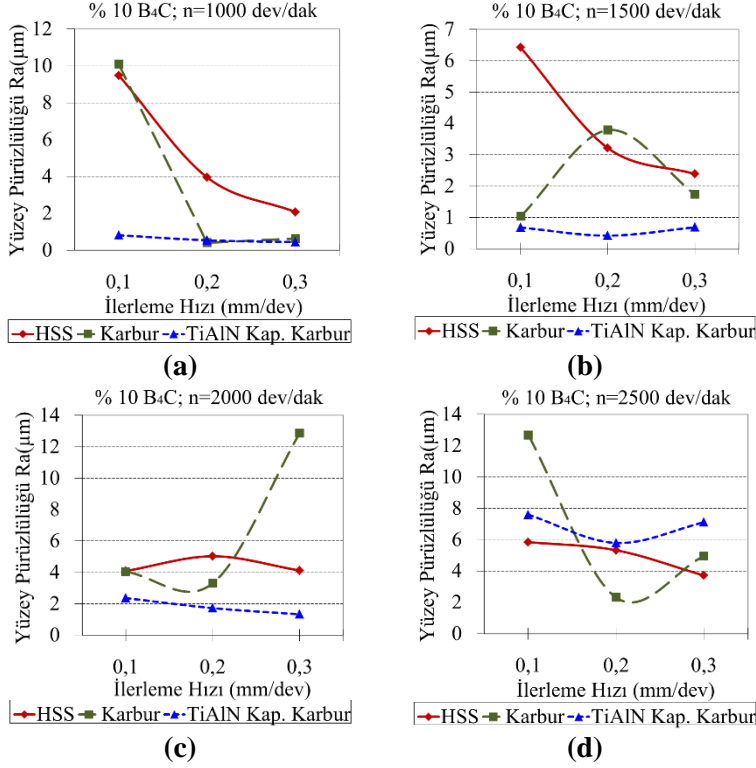
işlemi sonucunda Mitutoyo SJ-201 yüzey pürüzlülük ölçüm cihazı ile elde edilen, ortalama yüzey pürüzlülük ( $R_a$ ) değerleri verilmiştir.



Şekil 4.19. Takviye oranının yüzey pürüzlülüğüne etkisi

Şekil 4.19'da takviye oranlarına göre yüzey pürüzlülüğü değerleri görülmektedir. Şekil 4.19 incelendiğinde, dört farklı devir sayısında da kaplamasız karbür ve kaplamalı karbür matkap ile delme yapıldığında takviye oranındaki artış ile ortalama yüzey pürüzlülük değerinin azaldığı görülmektedir. Ancak, HSS matkaplarla delme yapıldığında ise, takviye oranındaki artış ile ortalama yüzey pürüzlülük değerini arttırdığı görülmüştür. Bunun nedeni kesici takım ile delinen malzeme arasındaki ilişkiye atfedilebilir. Ortaya çıkan bu sonuç, Tosun ve Muratoğlu'nun (2004) [29] matkap sertliği arttıkça, deliğin yüzey pürüzlülüğünün azaldığı görüşlerini desteklemektedir. Kaplamalı ve kaplamasız karbür matkaplar takviye oranı arttıkça, delik içerisinde sert  $B_4C_p$  parçacıkları ile daha fazla temas etmesi sonucu meydana gelen taşlama ve honlama etkisi arttığından dolayı yüzey kalitesi artmıştır [1, 6]. HSS matkap malzemesi ise, karbür matkaplara göre daha yumuşak bir malzemedir. Bu nedenle oluşan taşlama ve honlama etkisi azalmakta ve ilaveten aşındırıcı sert  $B_4C_p$  parçacıkları HSS matkap üzerinde daha fazla aşındırıcı etkisine sahip olmaktadır. Bu ise HSS matkabın,

karbür matkaplardan daha kısa zamanda ve daha çok miktarda aşınmasına; dolayısıyla nispeten kötü yüzey oluşmasına neden olmaktadır.



Şekil 4.20. İlerleme hızının yüzey pürüzlülüğüne etkisi

Şekil 4.20’de, farklı kesme hızlarında, ilerleme hızının yüzey pürüzlülüğü üzerine etkisi görülmektedir. Bu zamana kadar yapılan literatür çalışmalarında; yüzey pürüzlülük değerinin, ilerleme hızındaki artışla arttığı, kesme hızındaki artışla azaldığı ifade edilmektedir. Bu çalışmada ise, bazı çalışmaların aksine [6, 11, 23], ilerleme hızındaki artışla yüzey pürüzlülük değerinin azaldığı sonucuna ulaşılmıştır (Şekil 4.20). Bunun sebebinin, ilerleme hızının artmasıyla kesici takımın, delinen malzeme ile temas süresinin azalması ile ilişkilendirilebilir [1, 23]. Neticede temas süresinin azalmasına bağlı olarak kesici takım üzerinde oluşan aşınma miktarı azalmakta ve bu durum işlenen yüzeyin pürüzlülük değerinin azalmasına sebep olmaktadır. Elde edilen bu sonuçlar, Tosun ve Muratoğlu’nun [29] ve El-Gallab ve diğerlerinin, (1998) [113], ilerleme hızının yüzey pürüzlülüğü üzerine etkisi hakkındaki görüşlerini desteklemektedir. Fakat Ahamed ve diğerlerinin, (2010) [1], HSS matkaplarla düşük hız ve düşük ilerleme kombinasyonu ile delinebileceği ifadesinin aksine, düşük hız ve nispeten yüksek ilerleme hızıyla delindiğinde en iyi sonuç elde edilmiştir (Şekil

4.20). Deneyleerde elde edilen en iyi ve en kötü yüzey pürüzlülük değerleri ve kesme şartları Çizelge 4.13’de verilmiştir.

Çizelge 4.13. Matkap malzemesine göre en iyi ve en kötü işleme yüzeylerinin oluştuğu kesme şartları

Takviye Oranı	İlerleme hızı (mm/dev)	Devir sayısı (dev/dak)			
		1000	1500	2000	2500
% 10 B <sub>4</sub> C <sub>p</sub>	0,1				Kaplamalı karbür R <sub>a</sub> =7,60 μm
	0,3	HSS R <sub>a</sub> =2,08 μm		Karbür R <sub>a</sub> =12,87 μm	
% 15 B <sub>4</sub> C <sub>p</sub>	0,1				HSS R <sub>a</sub> =13,48 μm
	0,3	Karbür R <sub>a</sub> =0,23 μm			
% 25 B <sub>4</sub> C <sub>p</sub>	0,3				Kaplamalı karbür R <sub>a</sub> =0,32 μm

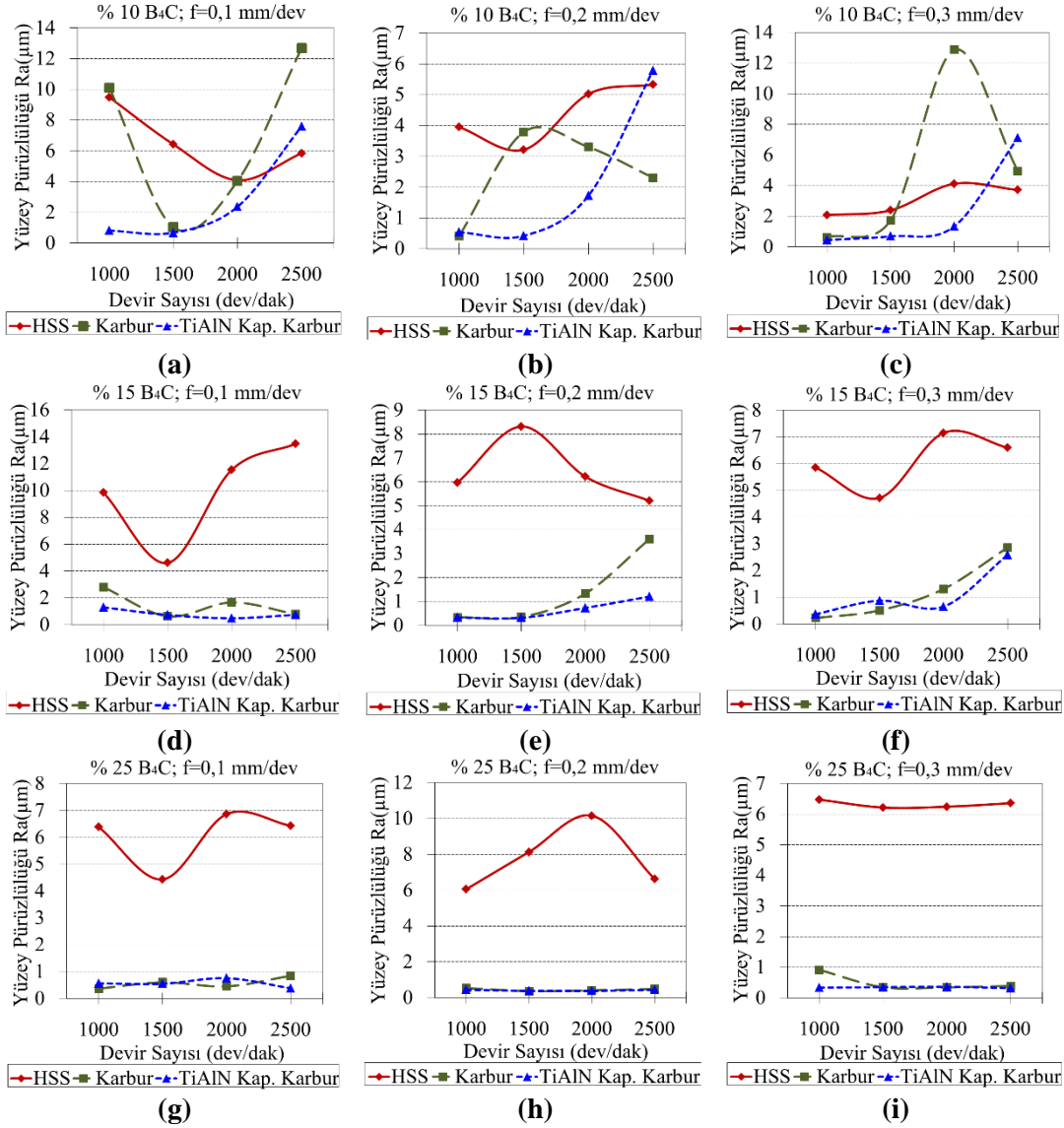
Gölgelendirilmiş hücreler en kötü yüzeyi, gölgelendirilmemiş hücreler ise en iyi yüzeyi ifade etmektedir.

Şekil 4.21’deki grafikler incelendiğinde, farklı işleme şartlarında, devir sayısındaki değişime bağlı olarak ortalama yüzey pürüzlülük değerinde dalgalanmalar görülmektedir. Bu grafiklerden devir sayısının yüzey pürüzlülüğü üzerine etkisinin takviye oranına bağlı olduğu söylenebilir. Şöyle ki, %10 B<sub>4</sub>C<sub>p</sub> içerikli kompozit malzeme işlenirken, devir sayısının artmasına bağlı olarak ortalama yüzey pürüzlülük değerindeki dalgalanmalar çok keskin ve büyüktür (Şekil 4.21a-c). Takviye oranı %15 B<sub>4</sub>C<sub>p</sub> olduğunda, devir sayısındaki artışa bağlı olarak ortalama yüzey pürüzlülük değerinin değişimindeki dalgalanmalar azalmaktadır (Şekil 4.21d-f). %25 B<sub>4</sub>C<sub>p</sub> içerikli kompozit malzeme işlenirken, özellikle kaplamalı karbür ve kaplamasız karbür matkaplar için, devir sayısındaki dalgalanmalar kaybolmakta ve hemen hemen aynı seviyeye gelmektedir (Şekil 4.21g-i). %25 B<sub>4</sub>C<sub>p</sub> içerikli kompozit malzemenin delinmesinde, her üç ilerleme hızında da devir sayısının artmasına rağmen yüzey pürüzlülük değerinde genel olarak belirli bir değişimin olmaması, kaplamalı ve kaplamasız karbür matkaplar için devir sayısının yüzey pürüzlülüğü üzerine etkisinin, takviye oranına bağlı olduğunu göstermektedir.

Önceki çalışmalara bakıldığında, kesme hızı arttıkça yüzey pürüzlülük değeri azalmaktadır. Fakat % 15 B<sub>4</sub>C<sub>p</sub> MMK, kaplamalı karbür ve kaplamasız karbür matkaplarla delindiği zaman, önceki çalışmaların tersine [6, 23, 28, 29], devir sayısı arttıkça yüzey pürüzlülük değerinin de arttığı görülmüştür (Şekil 4.21e-f). Ayrıca %25 MMK delinirken devir sayısındaki artışın yüzey pürüzlülük değeri üzerindeki çok küçük etkileri ihmal edilirse, devir sayısındaki



artışın yüzey pürüzlülük değeri üzerinde çok az bir etkiye sahip olduğu söylenebilir (Şekil 4.21g-i).



Şekil 4.21. Devir sayısının yüzey pürüzlülüğüne etkisi

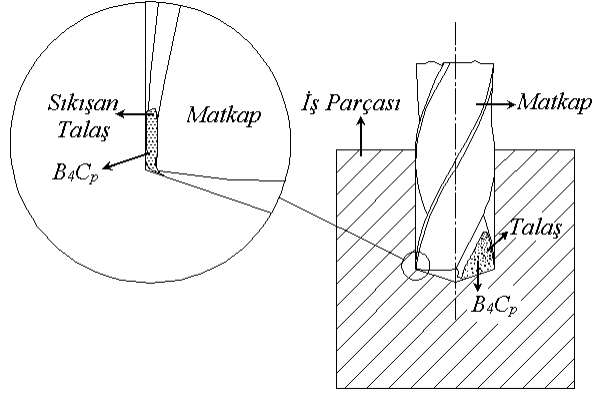
İşleme yöntemlerine göre ulaşılabilen  $R_a$  değerleri, honlama için 0,006-0,35  $\mu\text{m}$ , taşlama için 0,012-6,3  $\mu\text{m}$  ve delme için 1,6-25  $\mu\text{m}$  olduğu belirtilmiştir [114]. Matkap malzemesi açısından bakıldığında, taşlama kalitesinde en iyi bitirme yüzeyi karbür ve kaplamalı karbür matkap ile elde edilmiştir. Hatta %25 B<sub>4</sub>C<sub>p</sub> içerikli MMK'nın 0,2 mm/dev ve 0,3 mm/dev ilerleme hızında, karbür ve kaplamalı karbür matkap ile delinmesiyle honlama kalitesinde en iyi bitirme yüzeyi elde edilmiştir. En kötü bitirme yüzeyi HSS matkapla delme yapıldığı zaman elde edilmiştir. Ancak, üç farklı takım malzemesi ile yapılan delme işlemi sonunda

ölçülen yüzey pürüzlülük değerleri, delme operasyonu için önceden kabul edilmiş yüzey pürüzlülük değeri, N7 ile N10 yüzey kalitesi (1,6  $\mu\text{m}$  ile 12,5  $\mu\text{m}$ ) [114] aralığında kalmıştır.

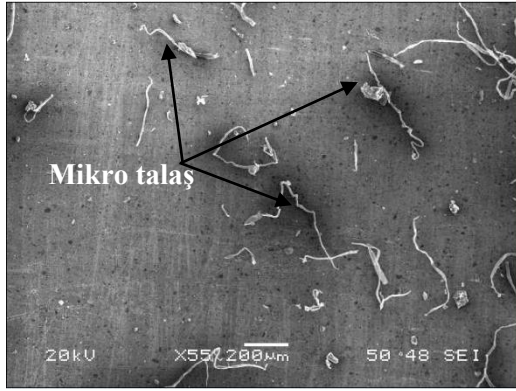
Delinen delik yüzeyinin mikro yapısını incelemek amacıyla kompozit malzemeler tel erozyon tezgâhında, deliğin ortasından iki eşit parçaya bölünmüş ve yüzeyin SEM görüntüleri alınmıştır. Resim 4.11a-4.16a'da, delik yüzeyinin orta kısmından çekilmiş SEM görüntüleri, Resim 4.11b-4.16b'de ise delik sonundan çekilmiş yüzeyin SEM görüntüleri görülmektedir. Genel olarak SEM grafikleri incelendiğinde delik çıkışlarında yüzey pürüzlülüğünün arttığı ve bazılarında derin çukur ve olukların oluştuğu görülmektedir. Bunun nedeni, delik sonuna doğru iyice aşınmış olan matkap, ilerlemeden kaynaklanan ilerleme kuvvetinin de etkisiyle delik sonunda kalan 1-2 mm ince tabakayı kesmeden kopartmıştır (Resim 4.17). Yani ilerleme kuvveti daha baskın çıkmıştır. Deliğin son kısmında matkap tarafından kaldırılması gereken 1-2 mm'lik ince tabakanın körlenmiş matkap tarafından kesilmeden koparılması, delinmiş yüzeyde mikro çatlakların, olukların ve kraterlerin oluşmasına neden olmaktadır (Resim 4.11b-4.16b). Buna ilaveten yırtılma sonucu oluşan tepelerin, körlenmiş matkap tarafından delik yüzeyine sıvanmasıyla, yüzeydeki çukurların olukların bir kısmı doldurulur. Fakat yine de bazı çukur ve oluklar kalır (Resim 4.15b). Deliğin orta kısmında ise işlenmiş deliğin yüzey kalitesi ve yüzeye yapışan mikro talaşlar görülmektedir (Resim 4.11a-4.16a). Yüzeye yapışan mikro talaşların, ortalama yüzey pürüzlülük değerlerini ölçerken, ölçüm sonuçlarını etkilediği söylenebilir. Yüzeye yapışan mikro talaşların karbür matkapta biraz daha azaldığı, kaplamalı karbür matkapta ise kaplama malzemesinin etkisiyle neredeyse yok olduğu görülmektedir (Resim 4.11a, 4.13a ve 4.15a).

Delme sırasında oluşan diğer bir olay, köşe aşınması artan matkaplarda kesilen mikro talaş iş parçası ile matkap arasına sıkışır. İş parçası ile matkap arasına sıkışan mikro talaş, sıcaklığın etkisiyle yumuşayan delik yüzeyine bir miktar dalma yapar (Şekil 4.22). Matkabın dönmesi ile birlikte, içerisinde sert  $\text{B}_4\text{C}_p$  bulunan ve köşe kısmı aşınmış matkap ile iş parçası arasına sıkışmış olan mikro talaş delik yüzeyinde, yüzeysel yırtılmaya neden olur. Bu olay matkapla iş parçası arasına sıkışmış olan mikro talaşın kurtulmasına kadar devam eder (Resim 4.11-4.16). ). Ahamed ve diğerleri, (2010) tarafından, yüzeyden koparılan sert SiC ve  $\text{B}_4\text{C}$  parçacıklarının delik yüzeyinde oluklara neden olduğu ve aynı zamanda kopan bu sert parçacıkların delik yüzeyinde kazıntılara neden olduğu ifade edilmiştir [1]. Buna ilaveten, köşe kısmı aşınmış olan matkap ile iş parçası arasında kalan iş parçası

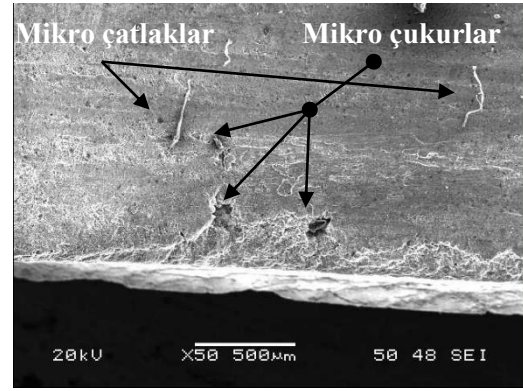
malzemesinin bir kısmı sıcaklık ve ilerleme kuvvetinin de etkisiyle yoğrulur ve yumuşar. Yumuşayan bu malzeme iş parçası yüzeyine yapışır ve YT'nin oluşumu gerçekleşir (Resim 4.12b, Resim 4.15a ve Resim 4.16a-b).



Şekil 4.22. İş parçası ile matkap arasında sıkışan ve yüzeysel yırtılmaya neden olan talaş

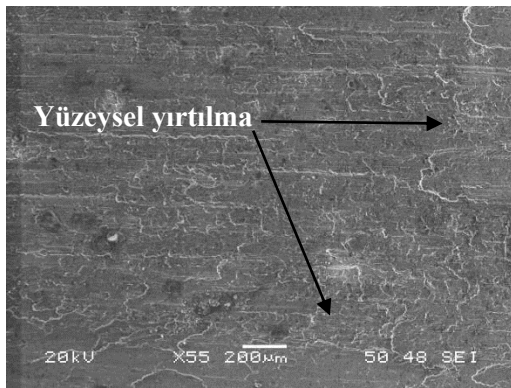


(a)

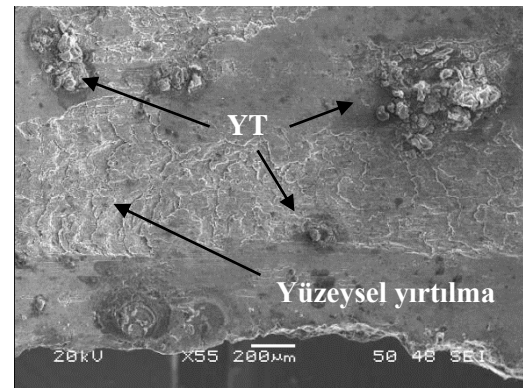


(b)

Resim 4.11. HSS matkap ile elde edilen en hassas yüzeyin SEM görüntüsü (%10 B<sub>4</sub>C<sub>p</sub> MMK, n=1000 dev/dak, f= 0,3 mm/dev)



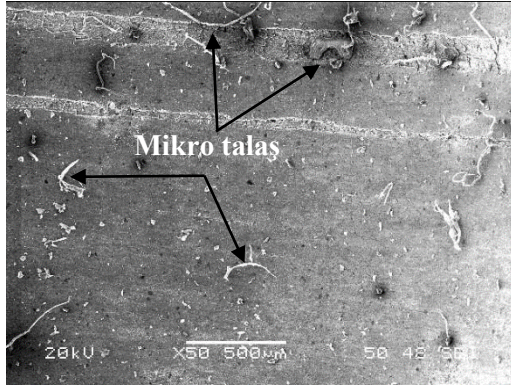
(a)



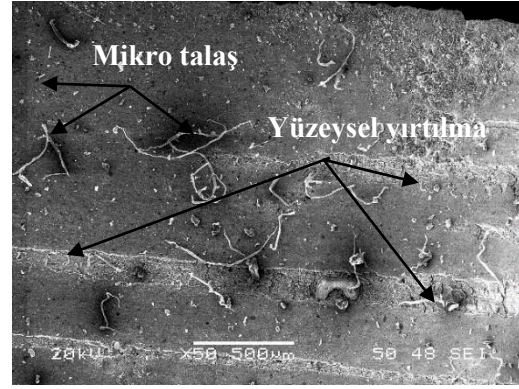
(b)

Resim 4.12. HSS matkap ile elde edilen en kötü yüzeyin SEM görüntüsü (%15 B<sub>4</sub>C<sub>p</sub> MMK, n=2500 dev/dak, f= 0,1 mm/dev )



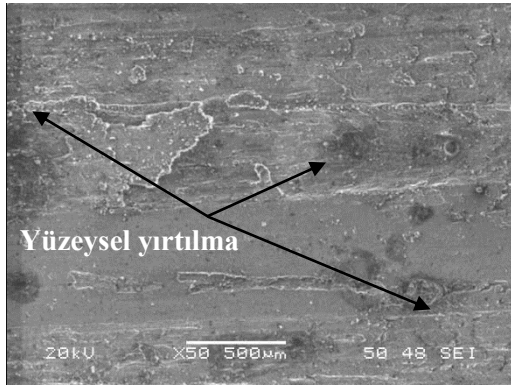


(a)

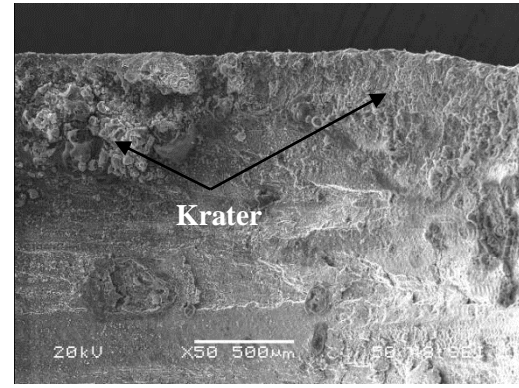


(b)

Resim 4.13. Karbür matkap ile elde edilen en hassas yüzeyin SEM görüntüsü (%15 B<sub>4</sub>C<sub>p</sub> MMK, n=1000 dev/dak, f= 0,3 mm/dev)

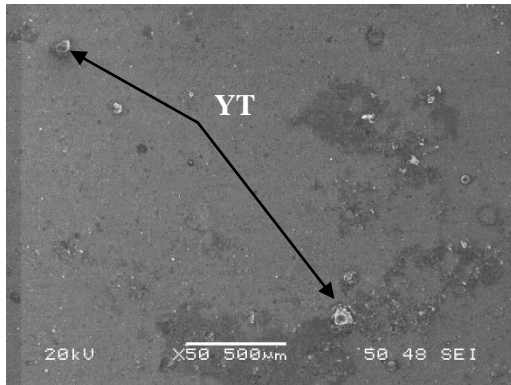


(a)

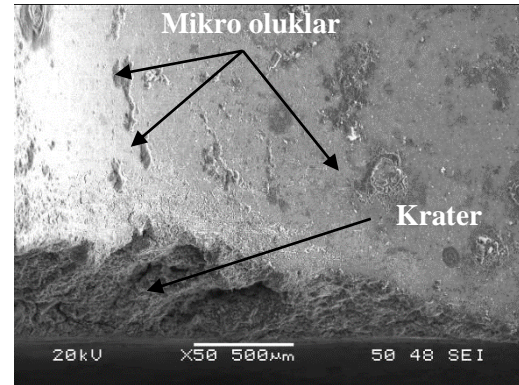


(b)

Resim 4.14. Karbür matkap ile elde edilen en kötü yüzeyin SEM görüntüsü (%10 B<sub>4</sub>C<sub>p</sub> MMK, n=2000 dev/dak, f= 0,3 mm/dev)

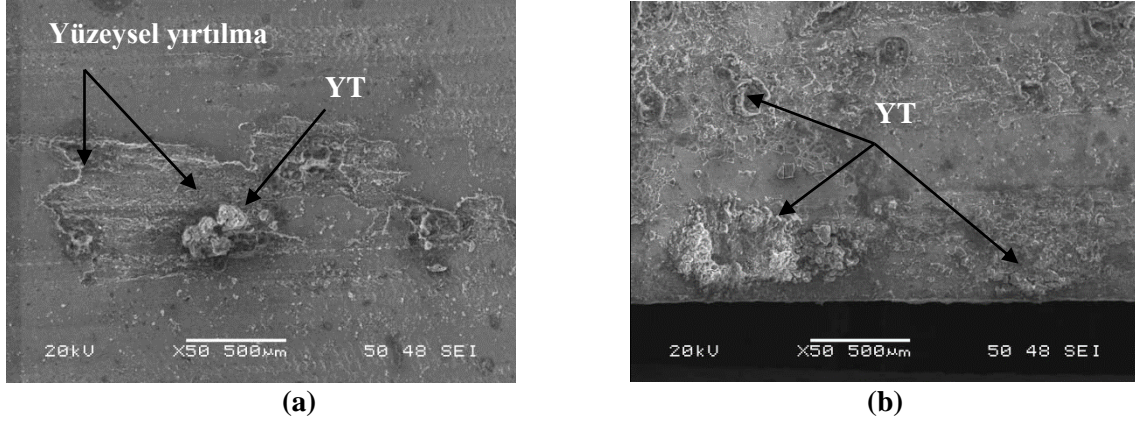


(a)



(b)

Resim 4.15. Kaplamalı karbür matkap ile elde edilen en hassas yüzeyin SEM görüntüsü (%25 B<sub>4</sub>C<sub>p</sub> MMK, n=2500 dev/dak, f= 0,3 mm/dev )



Resim 4.16. Kaplamalı karbür matkap ile elde edilen en kötü yüzeyin SEM görüntüsü (%10 B<sub>4</sub>C<sub>p</sub> MMK, n=2500 dev/dak, f= 0,1 mm/dev)



Resim 4.17. Delik sonlarında elde edilen talaş resimleri

#### 4.2.6. Yüzey pürüzlülüğü için Taguchi metodu ve ANOVA

Bu kısımda, Taguchi deneysel tasarımı yardımıyla, devir sayısının, ilerleme hızının, farklı takviye oranına sahip kompozit malzemenin, kesici takım malzemesinin ve bunların etkileşimlerinin yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkileri belirlenerek, yüzey pürüzlülüğü bakımından sistemin optimizasyonu gerçekleştirilmiştir. Çizelge 4.14’de, her bir faktörün ve seviyelerinin (Bkz. Çizelge 3.5) Taguchi’nin L<sub>27</sub> ortogonal dizisine ait tabloya (Bkz. Çizelge 3.6) yerleştirilmiş hali ile yapılan her bir deneye karşılık gelen yüzey pürüzlülüğü değerleri verilmiştir. Çizelge 4.14’de, Taguchi tasarım sürecinin dördüncü aşamasında “En düşük daha iyidir” hesaplama yöntemi ile hesaplanmış yüzey pürüzlülüğü ait S/N oranları verilmiştir.

Çizelge 4.14. Yüzey pürüzlülüğü için kullanılan faktör ve seviyelerin Taguchi'nin  $L_{27}$  ortogonal dizisine yerleştirilmiş hali ve S/N oranları

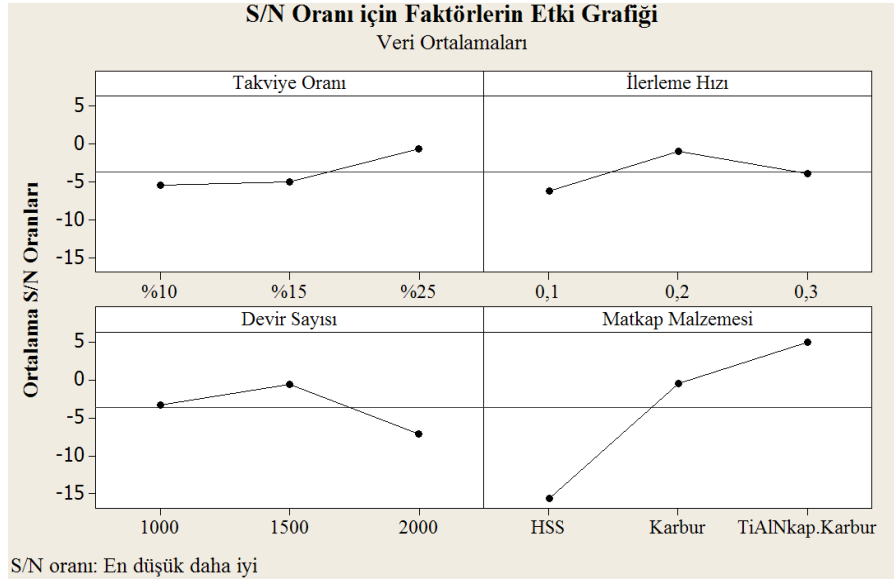
Deney No	Takviye Oranı (A) (%)	İlerleme Hızı (B) (mm/dev)	Devir sayısı (C) (dev/dak)	Matkap Malzemesi (D)	Yüzey Pürüzlülüğü ( $R_a$ ) ( $\mu\text{m}$ )	Yüzey Pürüzlülüğü için S/N oranı
1	10	0,1	1000	HSS	9,485	-19,541
2	10	0,1	1500	Karbür	1,035	-0,299
3	10	0,1	2000	TiAlN	2,363	-7,467
4	10	0,2	1000	Karbür	0,408	7,797
5	10	0,2	1500	TiAlN	0,42	7,535
6	10	0,2	2000	HSS	5,025	-14,023
7	10	0,3	1000	TiAlN	0,445	7,033
8	10	0,3	1500	HSS	2,385	-7,550
9	10	0,3	2000	Karbür	12,87	-22,192
10	15	0,1	1000	Karbür	2,795	-8,928
11	15	0,1	1500	TiAlN	0,728	2,763
12	15	0,1	2000	HSS	11,538	-21,242
13	15	0,2	1000	TiAlN	0,328	9,696
14	15	0,2	1500	HSS	8,315	-18,397
15	15	0,2	2000	Karbür	1,335	-2,510
16	15	0,3	1000	HSS	5,86	-15,358
17	15	0,3	1500	Karbür	0,513	5,806
18	15	0,3	2000	TiAlN	0,655	3,675
19	22	0,1	1000	TiAlN	0,565	4,959
20	25	0,1	1500	HSS	4,438	-12,943
21	25	0,1	2000	Karbür	0,453	6,888
22	25	0,2	1000	HSS	6,053	-15,639
23	25	0,2	1500	Karbür	0,368	8,695
24	25	0,2	2000	TiAlN	0,375	8,519
25	25	0,3	1000	Karbür	0,915	0,772
26	25	0,3	1500	TiAlN	0,35	9,119
27	25	0,3	2000	HSS	6,248	-15,914

Taguchi tasarım sürecinin beşinci aşamasında, optimum şartlar belirlenmiştir. Bu amaçla takviye oranı, ilerleme hızı, devir sayısı ve matkap malzemesi için her bir seviyenin S/N oranlarının aritmetik ortalaması alınmış, yüzey pürüzlülüğü için Çizelge 4.15 elde edilmiştir. Her bir faktörün yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkileme derecesi Çizelge 4.15'in en son satırında verilmiştir. Buna göre yüzey pürüzlülüğü üzerinde etkili olan kontrol faktörleri etki derecesine göre sıralandığında, 1. sırayı matkap malzemesi, 2. sırayı devir sayısı, 3. sırayı ilerleme hızı ve 4. sırayı takviye oranı almıştır. Her bir faktörün ortalama S/N oranına göre etki grafiği çizildiğinde, Şekil 4.23'de yüzey pürüzlülüğü için S/N oranı etki grafiği elde edilmiştir. Grafiklerdeki ince yatay çizgi S/N oranına ait aritmetik ortalamayı ifade etmektedir. Bu şekillerdeki faktörlere ait her bir seviye ile yatay çizgi arasındaki mesafenin büyüklüğü, o faktörün etki derecesini göstermektedir. Şekil 4.23 incelendiğinde, takviye oranı artarken yüzey pürüzlülüğünün azaldığı, ilerleme hızı 0,1 mm/dev'den 0,2 mm/dev'e artarken yüzey pürüzlülüğünün azaldığı, fakat 0,2 mm/dev'den 0,3 mm/dev'e artarken yüzey

pürüzlülük değerinin tekrar bir miktar arttığı görülmektedir. Devir sayısı açısından bakıldığında, yüzey pürüzlülük değerinin 1000 dev/dak'dan 1500 dev/dak azaldığı, fakat 1500 dev/dak'dan 2000 dev/dak'ya artarken yüzey pürüzlülük değerinin arttığı görülmektedir. Matkap malzemesi açısından bakıldığında, kaplamalı ve kaplamasız karbür matkaplarla, HSS matkaplara göre daha iyi bir yüzey kalitesi elde edildiği ve karbür matkaplar için kullanılan TiAlN kaplama malzemesinin etkisinin yüzey pürüzlülük değeri açısından çok önemli olduğu, yani en iyi yüzey pürüzlülük değerinin TiAlN kaplamalı karbür matkaplarla elde edildiği görülmektedir.

Çizelge 4.15. Yüzey pürüzlülüğüne ait her bir faktör ve seviyeye için ortalama S/N oranı

Seviye	Takviye Oranı	İlerleme Hızı	Devir Sayısı	Matkap Malzemesi
1	-5,4118	-6,2011	-3,2454	-15,6229
2	-4,9438	-0,9251*	-0,5856*	-0,4411
3	-0,6161*	-3,8455	-7,1406	5,0924*
Fark	4,7957	5,2760	6,5550	20,7153
Sıralama	4	3	2	1



Şekil 4.23. Yüzey pürüzlülüğüne ait kontrol faktörlerinin, “En düşük daha iyidir” yöntemi ile hesaplanmış S/N oranı etki grafiği

Optimum şartların belirlenmesi amacıyla Çizelge 4.15’de yüzey pürüzlülüğü için her faktörün sahip olduğu en büyük S/N oranı (\* ile işaretlenmiş olan) tespit edilmiştir. Sonuçta yüzey pürüzlülüğü için elde edilen optimum şartlar Çizelge 4.16’da verilmiştir.

Çizelge 4.16. Yüzey pürüzlülüğü için belirlenmiş olan optimum şartlar

Yüzey Pürüzlülüğü için Optimum Şartlar			
Takviye Oranı	İlerleme hızı	Devir Sayısı	Matkap Malzemesi
%25 B <sub>4</sub> C <sub>p</sub>	0,2	1500	TiAlN kaplamalı karbür

Çizelge 4.17’de yüzey pürüzlülüğüne ait ANOVA sonuçları verilmiştir. Çizelge 4.17’deki  $F_{test}$  sonuçları incelendiğinde, yüzey pürüzlülüğü üzerine sadece matkap malzemesinin etkisi anlamlı olmuştur. Yüzey pürüzlülüğü üzerine, diğer faktörlerin ve etkileşimlerinin etkisi anlamlı olmamıştır. Çizelge 4.17’nin son sütunu her bir faktörün ve etkileşimlerinin anlamlılık seviyelerini yüzdellikli olarak göstermektedir. Buna göre matkap malzemesi, %64,32 ile en fazla etkiye sahip olmuştur. Daha sonra %7,43 ile takviye oranı ile devir sayısı etkileşiminin etkisi 2. seviyede, %6,08 ile devir sayısının etkisi 3. seviyede kalmıştır. S/N oranına bakıldığında ise (Bkz. Çizelge 4.15), sıralama matkap malzemesi, devir sayısı, ilerleme hızı ve takviye oranı şeklindedir. Sonuçta, Çizelge 4.17 dikkate alındığında yüzey pürüzlülüğü üzerine etki eden faktörlerin önem sırası, matkap malzemesi, takviye oranı ile devir sayısı etkileşimi ve devir sayısı olarak belirlenmiştir.

Çizelge 4.17. Yüzey pürüzlülüğüne ait ANOVA sonuçları

Faktörler	SD	KT	Var	$F_{test}$	YD
Takviye Oranı (A)	2	125,842	62,921	2,057	3,909
İlerleme Hızı (B)	2	125,740	62,870	2,055	3,906
Devir sayısı (C)	2	195,645	97,823	3,198	6,077
Matkap Malzemesi (D)	2	2070,696	1035,348	33,844	64,319
AxB	4	125,415	31,354	1,025	3,896
AxC	4	239,068	59,767	1,954	7,426
BxC	4	153,464	38,366	1,254	4,767
Hata	6	183,552	30,592		5,701
<b>Toplam</b>	<b>26</b>	<b>3219,423</b>			<b>100</b>

**SD:** Serbestlik derecesi, **KT:** Kareler Toplamı, **Var:**Varyans, **YD:**Yüzde Dağılım  
**F-table**<sub>(0,05;2;6)</sub>=5,14, **F-table**<sub>(0,05;4;6)</sub>=4,53

#### Deney sonuçları ile tahmin sonuçlarının karşılaştırılması

Yüzey pürüzlülüğü için Taguchi metodu ile elde edilen sonuçlar, EK-5’de tablo halinde verilmiş ve  $R^2 = -3,96$  ile yüzey pürüzlülüğünün tahmin edilmesinde Taguchi yönteminin başarısız olduğunu göstermiştir.



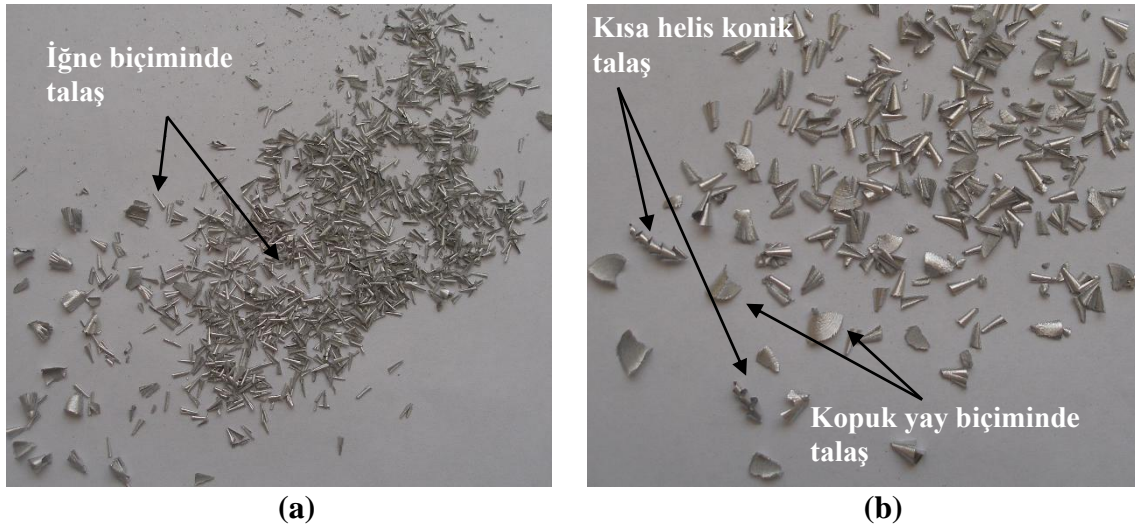
### Talaş oluşumu

Metal işlemede, uzun talaşlar kesiciye, iş parçasına, delik yüzeyine ve çevreye zarar verebileceğinden dolayı istenmeyen talaş türleridir. Yapılan tüm deneylerde kısa talaş türleri elde edilmiştir. HSS matkaplarla delme yapıldığında kopuk yay ve iğne biçiminde talaşlar elde edilmiştir (Resim 4.18). Elde edilen iğne biçimindeki talaşlar, 0,1 mm/dev ilerleme hızında daha küçük çapta kırpıntı şeklinde iken, ilerleme hızı 0,3 mm/dev doğru arttıkça daha büyük çapta iğne biçimindeki talaşa dönüşmüştür. Ayrıca takviye oranının artmasıyla kompozit malzeme daha gevrek hale gelmiş ve sonuçta iğne biçimindeki talaşların yanında toz halinde talaşlar da elde edilmiştir. Bu durum oldukça yüksek sertlik değerine sahip olan B<sub>4</sub>C<sub>p</sub> seramik ilavesinin kompozit malzemeyi gevrek ve kırılğan bir hale getirmesi ve daha çabuk aşınan HSS matkabın malzemeyi kesmesindeki verimin düşmesi ile delik içerisinde ovalama yapması ile açıklanabilir. Karbür ve kaplamalı karbür matkaplarla delme yapıldığında ise, genelde sadece kopuk yay biçiminde talaşlar elde edilmiştir (Resim 4.19). İğne biçimli talaş oluşmamıştır. Ramulu ve arkadaşlarının yaptıkları delme deneyleri [23] sonucunda, hem karbür hem de HSS matkapların talaşları kıramadığı, oluşan uzun talaş biçimlerinin iş parçasına zarar vermesinin muhtemel olduğu belirtilmiştir. Bu çalışmada ise, Ramulu ve arkadaşlarının yaptıkları çalışmanın aksine her iki matkap türüne ilaveten kaplamalı karbür matkaplarla kısa talaş formu elde edilmiştir. İki çalışma arasındaki bu farkın matkap geometrisi ve iş parçası malzemesinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Onlar çalışmalarında 118° uç açısına ve 15° boşluk açısına sahip matkaplar kullanırken, bu çalışmada 135° ve 140° uç açısına ve 10° boşluk açısına sahip matkaplar kullanılmıştır. Basavarajappa, ve diğerlerinin, (2008) yapmış oldukları çalışmada [6], grafit ilave edilmemiş Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/15SiC<sub>p</sub> kompozit malzemeler için benzer sonuçlar elde edilmiştir. Onlar da, oluşan talaşların süreksiz olduğunu ve testere dişine benzer bir yapıda olduğunu ifade etmişlerdir.

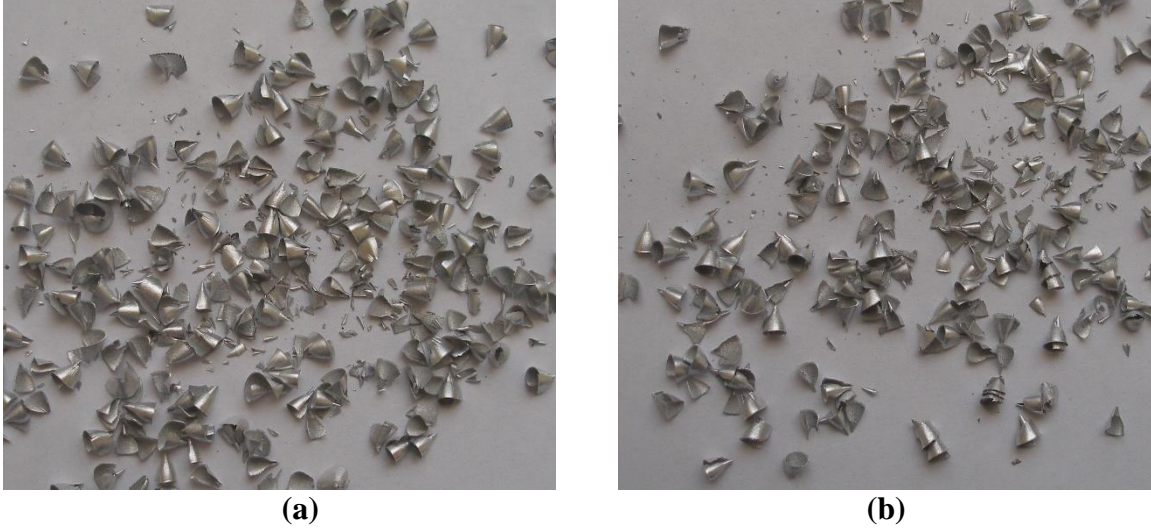
Her üç matkapla da delme yaparken, kopuk yay biçimindeki talaşa ilaveten kısa helis konik talaşlar da elde edilmiştir. Fakat HSS matkaplarla %25 B<sub>4</sub>C<sub>p</sub> içerikli MMK'lar delindiğinde kısa helis konik tipli talaş oluşumu görülmemiştir. %10 ve %15 B<sub>4</sub>C<sub>p</sub> içerikli MMK'lar HSS matkapla delindiğinde, artan ilerleme hızı ve devir sayılarında kısa helis konik tipli talaş oluşumu görülmüştür. Karbür ve kaplamalı karbür matkaplarla delme yapıldığında genelde 0,1 mm/dev ve 0,3 mm/dev ilerleme hızında kısa helis konik tipli talaş oluştuğu görülmüştür. Ayrıca takviye oranı %25 olduğunda karbür ve kaplamalı karbür matkaplarla üretilen kısa

helis konik tipli talaş sayısında artış olduğu tespit edilmiştir. Takviye oranının artmasına bağlı olarak, karbür ve kaplamalı karbür matkaplarla üretilen kısa helis konik tipli talaş sayısındaki artışın nedeni, meydana gelen talaş içerisindeki sert  $B_4C_p$  parçacıklarının oranının artmasıyla ilişkilendirilebilir. Matkap kesmeye ilk başladığında keskin ağızları sayesinde parça üzerinden talaşı kaldırır ve çıkan talaş matkabın olukları içerisinde akmaya başlar. Çıkan talaş içerisindeki  $B_4C_p$  parçacıklarının oranının artması, talaşın matkabın olukları içerisindeki akışını kolaylaştırır. Dolayısı ile oluşan talaş herhangi bir kırılmaya uğramadığı için, kıvrılarak matkabın olukları içerisinde ilerleyişini devam ettirecektir. Bu durum matkabın kesme kabiliyetini yitirmesine kadar devam edecek ve matkabın körlenmesiyle birlikte kırılmaya maruz kalarak kopacaktır. Kısa helis konik talaş oluşumu kısaca bu şekilde özetlenebilir.

Delik sonlarında ise iyice aşınmış olan matkap, ilerleme hızının artmasıyla artan ilerleme kuvvetinin etkisiyle, delik sonlarında kesilmeden kalan deliğin son kısmındaki 1-2 mm kalınlığındaki ince tabakayı ileri doğru iterek koparmıştır. Resim 4.17’de delik sonlarında kesilmeden koparılan talaşların resmi görülmektedir. Benzer şekilde talaş oluşumu, Davim ve diğerlerinin, (2001) [11] yapmış oldukları çalışmada rapor edilmiştir.



Resim 4.18. HSS matkapla kompozit malzemenin delinmesi sonucu elde edilen talaş biçimleri (a)  $f=0,1$  mm/dev (b)  $f=0,3$  mm/dev

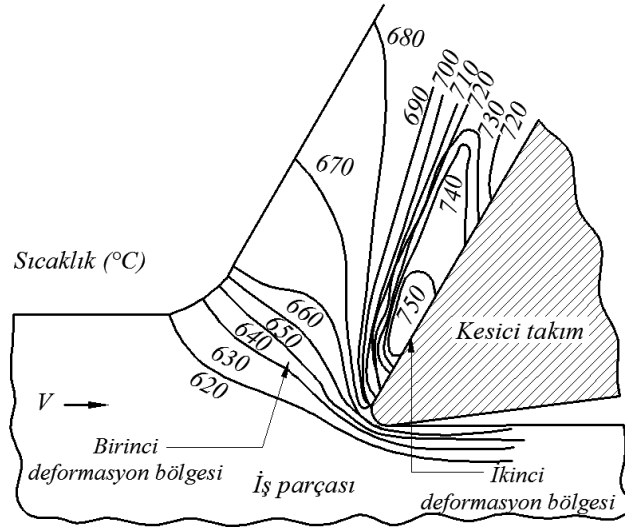


Resim 4.19. (a) Karbür matkapla ve (b) Kaplamalı karbür matkapla kompozit malzemenin delinmesi sonucu elde edilen talaş biçimleri

#### 4.2.7. Delme esnasında oluşan kesici takım sıcaklığı

Talaş kaldırma sürecinde enerji, takım ve iş parçası arasındaki sürtünme direnci ile talaş deformasyonuna harcanır. Bu enerjinin neredeyse tamamına yakını iş parçası, takım ve talaş etrafındaki ısıyla, deformasyon bölgesinde oluşan yüksek sıcaklıkların kaynağı olan ısıya dönüştürülür (Şekil 4.24). Metal üzerinden talaş kaldırırken oluşan kesme sıcaklıkları, işleme performansını etkilediği için gün geçtikçe artan bir öneme sahip olmakta ve araştırmacıları bu konu üzerinde araştırma yapmaya zorlamaktadır. Kesme sıcaklıkları, iş parçasının mekanik özelliklerini, kesici takım üzerinde oluşan aşınma mekanizmasını ve kesme kuvvetlerini etkilemektedir. Kesme esnasında artan sıcaklıklar, kesici takım malzemesinin sertlik özelliğini kaybederek yumuşamasına ve sonuçta kesici takımın daha hızlı aşınmasıyla birlikte işlevini kaybetmesine yol açmaktadır. Bu durum, kesme hızındaki artışla birlikte kesme sıcaklıkları da arttığı için, maksimum kesme hızlarını sınırlandırmaktadır. İş parçası açısından bakıldığında, kesme sıcaklıkları işlenmiş yüzeyin kalitesini ve metalürjik durumunu etkilemektedir. Artan kesme sıcaklıkları iş parçasının özelliğine bağlı olarak işlenmiş yüzeyinin yanmasına, sertleşmesine ve hatta yumuşamasına neden olmaktadır. Kesme esnasında oluşan sıcaklıkları ölçmek, iş parçası, kesici takım malzemesi ve ölçme cihazının özelliklerinden dolayı zordur. Kesme esnasında oluşan kuvvetler vektörel bir büyüklüğe sahip olduğundan dolayı dinamometre ile ölçmek, skaler bir büyüklüğe sahip olan kesme sıcaklıklarını ölçmekten kolaydır [115]

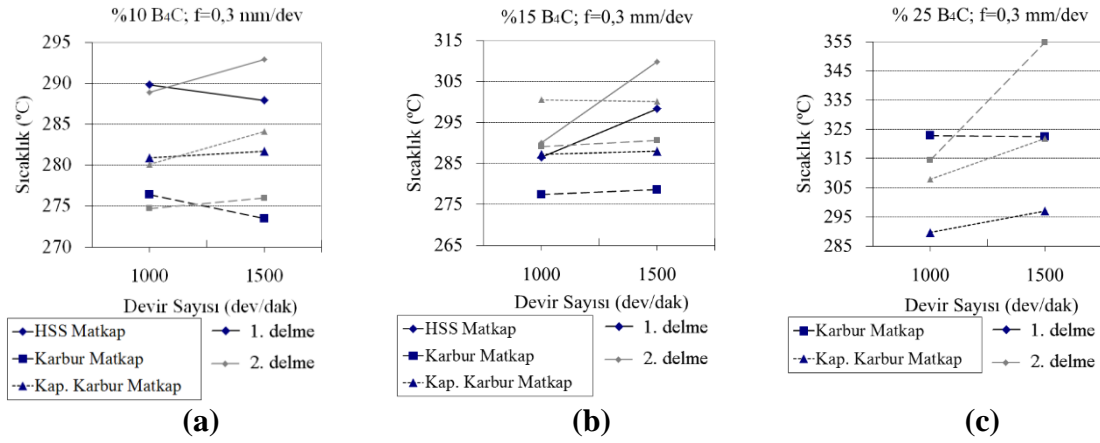
EK-3'de HSS, karbür ve TiAlN kaplamalı karbür matkapla yapılan delme işlemi sonucunda Optris 3MH2 temassız sıcaklık ölçüm cihazı ile elde edilen, kesici takım sıcaklık ( $T_{max}$ ) değerleri verilmiştir.



Şekil 4.24. Kesme esnasında oluşan sıcaklık [116]

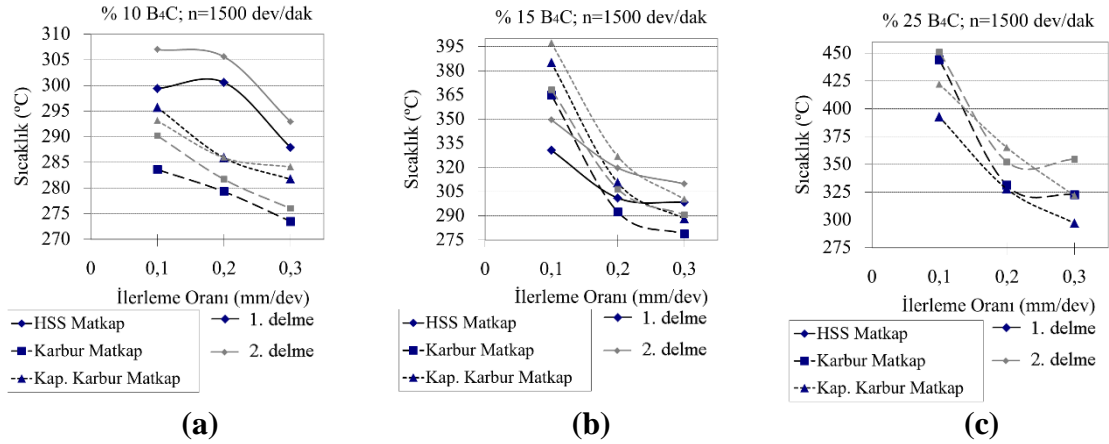
Malzeme işleme operasyonlarında, kesici takımın malzeme üzerinden talaş kaldırması esnasında meydana gelen kesme sıcaklığı ile ilgili literatür çalışmalarında, kesme hızındaki artışla sıcaklığın arttığı bildirilmiştir [61, 63, 70, 71, 73]. Özçelik ve Bağcı (2006) [65] tarafından, gagalamalı delme operasyonunda, AISI 1040 çelik malzemenin aynı ilerleme hızı değerlerinde, devir sayısındaki artışla matkap üzerindeki sıcaklığın arttığı, Al 7075-T651 alaşımı için devir sayısındaki artışla matkap üzerindeki sıcaklığın azaldığı ifade edilmiştir. Bu çalışmada da, %10 B<sub>4</sub>C içerikli kompozit malzeme üzerine her üç matkap malzemesi ile birinci delik delindiğinde devir sayısındaki artışla birlikte delme esnasında oluşan sıcaklık çok küçük bir miktar azalmıştır (Şekil 4.25a). Fakat ikinci kez delik delindiğinde ise matkabın körlenmesine bağlı olarak devir sayısındaki artışla birlikte delme esnasında oluşan sıcaklık bir miktar artış göstermiştir (Şekil 4.25a). %15 B<sub>4</sub>C içerikli kompozit malzeme üzerine kaplamalı ve kaplamasız karbür matkaplar ile delik delinirken devir sayısındaki artışla birlikte herhangi bir değişiklik olmazken, HSS matkap ile delik delindiğinde devir sayısındaki artışla birlikte delme esnasında oluşan sıcaklık artmıştır (Şekil 4.25b). %25 B<sub>4</sub>C içerikli kompozit malzeme üzerine kaplamasız karbür matkaplar ile birinci delik delinirken devir sayısındaki artışla birlikte herhangi bir değişiklik olmazken, kaplamalı karbür matkap ile birinci delik delindiğinde devir sayısındaki artışla birlikte delme esnasında oluşan sıcaklık artmıştır (Şekil 4.25c). %25 B<sub>4</sub>C içerikli kompozit malzeme üzerine hem kaplamalı hem de

kaplamasız karbür matkaplar ile ikinci kez delik delindiğinde devir sayısındaki artışla birlikte delme esnasında oluşan sıcaklık artmıştır (Şekil 4.25c). Wu ve Han (2009) tarafından, kesme hızına bağlı olarak sıcaklıktaki artış, kesme hızıyla beraber sürtünme için harcanan gücün artışına bağlanmıştır [71]. Devir sayısındaki artışla birlikte, ikinci kez delme yapıldığında, körlenmeye bağlı olarak matkap daha fazla iş parçasına sürtünmekte, bu nedenle de sıcaklık artmaktadır.



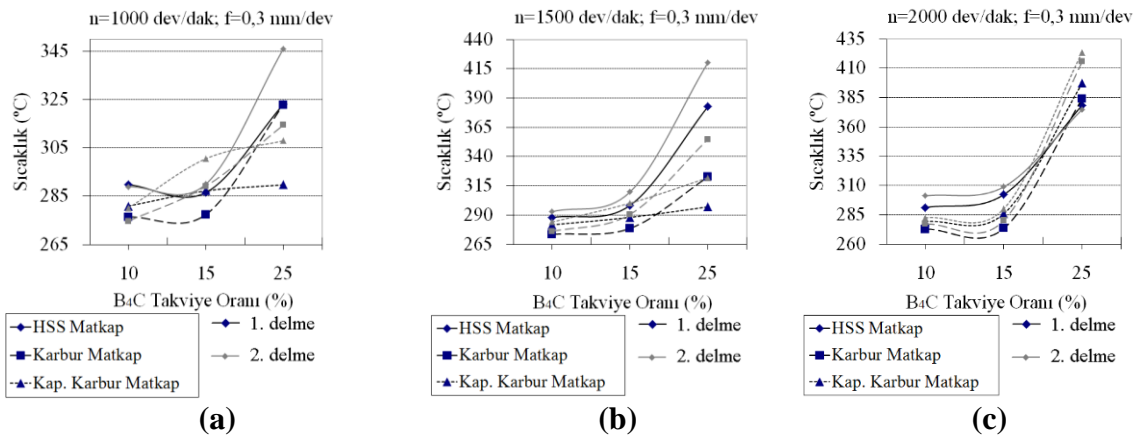
Şekil 4.25. (a) %10, (b) %15 ve (c) %25 B<sub>4</sub>C<sub>p</sub> esaslı kompozit malzemenin 0,3 mm/dev ilerleme hızında delinmesinde devir sayısındaki değişimin sıcaklığa etkisi

İlerleme hızındaki artışla sıcaklığın azaldığı bildirilmektedir [61, 63, 65]. Bazı yazarlar ise ilerleme hızı arttıkça, kesme sıcaklığının da arttığını bildirmişlerdir [70, 71]. İlerleme hızına bağlı olarak kesme sıcaklığındaki artış, ilerleme hızının artmasıyla kesme derinliğinin artmasına bağlı olarak harcanan gücün de artmasına bağlanmıştır [71]. Coz ve diğerleri, (2012) tarafından [73], aynı kesme hızında ilerleme hızının 0,1 mm/dev'den 0,12 mm/dev'e artmasıyla sıcaklığın arttığı, ilerleme hızının 0,12 mm/dev'den 0,14 mm/dev'e artmasıyla sıcaklığın azaldığı, ilerleme hızının 0,14 mm/dev'den 0,16 mm/dev'e artmasıyla sıcaklığın tekrar bir miktar daha artış gösterdiği belirtilmiştir. Bu çalışmada, ilerleme hızındaki artışla sıcaklığın azaldığı Şekil 4.26a-c'deki grafiklerde görülmektedir. İlerleme hızının artmasıyla birlikte delme süresi azalmakta, matkap iş parçasıyla daha kısa süre sürtünmeye maruz kalmaktadır. Bu nedenle ilerleme hızındaki artışla birlikte delme sıcaklıkları da azalmaktadır.



Şekil 4.26. (a) %10, (b) %15 ve (c) %25 B<sub>4</sub>C<sub>p</sub> esaslı kompozit malzemenin 1500 dev/dak devir sayısında delinmesinde ilerleme hızındaki değişimin sıcaklığa etkisi

Takviye oranındaki artışla sıcaklığın arttığı Şekil 4.27a-c'deki grafiklerden görülmektedir. Takviye oranındaki artışla birlikte kompozit malzemenin sertliğide artmış, sertlik artışına bağlı olarak delme esnasında oluşan sıcaklıkta artmıştır.



Şekil 4.27. Kompozit malzemelerin (a) 1000 dev/dak, (b) 1500 dev/dak ve (c) 2000 dev/dak devir sayısında, 0,3 mm/dev ilerleme hızında delinmesinde takviye oranındaki değişimin sıcaklığa etkisi

#### 4.2.8. Kesici takım sıcaklığı için Taguchi metodu ve ANOVA

Bu kısımda, Taguchi deneysel tasarımı yardımıyla, devir sayısının, ilerleme hızının, farklı takviye oranına sahip kompozit malzemenin, kesici takım malzemesinin ve bunların etkileşimlerinin kesici takım sıcaklığı üzerindeki etkileri belirlenerek, kesici takım sıcaklığı bakımından sistemin optimizasyonu gerçekleştirilmiştir. Çizelge 4.18'de, her bir faktörün ve seviyelerinin (Bkz. Çizelge 3.5) Taguchi'nin L<sub>27</sub> ortogonal dizisine ait tabloya (Bkz. Çizelge 3.6) yerleştirilmiş hali ile yapılan her bir deneye karşılık gelen kesici takım sıcaklığı

değerleri verilmiştir. Çizelge 4.18’de, Taguchi tasarım sürecinin dördüncü aşamasında “En düşük daha iyidir” hesaplama yöntemi ile hesaplanmış kesici takım sıcaklığına ait S/N oranları verilmiştir.

Çizelge 4.18. Kesici takım sıcaklığı için kullanılan faktör ve seviyelerin Taguchi’nin  $L_{27}$  ortogonal dizisine yerleştirilmiş hali ve S/N oranları

Deney No	Takviye Oranı (A)	İlerleme Hızı (B)	Devir sayısı (C)	Matkap Malzemesi (D)	Kesici Takım Sıcaklığı ( $T_{max}$ ) ( $^{\circ}C$ )	Kesici Takım Sıcaklığı için S/N oranı
	(%)	(mm/dev)	(dev/dak)			
1	10	0,1	1000	HSS	293,6	-49,355
2	10	0,1	1500	Karbür	283,6	-49,054
3	10	0,1	2000	TiAlN	298	-49,484
4	10	0,2	1000	Karbür	273,1	-48,726
5	10	0,2	1500	TiAlN	285,9	-49,124
6	10	0,2	2000	HSS	298,4	-49,496
7	10	0,3	1000	TiAlN	280,9	-48,971
8	10	0,3	1500	HSS	287,9	-49,185
9	10	0,3	2000	Karbür	272,8	-48,717
10	15	0,1	1000	Karbür	349,4	-50,866
11	15	0,1	1500	TiAlN	384,9	-51,707
12	15	0,1	2000	HSS	354,6	-50,995
13	15	0,2	1000	TiAlN	308,2	-49,777
14	15	0,2	1500	HSS	301	-49,571
15	15	0,2	2000	Karbür	276,3	-48,828
16	15	0,3	1000	HSS	286,5	-49,142
17	15	0,3	1500	Karbür	278,6	-48,900
18	15	0,3	2000	TiAlN	285,9	-49,124
19	22	0,1	1000	TiAlN	388,5	-51,788
20	25	0,1	1500	HSS	419,3	-52,450
21	25	0,1	2000	Karbür	466,5	-53,377
22	25	0,2	1000	HSS	347,9	-50,829
23	25	0,2	1500	Karbür	331,2	-50,402
24	25	0,2	2000	TiAlN	420,3	-52,471
25	25	0,3	1000	Karbür	322,8	-50,179
26	25	0,3	1500	TiAlN	297	-49,455
27	25	0,3	2000	HSS	378,5	-51,561

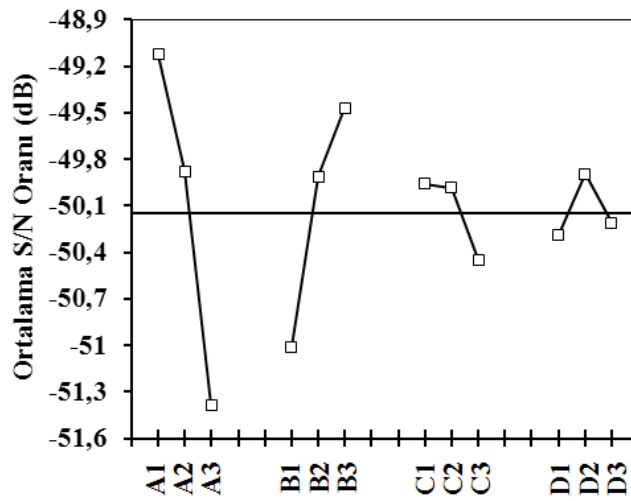
Taguchi tasarım sürecinin beşinci aşamasında, optimum şartlar belirlenmiştir. Bu amaçla takviye oranı, ilerleme hızı, devir sayısı ve matkap malzemesi için her bir seviyenin S/N oranlarının aritmetik ortalaması alınmış, kesici takım sıcaklığı için Çizelge 4.19 elde edilmiştir. Her bir faktörün kesici takım sıcaklığı üzerindeki etkileme derecesi Çizelge 4.19’un en son satırında verilmiştir. Buna göre kesici takım sıcaklığı üzerinde etkili olan kontrol faktörleri etki derecesine göre sıralandığında, 1. sırayı takviye oranı, 2. sırayı ilerleme hızı, üçüncü sırayı devir sayısı ve dördüncü sırayı matkap malzemesi almıştır. Her bir faktörün ortalama S/N oranına göre etki grafiği çizildiğinde, Şekil 4.28’deki kesici takım sıcaklığı için S/N oranı etki grafiği elde edilmiştir. Grafikteki ince yatay çizgi S/N oranına



ait aritmetik ortalamayı ifade etmektedir. Bu şekildeki faktörlere ait her bir seviye ile yatay çizgi arasındaki mesafenin büyüklüğü, o faktörün etki derecesini göstermektedir. Şekil 4.28 incelendiğinde, takviye oranı artarken kesici takım sıcaklığının arttığı, ilerleme hızı artarken kesici takım sıcaklığının azaldığı görülmektedir. Kesme hızı açısından bakıldığında, 1000 dev/dak'dan, 1500 dev/dak'ya sıcaklıktaki artışın önemsenmeyecek kadar az olduğu, fakat devir sayısı 2000 dev/dak'ya ulaştığında kesici takım sıcaklığındaki artışın önemli olduğu görülmektedir. Matkap malzemesi açısından bakıldığında, kaplamalı ve kaplamasız karbür matkaplar üzerinde oluşan kesici takım sıcaklığının, HSS matkaplara göre daha az olduğu ve karbür matkaplar için kullanılan TiAlN kaplama malzemesinin etkisinin olmadığı, yani kesici takım üzerinde oluşan kesici takım sıcaklığını azaltmadığı görülmektedir.

Çizelge 4.19. Kesici takım sıcaklığına ait her bir faktör ve seviyeye için ortalama S/N oranı

Seviye	Takviye Oranı	İlerleme Hızı	Devir Sayısı	Matkap Malzemesi
1	-49,124*	-51,009	-49,959*	-50,287
2	-49,879	-49,914	-49,983	-49,894*
3	-51,39	-49,47*	-50,45	-50,211
<b>Fark</b>	2,267	1,538	0,491	0,393
<b>Sıralama</b>	1	2	3	4



Şekil 4.28. Kesici takım sıcaklığına ait kontrol faktörlerinin, “En düşük daha iyidir” yöntemi ile hesaplanmış S/N oranı etki grafiği

Optimum şartların belirlenmesi amacıyla Çizelge 4.19’da kesici takım sıcaklığı için her faktörün sahip olduğu en büyük S/N oranı (\* ile işaretlenmiş olan) tespit edilmiştir. Sonuçta, kesici takım sıcaklığı için elde edilen optimum şartlar Çizelge 4.20’de verilmiştir.



Çizelge 4.20. Kesici takım sıcaklığı için belirlenmiş olan optimum şartlar

Kesici Takım Sıcaklığı için Optimum Şartlar			
Takviye Oranı	İlerleme hızı	Devir Sayısı	Matkap Malzemesi
%10 B <sub>4</sub> C <sub>p</sub>	0,3	1000	Karbür Matkap

Çizelge 4.21’de kesici takım sıcaklığına ait ANOVA sonuçları verilmiştir. Çizelge 4.21’deki  $F_{test}$  sonuçları incelendiğinde, kesici takım sıcaklığı üzerine takviye oranının, ilerleme hızının, takviye oranı ile devir sayısı etkileşiminin, takviye oranı ile ilerleme hızı etkileşiminin ve devir sayısının etkisi anlamlı olmuştur. Kesici takım sıcaklığı üzerine, matkap malzemesinin ve ilerleme hızı ile kesme hızı etkileşiminin etkisi anlamlı olmamıştır. Çizelge 4.21’in son sütunu her bir faktörün ve etkileşimlerinin anlamlılık seviyelerini yüzdellikli olarak göstermektedir. Buna göre takviye oranı, %51,641 ile en fazla etkiye sahip olmuştur. İlerleme hızı %24,3’lük bir etki ile ikinci sırada yer aldığı görülmektedir. Takviye oranı ile kesme hızı etkileşiminin %9,126’lık bir etkiyle üçüncü sırada ve takviye oranı ile ilerleme hızının etkileşiminin %8,119’luk bir etkiyle dördüncü sırada yer aldığı görülmektedir. Son olarak kesme hızının etkisinin %2,972’lik bir etkiye sahip olduğu görülmektedir.

Bu sebeple sonuçta kesici takım sıcaklığı üzerine etki eden faktörlerin önem sırası, takviye oranı, ilerleme hızı, takviye oranı ile devir sayısı etkileşimi, takviye oranı ile ilerleme hızı etkileşimi ve devir sayısı olarak belirlenmiştir.

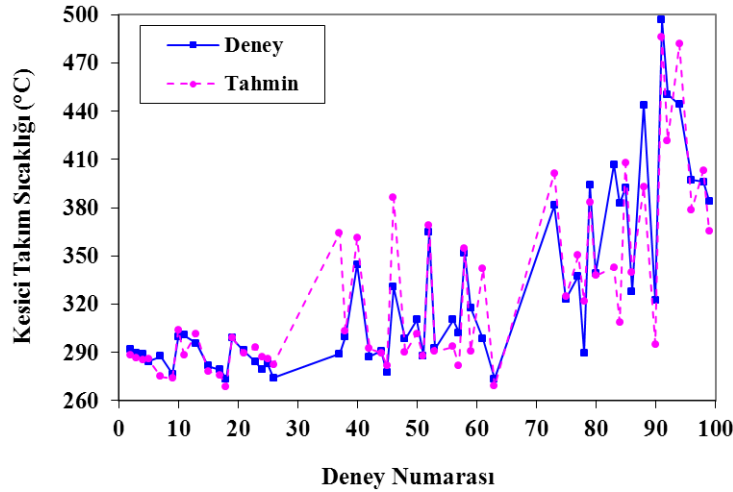
Çizelge 4.21. Kesici takım sıcaklığına ait ANOVA sonuçları

Faktörler	SD	KT	Var	$F_{test}$	YD
Takviye Oranı (A)	2	23,977	11,988	111,317	51,641
İlerleme Hızı (B)	2	11,282	5,641	52,381	24,300
Devir sayısı (C)	2	1,380	0,690	6,407	2,972
Matkap Malzemesi (D)	2	0,782	0,391	3,631	1,684
AxB	4	3,769	0,942	8,750	8,119
AxC	4	4,237	1,059	9,836	9,126
BxC	4	0,355	0,089	0,824	0,765
Hata	6	0,646	0,108		1,392
<b>Toplam</b>	<b>26</b>	<b>46,429</b>			<b>100</b>

**SD:** Serbestlik derecesi, **KT:** Kareler Toplamı, **Var:**Varyans, **YD:**Yüzde Dağılım  
**F-table**<sub>(0,05;2;6)</sub>=5,14, **F-table**<sub>(0,05;4;6)</sub>=4,53

### Deney sonuçları ile tahmin sonuçlarının karşılaştırılması

Deneylelerden elde edilen kesici takım sıcaklığı sonuçları ile Taguchi metodu ile tahmin edilen sonuçlar kıyaslanmış, EK-6’da tablo halinde verilmiş ve Şekil 4.29’da grafik halinde verilmiştir. Elde edilen sonuçlar, belirlilik katsayısı  $R^2= 0,80$  ile kesici takım sıcaklığının tahmin edilmesinde Taguchi yönteminin başarı ile uygulandığını göstermiştir (Şekil 4.29).



Şekil 4.29. Kesici takım sıcaklığı için deney sonuçları ile tahmin sonuçlarının karşılaştırılması

### **4.3. B<sub>4</sub>C<sub>p</sub> İçerikli Alüminyum MMK’ların Delinmesinde İşleme Parametrelerinin Taguchi Tabanlı Gri İlişki Analizi ile Optimizasyonu**

#### **4.3.1. İlerleme kuvveti, kesme momenti, serbest yüzey aşınması ve yüzey pürüzlülüğü için gri ilişki analizi**

Değişik takviye oranlarına sahip B<sub>4</sub>C<sub>p</sub> içerikli kompozit malzemelerin delinmesiyle oluşan ilerleme kuvveti, kesme momenti, serbest yüzey aşınması ve yüzey pürüzlülüğü açısından gri ilişkilendirme yöntemiyle sistemin optimizasyonu yapılmıştır. Buradaki amaç, minimum ilerleme kuvveti, kesme momenti, serbest yüzey aşınması ve yüzey pürüzlülüğü değerlerini elde edebilmek için, deneylerde kullanılan devir sayısı, ilerleme hızı, takviye oranı ve kesici takım malzemesi gibi faktörlere ait seviyelerin optimum değerlerini belirlemektir.

Gri ilişki analizine geçmeden önce, Taguchi deneysel tasarımının ilk aşamasında seçilen faktörler ve bu faktörlere ait seviyeler verilmişti (Bkz. Çizelge 3.5). Çizelge 4.22’de, her bir faktörün ve seviyelerinin, Taguchi’nin L<sub>27</sub> ortogonal dizisine ait tabloya (Bkz. Çizelge 3.6)

yerleştirilmiş hali ile yapılan her bir deneye karşılık gelen ilerleme kuvveti, kesme momenti, serbest yüzey aşınması ve yüzey pürüzlülüğü değerleri verilmiştir.

Birinci adımda  $L_{27}$  ( $3^{13}$ ) ortogonal dizisine ait, ilerleme kuvveti, kesme momenti, serbest yüzey aşınması ve yüzey pürüzlülüğü değerleri “En düşük daha iyidir” yöntemi ile normalleştirilmiştir [15, 83, 98-100]. Çizelge 4.23’de ilerleme kuvveti, kesme momenti, serbest yüzey aşınması ve yüzey pürüzlülük değerinin normalleştirme sonucu verilmiştir.

Çizelge 4.22. Gri ilişki analizi için kullanılan faktör ve seviyelerin Taguchi’nin  $L_{27}$  ortogonal dizisine yerleştirilmiş hali ve elde edilen sonuçlar

Deney No	Takviye Oranı (A) (%)	İlerleme Hızı (B) (mm/dev)	Devir sayısı (C) (dev/dak)	Matkap Malzemesi (D)	İlerleme Kuvveti (F <sub>c</sub> ) (N)	Kesme Momenti (M <sub>c</sub> ) (Ncm)	Aşınma (V <sub>B</sub> ) (mm)	Yüzey Pürüz. (R <sub>a</sub> ) (µm)
1	10	0,1	1000	HSS	843,23	292,99	0,66	9,485
2	10	0,1	1500	Karbür	834,26	300,91	0,53	1,035
3	10	0,1	2000	TiAlN	804,31	249,3	0,48	2,363
4	10	0,2	1000	Karbür	966,83	478,44	0,32	0,408
5	10	0,2	1500	TiAlN	924,1	343,97	0,41	0,42
6	10	0,2	2000	HSS	880,74	293,95	0,53	5,025
7	10	0,3	1000	TiAlN	1113,26	434,66	0,34	0,445
8	10	0,3	1500	HSS	1047,97	446,64	0,51	2,385
9	10	0,3	2000	Karbür	1096,14	291,28	0,38	12,87
10	15	0,1	1000	Karbür	1168,44	500,31	0,59	2,795
11	15	0,1	1500	TiAlN	1062,46	398,53	0,62	0,728
12	15	0,1	2000	HSS	973,33	309,14	0,9	11,538
13	15	0,2	1000	TiAlN	1244,12	496,66	0,46	0,328
14	15	0,2	1500	HSS	1131,54	370,64	0,66	8,315
15	15	0,2	2000	Karbür	1088,55	339,98	0,45	1,335
16	15	0,3	1000	HSS	1313,43	578,31	0,62	5,86
17	15	0,3	1500	Karbür	1310,46	328,03	0,37	0,513
18	15	0,3	2000	TiAlN	1218,18	388,47	0,425	0,655
19	22	0,1	1000	TiAlN	1630,85	627,11	0,8	0,565
20	25	0,1	1500	HSS	1654,51	434,06	1,54	4,438
21	25	0,1	2000	Karbür	1374,09	415,35	0,96	0,453
22	25	0,2	1000	HSS	1825,54	496,15	0,97	6,053
23	25	0,2	1500	Karbür	1477,21	492,76	0,67	0,368
24	25	0,2	2000	TiAlN	1378,53	547,77	0,62	0,375
25	25	0,3	1000	Karbür	1834,23	674,05	0,56	0,915
26	25	0,3	1500	TiAlN	1629,45	641,02	0,56	0,35
27	25	0,3	2000	HSS	1440,81	492,23	0,73	6,248

İkinci adımda gri ilişki katsayısı hesaplanmıştır. Çizelge 4.23’de normalleştirilmiş ilerleme kuvveti, kesme momenti ve yüzey pürüzlülük değerine ait gri ilişki katsayı değerleri verilmiştir.

Çizelge 4.23. İlerleme kuvveti, kesme momenti, serbest yüzey aşınması ve yüzey pürüzlülük değerine ait normalizasyon, gri ilişki katsayı ve gri ilişki derecesi değerleri

Deney No	Normalizasyon				Gri ilişki katsayısı				Gri ilişki derecesi	Gri ilişki analizine göre en iyi sıralama
	Fc	Mc	V <sub>B</sub>	Ra	Fc	Mc	V <sub>B</sub>	Ra		
1	0,962	0,897	0,721	0,270	0,930	0,829	0,642	0,406	0,702	12
2	0,971	0,878	0,828	0,944	0,945	0,804	0,744	0,899	0,848	2
3	1,000	1,000	0,869	0,838	1,000	1,000	0,792	0,755	0,887	1
4	0,842	0,461	1,000	0,994	0,760	0,481	1,000	0,987	0,807	4
5	0,884	0,777	0,926	0,993	0,811	0,692	0,871	0,985	0,840	3
6	0,926	0,895	0,828	0,625	0,871	0,826	0,744	0,572	0,753	8
7	0,700	0,564	0,984	0,991	0,625	0,534	0,968	0,982	0,777	6
8	0,763	0,535	0,844	0,836	0,679	0,518	0,763	0,753	0,678	14
9	0,717	0,901	0,951	0,000	0,638	0,835	0,910	0,333	0,679	13
10	0,646	0,409	0,779	0,803	0,586	0,458	0,693	0,718	0,614	18
11	0,749	0,649	0,754	0,968	0,666	0,587	0,670	0,940	0,716	10
12	0,836	0,859	0,525	0,106	0,753	0,780	0,513	0,359	0,601	20
13	0,573	0,418	0,885	1,000	0,539	0,462	0,813	1,000	0,704	11
14	0,682	0,714	0,721	0,363	0,611	0,636	0,642	0,440	0,582	21
15	0,724	0,787	0,893	0,920	0,644	0,701	0,824	0,862	0,758	7
16	0,506	0,225	0,754	0,559	0,503	0,392	0,670	0,531	0,524	24
17	0,509	0,815	0,959	0,985	0,504	0,730	0,924	0,971	0,782	5
18	0,598	0,672	0,914	0,974	0,554	0,604	0,853	0,950	0,740	9
19	0,197	0,111	0,607	0,981	0,384	0,360	0,560	0,964	0,567	23
20	0,174	0,565	0,000	0,672	0,377	0,535	0,333	0,604	0,462	26
21	0,447	0,609	0,475	0,990	0,475	0,561	0,488	0,980	0,626	17
22	0,008	0,419	0,467	0,544	0,335	0,462	0,484	0,523	0,451	27
23	0,347	0,427	0,713	0,997	0,434	0,466	0,635	0,994	0,632	16
24	0,442	0,297	0,754	0,996	0,473	0,416	0,670	0,992	0,638	15
25	0,000	0,000	0,803	0,953	0,333	0,333	0,718	0,914	0,575	22
26	0,199	0,078	0,803	0,998	0,384	0,352	0,718	0,996	0,613	19
27	0,382	0,428	0,664	0,528	0,447	0,466	0,598	0,514	0,506	25

Üçüncü adımda, gri ilişki derecesi hesaplanmıştır. Her bir deneye ait hesaplanmış gri ilişki dereceleri Çizelge 4.23’de verilmiştir. Çizelge 4.23’deki gri ilişki dereceleri en büyük değerden en küçük değere doğru sıralanmış ve tablonun en sağındaki sütunda verilmiştir. Buna göre, tabloda verilen deney şartları arasında elde edilen en büyük gri ilişki derecesi, çoklu performans karakteristiklerini optimize ettiği için (en düşük ilerleme kuvveti, kesme momenti, serbest yüzey aşınması ve yüzey pürüzlülüğü değerlerini verdiği için), optimum değer 3 nolu deney ile elde edilmiştir.

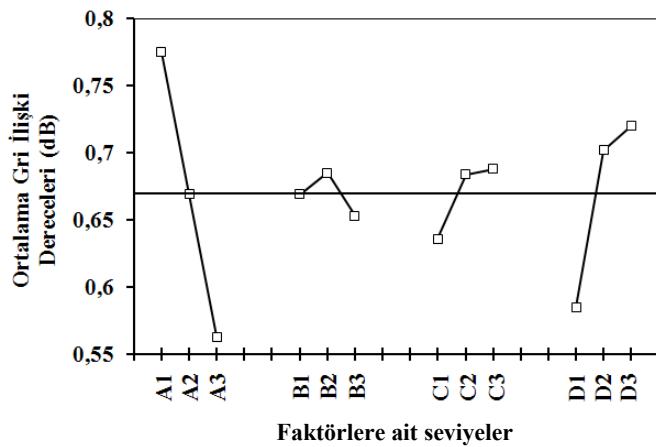
Dördüncü adımda Çizelge 4.23’deki elde edilen gri ilişki derecelerinden faydalanılarak, her bir faktöre ait gri ilişki derecesinin etki derecesi hesaplanmış ve Çizelge 4.24’ün son sütununda (sıralama) verilmiştir.

Çizelge 4.24. Faktörlere ait gri ilişki derecelerinin etkileri

Faktörler	Birimler	Seviyeler			Fark	Sıralama
		1	2	3		
Takviye Oranı (A)	(%)	0,775*	0,669	0,563	0,212	1
İlerleme Hızı (B)	(mm/dev)	0,669	0,685*	0,653	0,032	4
Devir Sayısı (C)	(dev/dak)	0,636	0,684	0,688*	0,052	3
Matkap Malzemesi (D)		0,585	0,702	0,720*	0,135	2

\*Gri ilişki derecesi için optimum seviyeler.

Beşinci adımda ise gri ilişki dereceleri için, optimum işleme parametreleri belirlenmiştir. Çizelge 4.24’de her faktörün sahip olduğu en büyük gri ilişki derecesi hesaplanmış ve \* ile işaretlenmiştir. Analiz sonucuna göre, aynı anda minimum ilerleme kuvveti, kesme momenti, serbest yüzey aşınması ve yüzey pürüzlülük değerleri,  $A_1B_2C_3D_3$  optimum işleme şartları altında elde edilebilmektedir. Şekil 4.30’da ise her faktör ve seviyesinin ortalama gri ilişki derecelerinin grafiği verilmiştir. Şekil 4.30’daki grafik üzerinde minimum delme kuvvetleri, serbest yüzey aşınması ve yüzey pürüzlülük değerlerini elde edebilmek için, gri ilişki derecesi üzerinde etkili olan faktörlerin optimum seviyeleri yani en yüksek gri ilişki derecesine sahip olduğu seviyeler görülmektedir. Grafik incelendiğinde çoklu performans karakteristiklerine ait değerlerin, takviye oranındaki artışla arttığı, devir sayısındaki artışla azaldığı görülmektedir. Çoklu performans karakteristiklerine ait değerlerin, ilerleme hızı 0,1 mm/dev’den 0,2 mm/dev’e artarken azaldığı, fakat 0,2 mm/dev’den 0,3 mm/dev’e artarken arttığı görülmektedir. Çoklu performans karakteristikleri açısından en kötü matkap malzemesi %5 kobalt içerikli HSS matkap olurken, en iyi matkap malzemesi TiAlN kaplamalı karbür matkap olmuştur.



Şekil 4.30. Her faktör ve seviyelerinin ortalama gri ilişki dereceleri etki grafiği

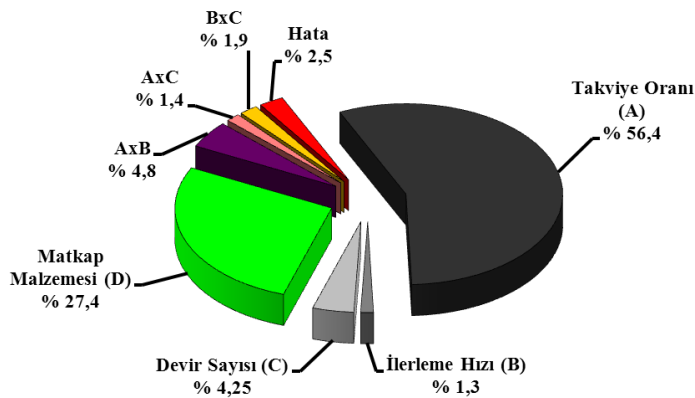
### Gri ilişki derecesi için ANOVA

Altıncı adımda gri ilişki derecesine etki eden her bir faktörün ve etkileşimlerinin anlamlı olup olmadıkları ve anlamlılık seviyelerini belirlemek amacı ile ANOVA yapılmıştır. Çizelge 4.25’deki ANOVA sonuçlarına göre, gri ilişki derecesi üzerinde etkili olan en önemli faktör %56,353 ile takviye oranı olmuştur. Diğer önemli olan faktörler sırasıyla %27,406 ile matkap malzemesi, %4,8 ile takviye oranı ile ilerleme hızının etkileşimi olmuştur. Devir sayısı faktörü ise %4,247 ile gri ilişki derecesi üzerinde etkili olan son faktör olmuştur. Geriye kalan faktörlerin ve etkileşimlerin etkisi çok küçük çıkmıştır. Şekil 4.31’de gri ilişki derecesi üzerinde etkili olan faktörlerin %’de dağılımları pasta grafik halinde görülmektedir.

Çizelge 4.25. Gri ilişki derecesine ait ANOVA sonuçları

Faktörler	SD	KT	Var	F <sub>test</sub>	YD
Takviye Oranı (A)	2	0,201	0,100	66,463	56,353
İlerleme Hızı (B)	2	0,005	0,002	1,544	1,310
Devir sayısı (C)	2	0,015	0,008	5,009	4,247
Matkap Malzemesi (D)	2	0,098	0,049	32,323	27,406
AxB	4	0,017	0,004	2,831	4,8
AxC	4	0,005	0,001	0,849	1,44
BxC	4	0,007	0,002	1,121	1,9
Hata	6	0,009	0,002		2,544
<b>Toplam</b>	<b>26</b>	<b>0,358</b>			<b>100</b>

**SD:** Serbestlik derecesi, **KT:** Kareler Toplamı, **Var:** Varyans, **YD:** Yüzde Dağılım  
**F-table**<sub>(0,05;2;6)</sub>=5,14, **F-table**<sub>(0,05;4;6)</sub>=4,53



Şekil 4.31. Gri ilişki derecesine ait ANOVA sonuçlarına göre faktörler ve faktörlerin etkisi (%)

Yedinci adımda optimum şartlara ait gri ilişki derecesi ( $\hat{\gamma}$ ) tahmin edilmiştir. %10 B<sub>4</sub>C<sub>p</sub> (A<sub>1</sub>) takviyeli kompozit malzeme, 0,2 mm/dev (B<sub>2</sub>) ilerleme hızında, 2000 dev/dak (C<sub>3</sub>) devir sayısında, TiAlN kaplamalı karbür matkap (D<sub>3</sub>) ile delindiğinde optimum gri ilişki derecesi (A<sub>1</sub>B<sub>2</sub>C<sub>3</sub>D<sub>3</sub>) Eş. 3.27 yardımı ile tahmin edilmiş ve sonuç 0,862 bulunmuştur.  $F_{\alpha}(1, f_e)$  %95'lik önem aralığındaki F-tablo değeri olup 5,99 olarak belirlenmiş, güven aralığı Eş. 3.28 ile hesaplanmış ve sonuç 0,016 bulunmuştur. Dolayısı ile gri ilişki derecesi değeri ( $\hat{\gamma}_{egg}$ );

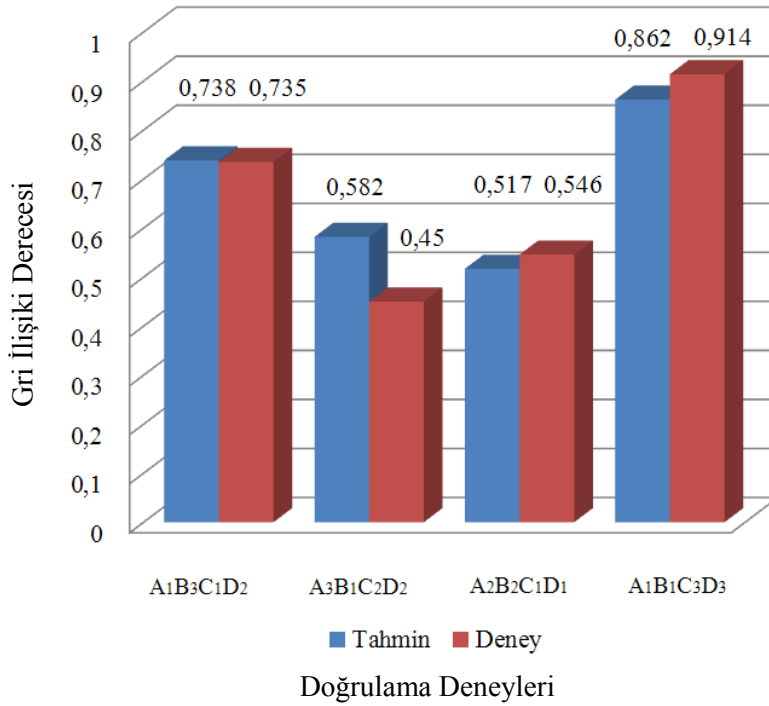
$$(0,862 - 0,016) \leq \hat{\gamma}_{egg} \leq (0,862 + 0,016)$$

$$(0,846) \leq \hat{\gamma}_{egg} \leq (0,878)$$

aralığında olmalıdır.

#### Doğrulama deneyleri

A<sub>1</sub>B<sub>2</sub>C<sub>3</sub>D<sub>3</sub> optimum şartlar için deneylerden elde edilen gri ilişki derecesi 0,914'tür. Deneylerden elde edilen sonuçla (0,914), tahmin edilen sonuç (0,862) arasındaki fark %5,7 çıkmıştır. Gri ilişkisi analizi için rastgele seçilmiş deneyler (x ekseni) ve bu deneylere ait sonuçların karşılaştırılması Şekil 4.32'de görülmektedir. Bu sonuçlar, minimum ilerleme kuvveti, kesme momenti, serbest yüzey aşınması ve yüzey pürüzlülüğü değerlerini elde edebilmek için gri ilişki analizinin kullanışlı bir araç olduğunu göstermektedir.



Şekil 4.32. Gri ilişki analizi için doğrulama deneylerinin sonuçları

#### 4.3.2. Serbest yüzey aşınması ve kesici takım sıcaklığı için gri ilişki analizi

Değişik takviye oranlarına sahip B<sub>4</sub>C<sub>p</sub> içerikli kompozit malzemelerin delinmesiyle oluşan serbest yüzey aşınması ve kesici takım sıcaklığı açısından gri ilişkilendirme yöntemiyle sistemin optimizasyonu yapılmıştır. Buradaki amaç, minimum serbest yüzey aşınması ve kesici takım sıcaklığı değerlerini elde edebilmek için, deneylerde kullanılan devir sayısı, ilerleme hızı, takviye oranı ve kesici takım malzemesi gibi faktörlere ait seviyelerin optimum değerlerini belirlemektir.

Gri ilişki analizine geçmeden önce, Taguchi deneysel tasarımının ilk aşamasında seçilen faktörler ve bu faktörlere ait seviyeler verilmişti (Bkz. Çizelge 3.5). Çizelge 4.26’da, her bir faktörün ve seviyelerinin, Taguchi’nin L<sub>27</sub> ortogonal dizisine ait tabloya (Bkz. Çizelge 3.6) yerleştirilmiş hali ile yapılan her bir deneye karşılık gelen serbest yüzey aşınması ve kesici takım sıcaklığı değerleri verilmiştir.

Birinci adımda L<sub>27</sub> (3<sup>13</sup>) ortogonal dizisine ait, serbest yüzey aşınması ve kesici takım sıcaklığı değerleri “En düşük daha iyidir” yöntemi ile normalleştirilmiştir [15, 83, 98-100]. Çizelge 4.27’de serbest yüzey aşınması ve kesici takım sıcaklığı değerinin normalleştirme sonucu verilmiştir.



Çizelge 4.26. Gri ilişki analizi için kullanılan faktör ve seviyelerin Taguchi'nin  $L_{27}$  ortogonal dizisine yerleştirilmiş hali ve elde edilen sonuçlar

Deney No	Takviye Oranı (A) (%)	İlerleme Hızı (B) (mm/dev)	Devir Sayısı (C) (dev/dak)	Matkap Malzemesi (D)	Aşınma ( $V_B$ ) (mm)	Takım Sıcaklığı ( $T_{max}$ ) ( $^{\circ}C$ )
1	10	0,1	1000	HSS	0,66	293,6
2	10	0,1	1500	Karbür	0,53	283,6
3	10	0,1	2000	TiAlN	0,48	298
4	10	0,2	1000	Karbür	0,32	273,1
5	10	0,2	1500	TiAlN	0,41	285,9
6	10	0,2	2000	HSS	0,53	298,4
7	10	0,3	1000	TiAlN	0,34	280,9
8	10	0,3	1500	HSS	0,51	287,9
9	10	0,3	2000	Karbür	0,38	272,8
10	15	0,1	1000	Karbür	0,59	349,4
11	15	0,1	1500	TiAlN	0,62	384,9
12	15	0,1	2000	HSS	0,9	354,6
13	15	0,2	1000	TiAlN	0,46	308,2
14	15	0,2	1500	HSS	0,66	301
15	15	0,2	2000	Karbür	0,45	276,3
16	15	0,3	1000	HSS	0,62	286,5
17	15	0,3	1500	Karbür	0,37	278,6
18	15	0,3	2000	TiAlN	0,425	285,9
19	22	0,1	1000	TiAlN	0,8	388,5
20	25	0,1	1500	HSS	1,54	419,3
21	25	0,1	2000	Karbür	0,96	466,5
22	25	0,2	1000	HSS	0,97	347,9
23	25	0,2	1500	Karbür	0,67	331,2
24	25	0,2	2000	TiAlN	0,62	420,3
25	25	0,3	1000	Karbür	0,56	322,8
26	25	0,3	1500	TiAlN	0,56	297
27	25	0,3	2000	HSS	0,73	378,5

İkinci adımda gri ilişki katsayısı hesaplanmıştır. Çizelge 4.27'de normalleştirilmiş serbest yüzey aşınması ve kesici takım sıcaklığı değerine ait gri ilişki katsayı değerleri verilmiştir.

Üçüncü adımda, gri ilişki derecesi hesaplanmıştır. Her bir deneye ait hesaplanmış gri ilişki dereceleri Çizelge 4.27'de verilmiştir. Çizelge 4.27'deki gri ilişki dereceleri en büyük değerden en küçük değere doğru sıralanmış ve tablonun en sağındaki sütunda verilmiştir. Buna göre, tabloda verilen deney şartları arasında elde edilen en büyük gri ilişki derecesi, çoklu performans karakteristiklerini optimize ettiği için (en düşük serbest yüzey aşınması ve kesici takım sıcaklığı değerlerini verdiği için), optimum değer 4 nolu deney ile elde edilmiştir.

Çizelge 4.27. Serbest yüzey aşınması ve kesici takım sıcaklığı değerine ait normalizasyon, gri ilişki katsayı ve gri ilişki derecesi değerleri

Deney No	Normalizasyon		Gri ilişki katsayısı		Gri ilişki derecesi	Gri ilişki analizine göre en iyi sıralama
	V <sub>B</sub>	T <sub>max</sub>	V <sub>B</sub>	T <sub>max</sub>		
1	0,721	0,893	0,642	0,823	0,733	15
2	0,828	0,944	0,744	0,900	0,822	8
3	0,869	0,870	0,792	0,794	0,793	10
4	1,000	0,998	1,000	0,997	0,998	1
5	0,926	0,932	0,871	0,881	0,876	6
6	0,828	0,868	0,744	0,791	0,767	13
7	0,984	0,958	0,968	0,923	0,946	3
8	0,844	0,922	0,763	0,865	0,814	9
9	0,951	1,000	0,910	1,000	0,955	2
10	0,779	0,605	0,693	0,558	0,626	19
11	0,754	0,421	0,670	0,464	0,567	20
12	0,525	0,578	0,513	0,542	0,527	23
13	0,885	0,817	0,813	0,732	0,773	12
14	0,721	0,854	0,642	0,774	0,708	16
15	0,893	0,982	0,824	0,965	0,895	5
16	0,754	0,929	0,670	0,876	0,773	11
17	0,959	0,970	0,924	0,943	0,934	4
18	0,914	0,932	0,853	0,881	0,867	7
19	0,607	0,403	0,560	0,456	0,508	25
20	0,000	0,244	0,333	0,398	0,366	27
21	0,475	0,000	0,488	0,333	0,411	26
22	0,467	0,612	0,484	0,563	0,524	24
23	0,713	0,699	0,635	0,624	0,630	18
24	0,754	0,239	0,670	0,396	0,533	22
25	0,803	0,742	0,718	0,660	0,689	17
26	0,803	0,875	0,718	0,800	0,759	14
27	0,664	0,454	0,598	0,478	0,538	21

Dördüncü adımda Çizelge 4.27’deki elde edilen gri ilişki derecelerinden faydalanılarak, her bir faktöre ait gri ilişki derecesinin etki derecesi hesaplanmış ve Çizelge 4.28’in son sütununda (sıralama) verilmiştir.

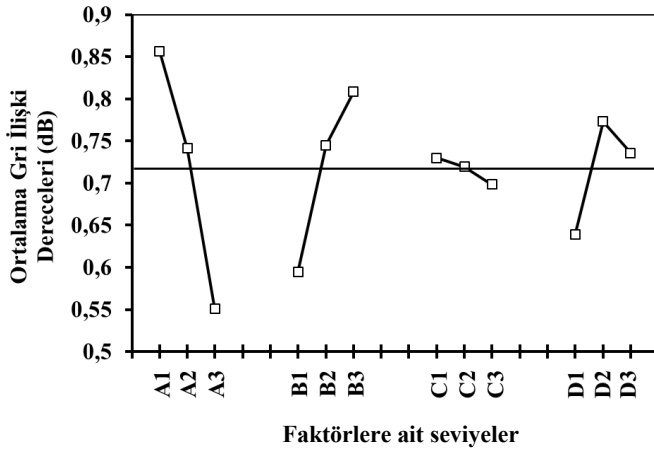
Çizelge 4.28. Faktörlere ait gri ilişki derecelerinin etkileri

Faktörler	Birimler	Seviyeler			Fark	Sıralama
		1	2	3		
Takviye Oranı (A)	(%)	0,856*	0,741	0,551	0,305	1
İlerleme Hızı (B)	(mm/dev)	0,595	0,745	0,808*	0,213	2
Devir Sayısı (C)	(dev/dak)	0,730*	0,719	0,699	0,031	4
Matkap Malzemesi (D)		0,639	0,773*	0,736	0,134	3

\*Gri ilişki derecesi için optimum seviyeler.

Beşinci adımda ise gri ilişki dereceleri için, optimum işleme parametreleri belirlenmiştir. Çizelge 4.28’de her faktörün sahip olduğu en büyük gri ilişki derecesi hesaplanmış ve \* ile işaretlenmiştir. Analiz sonucuna göre, aynı anda minimum serbest yüzey aşınması ve kesici

takım sıcaklığı değerleri,  $A_1B_3C_1D_2$  optimum işleme şartları altında elde edilebilmektedir. Şekil 4.33’de ise her faktör ve seviyesinin ortalama gri ilişki derecelerinin grafiği verilmiştir. Şekil 4.33’deki grafik üzerinde minimum serbest yüzey aşınması ve kesici takım sıcaklığı değerlerini elde edebilmek için, gri ilişki derecesi üzerinde etkili olan faktörlerin optimum seviyeleri yani en yüksek gri ilişki derecesine sahip olduğu seviyeler görülmektedir. Grafik incelendiğinde çoklu performans karakteristiklerine ait değerlerin, takviye oranındaki ve devir sayısındaki artışla arttığı, ilerleme hızındaki artışla azaldığı görülmektedir. Çoklu performans karakteristikleri açısından en kötü matkap malzemesi %5 kobalt içerikli HSS matkap olurken, en iyi matkap malzemesi kaplamasız karbür matkap olmuştur.



Şekil 4.33. Her faktör ve seviyelerinin ortalama gri ilişki dereceleri etki grafiği

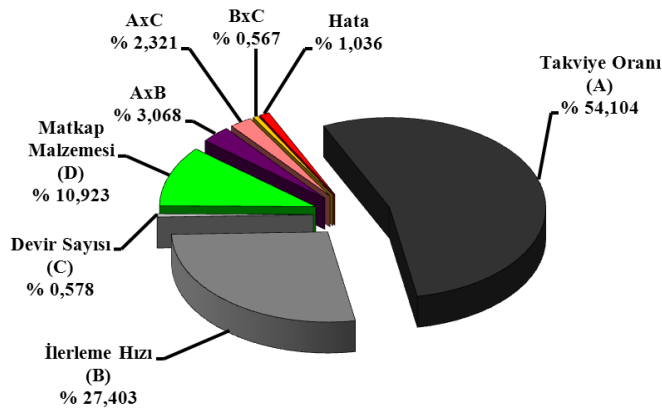
#### Gri ilişki derecesi için ANOVA

Altıncı adımda gri ilişki derecesine etki eden her bir faktörün ve etkileşimlerinin anlamlı olup olmadıkları ve anlamlılık seviyelerini belirlemek amacı ile ANOVA yapılmıştır. Çizelge 4.29’deki ANOVA sonuçlarına göre, gri ilişki derecesi üzerinde etkili olan en önemli faktör %54,104 ile takviye oranı olmuştur. Diğer önemli olan faktörler sırasıyla %27,403 ile ilerleme hızı ve %10,923 ile matkap malzemesi olmuştur. Devir sayısı ve faktörlerin etkileşimlerinin etkisi çok küçük çıkmıştır. Şekil 4.34’de, gri ilişki derecesi üzerinde etkili olan faktörlerin %’de dağılımları pasta grafik halinde görülmektedir.

Çizelge 4.29. Gri ilişki derecesine ait ANOVA sonuçları

Faktörler	SD	KT	Var	F <sub>test</sub>	YD
Takviye Oranı (A)	2	0,428	0,214	156,658	54,104
İlerleme Hızı (B)	2	0,217	0,108	79,344	27,403
Devir sayısı (C)	2	0,005	0,002	1,674	0,578
Matkap Malzemesi (D)	2	0,086	0,043	31,627	10,923
AxB	4	0,024	0,006	4,441	3,068
AxC	4	0,018	0,005	3,361	2,321
BxC	4	0,004	0,001	0,821	0,567
Hata	6	0,008	0,001		1,036
<b>Toplam</b>	<b>26</b>	<b>0,791</b>			<b>100</b>

**SD:** Serbestlik derecesi, **KT:** Kareler Toplamı, **Var:**Varyans, **YD:**Yüzde Dağılım  
**F-tablo**<sub>(0,05;2;6)</sub>=5,14, **F-tablo**<sub>(0,05;4;6)</sub>=4,53



Şekil 4.34. Gri ilişki derecesine ait ANOVA sonuçlarına göre faktörler ve faktörlerin etkisi (%)

Yedinci adımda optimum şartlara ait gri ilişki derecesi ( $\hat{\gamma}$ ) tahmin edilmiştir. %10 B<sub>4</sub>C<sub>p</sub> (A<sub>1</sub>) takviyeli kompozit malzeme, 0,3 mm/dev (B<sub>3</sub>) ilerleme hızında, 1000 dev/dak (C<sub>1</sub>) devir sayısında, kaplamasız karbür matkap (D<sub>2</sub>) ile delindiğinde optimum gri ilişki derecesi (A<sub>1</sub>B<sub>3</sub>C<sub>1</sub>D<sub>2</sub>) Eş. 3.27 yardımı ile tahmin edilmiş ve sonuç 0,979 bulunmuştur. F<sub>α</sub>(1, f<sub>e</sub>) %95'lik önem aralığındaki F-tablo değeri olup 5,99 olarak belirlenmiş, güven aralığı Eş. 3.28 ile hesaplanmış ve sonuç 0,0145 bulunmuştur. Dolayısı ile gri ilişki derecesi değeri ( $\hat{\gamma}_{egg}$ );

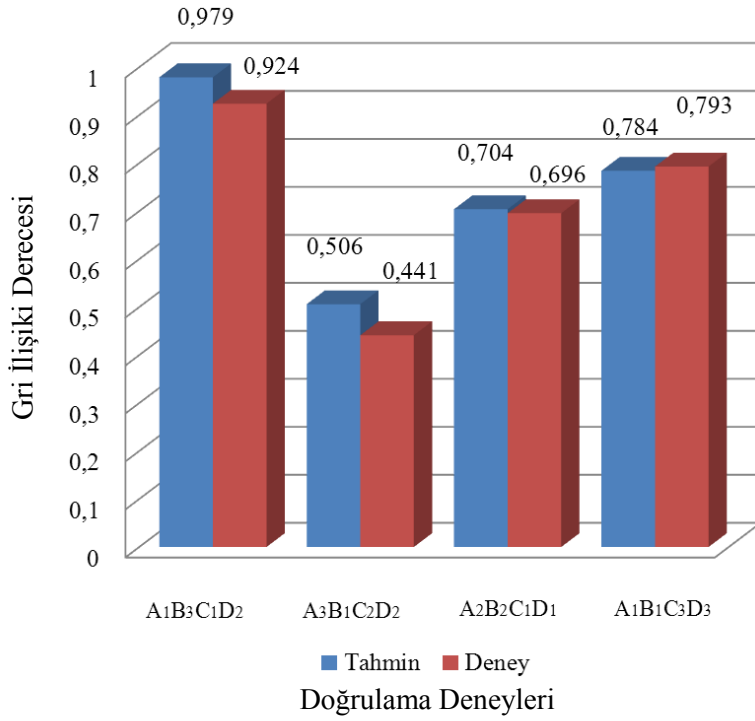
$$(0,979 - 0,0145) \leq \hat{\gamma}_{egg} \leq (0,979 + 0,0145)$$

$$(0,9641) \leq \hat{\gamma}_{egg} \leq (0,9932)$$

aralığında olmalıdır.

### Doğrulama deneyleri

$A_1B_3C_1D_2$  optimum şartlar için deneylerden elde edilen gri ilişki derecesi 0,924'tür. Deneylerden elde edilen sonuçla (0,924), tahmin edilen sonuç (0,979) arasındaki fark %5,95 çıkmıştır. Gri ilişkisi analizi için rastgele seçilmiş deneyler (x eksen) ve bu deneylere ait sonuçların karşılaştırılması Şekil 4.35'de görülmektedir. Bu sonuçlar, minimum serbest yüzey aşınması ve kesici takım sıcaklığı değerlerini elde edebilmek için gri ilişkisi analizinin kullanışlı bir araç olduğunu göstermektedir.



Şekil 4.35. Gri ilişki analizi için doğrulama deneylerinin sonuçları

## 5. SONLU ELEMANLAR ANALİZİ ve MATEMATİKSEL MODELLEME

Bu bölümde %25 B<sub>4</sub>C<sub>p</sub> takviyeli Al7XXX matrisli kompozitin %15 kobalt içerikli karbür matkapla delinmesiyle oluşan kesme sıcaklığı, sonlu elemanlar yöntemi ile analiz edilmiştir. Ayrıca, takviye oranı, kesici takım malzemesi, devir sayısı ve ilerleme hızı gibi değişik parametrelerle, ilerleme kuvveti, kesme momenti, aşınma, yüzey pürüzlülüğü ve kesici takım sıcaklığı arasında matematiksel ilişkiler kurulmuştur.

### 5.1. Sonlu Elemanlar Analizi

Toplam işleme süreci içerisinde büyük bir öneme sahip olan delme operasyonu, karmaşık üç boyutlu kesme teorisine sahiptir. Bu nedenle delme sürecini ifade eden bir matematiksel model ortaya konulamamış ve bu alanda sınırlı sayıda çalışma yapılmıştır. Ticari olarak elde edilen 3D sonlu eleman yazılımı, delme sürecinin anlaşılmasını kolaylaştırmıştır. Hem iki boyutlu hem de üç boyutlu kalıplama ve işleme operasyonlarını modellemek amacı ile geliştirilen Deform 3D sonlu elemanlar yazılımı, bilimsel kalıplama teknolojileri şirketinin bir ürünüdür [116]. Abaqus ve ThirdWave Advantedge aynı amaçla geliştirilmiş diğer yazılımlardır. Bu yazılımların avantaj ve dezavantajları Çizelge 5.1'de verilmiştir. Alüminyum alaşımının delinmesinde, diğer yazılımlara göre daha avantajlı olan Deform 3D sonlu elemanlar yazılımı tercih edilmiştir (Çizelge 5.1).

Sonlu elemanlar metodu talaş kaldırma sürecinde yaygın bir şekilde kullanılmasına karşılık, bu alanda ilk çalışma Klamecki tarafından 1973'de yapılmıştır [116]. Daha sonra deneysel çalışmaların pahalıya mal olduğu ve zaman aldığı çalışmalarda araştırmacılar tarafından kullanılmaya devam edilmiştir [117-119]. Sonlu elemanlar metodu ile yapılan çalışmaların sonucu, deneysel çalışmalarla kıyaslanmış ve sonuçların uyum içerisinde olduğu bildirilmiştir [67, 118-121]. Constantin ve diğerleri, (2010) tarafından, talaş kaldırma sürecinin 3D sonlu elemanlar metodu ile analizi yapılmıştır [122]. Sonlu elemanlar metodunun uygulanma sürecinin tanıtıldığı bu çalışmada, mevcut sonlu elemanlar yazılımlarının karşılaştırması yapılmıştır. Sonlu elemanlar metodu ile elde edilen analiz sonuçlarının kesme kuvvetleri, gerilimler, talaş oluşumu, takım aşınması ve kesme sıcaklığı ile ilgili olduğu bildirilmiştir.

Çizelge 5.1. Abaqus, Advantedge ve Deform sonlu elemanlar yazılımlarının karşılaştırılması [122]

Yazılımlar	Avantajlar	Dezavantajlar
<b>Abaqus</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Yüksek derecede ayrıntılı</li> <li>-İş parçası ve takımın manuel tasarımı, serbest modelleme</li> <li>-Malzemenin yapılandırılmasına izin verir</li> <li>-Oldukça hassas mesh kontrolü</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Herhangi bir malzemeyi desteklemez</li> <li>-Kullanıcı simülasyon parametrelerini manuel olarak ayarlar, bu da çok zaman alır.</li> </ul>
<b>AdvantEdge</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Hesaplama aracı, metal kesme sürecini optimize eder</li> <li>-Basit takım ve iş parçası geometrisi</li> <li>-Karmaşık geometrilerin import edilmesini sağlar.</li> <li>-Kapsamlı malzeme kütüphanesi</li> <li>-Yeni malzeme tanımlamaya olanak sağlar.</li> <li>-Çözüm hassasiyetini artırmak için adaptif mesh kullanır.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Kullanıcıya simülasyon ayarlarını yapmasına daha az esneklik sağlar. Bu da yazılımı kontrol etmek için kullanıcıyı sınırlar.</li> <li>-Yazılım delme operasyonlarını desteklemez.</li> </ul>
<b>Deform</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Standart işleme süreçlerini ayarlar</li> <li>-Çözüm parametrelerini ayarlar</li> <li>-Kapsamlı malzeme kütüphanesi</li> <li>-Yeni malzeme yeteneği</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Bazı takım geometrilerini import etmeye ihtiyaç duyar</li> <li>-Delme modulu hesaplama aracının oldukça yavaş çalışması ve periyodik olarak durması gibi verimsizliklere sahiptir.</li> </ul>

Lungu ve Borzan (2012) tarafından, AISI 1045 karbon çeliğinin sonlu elemanlar metodu kullanılarak işlenmesinde, takım geometrisi, sıcaklık ve kesme kuvvetleri üzerine kesme hızı ve ilerleme hızının etkileri araştırılmıştır [118]. Deform iki boyutlu talaş kaldırma yazılımı ile yapılan bu çalışma, kesme hızının artmasıyla sıcaklığın arttığını fakat kesme kuvvetinin azaldığını göstermiştir. İlerleme hızının artırılması ile kesici takım aşınmasının arttığı, aşınmaya bağlı olarak kesme kuvvetlerinin ve sıcaklığın yükseldiği bildirilmiştir. Isbilir ve Ghassemieh (2012) tarafından, karbon fiber takviyeli kompozitlerin delinmesiyle ortaya çıkan delaminasyon, mikrocatlak ve termal kusur gibi işleme hatalarını gidermek amacıyla delme parametrelerinin optimizasyonu sonlu elemanlar metodu ile yapılmıştır [117]. İtme kuvvetinin, kesme momenti ve delaminasyonun ilerleme hızı ile artarken, kesme hızıyla azaldığı bildirilmiştir. Analizde bol miktarda soğutma yapıldığından, sıcaklık etkisi dikkate alınmamıştır. Yang ve Sun (2009) tarafından, Ti6Al4V titanyum alaşımlarının delinmesinin modellenmesinde sonlu eleman metodu kullanılmıştır [119]. Gerilim ve sıcaklık dağılımlarının, delme başlangıcında arttığı, kararlı delme sürecine ulaştığında maksimum değere ulaştığı ve daha sonra matkabın delik içerisinde ilerlemesiyle yavaş yavaş azaldığı ifade edilmiştir. Kožmín ve diğerleri, (2010) tarafından, delmeye karşı mukavemet gösteren malzemelerin delinmesiyle oluşan talaş şekli ve kesme kuvvetleri sonlu elemanlar metodu

ile tahmin edilmiştir [120]. Kesici ağızlar üzerinde oluşan sıcaklığın, matkabın merkezinden dışa doğru gidildikçe kesme hızındaki artışa bağlı olarak arttığı belirtilmiştir. Matkabın uç açısındaki 10°'lik artışın üretilen talaş şekli, kesme kuvveti ve kesme momenti üzerindeki etkisinin önemsenmeyecek kadar az olduğu ifade edilmiştir. Bağci ve Ozelik (2006) tarafından, ardışık kuru delme işleminde helisel matkap üzerinde meydana gelen sıcaklık değişimleri sonlu elemanlar yöntemi ile incelenmiştir [67]. Delinen delik sayısındaki artışla birlikte sıcaklığın arttığı, fakat kesme kuvvetlerinde herhangi bir değişimin olmadığı görülmüştür. Li ve Shih (2007) tarafından, Ti6Al4V titanyum alaşımlarının yüksek hızda delinmesinde sonlu elemanlar metodu kullanılmıştır [121]. Matkabın soğutma kanallarıyla yapılan soğutma işlemi sonucunda sıcaklığın azaldığı belirtilmiştir. Matkabın soğutma kanallarıyla yapılan soğutma işleminde kesme hızı ve ilerleme hızının düşürülmesi ile takım sıcaklığının azaldığı, fakat matkap üzerinde oluşan gerilmelerin arttığı ifade edilmiştir. Guo ve Dornfeld (2000) tarafından, 304 paslanmaz çeliğin delinmesinde çapak oluşum süreci sonlu elemanlar metodu ile incelenmiştir [123]. Paslanmaz çeliğin delinmesiyle ortaya çıkan çapak geometrisinin oluşma süreci ile simülasyon sonuçlarının birbirine benzediği bildirilmiştir.

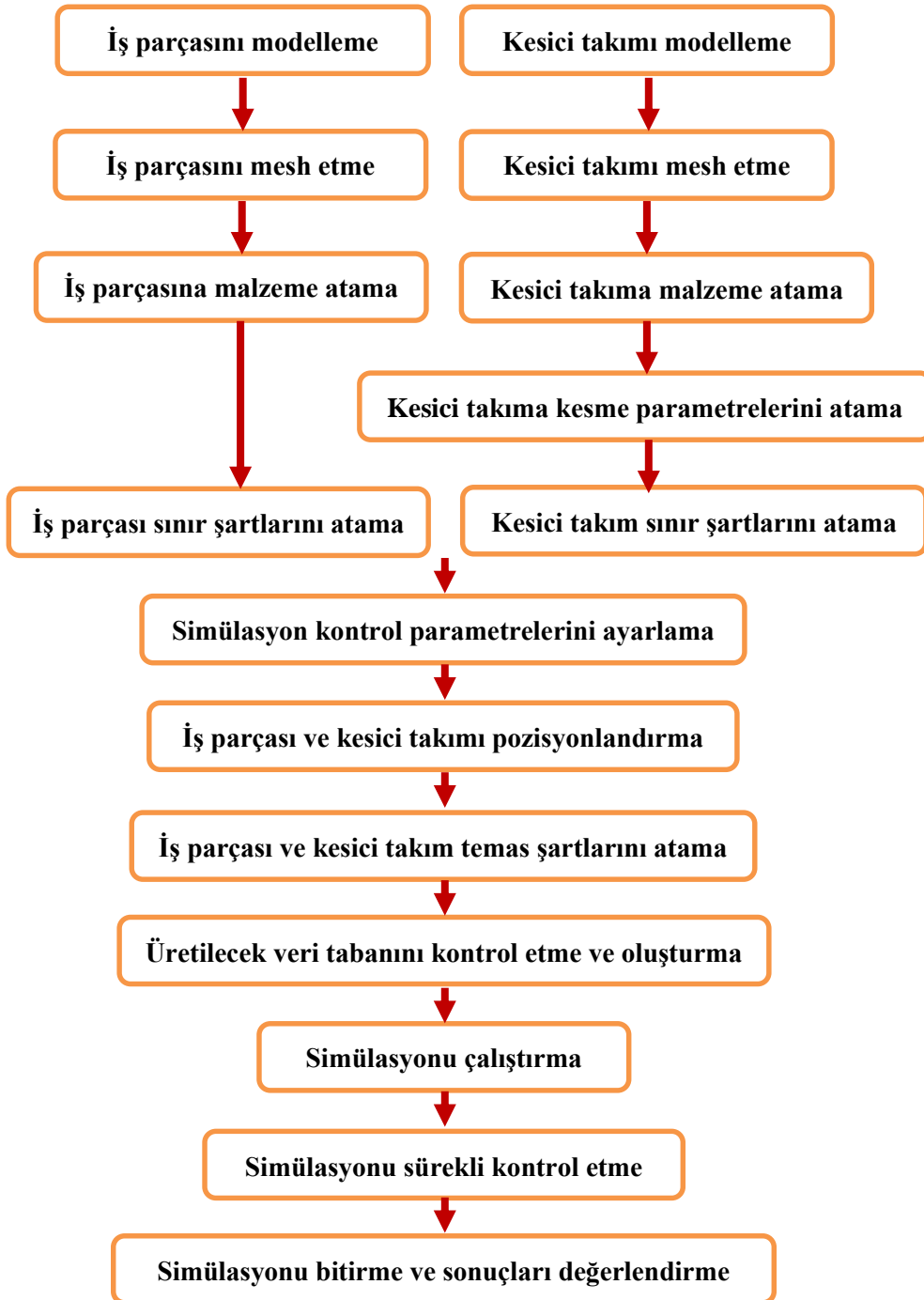
Çalışmanın bu kısmında sonlu elemanlar simülasyonu kullanılarak, alüminyum alaşımlarının delinmesi sürecinde ortaya çıkan sıcaklık dağılımlarının incelenmesi amaçlanmıştır. Al 7075 T351 alüminyum alaşımının, helisel karbür matkapla delinmesi sonucunda oluşan sıcaklık, DEFORM 3D V10.0 yazılımı kullanılarak araştırılmıştır. Sonlu elemanlar simülasyonu ile elde edilen sonuçlar, bor karbür takviyeli alüminyum 7XXX matrisli kompozitlerin deneysel olarak delinmesiyle ölçülen sıcaklık değerleri ile kıyaslanmıştır. Sonlu elemanlar simülasyonu sonucu, bor karbür takviyeli alüminyum 7XXX matrisli kompozitlerin deneysel olarak delinmesiyle elde edilen sıcaklık değerlerinin ve önerilen yeni sıcaklık ölçme tekniğinin doğruluğunu kanıtlamıştır.

### **5.1.1. Delme sürecinde sonlu elemanlar metodu**

Farklı malzemeye sahip kesici takım ile iş parçasından talaş kaldırma süreci oldukça karmaşıktır. Üstelik matkabın üç boyutlu geometriye sahip olmasından dolayı, talaş kaldırma yöntemleri arasında anlaşılması en zor olan operasyon delme operasyonudur. Tornalama ve frezeleme operasyonları iki boyutlu sonlu elemanlar metodu ile incelenebilirken, delme operasyonunun gerçeğe daha yakın sonuçların elde edilebilmesi için



üç boyutlu sonlu elemanlar metodu ile incelenmesi gerekmektedir. Pahalı ve zaman alan deney çalışmalarının yerine, sonuçları önceden tahmin etmek için kullanılan Deform 3D sonlu elemanlar yazılımının doğruluğu kanıtlanmıştır. Delme sonucunda elde edilecek verilere, Deform 3D sonlu elemanlar yazılımı ile bir kaç aşamadan sonra ulaşılabilmektedir. Şekil 5.1’de Deform 3D sonlu elemanlar metodunun aşamaları verilmiştir.

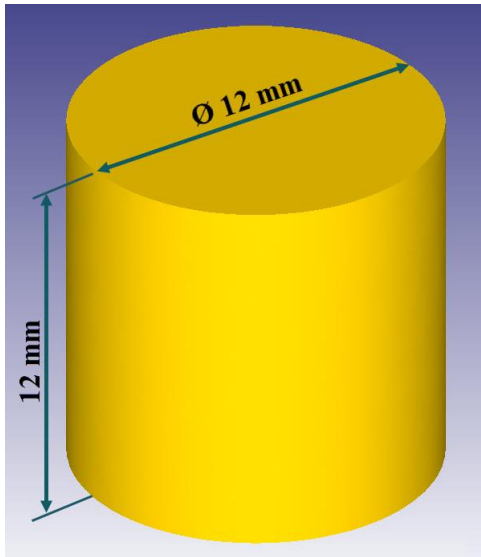


Şekil 5.1. Deform 3D sonlu elemanlar metodunun aşamaları

### 5.1.2. İş parçası ve matkabın modellenmesi ve mesh edilmesi

Deform 3D sonlu elemanlar yazılımının ilk aşaması iş parçası ve matkabın modellenmesidir. Delme operasyonunda, kesici takımın modellenmesi, iş parçasının modellenmesinden daha zor ve karmaşıktır. İş parçasının modellenmesi için prizmatik veya silindirik bir kütük yeterli olmaktadır. Fakat kesici takımın modellenmesi sonuçların hassasiyeti açısından oldukça önemlidir. Bu amaçla model üzerinde matkabın, olukları, keski kenarı, uç açısı, helis açısı ve boşluk açısı gerçeği ile birebir örtüşmelidir.

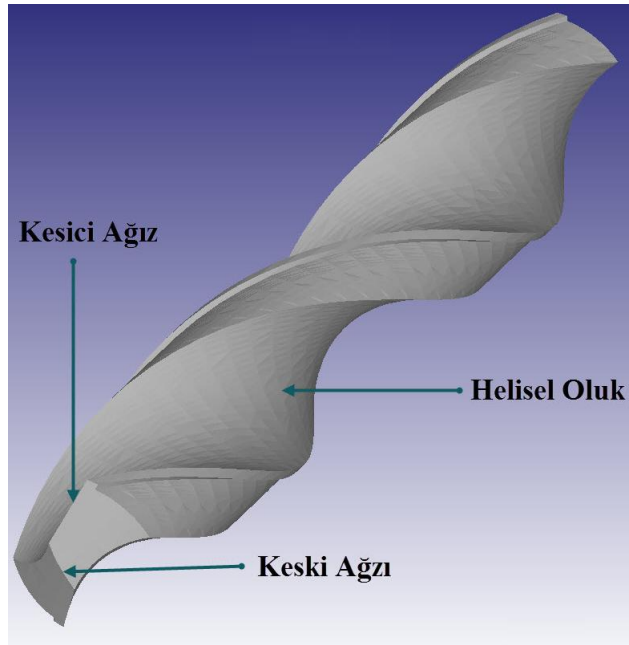
İş parçası ve matkabın katı modeli, üç boyutlu bilgisayar destekli tasarım programı veya Deform 3D yazılımının kendi arayüzü ile oluşturulabilmektedir. Herhangi bir bilgisayar destekli tasarım programı ile tasarlanmış model, Deform 3D sonlu eleman yazılımına import edilebilmektedir. Bu yöntemin sakıncaları mevcuttur. İport edilen model tek bir yüzeye sahip olmalı, bir veya birden fazla nokta, kenar ve yüzeye sahip olmamalıdır [124]. Çalışmanın bu kısmında iş parçası ve matkap, Deform 3D yazılımının kendi arayüzü ile modellenmiştir. İş parçası 12 mm çapında ve 12 mm boyunda silindirik kütük olarak modellenmiş ve Şekil 5.2’de verilmiştir. Çizelge 5.2’de geometrik özellikleri verilen matkaba ait oluşturulmuş modelin ekran görüntüsü Şekil 5.3’de verilmiştir.



Şekil 5.2. İş parçası modeli

Çizelge 5.2. Modellenen matkabın geometrik özellikleri

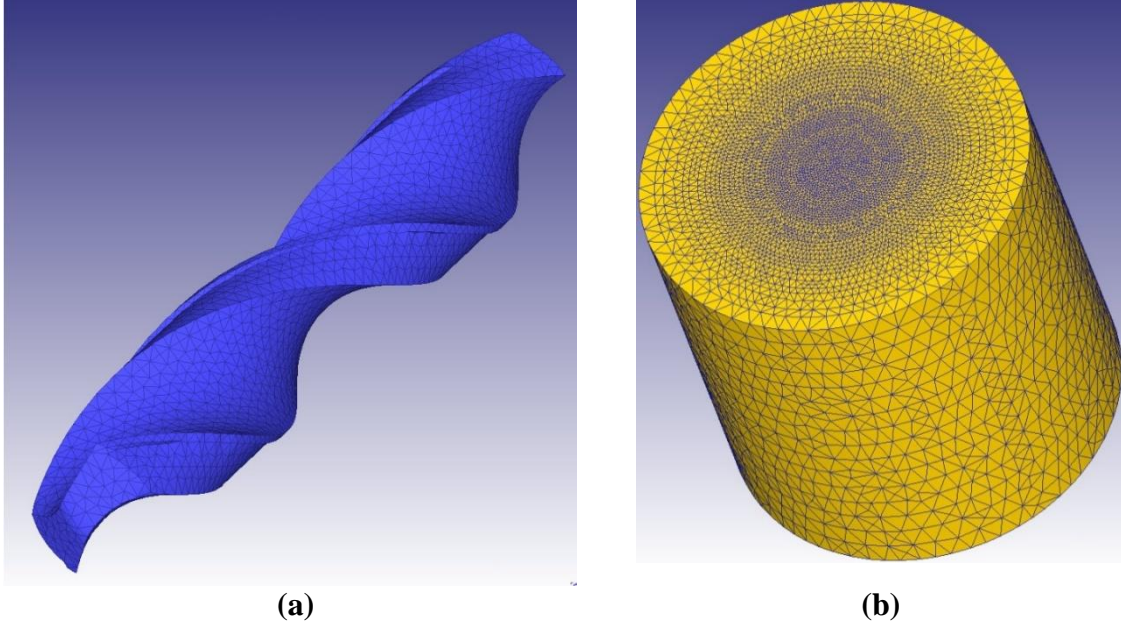
Matkap Çapı	8 mm
WEB Kalınlığı (Öz Kalınlığı)	1,92 mm
Helis Açısı	30,3°
Uç Açısı	140°
Zırh Genişliği	0,48 mm
Zırh Yüksekliği	0,25 mm



Şekil 5.3. Kesici takım modeli

Sonlu elemanlar metodunda temelde iki ana mesh türü vardır. Bunlardan ilki Lagrangian mesh, diğeri ise Eulerian mesh'tir. Lagrangian mesh talaş kaldırma sürecinde oluşan talaş ve çapağı modelleme kabiliyetine sahiptir. Ayrıca simülasyon herhangi bir sebeple durduğunda, simülasyonun kaldığı yerden devam edebilmesi açısından Lagrangian mesh daha avantajlıdır [116]. Bu çalışmada Lagrangian mesh kullanılmıştır.

İş parçasının mesh edilmesi, matkabın mesh edilmesinden daha büyük öneme sahiptir. Talaş kaldırma sürecinde en fazla deforme olan iş parçasıdır. Bu nedenle iş parçası plastik nesne olarak tanımlanırken, kesici takım rijit nesne olarak tanımlanmıştır. Kesici takım rijit nesne olduğu için, kesici takım için 20000 mesh yeterli olmaktadır. Bu çalışmada kesici takım için 25000 mesh ve en küçük mesh boyutu 0,3 mm olarak seçilmiştir. Şekil 5.4a'da mesh edilmiş matkap görülmektedir.



Şekil 5.4. Mesh edilmiş a) matkap b) iş parçası

İş parçası mesh edilirken, elde edilecek olan en küçük mesh boyutu, en azından matkabın kesici ağzı başına düşen ilerleme miktarı kadar olmalıdır [116]. Fakat yazılımı üreten firma tarafından, en küçük mesh boyutunun matkabın ilerleme hızının dörtte biri kadar olması önerilmektedir. Üretici firmanın tavsiyesi dikkate alındığında, analiz süresi günlerce ve hatta haftalarca sürmektedir [116]. En küçük mesh boyutu matkabın kesici ağzı başına düşen ilerleme miktarı kadar seçildiğinde, analiz süreci azalmakta, fakat bu durum sonuçların hassasiyetini azaltmaktadır. Bu çalışmada yazılımı üreten firmanın tavsiyesi dikkate alınmış ve en küçük mesh boyutu matkabın ilerleme oranının dörtte biri olan 0,075 mm olarak seçilmiştir. Elde edilecek mesh sayısını azaltmak için, iş parçasının matkap ile temas halinde olduğu kesme bölgesinde hassas mesh, diğer kısımlarında kaba mesh oluşturulmuştur. İş parçası üzerinde 62874 elemanlı mesh modelleme yapılmıştır. Şekil 5.4b’de mesh edilmiş iş parçası görülmektedir.

### 5.1.3. İş parçası ve kesici takım malzemesi

Deform 3D sonlu elemanlar yazılımında iş parçası ve kesici takım için önceden tanımlanmış malzeme kütüphanesi vardır. İş parçası için kütüphanede var olan malzemeler:

- Alüminyum ve alaşımları
- Beta Malzemeler (İnconel)
- Çelik ve alaşımları
- Süper alaşımlar
- Titanyum ve alaşımları
- Pirinç

Kesici takım için kütüphanede var olan malzemeler:

- Karbür
- SiC takviyeli Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>
- TiC Kaplamalı
- TiN Kaplamalı
- TiCN Kaplamalı
- TiAlN Kaplamalı

Deform 3D yazılımı yeni bir malzemenin kütüphaneye eklenmesine olanak sağlamaktadır. Fakat kütüphaneye eklenecek yeni malzeme, önceden yapılmış birçok deney sonucunda ulaşılmış verileri içermelidir. Bu veriler arasında, malzemenin deformasyon hızı, gerilmeleri, elastik modülü, termal genleşme katsayısı, sertlik, termal iletkenlik ve emisivite vb. değerler yer almaktadır. Farklı takviye oranlarına sahip alüminyum kompozit malzemenin özellikleri önceden bilinmediği için seçilemedi. Kıyaslama yapabilmek amacıyla iş parçası malzemesi Al 7075 T351 olarak seçilirken, kesici takım malzemesi % 15 kobalt içerikli karbür olarak seçilmiştir.

#### 5.1.4. Kesme parametreleri

Deform 3D sonlu elemanlar yazılımı ile yapılan analizde tanımlanan kesme parametreleri Çizelge 5.3’de verilmiştir.

Çizelge 5.3. Kesme parametreleri

Devir Sayısı	dev/dak	2500
İlerleme Hızı	mm/dev	0,3

#### 5.1.5. İş parçası ve kesici takım sınır şartları

İş parçasının yan yüzeyi üzerindeki tüm noktalar X, Y ve Z eksenî yönlerinde sabitlenmiştir. İlaveten hem iş parçası hem de kesici takımın tüm yüzeyleri için ortamla ısı değişimi sınır şartları 20 °C olarak ayarlanmıştır. Delme işlemi çok kısa bir zamanda gerçekleştiği için ortamla ısı değişimi minimum seviyede olmaktadır [116].

### 5.1.6. Simulasyon kontrol parametreleri

Deform 3D yazılımının bir sonraki adımında, önceden tanımlanmış problemin analiz edilmesindeki kriterler, simülasyon kontrol ara yüzü ile tanımlanmıştır. Simulasyon için, SI birim sistemi seçilmiş, Lagrangian çözümü kullanılmış, deformasyon ve ısı transferi modları aktif edilmiştir.

Simülasyon adımının hesaplanmasında, matkabın iş parçasını tamamen deldiği göz önünde bulundurulmuştur. Bu amaçla, iş parçasının yüksekliğine, matkabın uçundaki konik kısmın yüksekliği ilave edilmiştir. Toplam delme mesafesi 13,7 mm olarak hesaplanmış ve simülasyon adımının hesaplanmasında kullanılmıştır. Sonuçta simülasyon adımı 13700 olarak hesaplanmış ve simülasyon adımının tanımlanmasında kullanılmıştır.

Simülasyonun her bir adımındaki zaman artışı  $8 \times 10^{-5}$  olarak hesaplanmış ve adım artışının tanımlanmasında kullanılmıştır.

Sonlu elemanlar metodu ile talaş kaldırma sürecinde, iş parçasında büyük deformasyonlar meydana geldiğinden dolayı, mesh yapısı sürekli olarak bozulmaktadır. Simülasyonun devam edebilmesi için analiz sürecinde mesh yapısının, sık sık düzeltilmesi gerekmekte ve yeniden mesh edilmesi gerekmektedir [116]. Simulasyon kontrol sekmesi altında yeniden mesh etme kriteri, simülasyon sürecini optimize etmek amacıyla local mesh olarak seçilmiştir.

Delme operasyonu kuru işleme şartları altında gerçekleştirildiği için, simülasyon sürecinde soğutma yapılmamıştır. Bu nedenle, simülasyon kontrol penceresi altında işleme şartları sekmesinde var olan değerler değiştirilmemiş ve olduğu gibi kabul edilmiştir.

Matkap, iş parçasına göre yeniden pozisyonlandırılarak, yaklaşma yönü  $-Z$  istikametinde seçilmiş ve iş parçasının merkezinde delme başlangıç konumuna getirilmiştir.

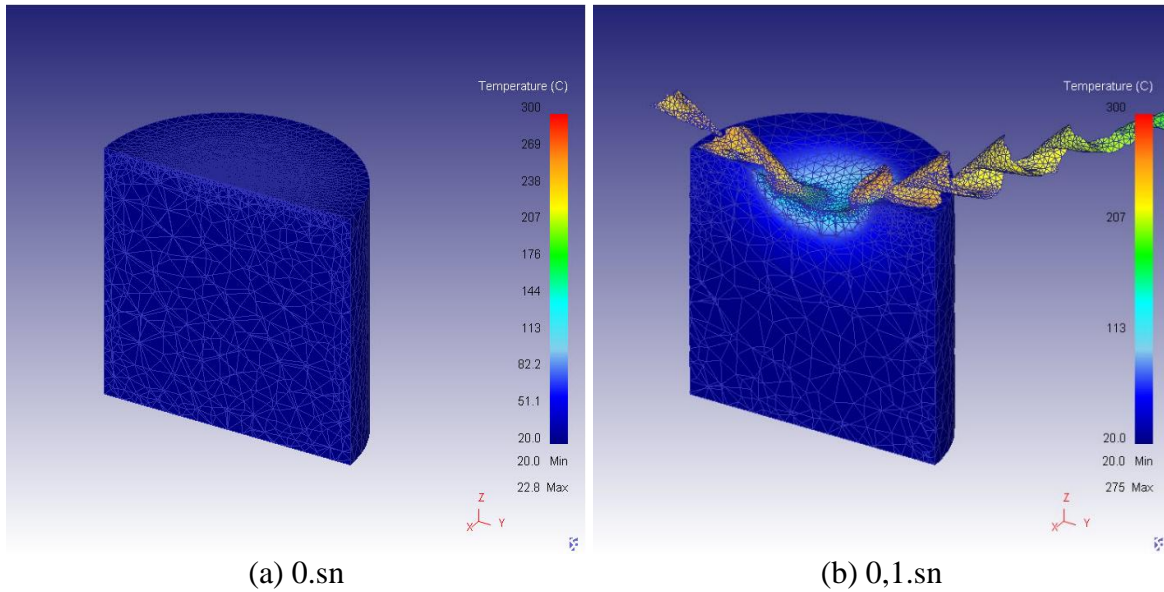
Matkap ile iş parçası arasındaki temas şartlarının tanımlanması için, sürtünme katsayısı ve ısı transfer katsayısının girilmesi gerekmektedir. Bu sebeple, matkap talaş kaldırma işlemini gerçekleştiren ana nesne, iş parçası ise üzerinden talaş kaldırılan yani etkilenen nesne olarak tanımlanmıştır. Sürtünme katsayısı 0,6 ve ısı iletim katsayısı 40 olarak tanımlanmıştır.

Ayrıca, delme sürecinde ortaya çıkan talaşın iş parçasına sürtünmesi muhtemel olduğundan, iş parçası için hem ana nesne hem de etkilenen nesne olarak tanımlama yapılmıştır.

Son olarak tanımlanan simülasyon parametreleri kontrol edilmiş ve simülasyonun çalıştırılması için gerekli olan veri tabanı üretilmiştir. Tanımlanan probleme ait simülasyon çalıştırılmış, çalışma esnasında sürekli kontrol edilmiş ve simülasyon tamamlanarak sonuçlar değerlendirilmiştir.

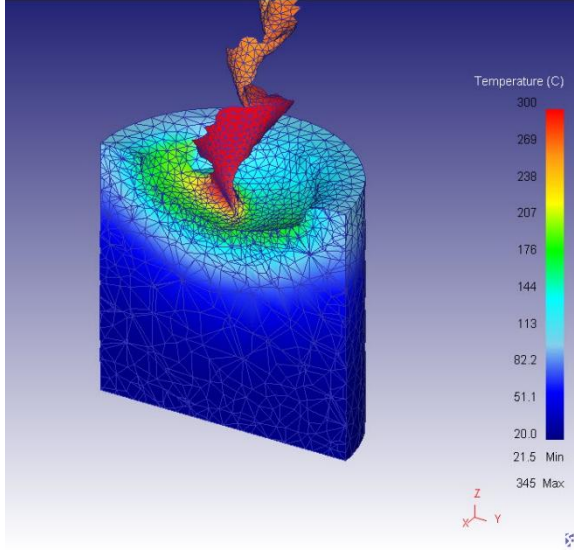
### 5.1.7. Sonuçlar ve tartışma

12 mm kalınlığındaki Al 7075 T351 malzemenin, % 15 kobalt içerikli karbür matkapla delinmesi sonucu iş parçası ve matkap üzerinde zamana bağlı olarak oluşan sıcaklık değerleri Şekil 5.5 ve Şekil 5.7’de verilmiştir. Şekil 5.5 incelendiğinde üretilen sıcaklığın büyük bir kısmının talaş ile kesme bölgesinden uzaklaştırıldığı anlaşılmaktadır. Kesme bölgesinde üretilen sıcaklığın diğer bir kısmı, iş parçası ısı iletim katsayısına bağlı olarak, merkezden dışa doğru bir yayılma göstermektedir. Ayrıca delme derinliğindeki artışla beraber, iş parçası üzerinde depolanan ısının artmasıyla sıcaklığın arttığı görülmektedir.

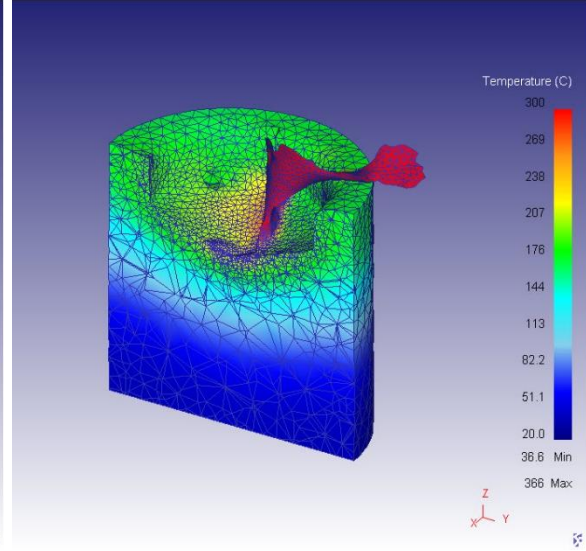


Şekil 5.5. Al 7075 iş parçası üzerinde zamana bağlı olarak oluşan sıcaklık değerleri

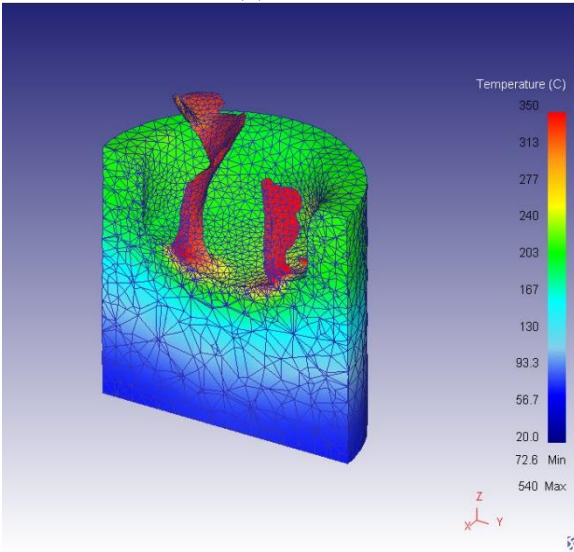




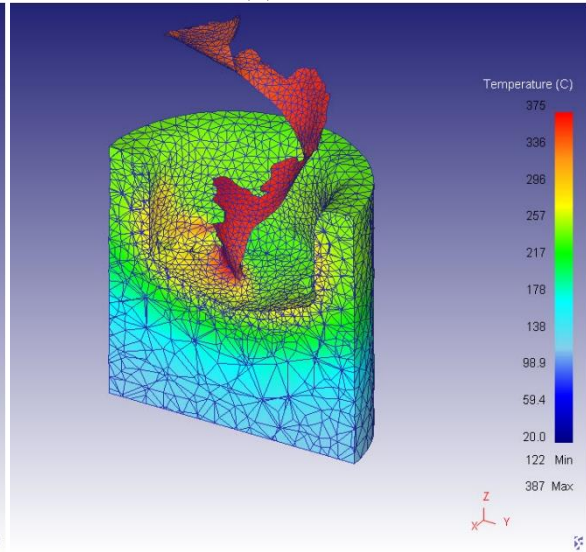
(c) 0,2.sn



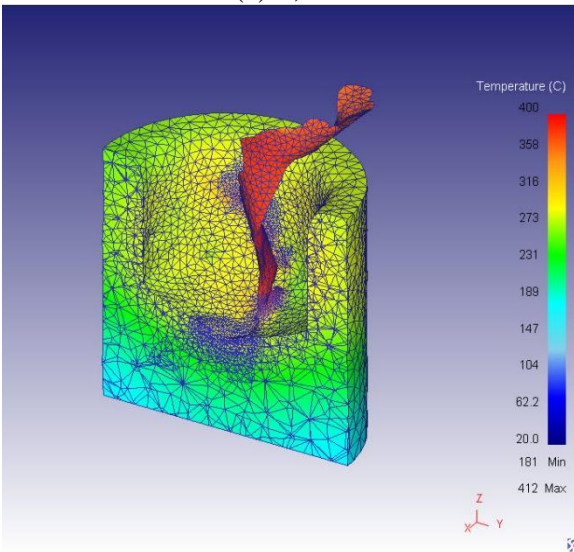
(d) 0,3.sn



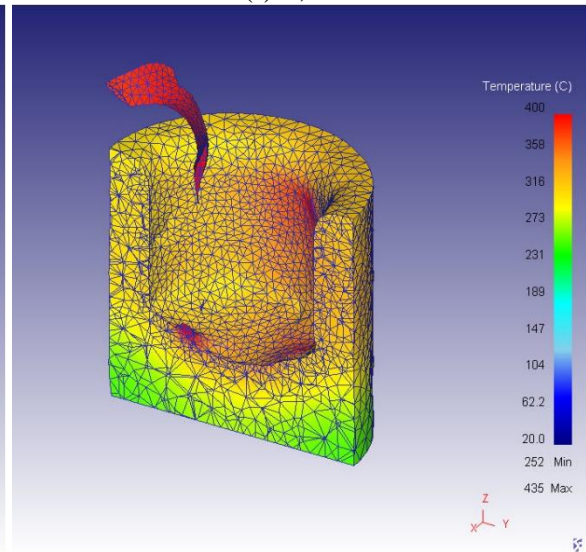
(e) 0,4.sn



(f) 0,5.sn



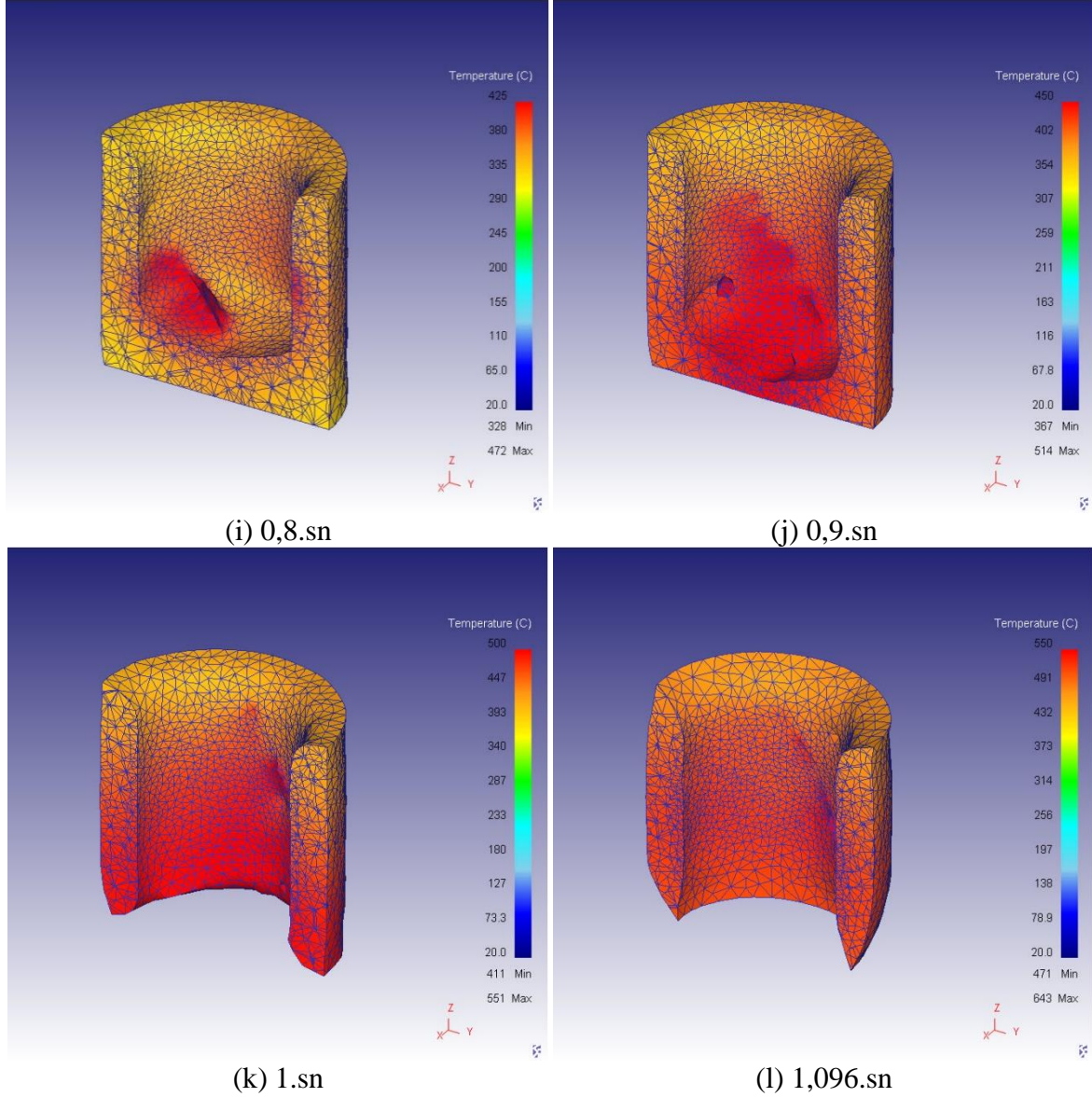
(g) 0,6.sn



(h) 0,7.sn

Şekil 5.5. (devam) Al 7075 iş parçası üzerinde zamana bağlı olarak oluşan sıcaklık değerleri

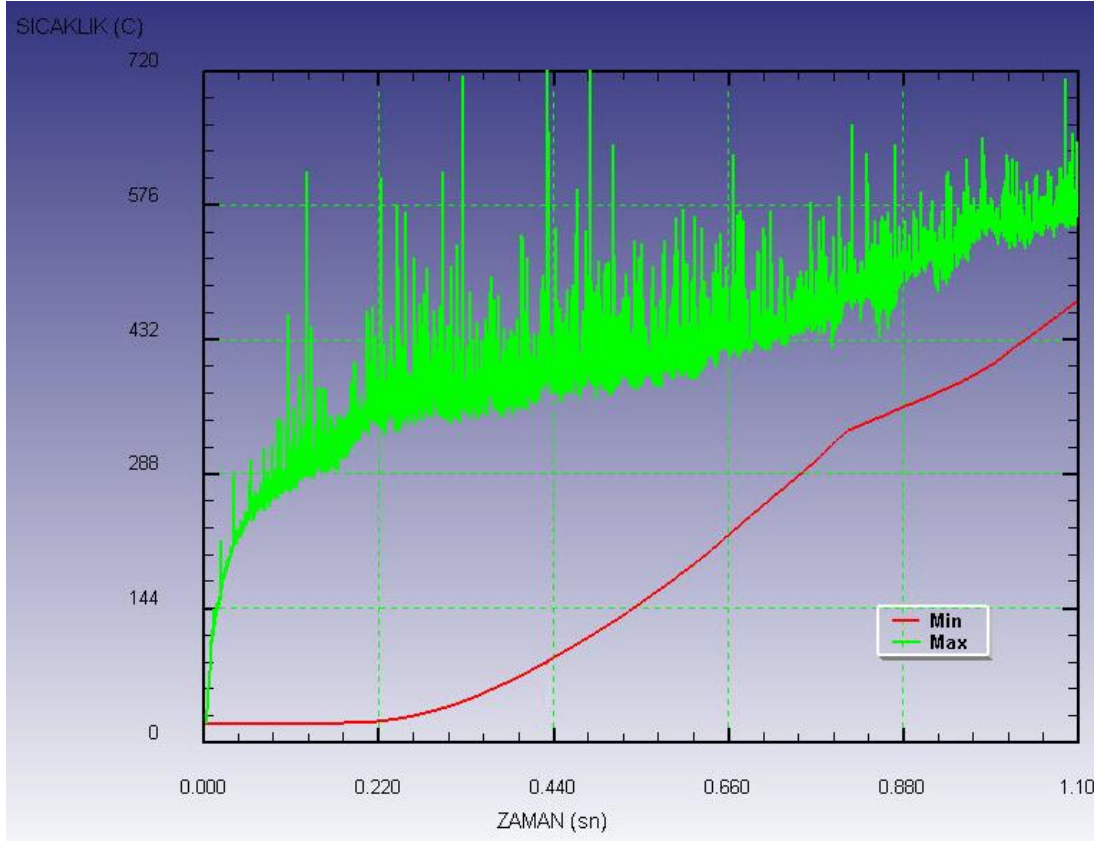




Şekil 5.5. (devam) Al 7075 iş parçası üzerinde zamana bağlı olarak oluşan sıcaklık değerleri

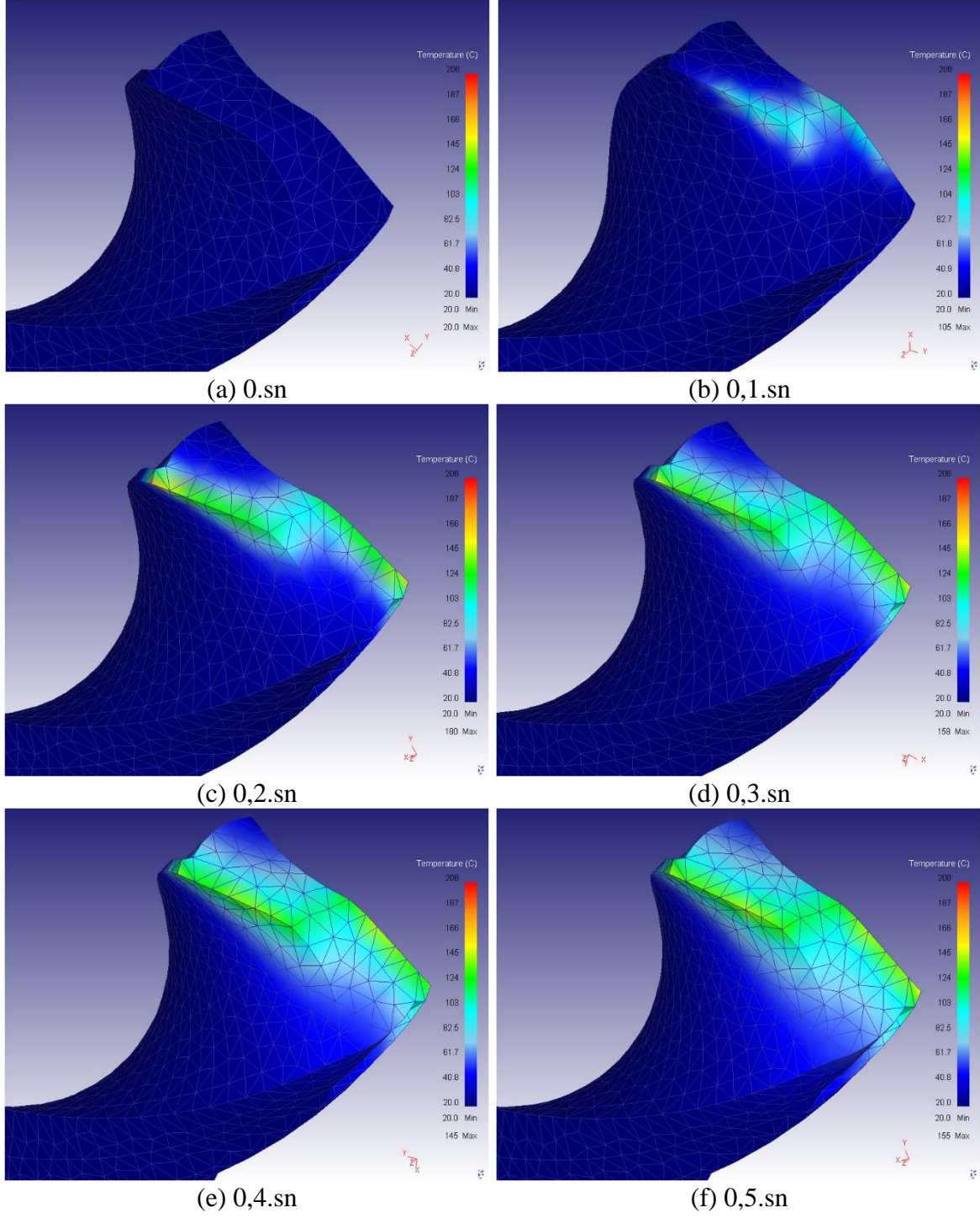
Şekil 5.6'daki grafik incelendiğinde yaklaşık olarak toplam delme süresinin onda biri olan 0,118 saniyeye karşılık gelen 1,48 mm derinliğe kadar maksimum sıcaklığın hızlı bir şekilde artarak 290 °C civarına ulaştığı anlaşılmaktadır. Bu noktadan sonra maksimum sıcaklık değeri zamana göre daha yavaş artış göstermiştir. Geri kalan onda dokuzluk süre zarfındaki sıcaklık artışı yaklaşık olarak 290 °C civarında olmuştur. Grafikteki kırmızı çizgi iş parçasının sahip olduğu minimum sıcaklık değerini göstermektedir. Delme süresinin yaklaşık beşte biri olan 0,22 saniyeye karşılık gelen 2,74 mm derinlikten sonra iş parçasının tamamı, ortam sıcaklık değeri olan 20 °C'yi aşmıştır. Geri kalan beşte dördlük süre zarfında hızlı bir sıcaklık artışı olarak, minimum sıcaklık değeri 470 °C'ye ulaşmıştır. Bu sonuç kesme bölgesinde üretilen ısının başlangıçta maksimum sıcaklığın üzerinde etkili olduğunu

ve belirli bir sıcaklık değerinden sonra iş parçasının minimum sıcaklığının artmasında etkili olduğunu göstermiştir. Bu nedenle maksimum sıcaklık değeri 0,118 saniyeden sonra nispeten daha yavaş bir artış göstermiştir.



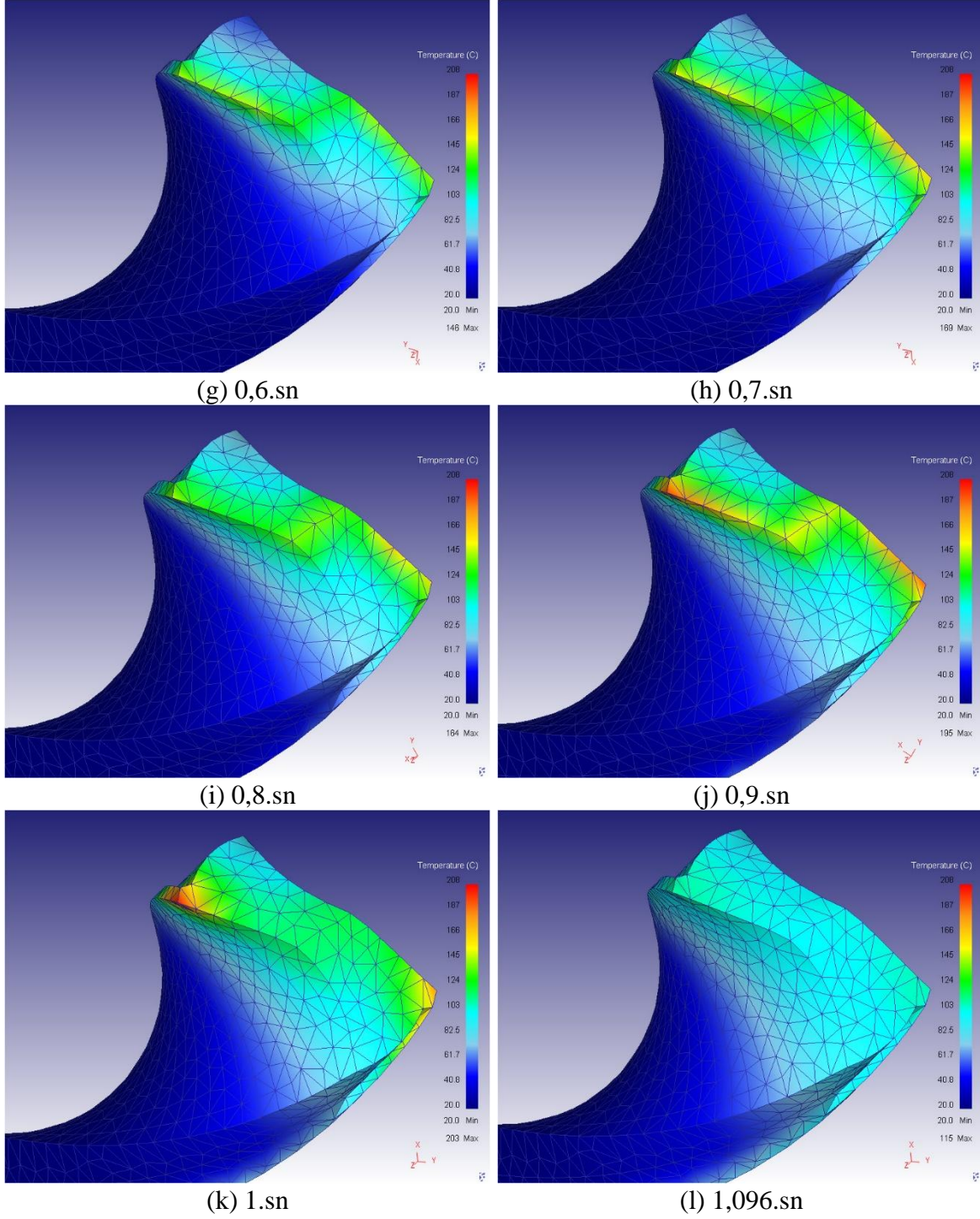
Şekil 5.6. İş parçasına ait zamana bağlı sıcaklık değişim grafiği

Şekil 5.7 incelendiğinde matkap üzerinde etkili olan maksimum sıcaklığın matkabın kesici ağızları üzerinde meydana geldiği görülmüştür. Matkap çapına bağlı olarak kesme hızındaki artış ile birlikte, matkabın kesici ağızları üzerinde merkezden dışa doğru gidildikçe sıcaklık değeri artmıştır. Bu beklenen bir sonuçtu. Çünkü matkap üzerinde etkili olan en önemli aşınma, köşe aşınmasıdır. Matkap üzerinde etkili olan en önemli aşınmanın köşe aşınması olmasının nedeni, kesme hızındaki ve sürtünmedeki artışa bağlı olarak artan sıcaklık değerleridir. Artan sıcaklık değerlerinin matkabın köşesinde maksimum olduğu özellikle 0,9 ve 1'inci saniyelerdeki şekillerden anlaşılmaktadır. İlâveten bu şekillerden kesme bölgesinde üretilen ısının bir kısmının matkap üzerine geçtiği ve zamana bağlı olarak matkap ucunun belirli bir kısmında yayıldığı görülmektedir.



Şekil 5.7. % 15 kobalt içerikli karbür matkap üzerinde zamana bağlı olarak oluşan sıcaklık değerleri

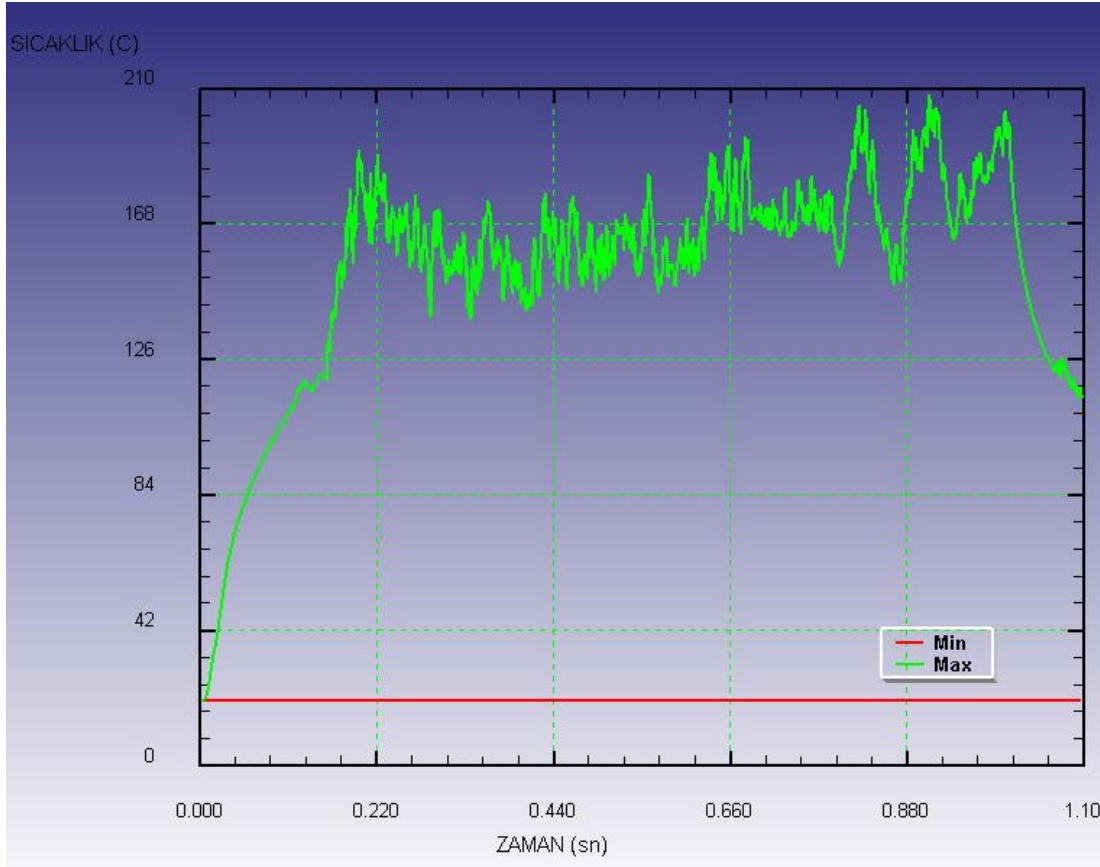




Şekil 5.7. (devam) % 15 kobalt içerikli karbür matkap üzerinde zamana bağlı olarak oluşan sıcaklık değerleri

Şekil 5.8'deki grafik incelendiğinde yaklaşık olarak toplam delme süresinin beşte biri olan 0,196 saniyeye karşılık gelen 2,457 mm derinliğe kadar maksimum sıcaklığın hızlı bir şekilde artarak 190 °C civarına ulaştığı anlaşılmaktadır. Bu noktadan sonra maksimum sıcaklık değeri zamana göre daha yavaş artış göstermiştir. Geri kalan beşte dördlük süre

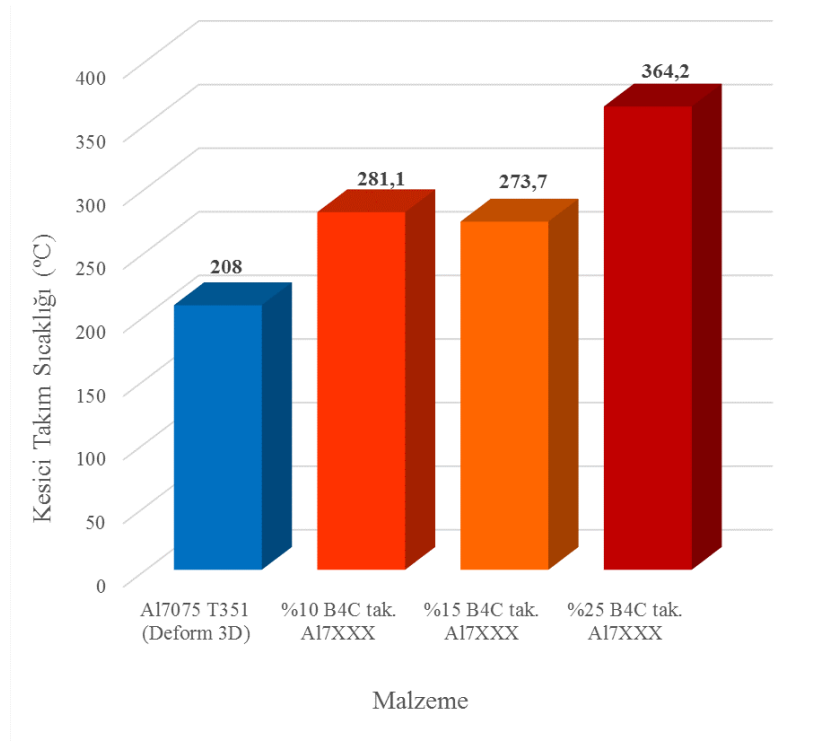
zarfındaki sıcaklık artışı yaklaşık olarak 18 °C civarında olmuştur. Grafikteki kırmızı çizgi matkabın sahip olduğu minimum sıcaklık değerini göstermektedir. Matkap sıcaklığı, delme süresi boyunca, ortam sıcaklık değeri olan 20 °C'yi aşmamıştır. Bu sonuç kesme bölgesinde üretilen ısının, matkap üzerinde iş parçasına göre daha yavaş yayıldığını göstermiştir. Ayrıca matkabın iş parçasını delip çıktıktan 1-1,096 saniye arasındaki süre zarfında, matkabın kesici ağızları üzerindeki sıcaklık, hızla azalmış ve 115 °C'ye kadar düşmüştür.



Şekil 5.8. Matkaba ait zamana bağlı sıcaklık değişim grafiği

Farklı takviye oranına sahip (%10, %15, %25) Al7XXX matrisli alüminyum kompozit malzemelerin karbür matkapla 2500 dev/dak, 0,3 mm/dev ilerleme hızında delinmesiyle ölçülen sıcaklık değerleri ile aynı kesme şartları altında Al7075 T351 malzemenin delinmesiyle Deform 3D sonlu elemanlar yazılımından elde edilen sıcaklık değerlerinin karşılaştırılması Şekil 5.9'da verilmiştir. Şekil 5.9 incelendiğinde, Deform 3D sonlu elemanlar yazılımı ile elde edilen kesici takım sıcaklık değerinin (208 °C), deneysel olarak ölçülen sıcaklık değerleri ile uyumlu olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Al7XXX serisi alüminyum alaşımına yapılan % 10'luk takviye ilavesinin, kesici takım sıcaklığını yaklaşık olarak 73 °C artırdığı söylenebilir. Benzer şekilde, Al7XXX serisi alüminyum alaşımına

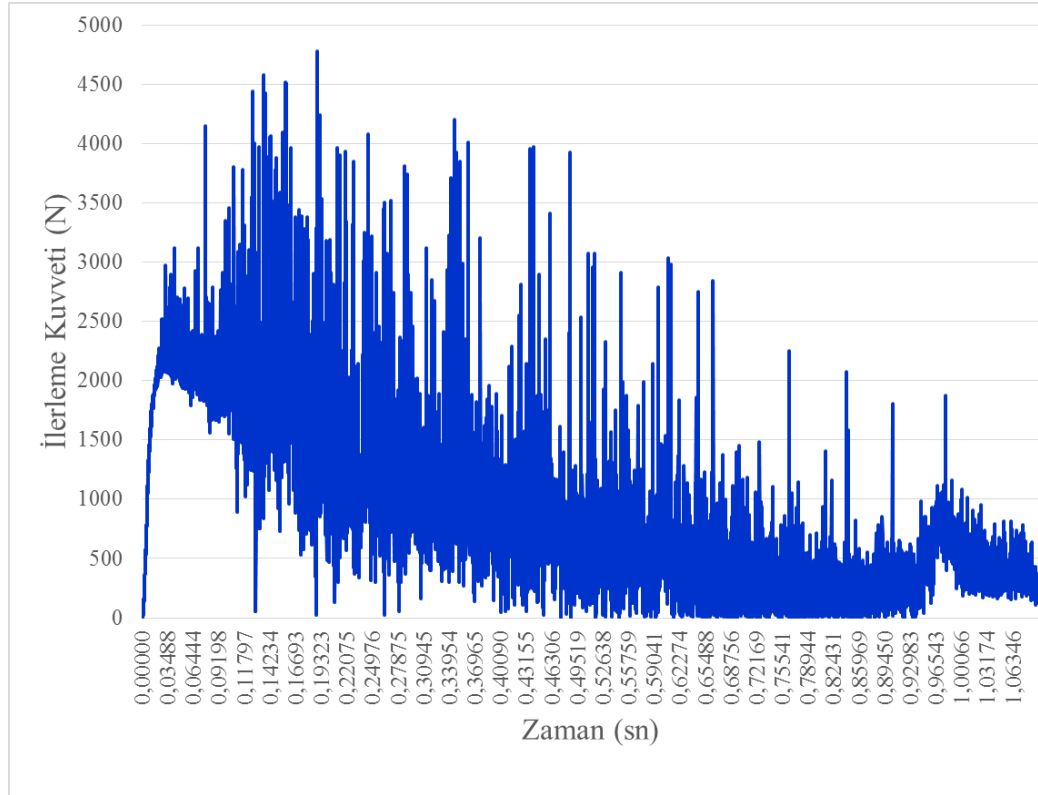
yapılan % 25'lik takviye ilavesinin, kesici takım sıcaklığını yaklaşık olarak 156 °C artırdığı söylenebilir. Takviye oranındaki 2,5 kata varan artışın, kesici takım sıcaklığını yaklaşık olarak 2,14 kat artırdığı anlaşılmaktadır. Elde edilen bu sonuç, Deform 3D ve pirometre ile deneysel olarak ölçülen sıcaklık değerlerinin doğruluğunu kanıtlamıştır.



Şekil 5.9. Karbür matkapla 2500 dev/dak, 0,3 mm/dev ilerleme hızında elde edilen sıcaklık değerleri

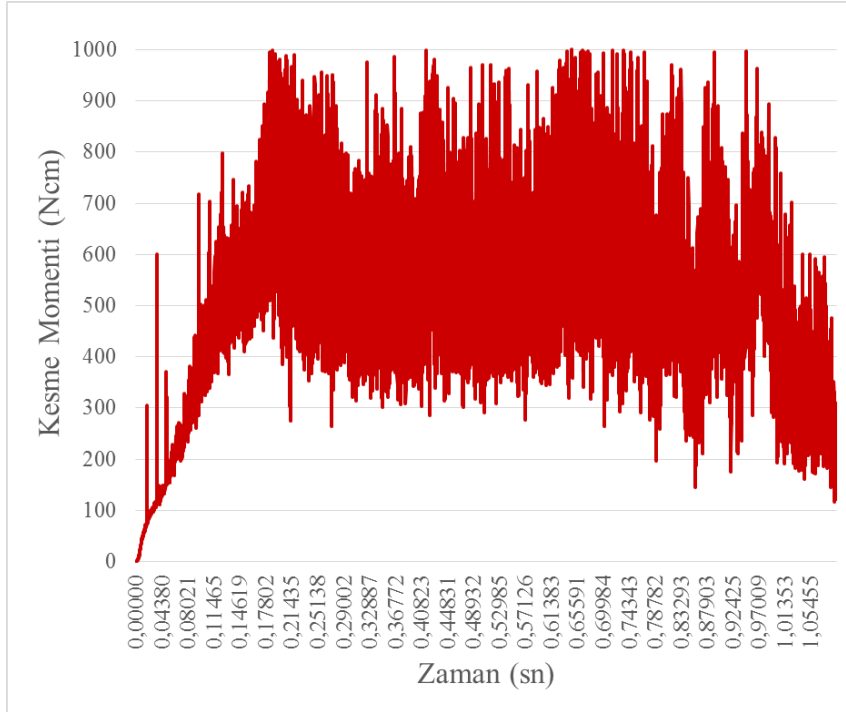
Al7075 T351 malzemenin karbür matkapla 2500 dev/dak, 0,3 mm/dev ilerleme hızında delinmesiyle Deform 3D sonlu elemanlar yazılımından elde edilen ilerleme kuvveti grafiği Şekil 5.10'da verilmiştir. Kompozit malzemelerin delme deneylerinde ölçülen ortalama ilerleme kuvveti değerinin belirlenmesinde, matkabın kesme yüküne maruz kaldığı mesafe (Bkz. Şekil 3.6b) kullanılmıştı. Bu durumda %10 B<sub>4</sub>C içerikli kompozit malzeme için 1074 N, % 15 B<sub>4</sub>C içerikli kompozit malzeme için 1194 N, ve %25 B<sub>4</sub>C içerikli kompozit malzeme için 1434 N ilerleme kuvveti değerine ulaşıldı. Benzer hesaplama yöntemi ile Deform 3D sonlu elemanlar yazılımı vasıtasıyla 766 N ortalama ilerleme kuvveti değerine ulaşılmıştır. Bu sonuçlara göre Al7XXX serisi alüminyum alaşımına yapılan % 10'luk takviye ilavesinin, ortalama ilerleme kuvveti değerini 307 N artırdığı söylenebilir. Benzer şekilde Al7XXX serisi alüminyum alaşımına yapılan, % 15'lik takviye ilavesinin, ortalama ilerleme kuvveti değerini 427 N, % 25'lik takviye ilavesinin, ortalama ilerleme kuvveti değerini 667 N

artırdığı söylenebilir. Takviye oranındaki 1,5 kata varan artışın, ortalama ilerleme kuvveti değerini yaklaşık olarak 1,4 kat artırdığı ve takviye oranındaki 2,5 kata varan artışın, ortalama ilerleme kuvveti değerini yaklaşık olarak 2,17 kat artırdığı anlaşılmaktadır. Elde edilen bu sonuç, Deform 3D ve dinamometre ile deneysel olarak ölçülen ortalama ilerleme kuvveti değerlerinin uyum içerisinde olduğunu göstermiştir.



Şekil 5.10. Deform 3D sonlu elemanlar yazılımı ile elde edilen ilerleme kuvveti grafiği

Al7075 T351 malzemenin karbür matkapla 2500 dev/dak, 0,3 mm/dev ilerleme hızında delinmesiyle Deform 3D sonlu elemanlar yazılımından elde edilen kesme momenti grafiği Şekil 5.11'de verilmiştir. Kompozit malzemelerin delme deneylerinde ölçülen ortalama kesme momenti değerinin belirlenmesinde, matkabın kesme yüküne maruz kaldığı mesafe (Bkz. Şekil 3.6b) kullanılmıştı. Bu durumda %10 B<sub>4</sub>C içerikli kompozit malzeme için 265 Ncm, %15 B<sub>4</sub>C içerikli kompozit malzeme için 294 Ncm, ve %25 B<sub>4</sub>C içerikli kompozit malzeme için 379 Ncm kesme momenti değerine ulaşıldı. Benzer hesaplama yöntemi ile Deform 3D sonlu elemanlar yazılımı vasıtasıyla 545 Ncm ortalama kesme momenti değerine ulaşılmıştır. Elde edilen bu sonuç, Deform 3D ve dinamometre ile deneysel olarak ölçülen ortalama kesme momenti değerleri arasında uyum olmadığını göstermiştir.



Şekil 5.11. Deform 3D sonlu elemanlar yazılımı ile elde edilen kesme momenti grafiği

## 5.2. Matematiksel Modelleme

Literatürde ilerleme kuvveti ve kesme momentinin tahmin edilebilmesi için istatistikî çalışmalara ilaveten, matematiksel model geliştirmek için de çalışmalar yapıldığı görülmektedir [12, 14, 18]. Delme operasyonunun üç boyutlu kesme doğası ile farklı takviye oranına sahip kompozit malzemelerin yapısı dikkate alındığı zaman, matematiksel model ortaya koymak oldukça zordur. Bu alanda yapılan çalışmalar incelendiğinde, bu konuda ortaya çıkan ihtiyacın regresyon analizleri ile karşılanmaya çalışıldığı görülmektedir [8, 20, 83, 91, 93].

Ticari olarak piyasada mevcut olan GeneXproTool programı, regresyon analizi ve fonksiyon bulmak için geliştirilmiş bilgisayar yazılımıdır. GeneXproTool yazılımı, genetik algoritma ve genetik programlamanın avantajlarını birleştiren gen ile ifade edilen programlama (GEP) tekniğini kullanmaktadır [125-127]. Yang ve diğerleri tarafından, yüzey frezelemede ortaya çıkan hem kesme kuvvetlerini [126, 128] hem de enerji tüketimini [127] tahmin etmek amacıyla, GEP tekniği ile birer model oluşturulmuştur. Colak ve diğerleri, (2007) tarafından, parmak frezeleme ile oluşan yüzey pürüzlülük değerini tahmin etmek amacıyla, GEP tekniği ile bir model oluşturulmuştur [129]. Kök ve diğerleri, (2011) tarafından,  $Al_2O_3$  seramik takviyeli Al7075 matrisli kompozit malzemelerin su jeti ile kesilmesiyle oluşan yüzey



pürüzlülük değerini tahmin etmek amacıyla, GEP tekniği ile bir model oluşturulmuştur [130]. Salman ve diğerleri, (2008) tarafından, elektro erozyon tezgâhı ile işleme sonucu oluşan yüzey pürüzlülük değerlerini tahmin etmek amacıyla, GEP tekniği ile bir model oluşturulmuştur [131]. Yazarlar tarafından, elde ettikleri modellerin sonuçlarını test etmek amacıyla deneyler yapılmış ve deneysel sonuçlarla tahmin edilen sonuçların oldukça uyum içerisinde olduğu bildirilmiştir [126-131]. Ayrıca Ghorbanı ve diğerleri, (2012) tarafından, ABD'nin California eyaletindeki buharlaşmayı hesaplamak için, hava sıcaklığı, güneş radyasyonu, rüzgâr hızı, basınç ve nem dâhil olmak üzere beş bağımsız iklim değişkenini içeren bir GEP model oluşturulmuştur [125]. Elde edilen GEP modelin sonuçları, yapay sinir ağları ve bulanık mantık olmak üzere iki yapay zekâ modeli ile karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlardan, GEP modelin diğer yapay zekâ modellerine alternatif olabileceği bildirilmiştir.

Bu bölümde delme esnasında oluşan ilerleme kuvveti, kesme momenti, aşınma, yüzey pürüzlülüğü ve kesici takım sıcaklığının tahmin edilebilmesi için GeneXproTool programı kullanılmıştır. Program vasıtası ile deneye ait bağımsız değişkenler (takviye oranı ve matkap malzemesine ait sertlik değerleri (Çizelge 5.4) ile devir sayısı ve ilerleme hızı), sonuçta elde edilecek fonksiyon için girdi parametreleri olarak tanımlanmıştır. Yapılan 108 adet deneyden seçilmiş 9 adet deney verileri, elde edilecek olan matematiksel model sonuçlarını doğrulamak amacıyla hesaba katılmamıştır. Bu sayede ilerleme kuvveti, kesme momenti, aşınma, yüzey pürüzlülüğü ve kesici takım sıcaklığı için matematiksel modeller elde edilmiştir. Elde edilen matematiksel modellerin doğruluğunu kanıtlamak amacıyla, hesaba katılmayan 9 adet deneyin sonuçları ile matematiksel modellerden elde edilen sonuçlar kıyaslanmış ve sonuçların yüzey pürüzlülüğü dışında oldukça yeterli olduğu görülmüştür. Yüzey pürüzlülüğü için elde edilen matematiksel model başarısız olmuştur.

Çizelge 5.4. Kompozit ve kesici takım malzemesi Vickers sertlik değerleri

Malzeme	HV sertlik değeri
% 10 MMK	101
% 15 MMK	130
% 25 MMK	148
HSS	880
Karbür	1500
TiAlN Kap. Karbür	2800

### 5.2.1. İlerleme kuvveti için GEP model

Her bir deneye karşılık gelen bağımsız değişkenler ve ilerleme kuvveti değerleri GEP model elde etmek için programa girilmiş ve Şekil 5.12'deki gen yapısı elde edilmiştir. Elde edilen gen yapısında kullanılan simgeler Çizelge 5.5'de verilmiştir. Şekil 5.12'deki ilerleme kuvvetine ait gen yapısındaki sabit değerler, Çizelge 5.6'da verilmiştir.

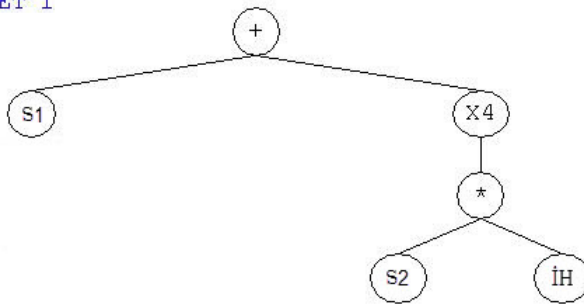
Çizelge 5.5. Gen yapısında kullanılan simgeler ve açıklamaları

TO	Takviye Oranına Göre Sertlik Değeri (HV)
KT	Kesici Takım Sertliği (HV)
İH	İlerleme Hızı (mm/dev)
DS	Devir Sayısı (dev/dak)

Çizelge 5.6. İlerleme kuvvetine ait gen yapısındaki sabit değerler

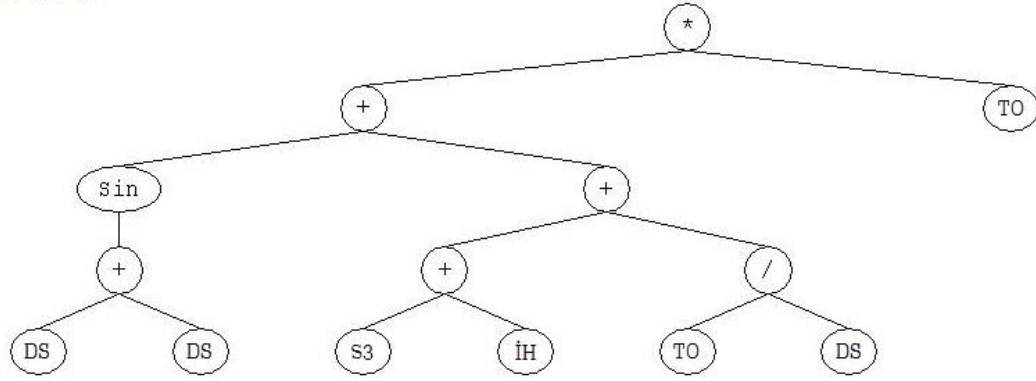
S1	-249,3729
S2	-12,4745
S3	10,608
S4	-1,7145
S5	-2,764

Sub-ET 1

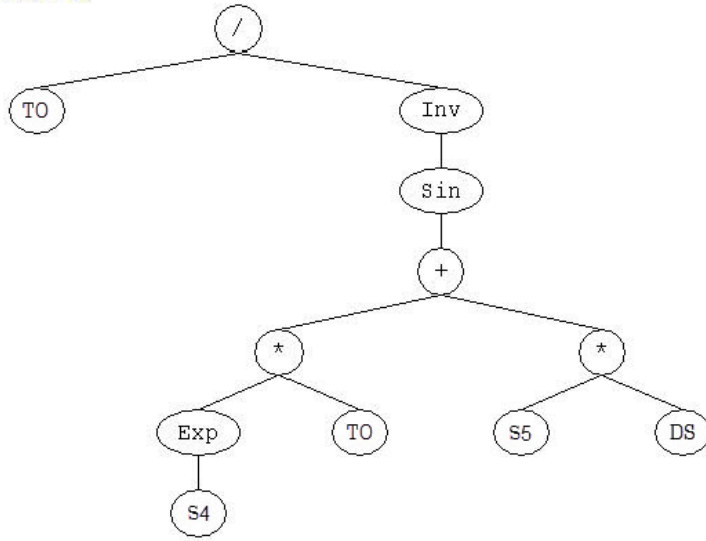


Şekil 5.12. İlerleme kuvvetine ait gen yapısı

Sub-ET 2



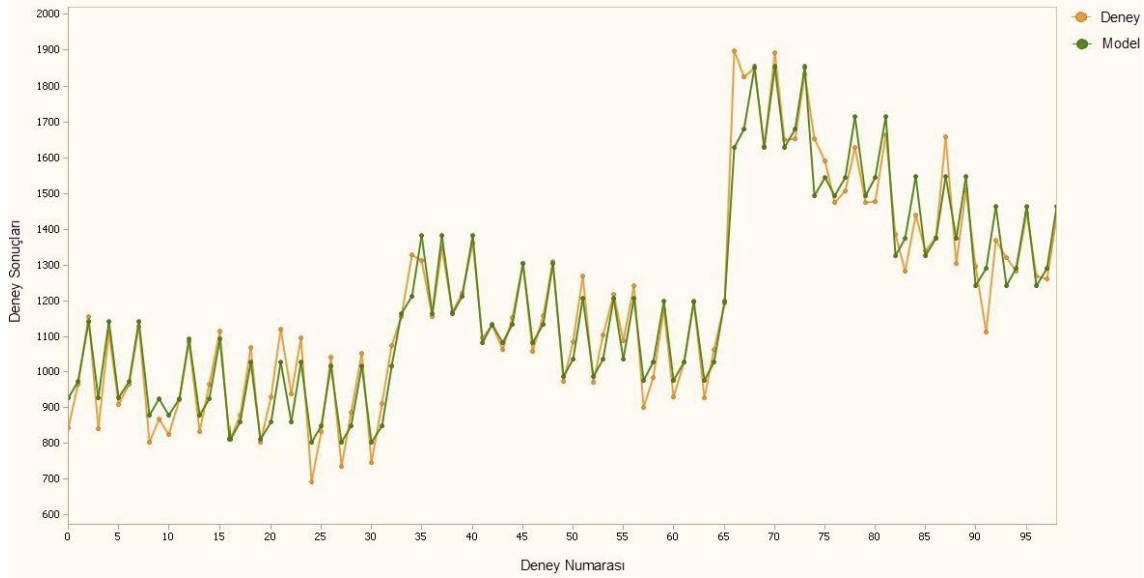
Sub-ET 3



Şekil 5.12. (devam) İlerleme kuvvetine ait gen yapısı

Şekil 5.12'deki gen yapısından elde edilen ilerleme kuvvetine ait matematiksel model Eş. 5.1'de verilmiştir. Eşitlikte sunulan trigonometrik fonksiyonlar radyan cinsinden hesaplanmıştır. İlerleme kuvvetine ait matematiksel modelin doğruluk oranı  $R^2=0,953$  ve kolerasyon katsayısı  $R=0,976$ 'dır. Deney sonuçları ile modelden elde edilen sonuçların karşılaştırılması Şekil 5.13'de grafik halinde verilmiştir.

$$F_a = \left[ \{-249,3729 + (-12,4745 \times İH)^4\} + \left\{ \left( (\sin(2 \times DS)) + (10,608 + İH) + \left( \frac{TO}{DS} \right) \times TO \right) \right\} + \{TO \times \sin((e^{-1,7145} \times TO) + (-2,764 \times DS))\} \right] \quad (5.1)$$

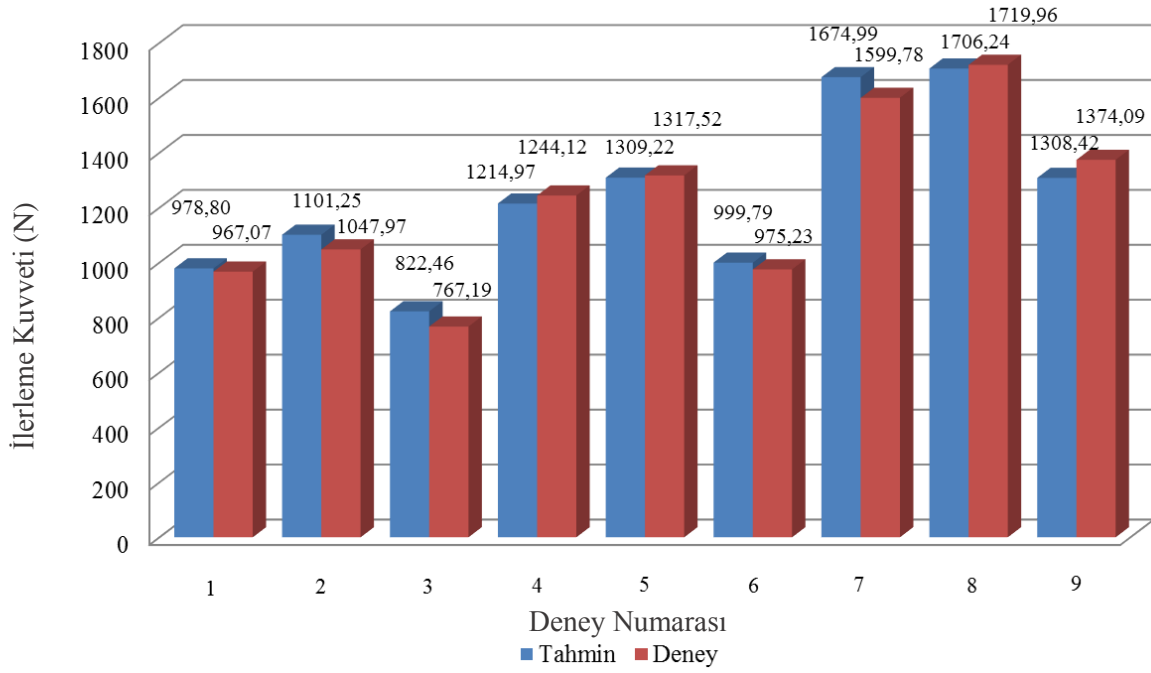


Şekil 5.13. İlerleme kuvveti için deney sonuçları ile modelden elde edilen sonuçların karşılaştırılması

İlerleme kuvveti için hesaba katılmayan 9 adet deney için, deney şartları ve sonuçları Çizelge 5.7’de verilmiştir. İlerleme kuvvetine ait Eş. 5.1’deki matematiksel modelin doğruluğunu kanıtlamak için, hesaba katılmayan 9 adet deneye ait modelden elde edilen sonuçlar ile deneylerden elde edilen sonuçlar karşılaştırılmış ve Şekil 5.14’de grafik halinde verilmiştir.

Çizelge 5.7. İlerleme kuvvetine ait hesaba katılmayan 9 adet deney

Deney No	Takviye Oranı (TO)	Kesici Takım (KT)	Devir Sayısı (DS)	İlerleme Hızı (İH)	Tahmin Sonucu	Deney Sonucu	Doğruluk Oranı (%)
1	% 10 (101)	TiAlN Kap. Karbür (2800)	1000	0,2	978,80	967,07	98,79
2	% 10 (101)	HSS (880)	1500	0,3	1101,25	1047,97	94,92
3	% 10 (101)	Karbür (1500)	2000	0,1	822,46	767,19	92,80
4	% 15 (130)	TiAlN Kap. Karbür (2800)	1000	0,2	1214,97	1244,12	97,66
5	% 15 (130)	HSS (880)	1500	0,3	1309,22	1317,52	99,37
6	% 15 (130)	Karbür (1500)	2000	0,1	999,79	975,23	97,48
7	% 25 (148)	TiAlN Kap. Karbür (2800)	1000	0,2	1674,99	1599,78	95,30
8	% 25 (148)	HSS (880)	1500	0,3	1706,24	1719,96	99,20
9	% 25 (148)	Karbür (1500)	2000	0,1	1308,42	1374,09	95,22

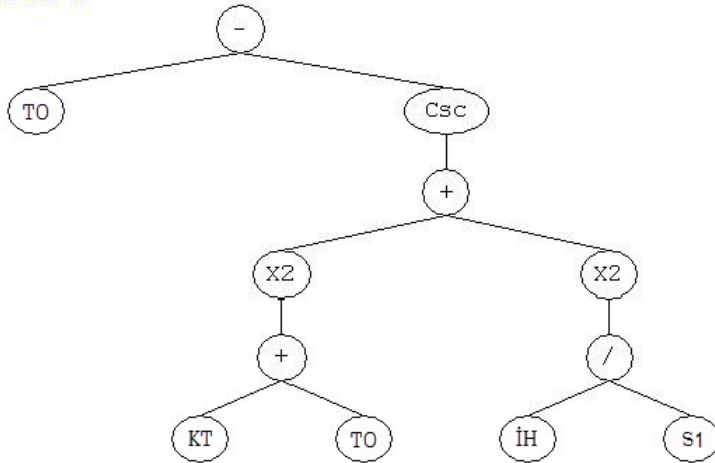


Şekil 5.14. İlerleme kuvveti için, GEP model ile deney sonuçlarının karşılaştırılması

### 5.2.2. Kesme momenti için GEP model

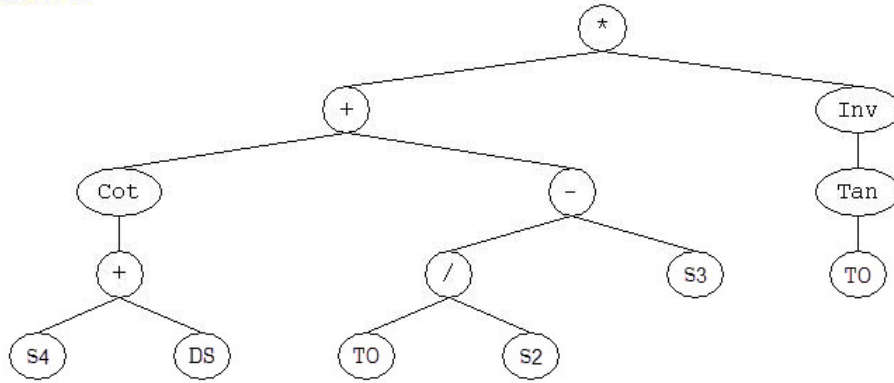
Her bir deneye karşılık gelen bağımsız değişkenler ve kesme momenti değerleri GEP model elde etmek için programa girilmiş ve Şekil 5.15'deki gen yapısı elde edilmiştir. Elde edilen gen yapısında kullanılan simgeler Çizelge 5.5'de verilmiştir. Şekil 5.15'deki kesme momentine ait gen yapısındaki sabit değerler, Çizelge 5.8'de verilmiştir.

Sub-ET 1

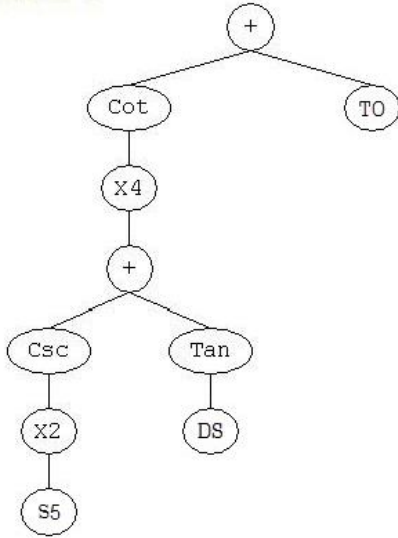


Şekil 5.15. Kesme momentine ait gen yapısı

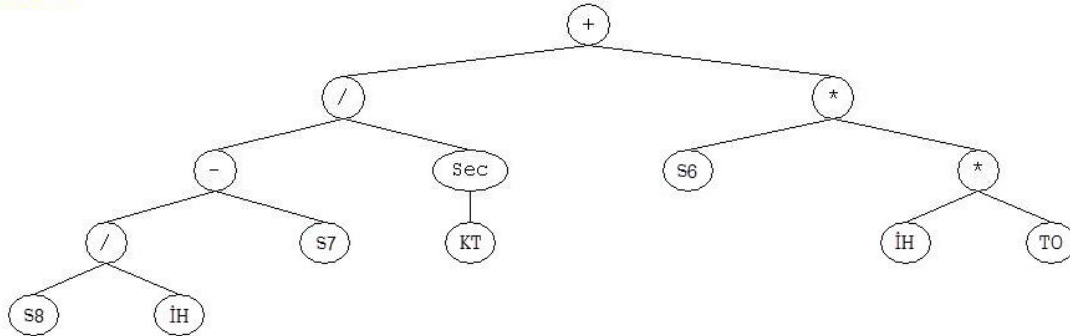
Sub-ET 2



Sub-ET 3



Sub-ET 4



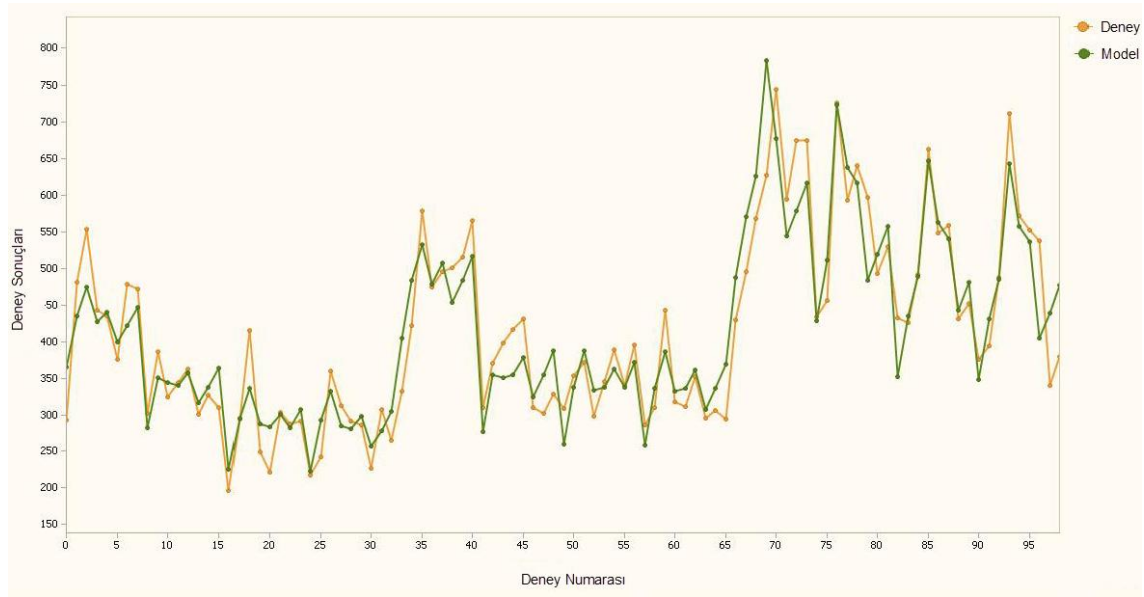
Şekil 5.15. (devam) Kesme momentine ait gen yapısı

Şekil 5.15'deki gen yapısından elde edilen kesme momentine ait matematiksel model Eş. 5.2'de verilmiştir. Eşitlikte sunulan trigonometrik fonksiyonlar radyan cinsinden hesaplanmıştır. Kesme momentine ait matematiksel modelin doğruluk oranı  $R^2=0,86$  ve kolerasyon katsayısı  $R=0,926$ 'dır. Deney sonuçları ile modelden elde edilen sonuçların karşılaştırılması Şekil 5.16'da grafik halinde verilmiştir.

Çizelge 5.8. Kesme momentine ait gen yapısındaki sabit değerler

S1	2,886
S2	5,2252
S3	6,8255
S4	1,719
S5	3,4585
S6	2,6907
S7	-43,5827
S8	-9,25

$$M_C = \left\{ \left[ TO - \csc \left( (KT + TO)^2 + \left( \frac{IH}{2,886} \right)^2 \right) \right] + \left\{ \left( \cot(1,719 + DS) + \left( \frac{TO}{5,2252} - 6,8255 \right) \right) \times \left( \frac{1}{\tan(TO)} \right) \right\} + \left\{ \cot \left( \left( \csc(3,4585^2) + \tan(DS) \right)^4 + TO \right) + \left( \frac{\left( \frac{-9,25}{IH} + 43,5827 \right)}{\sec(KT)} \right) + (2,6907 \times IH \times TO) \right\} \right\} \quad (5.2)$$

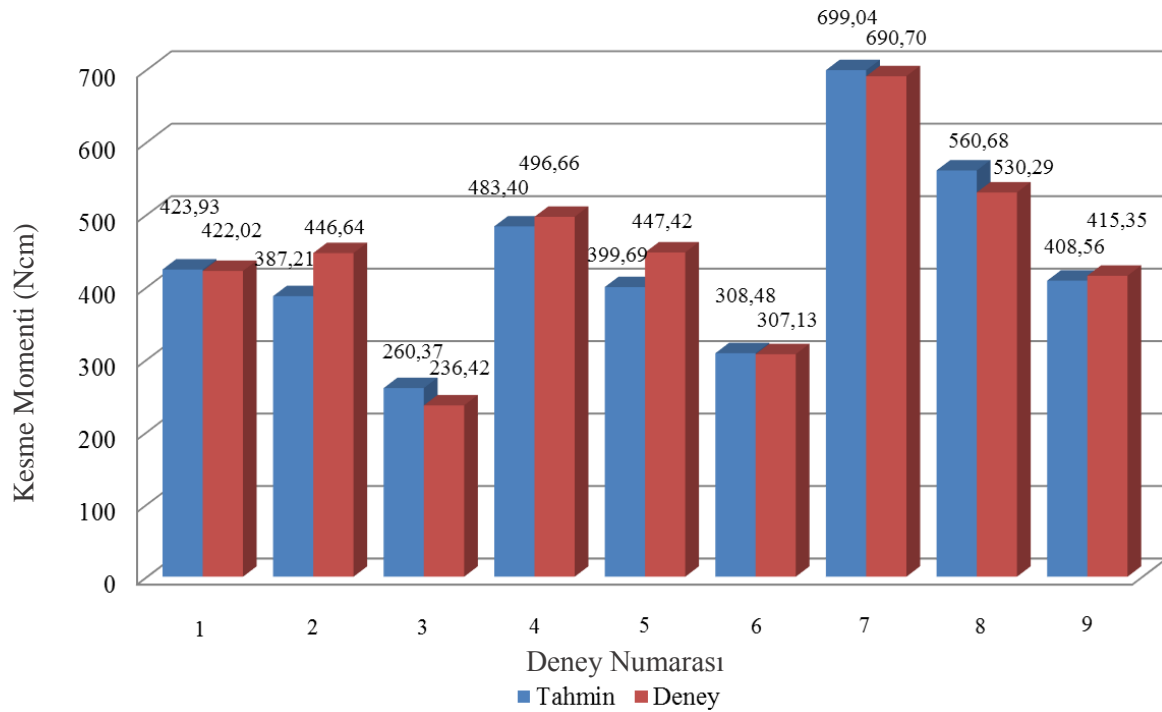


Şekil 5.16. Kesme momentini için deney sonuçları ile modelden elde edilen sonuçların karşılaştırılması

Kesme momentini için hesaba katılmayan 9 adet deney için, deney şartları ve sonuçları Çizelge 5.9'da verilmiştir. Kesme momentine ait Eş. 5.2'deki matematiksel modelin doğruluğunu kanıtlamak için, hesaba katılmayan 9 adet deneye ait modelden elde edilen sonuçlar ile deneylerden elde edilen sonuçlar karşılaştırılmış ve Şekil 5.17'de grafik halinde verilmiştir.

Çizelge 5.9. Kesme momentine ait hesaba katılmayan 9 adet deney

Deney No	Takviye Oranı (TO)	Kesici Takım (KT)	Devir Sayısı (DS)	İlerleme Hızı (İH)	Tahmin Sonucu	Deney Sonucu	Doğruluk Oranı (%)
1	%10 (101)	TiAlN Kap. Karbür (2800)	1000	0,2	423,93	422,02	99,55
2	%10 (101)	HSS (880)	1500	0,3	387,21	446,64	86,69
3	%10 (101)	Karbür (1500)	2000	0,1	260,37	236,42	89,87
4	%15 (130)	TiAlN Kap. Karbür (2800)	1000	0,2	483,40	496,66	97,33
5	%15 (130)	HSS (880)	1500	0,3	399,69	447,42	89,33
6	%15 (130)	Karbür (1500)	2000	0,1	308,48	307,13	99,56
7	%25 (148)	TiAlN Kap. Karbür (2800)	1000	0,2	699,04	690,70	98,79
8	%25 (148)	HSS (880)	1500	0,3	560,68	530,29	94,27
9	%25 (148)	Karbür (1500)	2000	0,1	408,56	415,35	98,37



Şekil 5.17. Kesme momentini için, GEP model ile deney sonuçlarının karşılaştırılması

### 5.2.3. Yüzey pürüzlülüğü için GEP model

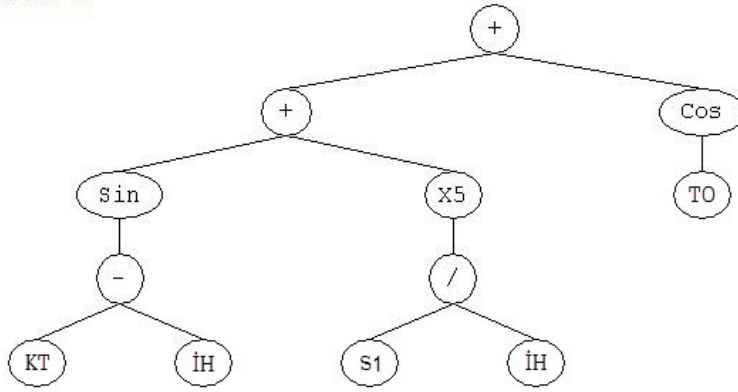
Her bir deneye karşılık gelen bağımsız değişkenler ve yüzey pürüzlülük değerleri GEP model elde etmek için programa girilmiş ve Şekil 5.18'deki gen yapısı elde edilmiştir. Elde edilen gen yapısında kullanılan simgeler Çizelge 5.5'de verilmiştir. Şekil 5.18'deki yüzey pürüzlülüğüne ait gen yapısındaki sabit değerler, Çizelge 5.10'da verilmiştir.



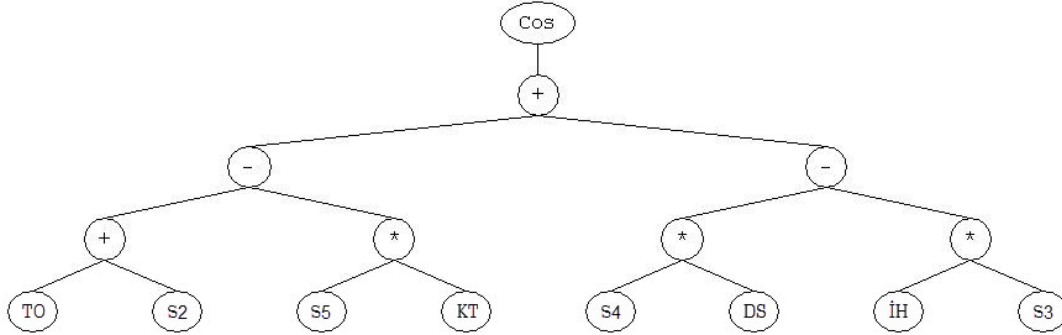
Çizelge 5.10. Yüzey pürüzlülüğüne ait gen yapısındaki sabit değerler

S1	0,11015
S2	8,70296
S3	-2,28768
S4	6,05762
S5	4,32173
S6	-7,67657
S7	-1,53836

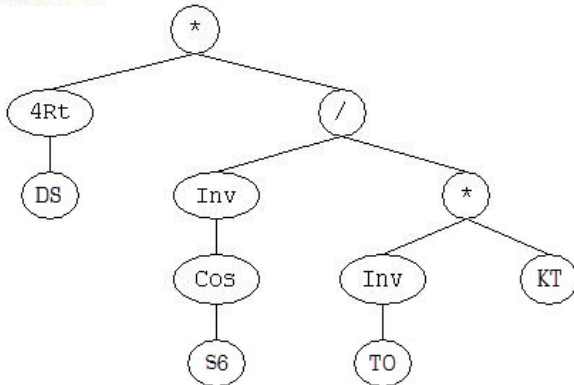
Sub-ET 1



Sub-ET 2

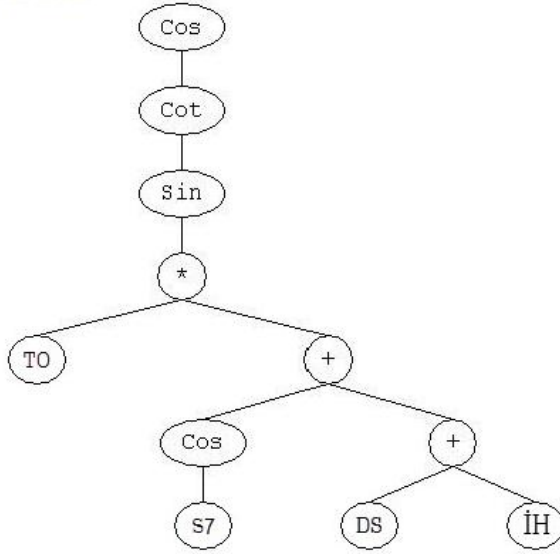


Sub-ET 3



Şekil 5.18. Yüzey pürüzlülüğüne ait gen yapısı

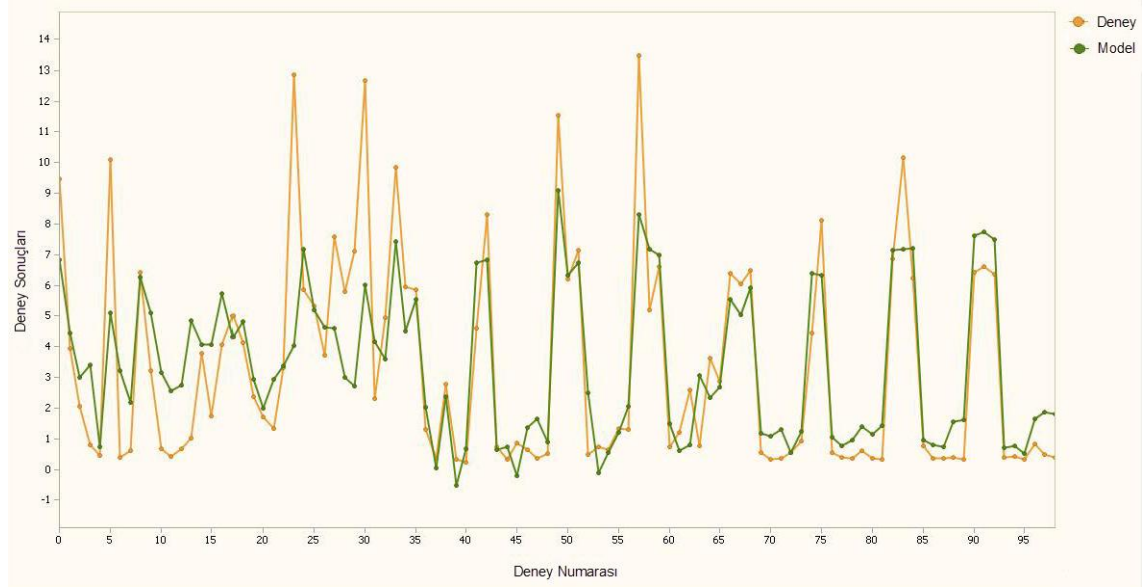
Sub-ET 4



Şekil 5.18. (devam) Yüzey pürüzlülüğüne ait gen yapısı

5.18'deki gen yapısından elde edilen yüzey pürüzlülüğüne ait matematiksel model Eş. 5.3'de verilmiştir. Eşitlikte sunulan trigonometrik fonksiyonlar radyan cinsinden hesaplanmıştır. Yüzey pürüzlülüğüne ait matematiksel modelin doğruluk oranı  $R^2=0,69$  ve kolerasyon katsayısı  $R=0,83$ 'dür. Deney sonuçları ile modelden elde edilen sonuçların karşılaştırılması Şekil 5.19'da grafik halinde verilmiştir.

$$R_a = \left[ \left\{ \sin(KT - İH) + \left( \frac{0,11015}{İH} \right)^5 + \cos(TO) \right\} + \left\{ \cos \left( ((TO + 8,70296) - (4,32173 \times KT)) + ((6,05762 \times DS) - (İH \times (-2,28768))) \right) \right\} + \left\{ DS^{\frac{1}{4}} \times \left( \frac{TO}{KT \times \cos(-7,67657)} \right) \right\} + \left\{ \cos(\cot(\sin(TO \times (\cos(-1,53836) + DS + İH)))) \right\} \right] \quad (5.3)$$

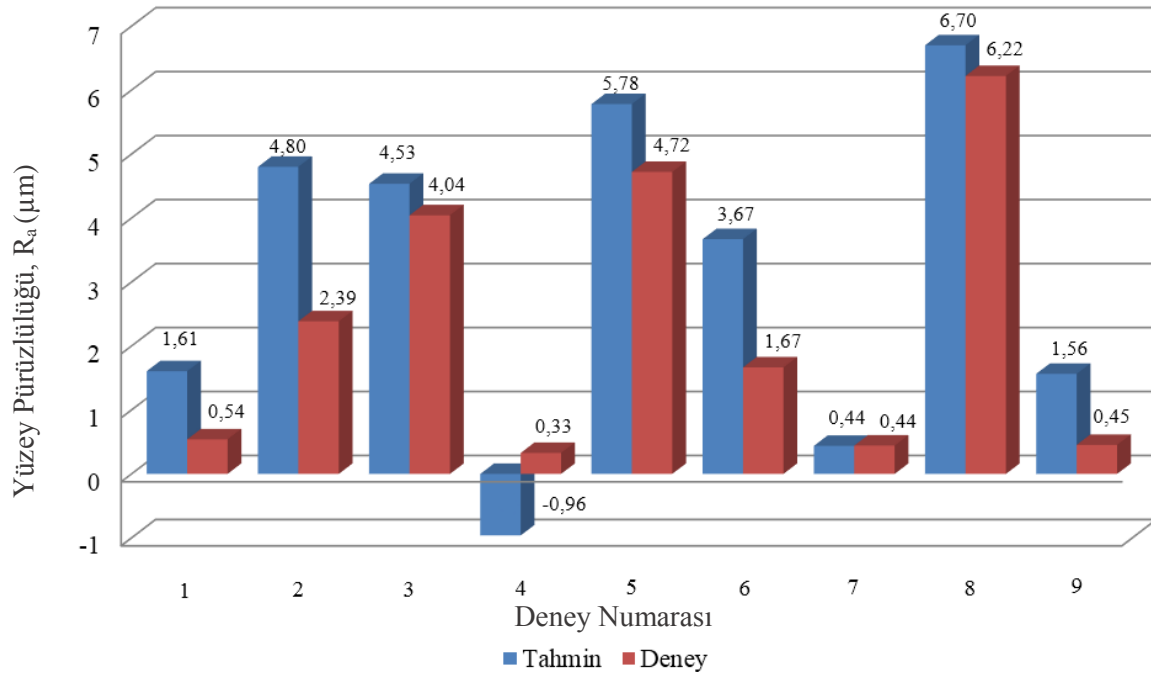


Şekil 5.19. Yüzey pürüzlülüğü için deney sonuçları ile modelden elde edilen sonuçların karşılaştırılması

Yüzey pürüzlülüğü için hesaba katılmayan 9 adet deney için, deney şartları ve sonuçları Çizelge 5.11’de verilmiştir. Yüzey pürüzlülüğüne ait Eş. 5.3’deki matematiksel modelin doğruluğunu kanıtlamak için, hesaba katılmayan 9 adet deneye ait modelden elde edilen sonuçlar ile deneylerden elde edilen sonuçlar karşılaştırılmış ve Şekil 5.20’de grafik halinde verilmiştir.

Çizelge 5.11. Yüzey pürüzlülüğüne ait hesaba katılmayan 9 adet deney

Deneysel No	Takviye Oranı (TO)	Kesici Takım (KT)	Devir Sayısı (DS)	İlerleme Hızı (İH)	Tahmin Sonucu	Deneysel Sonucu	Doğruluk Oranı (%)
1	% 10 (101)	TiAlN Kap. Karbür (2800)	1000	0,2	1,61	0,54	298,15
2	% 10 (101)	HSS (880)	1500	0,3	4,80	2,39	200,84
3	% 10 (101)	Karbür (1500)	2000	0,1	4,53	4,04	112,12
4	% 15 (130)	TiAlN Kap. Karbür (2800)	1000	0,2	-0,96	0,33	390,90
5	% 15 (130)	HSS (880)	1500	0,3	5,78	4,72	122,46
6	% 15 (130)	Karbür (1500)	2000	0,1	3,67	1,67	219,76
7	% 25 (148)	TiAlN Kap. Karbür (2800)	1000	0,2	0,44	0,44	100
8	% 25 (148)	HSS (880)	1500	0,3	6,70	6,22	107,71
9	% 25 (148)	Karbür (1500)	2000	0,1	1,56	0,45	346,66



Şekil 5.20. Yüzey pürüzlülüğü için, GEP model ile deney sonuçlarının karşılaştırılması

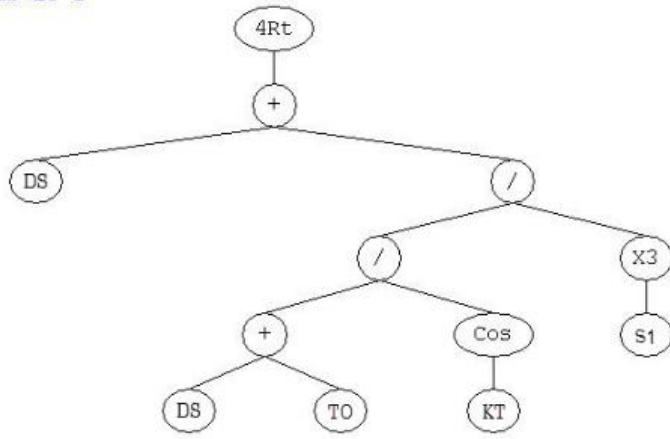
#### 5.2.4. Takım aşınması için GEP model

Her bir deneye karşılık gelen bağımsız değişkenler ve takım aşınması değerleri GEP model elde etmek için programa girilmiş ve Şekil 5.21'deki gen yapısı elde edilmiştir. Elde edilen gen yapısında kullanılan simgeler Çizelge 5.5'de verilmiştir. Şekil 5.21'deki takım aşınmasına ait gen yapısındaki sabit değerler, Çizelge 5.12'de verilmiştir.

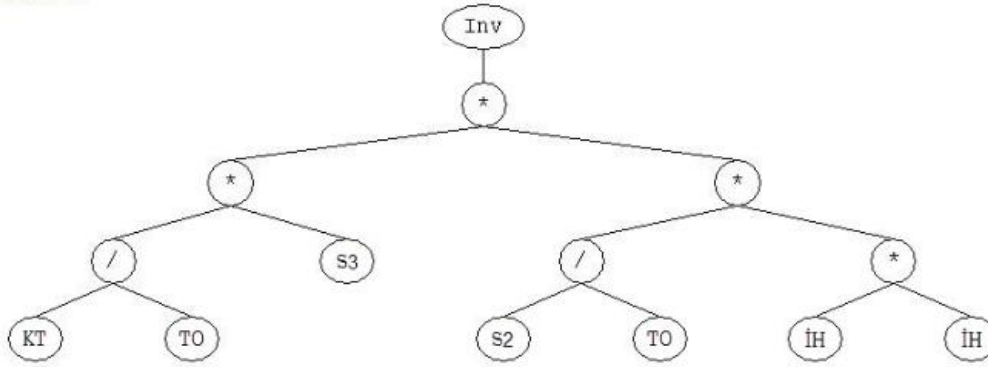
Çizelge 5.12. Takım aşınmasına ait gen yapısındaki sabit değerler

S1	5,4963
S2	788,0235
S3	4,737
S4	7,1361
S5	-6,0686
S6	0,74251
S7	6,1766

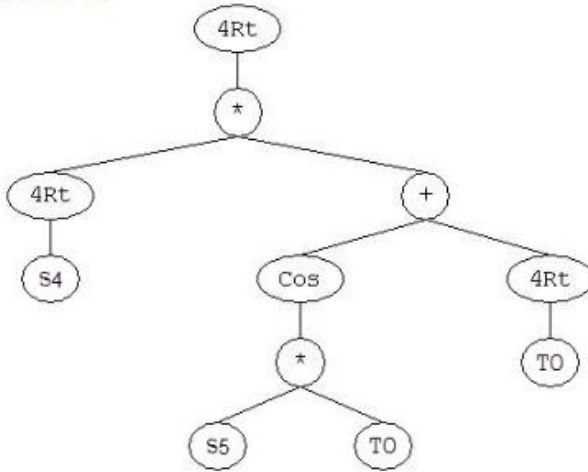
Sub-ET 1



Sub-ET 2

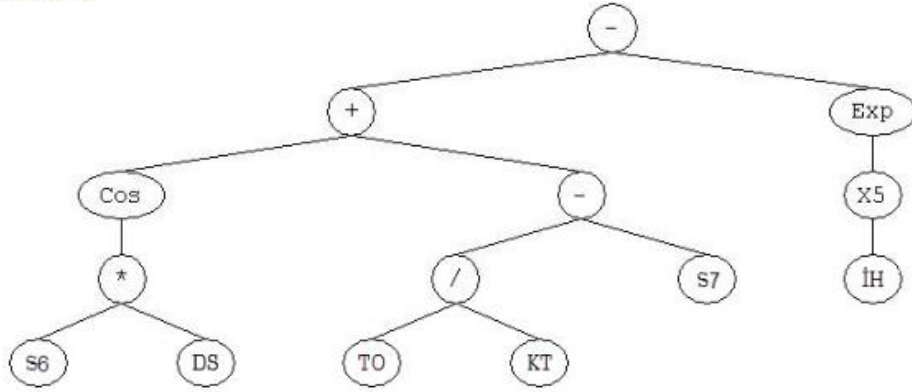


Sub-ET 3



Şekil 5.21. Takım aşınmasına ait gen yapısı

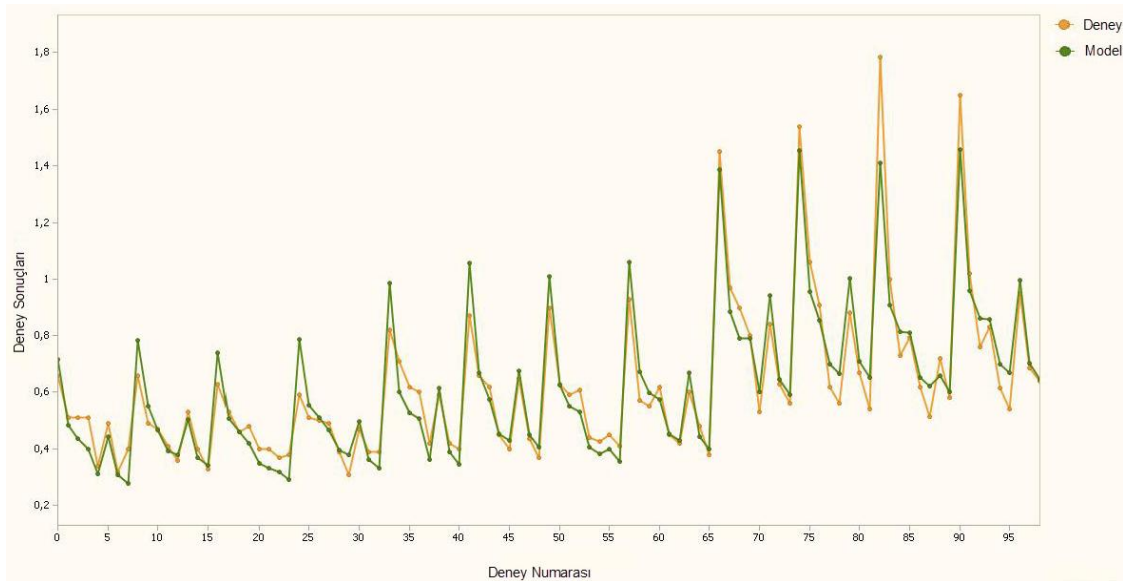
Sub-ET 4



Şekil 5.21. (devam) Takım aşınmasına ait gen yapısı

Şekil 5.21'deki gen yapısından elde edilen takım aşınmasına ait matematiksel model Eş. 5.4'de verilmiştir. Eşitlikte sunulan trigonometrik fonksiyonlar radyan cinsinden hesaplanmıştır. Takım aşınmasına ait matematiksel modelin doğruluk oranı  $R^2=0,907$  ve kolerasyon katsayısı  $R=0,952$ 'dir. Deney sonuçları ile modelden elde edilen sonuçların karşılaştırılması Şekil 5.22'de grafik halinde verilmiştir.

$$V_B = \left[ \left\{ \left( DS + \frac{(DS+TO)}{\frac{\cos(KT)}{5,4963^3}} \right)^{\frac{1}{4}} \right\} + \left\{ \frac{1}{\left( \left( \frac{KT}{TO} \times 4,737 \right) \times \left( \frac{788,0235}{TO} \right) \times IH^2 \right)} \right\} + \left\{ \left( 7,1361^{\frac{1}{4}} \times \left( \cos(-6,0686 \times \right. \right. \right. \right. \\ \left. \left. \left. \left. TO \right) + TO^{\frac{1}{4}} \right) \right)^{\frac{1}{4}} \right\} + \left\{ \left( \cos(0,74251 \times DS) + \left( \frac{TO}{KT} - 6,1766 \right) \right) - e^{IH^5} \right\} \right] \quad (5.4)$$

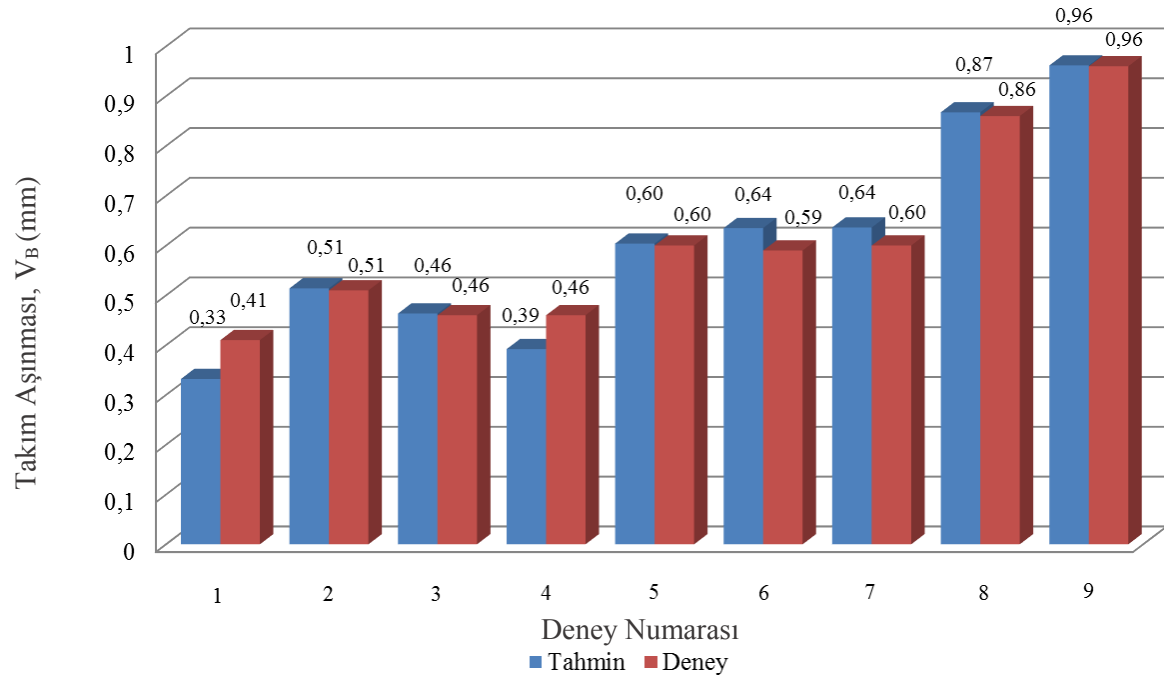


Şekil 5.22. Takım aşınması için deney sonuçları ile modelden elde edilen sonuçların karşılaştırılması

Takım aşınması için hesaba katılmayan 9 adet deney için, deney şartları ve sonuçları Çizelge 5.13’de verilmiştir. Takım aşınmasına ait Eş. 5.4’deki matematiksel modelin doğruluğunu kanıtlamak için, hesaba katılmayan 9 adet deneye ait modelden elde edilen sonuçlar ile deneylerden elde edilen sonuçlar karşılaştırılmış ve Şekil 5.23’de grafik halinde verilmiştir.

Çizelge 5.13. Takım aşınmasına ait hesaba katılmayan 9 adet deney

Deney No	Takviye Oranı (TO)	Kesici Takım (KT)	Devir Sayısı (DS)	İlerleme Hızı (İH)	Tahmin Sonucu	Deney Sonucu	Doğruluk Oranı (%)
1	% 10 (101)	TiAlN Kap. Karbür (2800)	1000	0,2	0,33	0,41	80,96
2	% 10 (101)	HSS (880)	1500	0,3	0,51	0,51	99,20
3	% 10 (101)	Karbür (1500)	2000	0,1	0,46	0,46	99,25
4	% 15 (130)	TiAlN Kap. Karbür (2800)	1000	0,2	0,39	0,46	85,21
5	% 15 (130)	HSS (880)	1500	0,3	0,60	0,60	99,35
6	% 15 (130)	Karbür (1500)	2000	0,1	0,64	0,59	92,36
7	% 25 (148)	TiAlN Kap. Karbür (2800)	1000	0,2	0,64	0,60	93,96
8	% 25 (148)	HSS (880)	1500	0,3	0,87	0,86	99,13
9	% 25 (148)	Karbür (1500)	2000	0,1	0,96	0,96	99,82

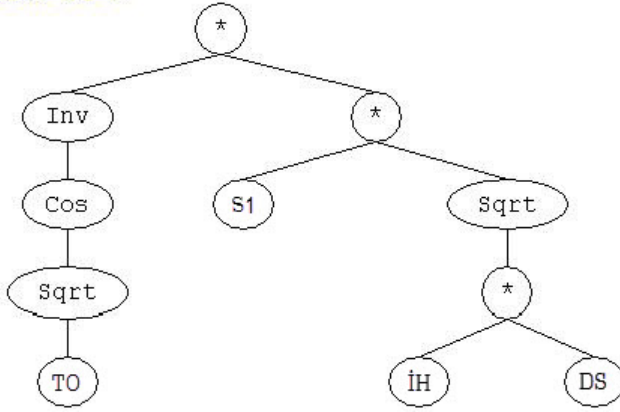


Şekil 5.23. Takım aşınması için, GEP model ile deney sonuçlarının karşılaştırılması

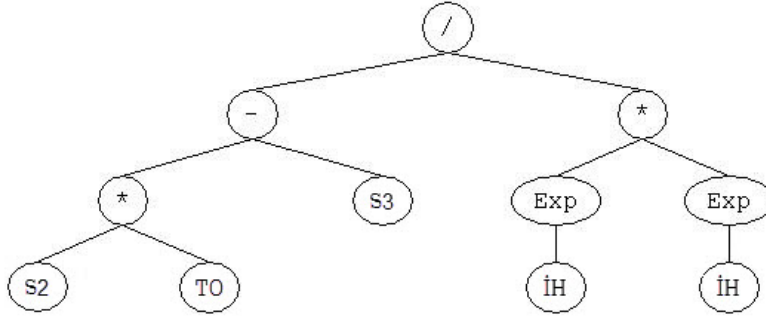
### 5.2.5. Kesici takım sıcaklığı için GEP model

Her bir deneye karşılık gelen bağımsız değişkenler ve kesici takım sıcaklığı değerleri GEP model elde etmek için programa girilmiş ve Şekil 5.24'deki gen yapısı elde edilmiştir. Elde edilen gen yapısında kullanılan simgeler Çizelge 5.5'de verilmiştir. Şekil 5.24'deki kesici takım sıcaklığına ait gen yapısındaki sabit değerler, Çizelge 5.14'de verilmiştir.

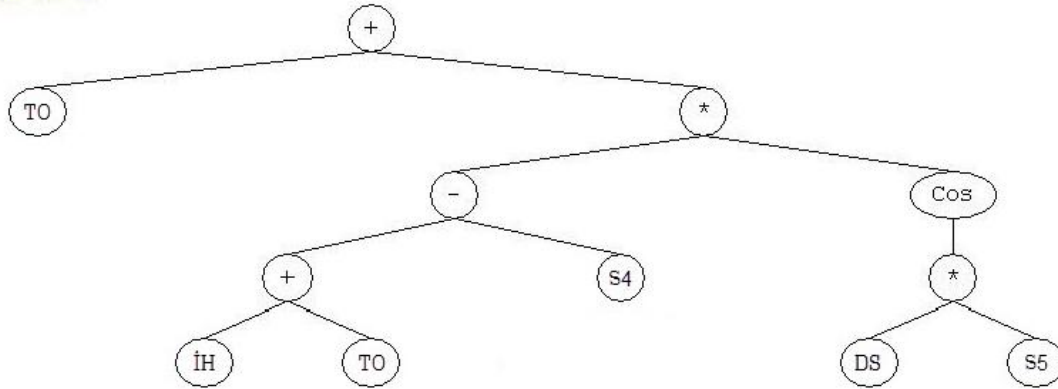
Sub-ET 1



Sub-ET 2

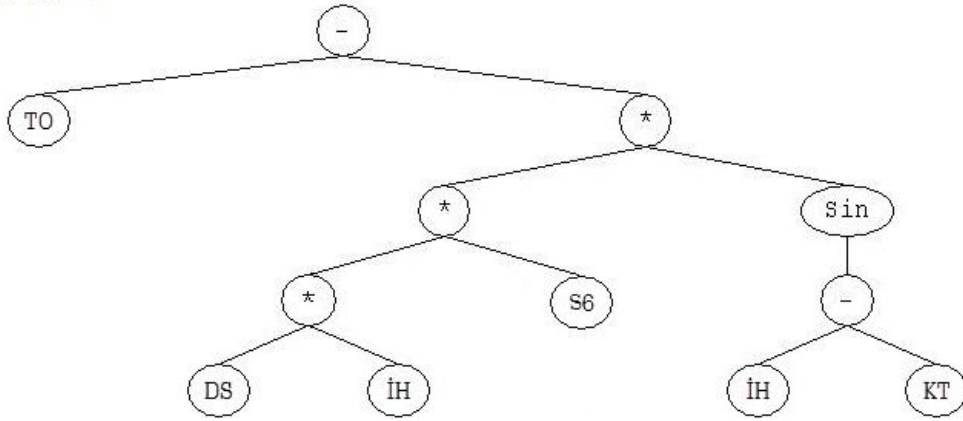


Sub-ET 3



Şekil 5.24. Kesici takım sıcaklığına ait gen yapısı





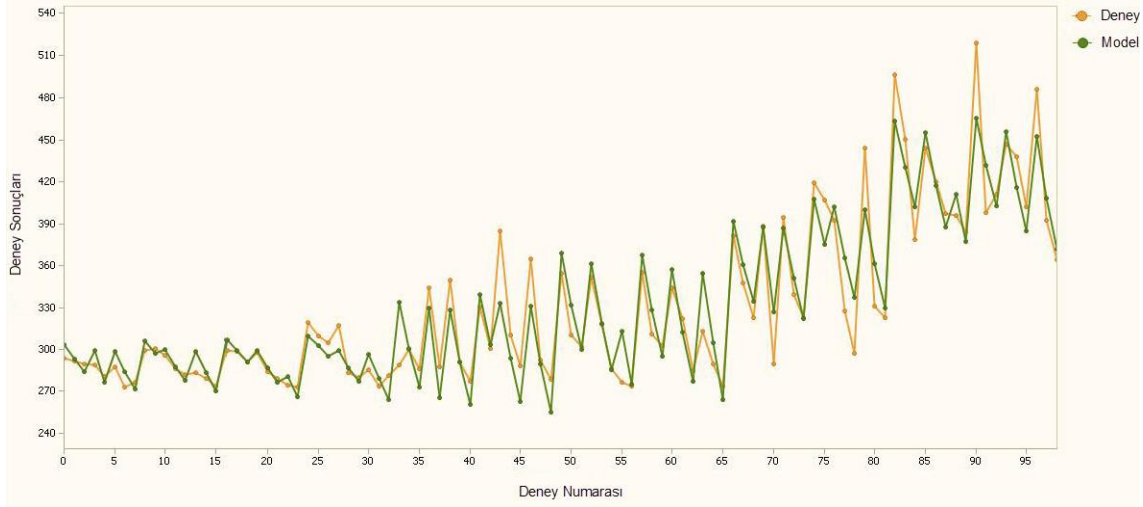
Şekil 5.24. (devam) Kesici takım sıcaklığına ait gen yapısı

Çizelge 5.14. Kesici takım sıcaklığına ait gen yapısındaki sabit değerler

S1	-1,0394
S2	1,6187
S3	58,4976
S4	102,9012
S5	-3,365
S6	0,04289

Şekil 5.24'deki gen yapısından elde edilen kesici takım sıcaklığına ait matematiksel model Eş. 5.5'de verilmiştir. Eşitlikte sunulan trigonometrik fonksiyonlar radyan cinsinden hesaplanmıştır. Kesici takım sıcaklığına ait matematiksel modelin doğruluk oranı  $R^2=0,9$  ve kolerasyon katsayısı  $R=0,947$ 'dir. Deney sonuçları ile modelden elde edilen sonuçların karşılaştırılması Şekil 5.25'de grafik halinde verilmiştir.

$$T_{\max} = \left[ \left\{ \left( \frac{1}{\cos \sqrt{TO}} \right) \times \left( -1,0394 \times \sqrt{(DS \times İH)} \right) \right\} + \left\{ \frac{(1,6187 \times TO - 58,4976)}{(e^{İH})^2} \right\} + \{ TO + ((İH + TO - 102,9012) \times \cos(-3,365 \times DS)) \} + \{ TO - (DS \times İH \times 0,04289 \times \sin(İH - KT)) \} \right] \quad (5.5)$$

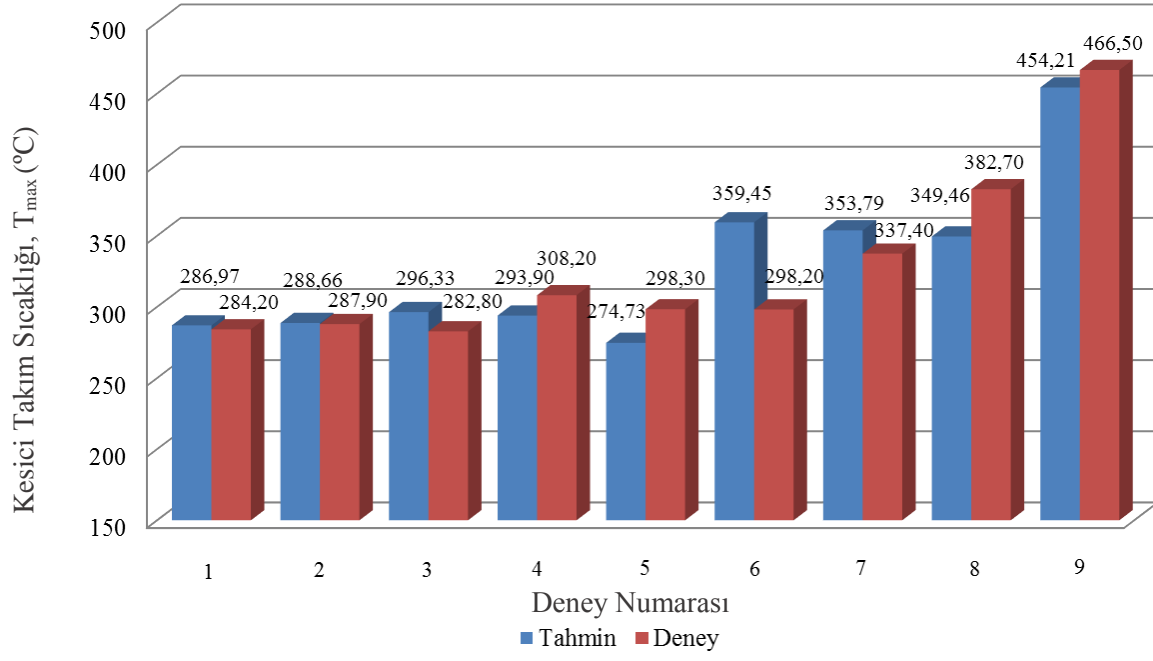


Şekil 5.25. Kesici takım sıcaklığı için deney sonuçları ile modelden elde edilen sonuçların karşılaştırılması

Kesici takım sıcaklığı için hesaba katılmayan 9 adet deneye için, deney şartları ve sonuçları Çizelge 5.15’de verilmiştir. Kesici takım sıcaklığına ait Eş. 5.5’deki matematiksel modelin doğruluğunu kanıtlamak için, hesaba katılmayan 9 adet deneye ait modelden elde edilen sonuçlar ile deneylerden elde edilen sonuçlar karşılaştırılmış ve Şekil 5.26’da grafik halinde verilmiştir.

Çizelge 5.15. Kesici takım sıcaklığına ait hesaba katılmayan 9 adet deney

Deney No	Takviye Oranı (TO)	Kesici Takım (KT)	Devir Sayısı (DS)	İlerleme Hızı (İH)	Tahmin Sonucu	Deney Sonucu	Doğruluk Oranı (%)
1	% 10 (101)	TiAlN Kap. Karbür (2800)	1000	0,2	286,97	284,20	99,03
2	% 10 (101)	HSS (880)	1500	0,3	288,66	287,90	99,74
3	% 10 (101)	Karbür (1500)	2000	0,1	296,33	282,80	95,22
4	% 15 (130)	TiAlN Kap. Karbür (2800)	1000	0,2	293,90	308,20	95,36
5	% 15 (130)	HSS (880)	1500	0,3	274,73	298,30	92,10
6	% 15 (130)	Karbür (1500)	2000	0,1	359,45	298,20	79,46
7	% 25 (148)	TiAlN Kap. Karbür (2800)	1000	0,2	353,79	337,40	95,14
8	% 25 (148)	HSS (880)	1500	0,3	349,46	382,70	91,31
9	% 25 (148)	Karbür (1500)	2000	0,1	454,21	466,50	97,37



Şekil 5.26. Kesici takım sıcaklığı için, GEP model ile deney sonuçlarının karşılaştırılması

## 6. SONUÇ VE ÖNERİLER

B<sub>4</sub>C<sub>p</sub> içerikli MMK malzemelerin üretimi ile HSS, kaplamalı ve kaplamasız karbür matkaplarla delinebilirliği üzerine yapılan bu çalışmada elde edilen önemli sonuçlar aşağıda verilmiştir.

### 6.1. B<sub>4</sub>C<sub>p</sub> İçerikli Kompozitlerin Üretimi ve Karakterizasyonu

- B<sub>4</sub>C<sub>p</sub> içerikli alüminyum MMK'lar sıvı faz sinterleme metodu ile üretilmiş ve seramik tanelerinin matris alaşımı içerisinde homojen bir biçimde dağıldığı görülmüştür.
- En yüksek çekme mukavemeti değerleri, %15 takviye oranında elde edilmiştir. Alüminyum matrise ilave edilen B<sub>4</sub>C<sub>p</sub> takviyesinin kompozit malzemenin sünekliğini azalttığı ve kompoziti daha kırılğan hale getirdiği görülmüştür.
- Alüminyum matris içerisindeki B<sub>4</sub>C<sub>p</sub> seramik takviyesinin oranının artırılması kompozit malzemenin sertliğini artırmıştır.

### 6.2. İlerleme Kuvveti ve Kesme Momenti

- Kompozit malzeme içeriğindeki takviye oranının artmasıyla hem ilerleme kuvvetinin hem de kesme momentinin önemli miktarda arttığı görülmüştür.
- Devir sayısının artmasıyla ilerleme kuvvetinin ve kesme momentinin azaldığı, ilerleme hızındaki artışla ilerleme kuvvetinin ve kesme momentinin arttığı görülmüştür.
- HSS takımlar daha düşük uç açısına sahip olduğundan, genelde %10 ve %15 B<sub>4</sub>C<sub>p</sub> takviyeli MMK'nın işlenmesinde, kaplamalı ve kaplamasız karbür takımlara göre daha düşük ilerleme kuvveti üretmiştir. Ayrıca, genel olarak kaplamalı karbür takım ile kaplamasız karbür takım malzemeleri birbirine yakın değerlerde ilerleme kuvveti üretmiştir.

- Kaplamalı karbür takım kaplamasız karbür takım malzemesine yakın ve bir miktar büyük kesme momenti üretmiştir. Bu sonuç kesme momenti açısından bakıldığında kaplama malzemesinin etkili olmadığını göstermiştir.
- Taguchi ve ANOVA analizi sonucunda hem ilerleme kuvvetini hem de kesme momentini etkileyen en önemli faktörün takviye oranı olduğu sonucu ortaya çıkmıştır. Önem sırasına göre etkili olan diğer faktörler, ilerleme kuvveti için ilerleme hızı ve devir sayısı olurken, kesme momenti için devir sayısı ve ilerleme hızı olmuştur. Matkap malzemesi, ilerleme kuvveti üzerinde ihmal edilebilir bir etkiye sahipken, kesme momenti üzerinde etkili olan son faktör olmuştur.
- İlerleme kuvveti ve kesme momenti için optimum işleme parametreleri belirlenmiştir. Buna göre en düşük ilerleme kuvveti değerleri, %10 B<sub>4</sub>C<sub>p</sub> takviyeli MMK'nın 0,1 mm/dev ilerleme hızında, 2000 dev/dak devir sayısında, TiAlN kaplamalı karbür matkaplarla delinmesinde elde edilebilmektedir. En düşük kesme momenti değerleri ise, %10 B<sub>4</sub>C<sub>p</sub> takviyeli MMK'nın 0,1 mm/dev ilerleme hızında, 2000 dev/dak devir sayısında, HSS matkaplarla delinmesinde elde edilebilmektedir.

### 6.3. Takım Aşınması ve Delik Ölçüsü

- Kesici takımda çoğunlukla abraziv aşınma ve YT oluşumu hâkim olmuştur. Sert B<sub>4</sub>C<sub>p</sub> parçacıkları, kullanılan matkaplar üzerinde serbest yüzey ve köşe aşınmasına neden olmuştur.
- Kompozit malzeme içerisindeki takviye oranının artması ile kesici takımdaki serbest yüzey aşınmasının arttığı, ilerleme hızının artmasıyla bu aşınmanın azaldığı tespit edilmiştir. Devir sayısındaki artışın serbest yüzey aşınması üzerinde küçük bir etkiye sahip olduğu görülmüştür.
- Deneyler sonucunda ölçülen takımdaki köşe aşınmasının, serbest yüzey aşınmasından daha büyük olduğu tespit edilmiştir. Dolayısıyla, MMK malzemeler matkapla işlenirken en önemli aşınma köşe aşınması olmuştur.

- Tüm deney şartlarında bir kez delik delindiğinde serbest yüzey aşınması  $V_B=0,3$  mm değerini aşmıştır. Kesici takımındaki abraziv aşınma mekanizmasının takım sertliğine bağlı olduğu ve HSS matkap malzemesinin MMK malzemelerin delinmesi için uygun olmadığı sonucu ortaya çıkmıştır.
- Kullanılan her üç kesici takım malzemesi ile yapılan delme işleminde, ilerleme hızının artması ile delme kuvvetlerinin artmasına bağlı olarak YT artmıştır. HSS matkaplarda devir sayısındaki artışla YT artarken, kaplamalı ve kaplamasız karbür matkaplarda devir sayısındaki artışla YT azalmıştır.
- İki delik üst üste delindikten sonra, tüm matkaplarda serbest yüzey aşınması  $V_{Bmax}= 0,6$  mm değerini aştığı ve kesici takım üzerinde oluşan YT'nin arttığı görülmüştür. TiAlN kaplamalı karbür matkaplar üzerinde oluşan YT'nin, HSS matkaplara göre daha az olduğu, fakat kaplamasız karbür matkaplara göre daha fazla olduğu görülmüştür.
- Delik çap ölçüsünün takım ömrünü belirleyen önemli unsurlardan biri olduğu ve kesici takım aşınmasına bağlı olarak üretilen delik çap ölçüsünün de küçüldüğü görülmüştür.
- Taguchi ve ANOVA analizi sonucunda serbest yüzey aşınmasını etkileyen en önemli faktörün takviye oranı olduğu sonucu ortaya çıkmıştır. Önem sırasına göre etkili olan diğer faktörler, ilerleme hızı ve matkap malzemesi olmuştur. Devir sayısının serbest yüzey aşınması üzerindeki etkisinin nispeten az olduğu görülmüştür.
- Serbest yüzey aşınması için optimum işleme parametreleri belirlenmiştir. Buna göre en düşük serbest yüzey aşınması değerleri, %10  $B_4C_p$  takviyeli MMK'nın 0,3 mm/dev ilerleme hızında, 1000 dev/dak devir sayısında, TiAlN kaplamalı karbür matkaplar ile delinmesi ile elde edilebilmektedir.

#### 6.4. Yüzey Pürüzlülüğü ve Talaş Oluşumu

- Dört farklı devir sayısında da, kaplamasız karbür ve kaplamalı karbür matkaplar ile delme yapıldığında, takviye oranındaki artış ile ortalama yüzey pürüzlülük değerinin

azaldığı, HSS matkaplarda ise takviye oranındaki artış ile ortalama yüzey pürüzlülük değerinin arttığı görülmüştür.

- Genel olarak ilerleme hızının artmasıyla, yüzey pürüzlülük değeri azalmıştır. İlginçtir ki, kompozit malzemeler, HSS matkaplarla düşük hız ve yüksek ilerleme hızıyla delindiğinde en iyi bitirme yüzeyi elde edilmiştir.
- Devir sayısının yüzey pürüzlülüğü üzerine etkisinin, takviye oranına bağlı olduğu sonucu ortaya çıkmıştır. Takviye oranındaki artışa bağlı olarak devir sayısının etkisinin azaldığı ve önemsenmeyecek kadar az bir etkiye sahip olduğu görülmüştür. B<sub>4</sub>C<sub>p</sub> içeriği %25 iken, devir sayısının yüzey pürüzlülüğüne etkisi ihmal edilebilir seviyede çıkmıştır. Bütün deney şartları göz önünde bulundurulduğunda yüzey pürüzlülüğü açısından optimum devir sayısının 1500 dev/dak olduğu bulunmuştur.
- Honlama kalitesinde en iyi bitirme yüzeyi, %25 B<sub>4</sub>C<sub>p</sub> içerikli MMK'nın 0,2 mm/dev ve 0,3 mm/dev ilerleme hızında karbür ve kaplamalı karbür matkap ile delinmesiyle elde edilmiştir. En kötü bitirme yüzeyi ise HSS matkapla delme yapıldığı zaman elde edilmiştir. Deneylerde kullanılan üç farklı takım malzemesi ile yapılan delme işlemi sonunda ölçülen yüzey pürüzlülük değeri, delme işlemi için belirlenmiş standart yüzey pürüzlülük değeri içerisinde kalmıştır.
- Yapılan tüm deneylerde kısa talaşlar elde edilmiştir. HSS matkaplarla delme yapıldığında kopuk yay ve iğne biçiminde talaşlar elde edilirken, karbür ve kaplamalı karbür matkaplarla delme yapıldığında kopuk yay biçiminde talaşlar elde edilmiştir. Takviye oranının artmasıyla kompozit malzeme gevrek ve kırılğan hale geldiğinden, toz biçimli talaşlar elde edilmiştir. Delik sonlarında, ilerleme kuvvetinin etkisi ile oluşan basınç nedeniyle ince kesitli bir miktar talaş kesilmeden ileri doğru itilerek koparılmıştır.
- Taguchi ve ANOVA analizi sonucunda yüzey pürüzlülük değerini etkileyen en önemli faktörün matkap malzemesi olduğu sonucu ortaya çıkmıştır. Önem sırasına göre etkili olan diğer faktörler, takviye oranı ile devir sayısı etkileşimi ve devir sayısı olmuştur. Anova sonuçlarına göre ilerleme hızının ve takviye oranının, yüzey pürüzlülük değeri üzerindeki etkisinin önemsenmeyecek kadar az olduğu görülmüştür.

- Yüzey pürüzlülük değeri için optimum işleme parametreleri belirlenmiştir. Buna göre en düşük yüzey pürüzlülük değerleri, %25 B<sub>4</sub>C<sub>p</sub> takviyeli MMK'nın 0,2 mm/dev ilerleme hızında, 1500 dev/dak devir sayısında, TiAlN kaplamalı karbür matkaplar ile delinmesi ile elde edilebilmektedir.

### 6.5. Delme Esnasında Oluşan Sıcaklık

- Delme sıcaklığı üzerinde takviye oranı % 51,641 ile en büyük etkiye sahip olmuş ve takviye oranındaki artışla delme sıcaklığı artmıştır.
- İlerleme hızı % 24,3 ile delme sıcaklığı üzerinde etkili olan ikinci faktör olmuştur. İlerleme hızındaki artışa bağlı olarak, delme sıcaklıkları önemli ölçüde azalmıştır.
- Delme sıcaklıkları üzerinde etkili olan diğer faktörler sırasıyla, % 9,126 ile takviye oranı ile devir sayısı etkileşimi ve % 8,119 ile takviye oranı ile ilerleme hızı etkileşimi olmuştur.
- Matkap malzemesi ve devir sayısı ile ilerleme hızının etkileşimi, delme sıcaklıkları üzerinde önemsenmeyecek kadar küçük bir etkiye sahip olmuştur.
- Devir sayısı delme sıcaklıkları üzerinde etkili olan son faktör olmuş ve devir sayındaki artışla delme sıcaklıkları artmıştır.
- Delme sıcaklıkları için optimum sonuçlar elde edilmiş, buna göre en düşük delme sıcaklığı % 10 B<sub>4</sub>C<sub>p</sub> içerikli MMK malzemenin, 0,3 mm/dev ilerleme hızında ve 1000 dev/dak devirde, karbür matkap ile delinmesi sonucu elde edilmiştir.
- Aynı takım ile iki kez üst üste delme yapıldığında ise delme sıcaklıkları takım aşınmasına bağlı olarak artmıştır.



## 6.6. Gri İlişki Analizi Sonuçları

### 6.6.1. İlerleme kuvveti, kesme momenti, serbest yüzey aşınması ve yüzey pürüzlülüğü için gri ilişki analizi sonuçları

- Taguchi metodu ve gri ilişkisi analizi B<sub>4</sub>C<sub>p</sub> takviyeli MMK'ların delinmesinde, ilerleme kuvveti, kesme momenti ve yüzey pürüzlülüğü gibi çoklu performans karakteristiklerinin tahmin edilmesinde oldukça kullanışlı bir araçtır.
- Deneyleerde kullanılan faktör ve seviyelerinin optimum gri ilişki derecesi hesaplanmış ve minimum ilerleme kuvveti, kesme momenti ve yüzey pürüzlülük değerleri için optimum işleme şartları, %10 B<sub>4</sub>C<sub>p</sub> takviye oranında (A<sub>1</sub>), 0,2 mm/dev ilerleme hızında (B<sub>2</sub>), 2000 dev/dak devir sayısında (C<sub>3</sub>) ve TiAlN kaplamalı karbür matkap (D<sub>3</sub>) ile elde edilmiştir.
- Çoklu performans karakteristikleri üzerinde faktörlerin etkisini belirleyebilmek amacı ile ANOVA yapılmış, sonuçta etkili olan faktörlerin önem sırası, takviye oranı (%56,35), matkap malzemesi (%27,41), takviye oranı ile ilerleme hızı etkileşimi (%4,8) ve devir sayısı (%4,25) olarak bulunmuştur.

### 6.6.2. Serbest yüzey aşınması ve kesici takım sıcaklığı için gri ilişki analizi

- Taguchi metodu ve gri ilişkisi analizi B<sub>4</sub>C<sub>p</sub> takviyeli MMK'ların delinmesinde, serbest yüzey aşınması ve kesici takım sıcaklığı gibi çoklu performans karakteristiklerinin tahmin edilmesinde oldukça kullanışlı bir araçtır.
- Deneyleerde kullanılan faktör ve seviyelerinin optimum gri ilişki derecesi hesaplanmış ve minimum serbest yüzey aşınması ve kesici takım sıcaklığı için optimum işleme şartları, %10 B<sub>4</sub>C<sub>p</sub> takviye oranında (A<sub>1</sub>), 0,3 mm/dev ilerleme hızında (B<sub>3</sub>), 1000 dev/dak devir sayısında (C<sub>1</sub>) ve kaplamasız karbür matkap (D<sub>2</sub>) ile elde edilmiştir.
- Çoklu performans karakteristikleri üzerinde faktörlerin etkisini belirleyebilmek amacı ile ANOVA yapılmış, sonuçta etkili olan faktörlerin önem sırası, takviye oranı

(%54,104), ilerleme hızı (%27,403) ve matkap malzemesi (%10,923) olarak bulunmuştur.

- Devir sayısı ve faktörlerin etkileşimlerinin etkisi çok küçük çıkmıştır.

## 6.7. Öneriler

Değişik oranlarda  $B_4C_p$  içerikli MMK'ların delme işlenebilirliği ile ilgili olarak yapılan bu çalışma sonucunda ulaşılan ve daha sonraki çalışmalarda dikkate alınabilecek öneriler şunlardır:

- Bu çalışmada sıvı faz sinterleme metodu ile üretilen  $B_4C_p$  içerikli MMK'ların mekanik özellikleri ve delme işlenebilirliği çalışılmıştır. Parçacık takviyeli MMK'ların üretilmesinde kullanılan karıştırarak dökme yöntemi ile üretilecek olan aynı oranlardaki MMK'ların, mekanik özellikleri ve delme işlenebilirliği çalışılabilir ve elde edilen bulgular bu çalışmada varılan sonuçlarla mukayese edilebilir. Bu sayede MMK'ların üretim tekniğinin işlenebilirliğe olan etkisi belirlenebilir.
- Bu zamana kadar yapılan çalışmalarda MMK'ların içerisine katılan grafitin yağlayıcı özelliğinden dolayı işlenebilirliği iyileştirdiği, fakat mekanik özelliklerin azalmasına neden olduğu belirtilmiştir. Bu çalışmada kullanılan değişik oranlardaki  $B_4C_p$  içerikli MMK'ların içerisine grafit ilave edilerek, kompozit malzemenin mekanik özelliklerine ve delme işlenebilirliğine olan etkisi araştırılabilir.
- MMK'ların delinmesinde en iyi sonuçların PCD uçlu matkaplarla elde edildiği bildirilmiştir. Bu çalışmada bütçe olanakları ve zaman müsaade etmediği için, PCD matkaplarla delme işlenebilirliği araştırılamamıştır. Bundan sonraki çalışmalarda üretim-maliyet açısından, PCD matkapların bu tür kompozit malzemelerin delinmesinde verimli olup olmadığı araştırılabilir.
- Bu çalışmada matkap uç açılarının işlenebilirliğe olan etkisi araştırılamamıştır. Bundan sonraki çalışmalarda, aynı matkap uçları değişik açılarda bilenmek suretiyle, bu tür kompozit malzemelerin delinmesi deneylerinde kullanılabilir ve elde edilen

bulgularla bu çalışmada varılan sonuçlar mukayese edilerek en uygun matkap uç açısı belirlenebilir.

- Seramik takviyeli alüminyum matrisli MMK'lara uygulanan ısıtıl işlemin, bu tür kompozit malzemelerin mekanik özelliklerini artırdığı, fakat işlenebilirliği azalttığı ifade edilmiştir. Bu çalışmada üretilen değişik oranlardaki  $B_4C_p$  içerikli Al7XXX serisi MMK'lara farklı ısıtıl işlemler uygulanarak, elde edilen yeni özellikteki kompozitlerin mekanik özellikleri ve delme işlenebilirliği araştırılabilir. Mevcut çalışmanın sonuçları ile karşılaştırarak, uygulanan ısıtıl işlemin işlenebilirliğe olan etkisi belirlenebilir.
- %10, %15 ve %25  $B_4C$  içerikli kompozit malzemeler ile HSS, karbür ve TiAlN kaplamalı karbür malzemesi arasındaki, değişen devir sayısı ve ilerleme hızındaki dinamik sürtünme kuvveti değerleri araştırılabilir. Bu sayede kesme esnasında oluşan sürtünme momenti hesaplanarak, deneylerden ölçülen toplam kesme momentinden çıkarılır ve gerçek kesme momentinin değeri hesaplanabilir.
- %10, %15 ve %25  $B_4C$  içerikli kompozit malzemeler ile HSS, karbür ve TiAlN kaplamalı karbür malzemesi ile işlenirken oluşan  $k_s$ , takım gereci faktörü ( $k_p$ ) ve aşınma faktörü ( $k_u$ ) değerleri araştırılabilir. Bu sayede, kesme kuvveti değerinin hesaplanması mümkün olabilecektir.
- Bu zamana kadar yapılan çalışmalarda kesme sıcaklıklarını ölçerken yöntem olarak, iş parçasına veya kesici takıma gömülen ısıtıl çiftler kullanılmıştır. Mevcut çalışmada ise kesme sıcaklıklarını ölçerken teknolojinin olanaklarından faydalanılmış ve kızılötesi ölçme tekniği ile temassız ölçme yapabilen pirometre kullanılmıştır. Yine bu tür kompozit malzemelerde, bu çalışmada kullanılan kesme parametreleri kullanılarak, ısıtıl çiftlerle sıcaklık ölçümleri gerçekleştirilebilir ve bu çalışmada elde edilen değerlerle mukayese edilerek, kullanılan ölçme tekniğinin kesme sıcaklıklarını ölçmeye olan etkisi belirlenebilir.
- MMK'ların işlenebilirliği ile yapılan çalışmaların sonucunda, deney sonuçlarını tahmin etmek amacıyla modelleme tekniklerinden biri olan yapay sinir ağları metodu da kullanılmaktadır. Bu çalışma sonucunda elde edilen sonuçların tahmin edilmesinde,

yapay sinir ağları metodu kullanılabilir ve elde edilen sonuçlarla mevcut çalışmada elde edilen sonuçlar karşılaştırılabilir.

- B<sub>4</sub>C<sub>p</sub> içerikli alüminyum MMK'ların delinmesi ile ilgili bu çalışmada soğutma sıvısı kullanılmamıştır. Daha önceki çalışmalar irdelendiğinde, kesici takım içerisinden minimum miktarda soğutma sıvısı kullanılarak yapılan çalışmaların, delme kuvvetlerini azalttığı, kesici takım ömrünü ve yüzey kalitesini artırdığı göz önünde bulundurunca, aynı deneylerin minimum miktarda soğutma sıvısı kullanarak yapılması tavsiye edilir.



## KAYNAKLAR

1. Ahamed, A.R., Asokan, P., Aravindan, S. and Prakash, M.K. (2010). Drilling of hybrid Al-5%SiC<sub>p</sub>-5%B<sub>4</sub>C<sub>p</sub> metal matrix composite, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 49: 871–877.
2. Alrashdan, A., Mayyas, A.T., Hassan, A. M. and Hayajneh, M. T. (2011). Drilling of Al–Mg–Cu alloys and Al–Mg–Cu/SiC composites, *Journal of Composite Materials*, 45 (20): 2091-2101.
3. Altunpak, Y., Ay, M. and Aslan, S. (2012). Drilling of a hybrid Al/SiC/Gr metal matrix composites, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 60 (5-8): 513-517.
4. Barnes, S. and Pashby, I.R. (2000). Through-tool coolant drilling of Aluminum/SiC metal matrix composite, *Journal of Engineering Materials And Technology*, 122: 384-388.
5. Basavarajappaa, S., Chandramohanb, G. and Davim, J. Paulo (2008). Some studies on drilling of hybrid metal matrix composites based on Taguchi techniques, *Journal of Materials Processing Technology*, 196 (1-3): 332–338.
6. Basavarajappaa, S., Chandramohanb, G., Davim, J.P., Prabu, M., Mukund, K., Ashwin, M. and PrasannaKumar, M. (2008). Drilling of hybrid aluminium matrix composites, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 35: 1244-1250.
7. Coelho, R. T., Yamada, S., Aspinwall, D. K. and Wise, M.L.H. (1995). The application of polycrystalline diamond (PCD) tool materials when drilling and reaming aluminium based alloys including MMC, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 35 (5): 761–774.
8. Davim, J.P. (2003). Study of drilling metal-matrix composites based on the Taguchi techniques, *Journal of Materials Processing Technology*, 132: 250-254.
9. Davim, J. P. and Antonio, C.A.C. (2001). Optimal drilling of particulate metal matrix composites based on experimental and numerical procedures, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 41: 21–31.
10. Davim, J. P. and Baptista, A. M. (2000). Relationship between cutting force and PCD cutting tool wear in machining silicon carbide reinforced aluminium, *Journal of Materials Processing Technology*, 103: 417-423.
11. Davim, J.P. and Baptista, A.M. (2001). Cutting force, tool wear and surface finish in drilling metal matrix composites, *Journal of Process Mechanical Engineering Part E: Journal of Process Mechanical Engineering*, 215: 177-183.
12. Elhachimi, M., Torbaty, S. and Joyot, P. (1999). Mechanical modelling of high speed drilling. 1: predicting torque and thrust, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 39 (4): 553–568.

13. Elhachimi, M., Torbaty, S. and Joyot, P. (1999). Mechanical modelling of high speed drilling. 2: predicted and experimental results, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 39 (4): 569–581.
14. Hamade, R.F., Seif, C.Y. and Ismail, F. (2006). Extracting cutting force coefficients from drilling experiments, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 46: 387–396.
15. Haq, A.N., Marimuthu, P. and Jeyapaul, R. (2008). Multi response optimization of machining parameters of drilling Al/SiC metal matrix composite using grey relational analysis in the Taguchi method, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 37: 250–255.
16. Hayajneh, M.T., Hassan, A.M. and Mayyas, A.T. (2009). Artificial neural network modeling of the drilling process of self-lubricated aluminum/alumina/graphite hybrid composites synthesized by powder metallurgy technique, *Journal of Alloys & Compounds*, 478: 559-565.
17. Karakaş, M.S., Acır, A., Übeyli, M. and Ögel, B. (2006). Effect of cutting speed on tool performance in milling of B<sub>4</sub>C<sub>p</sub> reinforced aluminum metal matrix composites, *Journal of Materials Processing Technology*, 178: 241-246.
18. Langella, A., Nele, L. and Maio, A. (2005). A torque and thrust prediction model for drilling of composite materials, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 36 (1): 83–93.
19. Monaghan, J. and O'Reilly, P. (1992). The drilling of an Al/SiC metal-matrix composite, *Journal of Materials Processing Technology*, 33: 469-480.
20. Morin, E., Masounave, J. and Laufer, E.E. (1995). Effect of drill wear on cutting forces in the drilling of metal-matrix composites, *Wear*, 184: 11-16.
21. Rajmohan, T. and Palanikumar, K. (2011). Experimental investigation and analysis of thrust force in drilling hybrid metal matrix composites by coated carbide drills, *Materials and Manufacturing Processes*, 26 (8): 961–968.
22. Rajmohan, T. and Palanikumar, K. (2012). Optimization of machining parameters for surface roughness and burr height in drilling hybrid composites, *Materials and Manufacturing Processes*, 27: 320–328.
23. Ramulu, M., Rao, P.N. and Kao, H. (2002). Drilling of (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)<sub>p</sub>/6061 metal matrix composites, *Journal of Materials Processing Technology*, 124: 244-254.
24. Songmene, A.V. and Balazinski, M. (1999). Machinability of grafitic metal matrix composites as a function of reinforcing particles, *College International Pour La Recherche En Productique Annals-Manufacturing Technology*, 48 (1): 77–80.
25. Strenkowski, J.S., Hsieh, C.C. and Shih, A.J. (2004). An analytical finite element technique for predicting thrust force and torque in drilling, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 44: 1413-1421.

26. Teti, R. (2002). Machining of composite materials, *College International Pour La Recherche En Productique Annals-Manufacturing Technology*, 51: 611-634.
27. Tosun, G. (2011). Statistical analysis of process parameters in drilling of Al/SiC<sub>p</sub> metal matrix composite, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 55: 477-485.
28. Tosun, G. and Muratoğlu, M. (2004). The drilling of an Al/SiC<sub>p</sub> metal-matrix composites. Part I: microstructure, *Composites Science and Technology*, 64: 299-308.
29. Tosun, G. and Muratoğlu, M. (2004). The drilling of an Al/SiC<sub>p</sub> metal-matrix composites. Part II: microstructure, *Composites Science and Technology*, 64: 1413-1418.
30. Bell, J.A.E., Stephenson, T.F., Waner, A.E.M. and Songmene, V. (1997). *Physical properties of graphitic silicon carbide aluminum metal matrix composite*, International Congress & Exposition, Detroit,
31. Seeman, M., Ganesan, G., Karthikeyan, R. and Velayudham, A. (2010). Study on tool wear and surface roughness in machining of particulate aluminum metal matrix composite-response surface methodology approach, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 48: 613-624.
32. Rajmohan, T., Palanikumar, K. and Davim, J. P. (2012). Analysis of surface integrity in drilling metal matrix and hybrid metal matrix composites, *Journal of Materials Sciences & Technology*, 28 (8): 761-768.
33. Candan, S. and Bilgic, E. (2004). Corrosion behavior of Al-60 vol.% SiC<sub>p</sub> composites in NaCl solution, *Materials Letters* 58: 2787-2790.
34. Božić, D., Stašić, J. and Rajković, V. (2011). Microstructures and mechanical properties of ZA27-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> composites obtained by powder metallurgy process *Science of Sintering*, 43: 63-70.
35. Anandakrishnan, V. and Mahamani, A. (2011). Investigations of flank wear, cutting force, and surface roughness in the machining of Al-6061-TiB<sub>2</sub> in situ metal matrix composites produced by flux-assisted synthesis, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 55: 65-73.
36. Rahimian, M., Parvin, N. and Ehsani, N. (2011). The effect of production parameters on microstructure and wear resistance of powder metallurgy Al-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> composite, *Materials and Design*, 32: 1031-1038.
37. Kommel, L and Kimmari, E. (2006). Boron carbide based composites manufacturing and recycling features, *Materials Science (Medžiagotyra)*, 12 (1): 48-52
38. Hunt, Warren H. JR. (2000). *Comprehensive Composite Materials*, Kelly, A. and Zweben, C., Oxford: Elsevier Science Ltd, 701-715.



39. Nie, C.-Z., Gu, J.-J., Liu, J.-L. and Zhang, D. (2007). Production of boron carbide reinforced 2024 aluminum matrix composites by mechanical alloying, *Materials Transactions*, 48 (5): 990-995.
40. Hasırcı, H. and Gül, F. (2010). B<sub>4</sub>C/Al kompozitlerin takviye hacim oranına bağlı olarak abrasif aşınma davranışlarının incelenmesi, *Süleyman Demirel Üniversitesi International Journal of Technological Science*, 2 (1): 15-21.
41. Orhan, A., Gür, A. K. and Çalığülü, U. (2007). Al matrisli B<sub>4</sub>C takviyeli kompozitlerin sıcak presleme yöntemiyle üretimi, *Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 4: 8-13.
42. Mahesh, V.P., Nair, P. S., Rajan, T.P.D., Pai, B.C. and Hubli, R.C. (2011). Processing of surface-treated boron carbide-reinforced aluminum matrix composites by liquid-metal stir-casting technique, *Journal of Composite Materials*, 45 (23): 2371–2378.
43. Abenojar, J., Velasco, F. and Martínez, M.A. (2007). Optimization of processing parameters for the Al + 10% B<sub>4</sub>C system obtained by mechanical alloying, *Journal of Materials Processing Technology*, 184: 441–446.
44. Çirakoğlu, M., Toy, Ç., Tekin, A. and Scott, W.D. (1997). The formation of aluminium nitride-boron carbide-aluminium composites by wetting assisted infiltration, *Ceramics International*, 23: 115-118.
45. Yücel, O. and Tekin, A. (1997). The fabrication of boron carbide-aluminium composites by explosive consolidation, *Ceramics International*, 23: 149-152.
46. Zhang, H., Ramesh, K.T. and Chin, E.S.C. (2004). High strain rate response of aluminum 6092/B<sub>4</sub>C composites, *Materials Science and Engineering*, A 384: 26–34.
47. Lillo, T. M. (2005). Enhancing ductility of Al6061 + 10 wt.% B<sub>4</sub>C through equal-channel angular extrusion processing, *Materials Science and Engineering*, A 410–411: 410–411.
48. Çanakçı, A. (2006). *AA2024 matrisli B<sub>4</sub>C parçacık takviyeli kompozitlerin vorteks yöntemiyle üretimi ve özelliklerinin incelenmesi*, Doktora Tezi Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, 35-109.
49. Cambronero, E.G., Sánchez, E., Ruiz-Roman, J.M. and Ruiz-Prieto, J.M. (2003). Mechanical characterisation of AA7015 aluminium alloy reinforced with ceramics, *Journal of Materials Processing Technology*, 143–144: 378–383
50. Bedir, F. (2006). Alüminyum kompozitlerin üretimi, karakteristik özellikleri ve endüstriyel uygulamaları, *Mühendis ve Makina*, 47 (554): 28-35.
51. Doğan, M. A., Kanca, E. and Kök, M. (2012). *Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Partikül takviyeli 6061 alüminyum metal matrisli kompozitlerin üretimi*, International Iron & Steel Symposium, Karabük, 558-564.

52. Reddy, A. C. and Zitoun, E. (2010). Matrix Al-alloys for silicon carbide particle reinforced metal matrix composites, *Indian Journal of Science and Technology*, 3 (12): 1184-1187.
53. Das, S., Behera, R., Datta, A., Majumdar, G., Oraon, B. and Sutradhar, G. (2010). Experimental investigation on the effect of reinforcement particles on the forgeability and the mechanical properties of aluminum metal matrix composites, *Materials Sciences and Applications*, 1: 310-316.
54. Singh, V. and Prasad, R.C. (2004). *Tensile and fracture behavior of 6061 Al-SiC<sub>p</sub> metal matrix composites*, International Symposium of Research Students on Materials Science and Engineering, Chennai, 20-22.
55. Altinkök, N. and Çoban, A. (2012). The tensile behavior and microstructure of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/SiC<sub>p</sub> reinforced aluminum-based MMCs produced by the stir casting method, *International Journal of Science and Advanced Technology*, 2 (5): 78-86.
56. Sujan, D., Oo, Z., Rahman, M. E., Maleque, M. A. and Tan, C. K. (2012). Physio-mechanical properties of aluminium metal matrix composites reinforced with Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and SiC, *International Journal of Engineering and Applied Sciences*, , 6: 288-291.
57. Kumar, G. B. V., Rao, C. S. P., Selvaraj, N. and Bhagyashekar, M. S. (2010). Studies on Al6061-SiC and Al7075-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> metal matrix composites, *Journal of Minerals & Materials Characterization & Engineering*, 9 (1): 43-55.
58. Al-Rashed, A., Holeček, S., Pražák, M. and Proció, M. (1993). Powder metallurgy route in production of aluminium alloy matrix particulate composites, *Journal De Physique IV*, 3: 1821-1823.
59. Dhavamani, C. and Alwarsamy, T. (2011). Optimization of cutting parameters of composite materials using genetic algorithm, *European Journal of Scientific Research*, 63: 279-285.
60. Bono, M. and Ni, J. (2002). A model for predicting the heat flow into the workpiece in dry drilling, *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 124: 773-777.
61. Li, R. and Shih, A. J. (2007). Spiral point drill temperature and stress in high-throughput drilling of titanium, *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 47: 2005–2017.
62. Bono, M. and Ni, J. (2002). A method for measuring the temperature distribution along the cutting edges of a drill, *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 124: 921-922.
63. Ozcelik, B. and Bagci, E. (2006). Experimental and numerical studies on the determination of twist drill temperature in dry drilling: A new approach, *Materials & Design*, 27: 920–927.
64. Weinert, K. and Kempmann, C. (2004). Cutting temperatures and their effects on the machining behaviour in drilling reinforced plastic composites, *Advanced Engineering Materials*, 6 (8): 684-689.

65. Ozcelik, B. and Bagci, E. (2006). Investigation of the effect of drilling conditions on the twist drill temperature during step-by-step and continuous dry drilling, *Materials & Design*, 27: 446–454.
66. Bagci, E. and Ozcelik, B. (2006). Analysis of temperature changes on the twist drill under different drilling conditions based on Taguchi method during dry drilling of Al 7075-T651, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 26 (7-8): 629-636.
67. Bagci, E. and Ozcelik, B. (2006). Finite element and experimental investigation of temperature changes on a twist drill in sequential dry drilling, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 28: 680-687.
68. Bagci, E. and Ozcelik, B. (2007). Influence of cutting parameters on drill bit temperature in dry drilling of AISI 1040 steel material using statistical analysis, *Industrial Lubrication and Tribology*, 59 (4): 186-193.
69. Zeilmann, R. P. and Weingaertner, W. L. (2006). Analysis of temperature during drilling of Ti6Al4V with minimal quantity of lubricant, *Journal of Materials Processing Technology*, 179: 124–127.
70. Ueda, T., Nozaki, R. and Hosokawa, A. (2007). Temperature measurement of cutting edge in drilling -effect of oil mist-, *Annals of the College International Pour La Recherche En Productique*, 56 (1): 93-96.
71. Wu, J. and Han, R. D. (2009). A new approach to predicting the maximum temperature in dry drilling based on a finite element model, *Journal of Manufacturing Processes*, 11: 19-30.
72. Bhowmick, S., Lukitsch, M. J. and Alpas, A. T. (2010). Dry and minimum quantity lubrication drilling of cast magnesium alloy (AM60), *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 50: 444–457.
73. Coz, G. L., Marinescu, M., Devillez, A., Dudzinski, D. and Velnom, L. (2012). Measuring temperature of rotating cutting tools: Application to MQL drilling and dry milling of aerospace alloys, *Applied Thermal Engineering*, 36: 434-441.
74. Barnes, S., Pashby, I.R. and Hashim, A.B. (1999). Effect of heat treatment on the drilling performance of aluminum/SiC MMC, *Applied Composite Materials*, 6 (2): 121-138.
75. Brown, C.A. and Surappa, M.K. (1988). The machinability of a cast aluminium alloy-graphite particle composite, *Materials Science and Engineering*, 102 (1): 31-37.
76. Sharma, S.C., Girish, B.M., Kulkarni, R.S. and Kamath, R. (1996). Drillability of zinc/graphite metal matrix composites, *National Metallurgical Laboratory Technical Journal*, 38 (3): 127–131.

77. Acir, A., Turgut, Y., Übeyli, M., Günay, M., Şeker, U. (2009). A study on the cutting force in milling of boron carbide particle reinforced aluminum composite, *Science and Engineering of Composite Materials*, 16: 187-195.
78. Übeyli, M., Acir, A., Karakaş, M.S. and Ögel, B. (2008). Effect of feed rate on tool wear in milling of Al-4%Cu/B<sub>4</sub>C<sub>p</sub> composite, *Materials and Manufacturing Processes*, 23: 865-870.
79. Übeyli, M., Acir, A., Karakaş, M.S. and Demir, T. (2008). On the surface roughness Al-4%Cu/B<sub>4</sub>C metal matrix composites machined by milling operation, *Science and Engineering of Composite Materials*, 15: 131-139.
80. Übeyli, M., Acir, A., Karakaş, M.S. and Ögel, B. (2007). Study on performance of uncoated and coated tools in milling of Al-4%Cu/B<sub>4</sub>C metal matrix composites materials, *Materials Science and Technology*, 23 (8): 945-950.
81. Abrão, A.M., Rubio, J.C.C., Faria, P.E. and Davim, J.P. (2008). The effect of cutting tool geometry on thrust force and delamination when drilling glass fibre reinforced plastic composite, *Materials and Design*, 29 (2): 508-513.
82. Iliescu, D., Gehin, D., Gutierrez, M.E. and Girot, F. (2010). Modeling and tool wear in drilling of CFRP *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 50 (2): 204-213.
83. Rajmohan, T and Palanikumar, K (2011). Optimization of machining parameters for multi-performance characteristics in drilling hybrid metal matrix composites, *Journal of Composite Materials*, 46 (7): 869–878.
84. Narutaki, N. (1996). Machining of MMCs, *Verein Deutscher Ingenieure-Berichte*, 1276: 359–370.
85. List, G., Nouari, M., Géhin, D., Gomez, S., Manaud, J.P., Le Petitcorps, Y. and Girot, F. (2005). Wear behaviour of cemented carbide tools in dry machining of aluminium alloy, *Wear* 259: 1177–1189.
86. Kalidas, S., DeVor, R. E. and Kapoor, S. G. (2001). Experimental investigation of the effect of drill coatings on hole quality under dry and wet drilling conditions, *Surface and Coatings Technology*, 148: 117–128.
87. Kurt, M., Kaynak, Y. and Bagci, E. (2008). Evaluation of drilled hole quality in Al 2024 alloy, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 37: 1051–1060.
88. Pirtini, M. and Lazoglu, I. (2005). Forces and hole quality in drilling, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 45: 1271–1281.
89. Shyha, I.S., Soo, S.L., Aspinwall, D.K., Bradley, S., Perry, R., Harden, P. and Dawson, S. (2011). Hole quality assessment following drilling of metallic-composite stacks, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 51: 569–578.
90. Grzesik, W (2008). *Advanced Machining Processes of Metallic Materials: theory, modelling and applications, First ed.*, Amsterdam: Elsevier Science, 127-139.

91. Gopalsamy, B. M., Mondal, B. and Ghosh, S. (2009). Taguchi method and ANOVA: An approach for process parameters optimization of hard machining while machining hardened steel, *Journal of Scientific & Industrial Research*, 68: 686-695.
92. Savaşkan, M., Taptık, Y. and Ürgen, M. (2004). Deney tasarımı yöntemi ile matkap uçlarında performans optimizasyonu, *İstanbul Teknik Üniversitesi Dergisi*, 3: 117-128.
93. Tsao, C. C. (2007). Taguchi analysis of drilling quality associated with core drill in drilling of composite material, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 32: 877–884.
94. Roy, R.K. (1990). New York: *Van Nostrand Reinhold*, 1-247.
95. Mahapatra, S.S. and Chaturvedi, V. (2009). Modelling and analysis of abrasive wear performance of composites using Taguchi approach, *International Journal of Engineering, Science and Technology*, 1 (1): 123-135.
96. Pınar, A. M., Güllü, A., Gökozan, H. and Tekin, A. B. (2011). *CNC kontrollü hidrolik tahrikli dairesel interpolasyon hareketlerindeki dairesellik hatasının Taguchi metodu ile optimizasyonu*, 6th International Advanced Technologies Symposium (IATS'11), Elazığ, 89–93.
97. Holt, S. M. (2011). *Effect of processing parameters on bond strength and effective plasticity in Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-TiB<sub>2</sub> composites*, , Master of Science Virginia Polytechnic Institute and State University Virginia, , 20-42.
98. Palanikumar, K. (2011). Experimental investigation and optimisation in drilling of GFRP composites, *Measurement*, 44: 2138–2148.
99. Palanikumar, K., Latha, B., Senthilkumar, V. S. and Davim, J. P. (2012). Analysis on drilling of glass fiber–reinforced polymer (GFRP) composites using grey relational analysis, *Materials and Manufacturing Processes*, 27: 297–305.
100. Tosun, N. (2006). Determination of optimum parameters for multi-performance characteristics in drilling by using grey relational analysis, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 28: 450–455.
101. M., Faruk (2006). *Takım Tezgahları Teori ve Hesaplamaları*, Ankara: *Gazi Kitabevi*, 155-185.
102. T., Heinz (2009). *Applied Machining Technology*, New York: *Springer*, 109-113.
103. Jayabal, S. and Natarajan, U. (2010). Influence of cutting parameters on thrust force and torque in drilling of E-glass/polyester composites, , *Indian Journal of Engineering and Materials Sciences*, 17 (6): 463-470.
104. Li, R. and Shih, A. J. (2007). Tool temperature in titanium drilling, *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 129: 740-749.
105. Grzesik, W. (2008). *Advanced Machining Processes of Metallic Materials, First ed.*, Amsterdam: *Elsevier Science*, 163-180.

106. Chen, Y.C. and Liao, Y.S. (2003). Study on wear mechanisms in drilling of Inconel 718 superalloy, *Journal of Materials Processing Technology*, 140: 269–273.
107. Álvarez, M., Salguero, J., Sánchez, J. A., Huerta, M. and Marcos, M. (2011). SEM and EDS characterisation of layering TiO<sub>x</sub> growth onto the cutting tool surface in hard drilling processes of Ti-Al-V alloys, *Advances in Materials Science and Engineering*, 2011: 1687-8434.
108. Nouari, M., List, G., Girot, F. and D., Gèhin (2005). Effect of machining parameters and coating on wear mechanisms in dry drilling of aluminium alloys, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 45: 1436–1442.
109. Kilic, D. S. and Raman, S. (2007). Observations of the tool–chip boundary conditions in turning of aluminum alloys, *Wear*, 262 (7–8): 889-904.
110. Ozcatalbas, Y. (2003). Chip and built-up edge formation in the machining of in situ Al<sub>4</sub>C<sub>3</sub>-Al composite, *Materials & Design*, 24 (3): 215-221.
111. Demir, H. and Gündüz, S. (2009). The effects of aging on machinability of 6061 aluminium alloy, *Materials and Design*, 30 (5): 1480-1483.
112. Lucchini, E., Lo Casto, S. and Sbaizero, O. (2003). The performance of molybdenum toughened alumina cutting tools in turning a particulate metal matrix composite”, , *Materials Science and Engineering: A*, 357 (1-2): 369-375.
113. El-Gallab, M. and Sklad, M. (1998). Machining of Al/SiC particulate metal matrix composites part II: workpiece surface integrity, *Journal of Materials Processing Technology*, 83: 277–285.
114. "Üretim Yöntemlerine Göre Yüzey Pürüzlülüğü," in *Bölüm 2, DIN 4768-Bölüm 1' göre ulaşılabilen ortalama pürüzlülük değerleri Ra*, ed, 1981.
115. Stephenson, D. A. and Agapiou, J. S. (1997). *CRC Press*, 491-519.
116. Gardner, J.D. and Dornfeld, D. (2006). Finite element modeling of drilling using deform, *Laboratory for Manufacturing and Sustainability*:
117. Isbilir, O. and Ghassemieh, E. (2012). Finite element analysis of drilling of carbon fibre reinforced composites, *Applied Composite Materials*, 19: 637–656.
118. Lungu, N. and Borzan, M. (2012). Effect of cutting speed and feed rate on tool geometry, temperature and cutting forces in machining AISI 1045 carbon steel using fem simulation, *Proceedings in Manufacturing Systems*, 7 (4): 245–252.
119. Yang, Y. and Sun, J. (2009). *Finite element modelling and simulating of drilling of titanium alloy*, Information and Computing Science, ICIC '09. Second International Conference on, Manchester, 178-181.
120. Kožmín, P., Sklednička, J. and Roud, P. (2010). *FEM method in chip shape and cutting force prediction when drilling difficult to cut materials*, 3rd International Scientific Conference with Expert Participation – MANUFACTURING 2010, Poznan, 1-14.

121. Li, R. and Shih, A. J. (2007). Finite element modeling of high-throughput drilling of Ti-6AL-4V, *Transactions of the North American Manufacturing Research Institution of The Society of Manufacturing Engineers*, 35: 73-80.
122. Constantin, C., Croitoru, S. M., Constantin, G. and Bisu, C. F. (2010). *3D fem analysis of cutting processes*, *Advances in Visualization, Imaging And Simulation*, Faro, 41-46.
123. Guo, Y. B. and Dornfeld, D. A. (2000). Finite element modeling of burr formation process in drilling 304 stainless steel, *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 122: 612–619.
124. Raja Abdullah, R. (2011). *Hybrid deflection prediction for machining thin-wall titanium alloy aerospace component*, PhD Thesis, RMIT University Aerospace, Mechanical and Manufacturing Engineering, Melbourne, 26-47.
125. Ghorbani, M. A., Singh, V. P., Daneshfaraz, R. and Kashani, M. H. (2012). Modelling pan evaporation using genetic programming, *Journal of Statistics: Advances in Theory and Applications* 8(1): 15-36.
126. Yang, Y., Li, X., Gao, L. and Shao, X. (2013). A new approach for predicting and collaborative evaluating the cutting force in face milling based on gene expression programming, *Journal of Network and Computer Applications*, 36: 1540–1550.
127. Yang, Y., Li, X., Gao, L. and Shao, X. (2013). Modeling and impact factors analyzing of energy consumption in CNC face milling using GRASP gene expression programming, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, DOI 10.1007/s00170-013-5017-7:
128. Yang, Y., Li, X., Jiang, P. and Wen, L. (2012). *Modeling of cutting forces in a face-milling operation with gene expression programming*, *Computer Supported Cooperative Work in Design (CSCWD)*, 2012 IEEE 16th International Conference on, Wuhan, 769-774.
129. Colak, O., Kurbanoglu, C. and Kayacan, M. C. (2007). Milling surface roughness prediction using evolutionary programming methods, *Materials and Design*, 28: 657–666.
130. Kk, M., Kanca, E. and Eyerciolu, O. (2011). Prediction of surface roughness in abrasive waterjet machining of particle reinforced MMCs using genetic expression programming, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 55: 955-968.
131. Salman, O. and Kayacan, M. C. (2008). Evolutionary programming method for modeling the EDM parameters for roughness, *Journal of Materials Processing Technology*, 200: 347-355.

**EKLER**



**EK-1. Kompozit ve kesici takım malzemesine göre, işleme parametreleri ve ölçülen delme kuvveti değerleri**

Çizelge 1.1. HSS matkap için, işleme parametreleri ve ölçülen delme kuvveti değerleri

Deney No.	Kompozit Malzeme	Matkap Malzemesi	Devir sayısı (dev/dak)	İlerleme hızı (mm/dev)	İlerleme Kuvveti (F <sub>a</sub> ) (N)	Kesme Momenti (M <sub>c</sub> ) (Ncm)
1	%10 B <sub>4</sub> C	HSS	1000	0,1	843,23	292,99
2	%10 B <sub>4</sub> C	HSS	1000	0,2	967,33	480,66
3	%10 B <sub>4</sub> C	HSS	1000	0,3	1155,06	553,87
10	%10 B <sub>4</sub> C	HSS	1500	0,1	802,64	302,23
11	%10 B <sub>4</sub> C	HSS	1500	0,2	868,17	386,76
12	%10 B <sub>4</sub> C	HSS	1500	0,3	1047,97	446,64
19	%10 B <sub>4</sub> C	HSS	2000	0,1	814,30	197,32
20	%10 B <sub>4</sub> C	HSS	2000	0,2	880,74	293,95
21	%10 B <sub>4</sub> C	HSS	2000	0,3	1070,20	415,74
28	%10 B <sub>4</sub> C	HSS	2500	0,1	694,34	217,10
29	%10 B <sub>4</sub> C	HSS	2500	0,2	834,04	242,18
30	%10 B <sub>4</sub> C	HSS	2500	0,3	1043,15	360,07
37	%15 B <sub>4</sub> C	HSS	1000	0,1	1156,32	331,97
38	%15 B <sub>4</sub> C	HSS	1000	0,2	1328,08	422,30
39	%15 B <sub>4</sub> C	HSS	1000	0,3	1313,43	578,31
46	%15 B <sub>4</sub> C	HSS	1500	0,1	1096,21	309,95
47	%15 B <sub>4</sub> C	HSS	1500	0,2	1131,54	370,64
48	%15 B <sub>4</sub> C	HSS	1500	0,3	1317,52	447,42
55	%15 B <sub>4</sub> C	HSS	2000	0,1	973,33	309,14
56	%15 B <sub>4</sub> C	HSS	2000	0,2	1086,45	353,88
57	%15 B <sub>4</sub> C	HSS	2000	0,3	1270,25	371,73
64	%15 B <sub>4</sub> C	HSS	2500	0,1	902,57	285,93
65	%15 B <sub>4</sub> C	HSS	2500	0,2	985,11	309,69
66	%15 B <sub>4</sub> C	HSS	2500	0,3	1174,74	443,38
73	%25 B <sub>4</sub> C	HSS	1000	0,1	1897,99	430,32
74	%25 B <sub>4</sub> C	HSS	1000	0,2	1825,54	496,15
75	%25 B <sub>4</sub> C	HSS	1000	0,3	1850,49	567,51
82	%25 B <sub>4</sub> C	HSS	1500	0,1	1654,51	434,06
83	%25 B <sub>4</sub> C	HSS	1500	0,2	1592,14	456,60
84	%25 B <sub>4</sub> C	HSS	1500	0,3	1719,96	530,29
91	%25 B <sub>4</sub> C	HSS	2000	0,1	1384,91	431,92
92	%25 B <sub>4</sub> C	HSS	2000	0,2	1282,04	426,01
93	%25 B <sub>4</sub> C	HSS	2000	0,3	1440,81	492,23
100	%25 B <sub>4</sub> C	HSS	2500	0,1	1297,46	375,51
101	%25 B <sub>4</sub> C	HSS	2500	0,2	1112,17	393,81
102	%25 B <sub>4</sub> C	HSS	2500	0,3	1370,45	487,32

EK-1. (Devamı) Kompozit ve kesici takım malzemesine göre, işleme parametreleri ve ölçülen delme kuvveti değerleri

Çizelge 1.2. Karbür matkap için, işleme parametreleri ve ölçülen delme kuvveti değerleri

Deney No.	Kompozit malzeme	Matkap Malzemesi	Devir sayısı (dev/dak)	İlerleme hızı (mm/dev)	İlerleme Kuvveti (F <sub>a</sub> ) (N)	Kesme Momenti (M <sub>c</sub> ) (Ncm)
7	%10 B <sub>4</sub> C	KARBUR	1000	0,1	908,29	376,17
8	%10 B <sub>4</sub> C	KARBUR	1000	0,2	966,83	478,44
9	%10 B <sub>4</sub> C	KARBUR	1000	0,3	1129,03	471,59
16	%10 B <sub>4</sub> C	KARBUR	1500	0,1	834,26	300,91
17	%10 B <sub>4</sub> C	KARBUR	1500	0,2	965,77	327,34
18	%10 B <sub>4</sub> C	KARBUR	1500	0,3	1115,89	309,30
25	%10 B <sub>4</sub> C	KARBUR	2000	0,1	767,19	236,42
26	%10 B <sub>4</sub> C	KARBUR	2000	0,2	939,58	287,09
27	%10 B <sub>4</sub> C	KARBUR	2000	0,3	1096,14	291,28
34	%10 B <sub>4</sub> C	KARBUR	2500	0,1	746,85	226,95
35	%10 B <sub>4</sub> C	KARBUR	2500	0,2	913,15	307,90
36	%10 B <sub>4</sub> C	KARBUR	2500	0,3	1073,86	265,04
43	%15 B <sub>4</sub> C	KARBUR	1000	0,1	1168,44	500,31
44	%15 B <sub>4</sub> C	KARBUR	1000	0,2	1220,50	515,71
45	%15 B <sub>4</sub> C	KARBUR	1000	0,3	1362,40	565,25
52	%15 B <sub>4</sub> C	KARBUR	1500	0,1	1058,51	310,07
53	%15 B <sub>4</sub> C	KARBUR	1500	0,2	1157,52	301,57
54	%15 B <sub>4</sub> C	KARBUR	1500	0,3	1310,46	328,03
61	%15 B <sub>4</sub> C	KARBUR	2000	0,1	975,23	307,13
62	%15 B <sub>4</sub> C	KARBUR	2000	0,2	1088,55	339,98
63	%15 B <sub>4</sub> C	KARBUR	2000	0,3	1242,20	395,01
70	%15 B <sub>4</sub> C	KARBUR	2500	0,1	928,22	294,98
71	%15 B <sub>4</sub> C	KARBUR	2500	0,2	1063,48	306,43
72	%15 B <sub>4</sub> C	KARBUR	2500	0,3	1194,25	293,88
79	%25 B <sub>4</sub> C	KARBUR	1000	0,1	1650,71	594,17
80	%25 B <sub>4</sub> C	KARBUR	1000	0,2	1652,46	674,94
81	%25 B <sub>4</sub> C	KARBUR	1000	0,3	1834,23	674,05
88	%25 B <sub>4</sub> C	KARBUR	1500	0,1	1474,08	597,60
89	%25 B <sub>4</sub> C	KARBUR	1500	0,2	1477,21	492,76
90	%25 B <sub>4</sub> C	KARBUR	1500	0,3	1665,34	530,14
97	%25 B <sub>4</sub> C	KARBUR	2000	0,1	1374,09	415,35
98	%25 B <sub>4</sub> C	KARBUR	2000	0,2	1303,81	431,20
99	%25 B <sub>4</sub> C	KARBUR	2000	0,3	1510,68	452,04
106	%25 B <sub>4</sub> C	KARBUR	2500	0,1	1270,29	537,66
107	%25 B <sub>4</sub> C	KARBUR	2500	0,2	1261,87	340,34
108	%25 B <sub>4</sub> C	KARBUR	2500	0,3	1434,03	379,18

EK-1. (Devamı) Kompozit ve kesici takım malzemesine göre, işleme parametreleri ve ölçülen delme kuvveti değerleri

Çizelge 1.3. TiAlN kaplamalı karbür matkap için, işleme parametreleri ve ölçülen delme kuvveti değerleri

Deney No.	Kompozit malzeme	Matkap Malzemesi	Devir sayısı (dev/dak)	İlerleme hızı (mm/dev)	İlerleme Kuvveti (F <sub>a</sub> ) (N)	Kesme Momenti (M <sub>c</sub> ) (Ncm)
4	%10 B <sub>4</sub> C	K. KARBUR	1000	0,1	842,61	442,81
5	%10 B <sub>4</sub> C	K. KARBUR	1000	0,2	967,07	422,02
6	%10 B <sub>4</sub> C	K. KARBUR	1000	0,3	1113,26	434,66
13	%10 B <sub>4</sub> C	K. KARBUR	1500	0,1	826,65	324,89
14	%10 B <sub>4</sub> C	K. KARBUR	1500	0,2	924,10	343,97
15	%10 B <sub>4</sub> C	K. KARBUR	1500	0,3	1086,53	362,36
22	%10 B <sub>4</sub> C	K. KARBUR	2000	0,1	804,31	249,30
23	%10 B <sub>4</sub> C	K. KARBUR	2000	0,2	932,27	221,09
24	%10 B <sub>4</sub> C	K. KARBUR	2000	0,3	1120,65	303,01
31	%10 B <sub>4</sub> C	K. KARBUR	2500	0,1	735,84	311,97
32	%10 B <sub>4</sub> C	K. KARBUR	2500	0,2	888,65	291,00
33	%10 B <sub>4</sub> C	K. KARBUR	2500	0,3	1053,55	286,74
40	%15 B <sub>4</sub> C	K. KARBUR	1000	0,1	1156,65	474,84
41	%15 B <sub>4</sub> C	K. KARBUR	1000	0,2	1244,12	496,66
42	%15 B <sub>4</sub> C	K. KARBUR	1000	0,3	1346,38	495,31
49	%15 B <sub>4</sub> C	K. KARBUR	1500	0,1	1062,46	398,53
50	%15 B <sub>4</sub> C	K. KARBUR	1500	0,2	1154,06	416,52
51	%15 B <sub>4</sub> C	K. KARBUR	1500	0,3	1304,57	430,90
58	%15 B <sub>4</sub> C	K. KARBUR	2000	0,1	970,90	298,09
59	%15 B <sub>4</sub> C	K. KARBUR	2000	0,2	1104,81	345,44
60	%15 B <sub>4</sub> C	K. KARBUR	2000	0,3	1218,18	388,47
67	%15 B <sub>4</sub> C	K. KARBUR	2500	0,1	930,77	318,07
68	%15 B <sub>4</sub> C	K. KARBUR	2500	0,2	1029,01	310,74
69	%15 B <sub>4</sub> C	K. KARBUR	2500	0,3	1194,84	351,75
76	%25 B <sub>4</sub> C	K. KARBUR	1000	0,1	1630,85	627,11
77	%25 B <sub>4</sub> C	K. KARBUR	1000	0,2	1599,78	690,70
78	%25 B <sub>4</sub> C	K. KARBUR	1000	0,3	1890,18	744,77
85	%25 B <sub>4</sub> C	K. KARBUR	1500	0,1	1473,96	725,93
86	%25 B <sub>4</sub> C	K. KARBUR	1500	0,2	1508,23	592,96
87	%25 B <sub>4</sub> C	K. KARBUR	1500	0,3	1629,45	641,02
94	%25 B <sub>4</sub> C	K. KARBUR	2000	0,1	1340,58	663,13
95	%25 B <sub>4</sub> C	K. KARBUR	2000	0,2	1378,53	547,77
96	%25 B <sub>4</sub> C	K. KARBUR	2000	0,3	1657,27	558,74
103	%25 B <sub>4</sub> C	K. KARBUR	2500	0,1	1319,42	712,14
104	%25 B <sub>4</sub> C	K. KARBUR	2500	0,2	1283,02	571,72
105	%25 B <sub>4</sub> C	K. KARBUR	2500	0,3	1445,98	552,45

**EK-2. Taguchi metodu ile elde edilen ve doğrulama deneyleri sonucunda elde edilen ilerleme kuvveti ve kesme momenti sonuçlarının karşılaştırılması**

Çizelge 2.1. Doğrulama deneyleri sonucunda elde edilen ilerleme kuvveti değerleri ve doğruluk oranları

Deney No.	Taguchi sonucu S/N oranı	Taguchi ile elde edilen ilerleme kuvveti	Deneyden elde edilen ilerleme kuvveti	Doğruluk oranı (%)
2	-59,7631	973,0945	967,33	99,404
3	-60,835	1100,905	1155,06	95,312
4	-58,4505	836,6138	842,61	99,288
5	-59,7595	972,6912	967,07	99,419
7	-58,5634	847,5591	908,29	93,314
9	-60,9442	1114,833	1129,03	98,743
10	-58,4552	837,0666	802,64	95,711
11	-59,0103	892,3084	868,17	97,220
13	-58,4515	836,7101	826,65	98,783
15	-60,5727	1068,157	1086,53	98,309
17	-59,1195	903,5975	965,77	93,562
18	-60,6856	1082,131	1115,89	96,975
19	-58,0385	797,8569	814,30	97,981
21	-60,6193	1073,903	1070,20	99,654
23	-59,0357	894,9216	932,27	95,994
24	-60,6157	1073,458	1120,65	95,789
25	-58,1477	807,951	767,19	94,687
26	-59,1486	906,6298	939,58	96,493
37	-60,9514	1115,758	1156,32	96,492
38	-61,9934	1257,969	1328,08	94,721
40	-60,9477	1115,283	1156,65	96,424
42	-62,5634	1343,291	1346,38	99,771
44	-62,1027	1273,899	1220,50	95,625
45	-62,6763	1360,865	1362,40	99,887
46	-60,7328	1088,028	1096,21	99,254
48	-62,0888	1271,862	1317,52	96,535
50	-61,0173	1124,255	1154,06	97,417
51	-62,0851	1271,32	1304,57	97,451
52	-60,8421	1101,806	1058,51	95,910
53	-61,1302	1138,964	1157,52	98,397
56	-60,5876	1069,991	1086,45	98,485
57	-61,6694	1211,909	1270,25	95,407
58	-59,8501	982,8902	970,90	98,765
59	-60,584	1069,547	1104,81	96,808
61	-59,963	995,7493	975,23	97,896
63	-61,7787	1227,256	1242,20	98,797
73	-64,6082	1699,848	1897,99	89,560
75	-65,0615	1790,915	1850,49	96,781
77	-64,9662	1771,373	1599,78	89,274
78	-65,0578	1790,152	1890,18	94,708
79	-64,7175	1721,373	1650,71	95,719
80	-65,0792	1794,568	1652,46	91,400
83	-63,6398	1520,513	1592,14	95,501
84	-64,2256	1626,597	1719,96	94,572
85	-64,0284	1590,084	1473,96	92,122
86	-63,6362	1519,882	1508,23	99,227
88	-64,1413	1610,887	1474,08	90,719
90	-64,3348	1647,176	1665,34	98,909
91	-62,6361	1354,581	1384,91	97,810
92	-62,6897	1362,966	1282,04	93,688
94	-62,6325	1354,02	1340,58	98,997
96	-63,2857	1459,772	1657,27	88,083
98	-62,7989	1380,209	1303,81	94,140
99	-63,3986	1478,87	1510,68	97,894

EK-2. (Devamı) Taguchi metodu ile elde edilen ve doğrulama deneyleri sonucunda elde edilen ilerleme kuvveti ve kesme momenti sonuçlarının karşılaştırılması

Çizelge 2.2. Doğrulama deneyleri sonucunda elde edilen kesme momenti değerleri ve doğruluk oranları

Deney No.	Taguchi sonucu S/N oranı	Taguchi ile elde edilen kesme momenti	Deneyden elde edilen kesme momenti	Doğruluk oranı (%)
2	-52,008	398,474	480,66	82,901
3	-52,7553	434,2752	553,87	78,407
4	-50,7617	345,2113	442,81	77,959
5	-52,8267	437,8597	422,02	96,247
7	-50,1146	320,4277	376,17	85,182
9	-52,9269	442,9401	471,59	93,925
10	-49,2228	289,1612	302,23	95,676
11	-51,1119	359,414	386,76	92,929
13	-50,0415	317,7423	324,89	97,800
15	-52,792	436,114	362,36	79,646
17	-51,2835	366,5853	327,34	88,011
18	-52,1449	404,8042	309,30	69,122
19	-46,6841	215,8763	197,32	90,596
21	-49,3295	292,7352	415,74	70,413
23	-50,4009	331,1654	221,09	50,212
24	-50,1482	321,6696	303,01	93,842
25	-46,8557	220,1836	236,42	93,132
26	-49,7539	307,3937	287,09	92,928
37	-53,9135	496,2208	331,97	50,522
38	-53,7385	486,3232	422,30	84,839
40	-54,7322	545,268	474,84	85,168
42	-55,3255	583,8147	495,31	82,131
44	-53,9102	496,0323	515,71	96,184
45	-54,6785	541,9073	565,25	95,870
46	-50,8452	348,5459	309,95	87,548
48	-51,3768	370,5442	447,42	82,818
50	-51,3129	367,8282	416,52	88,310
51	-52,1955	407,1693	430,90	94,493
52	-51,0169	355,5044	310,07	85,347
53	-50,6659	341,4247	301,57	86,784
56	-50,7063	343,0165	353,88	96,930
57	-50,4747	333,9912	371,73	89,848
58	-50,8668	349,4138	298,09	82,782
59	-51,5249	376,9164	345,44	90,888
61	-50,2197	324,3284	307,13	94,400
63	-50,6463	340,6552	395,01	86,240
73	-54,4219	526,1323	430,32	77,735
75	-56,3276	655,2092	567,51	84,547
77	-55,5118	596,4719	690,70	86,358
78	-57,1463	719,971	744,77	96,670
79	-54,5936	536,6362	594,17	90,317
80	-54,8648	553,656	674,94	82,030
83	-53,3658	465,8971	456,60	97,964
84	-55,1145	569,8034	530,29	92,549
85	-54,0892	506,3607	725,93	69,753
86	-54,1844	511,9411	592,96	86,337
88	-53,4422	470,0131	597,60	78,650
90	-55,2861	581,1724	530,14	90,374
91	-52,3834	416,0734	431,92	96,331
92	-53,4877	472,4817	426,01	89,091
94	-53,202	457,1935	663,13	68,945
96	-54,9409	558,5281	558,74	99,962
98	-53,6593	481,909	431,20	88,240
99	-54,2939	518,4358	452,04	85,312

**EK-3. Deney numarasına göre ölçülen takım aşınması, yüzey pürüzlülüğü ve kesici takım sıcaklığı değerleri**

Çizelge 3.1. HSS matkap için, takım aşınması, yüzey pürüzlülüğü ve kesici takım sıcaklığı değerleri

Deney No.	Serbest Yüzey Aşınması (V <sub>B</sub> ) (mm)	Köşe Aşınması (mm)	Yüzey Pürüzlülüğü (R <sub>a</sub> ) (μm)	Kesici Takım Sıcaklığı (Aynı takımla üst üste iki kez) (T <sub>max</sub> , °C)	
				1. Ölçüm	2. Ölçüm
1	0,66	1,09	9,49	293,6	294,9
2	0,51	1,01	3,95	291,9	287,8
3	0,51	0,95	2,08	289,8	288,9
10	0,66	1,14	6,42	299,4	307
11	0,49	0,96	3,22	300,6	305,6
12	0,51	1,01	2,39	287,9	292,9
19	0,63	1,1	4,09	299,4	315,6
20	0,53	0,97	5,03	298,4	307,8
21	0,46	1,1	4,12	291,2	301,2
28	0,59	1,02	5,85	319,3	333,8
29	0,51	0,97	5,33	309,7	318,2
30	0,5	1,06	3,71	304,6	306,5
37	0,82	1,25	9,84	289,2	312,1
38	0,71	1,15	5,96	299,9	297,6
39	0,62	1,06	5,86	286,5	290
46	0,87	1,21	4,61	330,6	349,5
47	0,66	1,17	8,32	301	319,7
48	0,6	1,06	4,72	298,3	309,8
55	0,9	1,41	11,54	354,6	385,7
56	0,63	1	6,22	310,4	337
57	0,59	0,97	7,15	302,2	308,8
64	0,93	1,42	13,48	355,3	391,9
65	0,57	1,07	5,21	311	354,8
66	0,55	1,04	6,60	302,9	325,9
73	1,45	2,12	6,39	381,5	413,4
74	0,97	1,4	6,05	347,9	362,4
75	0,9	1,3	6,48	323	345,9
82	1,54	2,53	4,44	419,3	495,6
83	1,06	1,4	8,14	406,9	435,9
84	0,86	1,22	6,22	382,7	420,3
91	1,78	2,74	6,87	496,7	475,2
92	1	1,46	10,16	450,3	427,1
93	0,73	1,48	6,25	378,5	374,8
100	1,65	2,66	6,43	518,8	502
101	1,02	1,63	6,63	398,1	440,2
102	0,76	1,26	6,36	410,9	380,6

EK-3. (Devamı) Deney numarasına göre ölçülen takım aşınması, yüzey pürüzlülüğü ve kesici takım sıcaklığı değerleri

Çizelge 3.2. Karbür matkap için, takım aşınması, yüzey pürüzlülüğü ve kesici takım sıcaklığı değerleri

Deney No.	Serbest Yüzey Aşınması (V <sub>B</sub> ) (mm)	Köşe Aşınması (mm)	Yüzey Pürüzlülüğü (R <sub>a</sub> ) (μm)	Kesici Takım Sıcaklığı (Aynı takımla üst üste iki kez) (T <sub>max</sub> , °C)	
				1. Ölçüm	2. Ölçüm
7	0,49	0,7	10,10	287,7	287,8
8	0,32	0,61	0,41	273,1	276,6
9	0,4	0,63	0,63	276,4	274,7
16	0,53	0,69	1,04	283,6	290,2
17	0,4	0,64	3,79	279,3	281,7
18	0,33	0,68	1,73	273,5	276
25	0,46	0,66	4,04	282,8	296,5
26	0,37	0,87	3,30	274,2	280,8
27	0,38	0,67	12,87	272,8	277,1
34	0,47	0,68	12,69	285,4	299,9
35	0,39	0,87	2,31	273,7	277,2
36	0,39	0,74	4,96	281,1	274
43	0,59	0,79	2,80	349,4	381,6
44	0,42	0,7	0,34	290,9	298,3
45	0,4	0,67	0,23	277,4	289,1
52	0,65	0,81	0,63	364,8	368,2
53	0,435	0,69	0,35	292,3	306,5
54	0,37	0,62	0,51	278,6	290,6
61	0,59	0,83	1,67	298,2	338,4
62	0,45	0,66	1,34	276,3	290,9
63	0,41	0,64	1,31	273,4	280,2
70	0,6	0,82	0,78	313,2	364,9
71	0,48	0,68	3,62	289,9	299,3
72	0,38	0,66	2,87	273,7	279,4
79	0,84	1,32	0,37	394,4	425
80	0,63	0,92	0,54	339,4	352,7
81	0,56	0,76	0,92	322,8	314,4
88	0,88	1,39	0,60	444	451,1
89	0,67	1	0,37	331,2	352,3
90	0,54	0,75	0,35	322,5	354,7
97	0,96	1,42	0,45	466,5	428,6
98	0,72	1,03	0,41	396	432,2
99	0,58	0,79	0,34	384	415,6
106	0,95	1,43	0,85	486,4	450,9
107	0,685	1,09	0,49	392,3	417,8
108	0,64	0,86	0,39	364,2	423,2

EK-3. (Devamı) Deney numarasına göre ölçülen takım aşınması, yüzey pürüzlülüğü ve kesici takım sıcaklığı değerleri

Çizelge 3.3. TiAlN kaplamalı karbür matkap için, takım aşınması, yüzey pürüzlülüğü ve kesici takım sıcaklığı değerleri

Deney No.	Serbest Yüzey Aşınması ( $V_B$ ) (mm)	Köşe Aşınması (mm)	Yüzey Pürüzlülüğü ( $R_a$ ) ( $\mu\text{m}$ )	Kesici Takım Sıcaklığı (Aynı takımla üst üste iki kez) ( $T_{\text{max}}$ , °C)	
				1. Ölçüm	2. Ölçüm
4	0,51	0,63	0,82	289	292,9
5	0,41	0,63	0,54	284,2	282,9
6	0,34	0,71	0,45	280,9	280,1
13	0,47	0,67	0,68	295,7	293,1
14	0,41	0,61	0,42	285,9	285,9
15	0,36	0,65	0,69	281,7	284,1
22	0,48	0,66	2,36	298	314,7
23	0,4	0,63	1,72	284	286
24	0,4	0,66	1,33	279,1	282,4
31	0,49	0,74	7,60	317,4	352,3
32	0,39	0,63	5,79	283,5	288,2
33	0,31	0,62	7,11	279,8	282,1
40	0,6	0,87	1,30	344,5	365,8
41	0,46	0,68	0,33	308,2	320,7
42	0,42	0,65	0,37	287,2	300,5
49	0,62	0,91	0,73	384,9	397,1
50	0,45	0,68	0,32	310,4	326,7
51	0,4	0,68	0,88	288	300,1
58	0,61	0,93	0,48	351,9	392,9
59	0,44	0,67	0,73	317,7	334
60	0,425	0,65	0,66	285,9	290,2
67	0,62	0,9	0,74	344,5	405,9
68	0,45	0,63	1,21	322,2	332,9
69	0,42	0,69	2,59	285	291,8
76	0,8	1,36	0,57	388,5	416
77	0,6	0,86	0,44	337,4	368,8
78	0,53	0,73	0,33	289,7	307,9
85	0,91	1,31	0,55	392,6	422,1
86	0,62	1,03	0,38	327,8	365,1
87	0,56	0,72	0,35	297	321,8
94	0,795	1,36	0,76	444,2	454,1
95	0,62	0,97	0,38	420,3	433,8
96	0,515	0,8	0,36	397,2	423,7
103	0,83	1,37	0,38	447,3	444,8
104	0,615	0,96	0,44	437,9	409,5
105	0,54	0,79	0,32	402,1	413,6



**EK-4. Taguchi metodu ile elde edilen ve doğrulama deneyleri sonucunda elde edilen serbest yüzey aşınması sonuçlarının karşılaştırılması**

Çizelge 4.1. Doğrulama deneyleri sonucunda elde edilen serbest yüzey aşınması değerleri ve doğruluk oranları

Deney No.	Taguchi sonucu S/N oranı	Taguchi ile elde edilen serbest yüzey aşınması	Deneyden elde edilen serbest yüzey aşınması	Doğruluk oranı (%)
2	6,16649	0,492	0,51	96,41
3	5,94992	0,504	0,51	98,84
4	7,43308	0,425	0,51	83,33
5	9,50531	0,335	0,41	81,65
7	7,42131	0,426	0,49	86,84
9	9,27698	0,344	0,4	85,92
10	2,02503	0,792	0,66	79,99
11	4,81046	0,575	0,49	82,71
13	5,36385	0,539	0,47	85,26
15	8,94486	0,357	0,36	99,19
17	8,13751	0,392	0,4	97,96
18	8,93309	0,358	0,33	91,65
19	2,71362	0,732	0,63	83,86
21	5,40151	0,537	0,46	83,27
23	8,85181	0,361	0,4	90,23
24	8,74033	0,366	0,4	91,4
25	6,04067	0,499	0,46	91,56
26	8,84003	0,361	0,37	97,68
37	1,35896	0,855	0,82	95,71
38	3,42533	0,674	0,71	94,95
40	4,69778	0,582	0,6	97,04
42	7,36862	0,428	0,42	98,07
44	6,75239	0,46	0,42	90,57
45	7,35685	0,429	0,4	92,82
46	0,851875	0,907	0,87	95,8
48	5,24806	0,547	0,6	91,09
50	6,97027	0,448	0,45	99,6
51	8,58688	0,372	0,4	93,02
52	4,17893	0,618	0,65	95,09
53	6,9585	0,449	0,435	96,82
56	3,56706	0,663	0,63	94,73
57	4,27662	0,611	0,59	96,41
58	4,11239	0,623	0,61	97,89
59	6,90589	0,452	0,44	97,38
61	4,10062	0,624	0,59	94,29
63	7,60367	0,417	0,41	98,37
73	-1,98881	1,257	1,45	86,71
75	1,91323	0,802	0,9	89,15
77	3,98753	0,632	0,6	94,69
78	5,25205	0,546	0,53	96,93
79	1,33824	0,857	0,84	97,95
80	3,97576	0,633	0,63	99,57
83	-0,27583	1,032	1,06	97,38
84	2,00083	0,794	0,86	92,36
85	-0,28772	1,034	0,91	86,41
86	3,06299	0,703	0,62	86,64
88	-0,29949	1,035	0,88	82,38
90	5,32788	0,542	0,54	99,72
91	-2,50816	1,335	1,78	74,99
92	0,85648	0,906	1	90,61
94	0,830663	0,909	0,795	85,69
96	5,56491	0,527	0,515	97,68
98	4,18353	0,618	0,72	85,8
99	5,55314	0,528	0,58	90,97

**EK-5. Taguchi metodu ile elde edilen ve doğrulama deneyleri sonucunda elde edilen yüzey pürüzlülüğü sonuçlarının karşılaştırılması**

Çizelge 5.1. Doğrulama deneyleri sonucunda elde edilen yüzey pürüzlülük değerleri ve doğruluk oranları

Deney No.	Taguchi sonucu S/N oran	Taguchi ile elde edilen yüzey pürüzlülük değerleri	Deneyden elde edilen yüzey pürüzlülük değerleri	Doğruluk oranı (%)
2	-6,556	2,127	3,953	53,819
3	-14,778	5,481	2,075	264,166
4	1,442	0,847	0,815	96,066
5	14,159	0,196	0,540	36,278
7	-4,092	1,602	10,103	15,855
9	0,404	0,955	0,630	48,483
10	-16,124	6,400	6,423	99,655
11	-9,091	2,848	3,215	88,585
13	4,591	0,589	0,680	86,682
15	9,720	0,327	0,688	47,506
17	6,091	0,496	3,788	13,095
18	4,186	0,618	1,733	35,647
19	-27,806	24,565	4,085	601,351
21	-32,832	43,813	4,118	1064,061
23	1,775	0,815	1,723	47,326
24	-12,117	4,035	1,330	303,377
25	-12,625	4,278	4,043	94,177
26	-3,759	1,541	3,303	46,676
37	-23,068	14,236	9,843	55,360
38	-14,491	5,303	5,963	88,943
40	-2,353	1,311	1,300	99,148
42	7,787	0,408	0,370	89,733
44	0,691	0,924	0,343	269,642
45	2,254	0,771	0,225	342,879
46	-19,797	9,769	4,605	212,129
48	-9,025	2,826	4,720	59,880
50	3,812	0,645	0,318	203,086
51	11,691	0,260	0,878	29,663
52	-4,615	1,701	0,633	168,955
53	-1,722	1,219	0,353	345,893
56	-15,714	6,105	6,215	98,230
57	-19,821	9,796	7,153	63,041
58	0,276	0,969	0,483	200,768
59	5,002	0,562	0,733	76,755
61	-5,257	1,832	1,665	89,984
63	-4,639	1,706	1,313	70,025
73	-17,065	7,133	6,393	88,423
75	-15,745	6,127	6,480	94,549
77	7,720	0,411	0,443	92,920
78	4,971	0,564	0,333	30,305
79	-1,883	1,242	0,370	335,703
80	2,186	0,777	0,538	55,350
83	-12,070	4,013	8,138	49,318
84	-8,502	2,661	6,220	42,786
85	10,261	0,307	0,553	55,544
86	8,645	0,370	0,380	97,262
88	4,727	0,580	0,603	96,314
90	6,680	0,463	0,348	66,633
91	-9,474	2,976	6,868	43,339
92	-9,256	2,903	10,163	28,563
94	11,242	0,274	0,758	36,185
96	3,041	0,705	0,360	4,267
98	5,926	0,505	0,408	75,954
99	-2,493	1,332	0,343	389,029

**EK-6. Taguchi metodu ile elde edilen ve doğrulama deneyleri sonucunda elde edilen kesici takım sıcaklığı sonuçlarının karşılaştırılması**

Çizelge 6.1. Doğrulama deneyleri sonucunda elde edilen kesici takım sıcaklık değerleri ve doğruluk oranları

Deney No.	Taguchi sonucu S/N oranı	Taguchi ile elde edilen kesici takım sıcaklık değerleri	Deneyden elde edilen kesici takım sıcaklık değerleri	Doğruluk oranı (%)
2	-49,2010	288,435	291,9	98,81
3	-49,1397	286,407	289,8	98,83
4	-49,1049	285,264	289	98,71
5	-49,1250	285,923	284,2	99,39
7	-48,7879	275,041	287,7	95,60
9	-48,7467	273,738	276,4	99,04
10	-49,6613	304,135	299,4	98,42
11	-49,2024	288,483	300,6	95,97
13	-49,5853	301,486	295,7	98,04
15	-48,8925	278,372	281,7	98,82
17	-48,8094	275,722	279,3	98,72
18	-48,5755	268,395	273,5	98,13
19	-49,5203	299,236	299,4	99,92
21	-49,2336	289,520	291,2	99,42
23	-49,3363	292,965	284	96,84
24	-49,1576	286,998	279,1	97,17
25	-49,1273	286,000	282,8	98,87
26	-49,0193	282,466	274,2	96,99
37	-51,2282	364,259	289,2	74,05
38	-49,6330	303,146	299,9	98,92
40	-51,1522	361,087	344,5	95,19
42	-49,3173	292,326	287,2	98,22
44	-49,2401	289,736	290,9	99,60
45	-49,0003	281,849	277,4	98,40
46	-51,7358	386,182	330,6	83,19
48	-49,2493	290,046	298,3	97,23
50	-49,5857	301,498	310,4	97,13
51	-49,1734	287,520	288	99,83
52	-51,3429	369,099	364,8	98,82
53	-49,2687	290,693	292,3	99,45
56	-49,3498	293,422	310,4	94,53
57	-48,9927	281,601	302,2	93,18
58	-50,9971	354,695	351,9	99,21
59	-49,2739	290,867	317,7	91,55
61	-50,6801	341,984	298,2	85,32
63	-48,5997	269,145	273,4	98,44
73	-52,0692	401,292	381,5	94,81
75	-50,2282	324,645	323	99,49
77	-50,8912	350,395	337,4	96,15
78	-50,1522	321,818	289,7	88,91
79	-51,6762	383,541	394,4	97,25
80	-50,5742	337,838	339,4	99,54
83	-50,7023	342,859	406,9	84,26
84	-49,7907	308,699	382,7	80,66
85	-52,2074	407,727	392,6	96,15
86	-50,6263	339,873	327,8	96,32
88	-51,8904	393,115	444	88,54
90	-49,3977	295,044	322,5	91,49
91	-53,7317	485,943	496,7	97,83
92	-52,5016	421,774	450,3	93,67
94	-53,6557	481,712	444,2	91,56
96	-51,5692	378,844	397,2	95,38
98	-52,1086	403,117	396	98,20
99	-51,2522	365,267	384	95,12

## ÖZGEÇMİŞ

### Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : KÜTÜKDE, Kenan  
 Uyuğu : T.C.  
 Doğum tarihi ve yeri : 10/01/1975 Kangal  
 Medeni hali : Evli  
 Gsm : 0 (505) 230 81 83  
 e-posta : [yto.kenan@gmail.com](mailto:yto.kenan@gmail.com)



Eğitim Derecesi	Okul/Program	Mezuniyet yılı
Yüksek Lisans	Gazi Üniversitesi/ Fen Bilimleri Ens. Makine Eğitimi Anabilim Dalı	2002
Lisans	Gazi Üniversitesi Teknik Eğitim Fak. Makine Eğitimi Bölümü	1998
Lise	Selçuklu Teknik ve EML	1994

İş Deneyimi, Yıl	Çalıştığı Yer	Görev
2006-2013	Gazi Endüstri Meslek Lisesi	Makine Teknolojileri Öğretmeni
2008-2012	Orta Öğretim Projesi	Makine Teknolojileri Öğretmeni
2006-2007	Gazi Üniversitesi Mak. Res. Böl.	Öğretim Görevlisi
2005-2008	MEGEP (Mesleki Eğt. Geliştirme Projesi)	Makine Teknolojileri Öğretmeni
2004-2006	Yenimahalle Zeynep-Salih Alp Kız Teknik ve Meslek Lisesi	Tesviye Öğretmeni
2005-2006	Gazi Üniversitesi Mak. Res. Böl.	Öğretim Görevlisi
2004-2005	Gazi Üniversitesi Atatürk MYO	Öğretim Görevlisi
2003-2004	Gazi Üniversitesi Atatürk MYO	Öğretim Görevlisi
2003-2004	Haymana Teknik ve EML	Tesviye Öğretmeni
2002-2003	Yenimahalle Teknik ve EML	Tesviye Öğretmeni
1999-2002	Düzce Teknik ve EML	Tesviye Öğretmeni
1998-1999	Ardeşen Çok Programlı Lise	Tesviye Öğretmeni (Vekil Öğretmen)

**Yabancı Dil**

İngilizce

**Yayınlar**

1. Taşkesen, A., Kütükde, K., (2013). Optimization of the drilling parameters for the cutting forces in B<sub>4</sub>C-reinforced Al-7XXX-series alloys based on the Taguchi method, *Materials and Technology*, 47 (2), 169–176,
2. Taskesen, A., Kütükde, K. (2013). Analysis and optimization of drilling parameters for tool wear and hole dimensional accuracy in B<sub>4</sub>C reinforced Al-alloy, *Transactions of Nonferrous Metals Society*, 23, 2524–2536.
3. Taskesen, A., Kütükde, K. (2013). Experimental investigation and multi-objective analysis on drilling of boron carbide reinforced metal matrix composites using grey relational analysis, *Measurement*, 47, 321–330.

**Hobiler**

Yüzme, Ata binme, Bowling, Bilgisayar teknolojileri



*GAZİ GELECEKTİR...*





*Gazi gelecektir...*

