



**EURO 7 NOZUL İÇİN TAKIM GEOMETRİSİ GELİŞTİRİLMESİ VE
PERFORMANSLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ**

Hakan KÜÇÜKTÜRK

**DOKTORA TEZİ
İMALAT MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

OCAK 2022

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.

Hakan KÜÇÜKTÜRK

14/01/2022

EURO 7 NOZUL İÇİN TAKIM GEOMETRİSİ GELİŞTİRİLMESİ VE PERFORMANSLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ

(Doktora Tezi)

Hakan KÜÇÜKTÜRK

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Ocak 2022

ÖZET

Dizel motorlarda emisyon oranlarını düşürmek için yakıt tüketimini minimum seviyelerine indirmek hedeflenmekte ve bu amaçla yeni tip enjektör ve dizel motor parçaları geliştirilmektedir. Bunun yolu ilk olarak enjektör ve nozullardaki sıkıştırma oranını yani basıncı yüksek seviyelere çıkarmaktan geçmektedir. Euro 7 emisyon normlarının gereklerini karşılayacak nozul tasarımının ihtiyaç gösterdiği kompleks geometri, yüksek hassasiyet ve yüksek dayanım ihtiyacı, mevcut üretim platformlarında üretimlerini güçleştirmiş, enjektör üreticisi küresel aktörleri ciddi problemlerle karşı karşıya bırakmıştır. Nozul üreticisi firmalar, yüksek maliyetli makine parkına yatırım yapmaktan çok mevcut üretim platformuna uygun takımlama sistemlerinin geliştirilmesine ihtiyaç duymuşlardır. Bu çalışmada, Euro 7 nozul üretimi için gerekli ilave takım ve buna bağlı ilave taret kapasitesi ihtiyacını ortadan kaldırarak mevcut talaşlı imalat platformlarının kullanılmasını sağlamak için birleştirilmiş takım uygulaması ihtiva eden yeni bir takımlama sistemi tasarımı ve üretimi gerçekleştirilmiş, nümerik ve deneysel çalışmalarla Euro 7 nozul gereksinimlerine uygunluğu araştırılarak en uygun kesme parametrelerinin belirlenmesi sağlanmıştır. Bu kapsamda prototip imalatı yapılmış olan altı adet takım ile ön deneyler gerçekleştirilmiş, deney çıktıları doğrultusunda dört parametre seti belirlenmiştir. Bu parametre setleri ile yapılan deneyler sonucunda en iyi sonuçları veren parametre seti ile performans deneylerine devam edilmiştir. Performans deneyleri sonucunda takım aşınması ve yüzey pürüzlülüğü değerleri ölçülmüş ve nozul yüzeylerindeki ortalama yüzey pürüzlük değeri $Ra=0,34 \mu m$ olarak tespit edilmiş ve istenilen yüzey kalitesinin elde edildiği gözlenmiştir. Takım aşınması için takım ömürleri hedeflerine ulaşmak amacıyla kabul edilen ($<0,06 \text{ mm}$) değerlerden çok daha düşük aşınma sonuçları elde edilmiştir. Üretilen takımlarla sahada yapılan ömür testleri sonucunda takım ömürlerinin beklenen değerlerin üstünde ya da çok yakın değerler olduğu görülmüştür. Takım aşınması ve yüzey pürüzlülük değerleri üzerinden yapılan matematiksel modeller de takımların takım ömür hedeflerine ulaşabileceğini göstermiştir. Performans testleri sonucunda, tasarım ve üretim faaliyetlerinin başarılı olduğu ve geliştirilen takımlandırma sistemi ile mevcut üretim platformlarının Euro 7 Nozul üretimi için kullanılabileceği görülmüştür.

Bilim Kodu : 91438
Anahtar Kelimeler : Dizel motorlar, enjeksiyon sistemleri, Euro 7 Normları, Nozul Üretimi, Takımlandırma
Sayfa Adedi : 93
Danışman : Prof. Dr. Ulvi ŞEKER

EXPERIMENTAL OPTIMIZATION OF DRILLING PARAMETERS IN TOOLING FOR EURO 7 NOZZLE PRODUCTION

(Ph. D. Thesis)

Hakan KÜÇÜKTÜRK

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

January 2022

ABSTRACT

In order to reduce emission rates in diesel engines, it is aimed to reduce fuel consumption to minimum levels. For this purpose, new types of injectors and diesel engine parts are being developed. The way to do this is to first increase the compression ratio, that is, the pressure, in the injectors and nozzles to high levels. The complex geometry, high precision and high strength required by the nozzle design to meet the requirements of Euro 7 emission norms have made their production difficult in existing production platforms, and injector manufacturer global actors have faced severe problems. Nozzle manufacturers needed to develop tooling systems suitable for their existing production platform rather than investing in high-cost machinery. In this study, a new tooling system design and production was carried out, which includes the application of a combined tool to enable the use of existing machining platforms by eliminating the need for additional tooling and the additional turret capacity required for the production of Euro 7 nozzles. The adequacy of the tooling system was investigated with numerical and experimental studies according to Euro 7 nozzle requirements and the most suitable cutting parameters were determined. In this context, preliminary experiments were carried out with six sets of prototypes, and four parameter sets were determined in line with the test outputs. As a result of the experiments with these parameter sets, performance experiments were continued with the parameter set that gave the best results. After the performance tests, tool wear and surface roughness values were measured, and the average surface roughness value on the nozzle surfaces was determined as $Ra=0.34 \mu m$, and it was observed that the desired surface quality was obtained. Wear results for tool wear are much lower than the accepted ($<0.06 mm$) values to achieve tool life targets. As a result of the life tests carried out in the field with the produced tools, it has been observed that the tool lifetimes are above or very close to the expected values. Mathematical models based on tool wear and surface roughness values have also shown that tools can achieve tool life goals. As a result of the performance tests, it was seen that the design and production activities were successful, and the developed tooling system and existing production platforms could be used for Euro 7 nozzle production.

Science Code : 91438
Key Words : Diesel Engines, injection systems, Euro 7 Norms, Nozzle
Page Number : 93
Supervisor : Prof. Dr. Ulvi ŞEKER

TEŞEKKÜR

Tez hazırlama sürecimin tamamında bilgi ve tecrübeleriyle çalışmalarına yön veren çok değerli danışmanım Prof. Dr. Ulvi ŞEKER’e, doktora yapmam konusundaki teşvikleri ve doktora boyunca sağladıkları tüm olanak ve desteklerinden dolayı değerli Hocam ve Ağabeyim Doç. Dr. Gökhan KÜÇÜKTÜRK’e, çalışmam sırasında yardımlarını esirgemeyen değerli Hocalarım Prof. Dr. İhsan KORKUT ve Prof. Dr. Mustafa GÜNAY’a, tezime sağladığı katkılarından dolayı Dr. Şükran KATMER’e, deneysel çalışmalarda yardımlarından dolayı Dr. Öğr. Üyesi Güven MERAL ve Arş. Gör. Bahattin YILMAZ’a, her türlü teknik desteği sunan değerli arkadaşım Duran KAYA’ya, çalışmalarımın her aşamasında yanımda olan ve hiçbir zaman manevi desteğini benden esirgemeyen aileme bana duydukları güven, verdikleri destek, gösterdikleri anlayış ve sevgi için sonsuz teşekkürlerimi sunuyorum. Kesici takımların geliştirilmesi ve üretilmesi sırasında proje ortağı olarak katkıları sebebiyle Karcan Kesici Takım Sanayi ve Ticaret Limited Şirketi’ne ve Ar-Ge sorumlusu Sayın Çağlar YAVAŞ’a teşekkür ederim. Bu tez kapsamında her türlü imkanı sağlayan Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi İmalat Mühendisliği Bölüm Başkanlığına teşekkürlerimi sunarım.

Bu çalışmayı “TÜBİTAK 1501- Sanayi Ar-Ge Projeleri Destekleme Programı” kapsamında “3170550” No’lu proje ile destekleyen TÜBİTAK-TEYDEB’e teşekkür ederiz.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	ix
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	x
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xiii
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	3
2.1. Matkap Geometrisi İle İlgili Yapılan Araştırmalar	3
2.2. Delik Delme İle İlgili Yapılan Araştırmalar	7
2.3. Östenitik Paslanmaz Çeliklerin İşlenmesi İle İlgili Yapılan Çalışmalar.....	11
2.4. Literatür Araştırmasının Değerlendirilmesi	19
3. KURAMSAL TEMELLER	21
3.1. Delme Teknolojisi	21
3.2. Delme Parametreleri.....	22
3.3. Delik Delme İşlemlerinde Kesme Kuvvetleri Ve Moment.....	24
3.4. Euro 7 Normları	26
3.5. Dizel Enjektör Nozul Tasarımı ve Üretimindeki Değişiklikler	29
4. MATERYAL VE METOT	33
4.1. Analitik Çalışmalar	33
4.1.1. Takım tasarımı	34
4.1.2. Delme analizleri	34

	Sayfa
4.2. Deneysel Çalışmalar.....	35
4.2.1. Malzeme bilgisi.....	36
4.2.2. Takım imalatı / geometri ve ölçü kontrolü.....	36
4.2.3. Ön deneyler	41
4.2.4. İşleme parametrelerinin belirlenmesi	41
4.2.5. Performans deneyleri	47
4.2.6. Ömür testleri.....	50
5. BULGULAR VE TARTIŞMA.....	53
5.1. Analitik Bulgular.....	53
5.2. Ön Deneylerden Elde Edilen Bulgular.....	63
5.3. İşleme Parametreleri Deneylerinden Elde Edilen Bulgular	69
5.4. İlerleme Kuvveti ve Moment	71
5.5. Doğrulama Ölçümleri.....	76
5.6. Matematiksel Modelleme ve Deneysel Sonuçların Karşılaştırılması	78
6. SONUÇ VE ÖNERİLER	83
KAYNAKLAR	87
ÖZGEÇMİŞ	93

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 3.1. Dizel motorlu binek taşıtları için AB emisyon standartları (g/km).	27
Çizelge 4.1. AISI 304L östenitik paslanmaz çeliğin kimyasal kompozisyonu	36
Çizelge 4.2. Rollomatic NP5 CNC taşlama tezgâhı teknik özellikleri	38
Çizelge 4.3. TTB silindirik taşlama tezgâhı teknik özellikleri	39
Çizelge 4.4. ARION IMM-1100 dik işleme merkezinin teknik özellikleri	42
Çizelge 4.5. Pilot testlerdeki işleme parametreleri	43
Çizelge 4.6. Parametre seti 1, 2, 3.....	43
Çizelge 4.7. Belirlenen parametre setleri için 1. 2. ve 3. takımların başarı durumları ...	44
Çizelge 4.8. Belirlenen parametre setleri için 4. 5. ve 6. takımların başarı durumları ...	45
Çizelge 4.9. Parametre seti 4.....	46
Çizelge 4.10. KISTLER 9272 dinamometrenin teknik özellikleri	48
Çizelge 5.1. Pilot testlerde kırılan takımlar için ortalama kuvvet ve moment değerleri	68
Çizelge 5.2. Delik sayısına göre takım aşınma değerleri.....	78
Çizelge 5.3. Her bir takım için hesaplanan R2 değerleri	79
Çizelge 5.4. Takım ömür hedefleri	81

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 3.1. Delik delme işleminin şematik gösterimi.	22
Şekil 3.2. Matkap ucunu etkileyen kuvvetler.....	25
Şekil 3.3. (a) Euro 6 ve (b) Euro 7 nozul tipleri	32
Şekil 4.1. Euro 7 nozul takımlandırması.....	34
Şekil 4.2. Deform-3D sonlu elemanlar metodunun aşamaları.....	35
Şekil 4.3. (a) Dijital mikrometre ile çap ve (b) özel V yataklı manuel salgı kontrolü....	37
Şekil 4.4. Rulo baskı ve V blok	37
Şekil 4.5. Smart Grinder programında hazırlanan taşlama simülasyon görüntüleri	38
Şekil 4.6. Yüzey pürüzlülüğü ölçüm cihazı	39
Şekil 4.7. Oluşturulan taş seti örnekleri	40
Şekil 4.8. Üretilen takımların görseli.....	41
Şekil 4.9. (a) İş miline bağlı takım salgı kontrolü ve (b) malzeme yüzeyinin temizlenmesi.....	42
Şekil 4.10. Parametre seti denemeleri için 2. takım (a) ve 3. takım(b) kırılması	46
Şekil 4.11. Parametre seti 3 denemelerinde 4. takım kırılması (a) parametre seti 2 denemelerinde 6. takım kırılması (b)	47
Şekil 4.12. İş parçası üzerinde delik tasarımı (a) ve nihai nozullar (b)	46
Şekil 4.13. Delik giriş (a) ve dip çap kontrolü (b)	47
Şekil 4.14. Telli elektro erozyon ile kesim sonrası nozulların görünümü	47
Şekil 4.15. Performans testleri sonucu elde edilen delikler	48
Şekil 4.16. Ölçümde kullanılan bilgisayar ve Kistler 5070 amplifier.....	49
Şekil 4.17. Dinamometreye bağlanmış bağlama kalıbı ve dinamometre koruma	49
Şekil 4.18. DynoWare programındaki grafik görüntüsü.....	50

Şekil	Sayfa
Şekil 5.1. Deform-3D iş parçası modeli.....	54
Şekil 5.2. Kesici takım tersine mühendislik yöntemi ile inşası	55
Şekil 5.3. Kesici takımların CATIA V5 yazılımı ile tasarlanması	56
Şekil 5.4. Kesici takım ve iş parçası çiftinin SEA ağ görüntüsü	56
Şekil 5.5. Malzeme seçim ekranı ve kütüphanesi	57
Şekil 5.6. Simülasyon parametre ekranı	58
Şekil 5.7. Kesici takım ve iş parçası sınır koşulları	59
Şekil 5.8. CPA-08-N1 takım geometrisi	59
Şekil 5.9. Deform 3D programında takım geometrisinin tanımlanması.....	60
Şekil 5.10. Takım geometrisinin meş yapısının oluşturulması	60
Şekil 5.11. Takım konumunun belirlenmesi	61
Şekil 5.12. Takım – İş parçası konumlandırılması	61
Şekil 5.13. Takım ilerlemesinin ayarlanması.....	62
Şekil 5.14. Takım-iş parçası ısıl analizleri ve takım kuvvet analizi	63
Şekil 5.15. Hedef malzeme üzerindeki pilot takım denemeleri	65
Şekil 5.16. (a) Kırılan ilk takım, (b) uç kısmı ve (c) talaşı	65
Şekil 5.17. (a) Kırılan ikinci takım ve (b) talaşı	66
Şekil 5.18. (a) Üçüncü takımın talaş sarması, (b) talaş sarılan takım ve (c) talaş	66
Şekil 5.19. Birinci takım için (a) 640, (b) 300 ve (c) 150 m/dk ilerleme hızlarında dinamometreden elde edilen kuvvet ve moment grafikleri.....	67
Şekil 5.20. İkinci takım için 130 m/dk ilerleme hızında dinamometreden elde edilen (a) kuvvet ve (b) moment grafikleri	67
Şekil 5.21. Üçüncü takım için 100 m/dk ilerleme hızında dinamometreden elde edilen (a) kuvvet ve (b) moment grafikleri	68
Şekil 5.22. Elli delik sonrası kesme hızına bağlı takım aşınmalarındaki değişim.....	69
Şekil 5.23. Belirlenen parametre setlerinde yüzey pürüzlülüğündeki değişim.....	70

Şekil	Sayfa
Şekil 5.24. Takım 1 için delik sayısına bağlı moment ve ilerleme kuvvetlerindeki değişim	71
Şekil 5.25. (a) Takım 2 için 1. kademedeki delik sayısına bağlı moment ve ilerleme kuvvetlerindeki değişim (b) Takım 2 için 2. kademedeki delik sayısına bağlı moment ve ilerleme kuvvetlerindeki değişim	72
Şekil 5.26. (a) Takım 3 için 1. kademedeki delik sayısına bağlı moment ve ilerleme kuvvetlerindeki değişim (b) Takım 3 için 2. kademedeki delik sayısına bağlı moment ve ilerleme kuvvetlerindeki değişim	73
Şekil 5.27. Takım 4 için delik sayısına bağlı moment ve ilerleme kuvvetlerindeki değişim	74
Şekil 5.28. Takım 5 için 1. kademedeki delik sayısına bağlı moment ve ilerleme kuvvetlerindeki değişim (b) Takım 5 için 2. kademedeki delik sayısına bağlı moment ve ilerleme kuvvetlerindeki değişim	75
Şekil 5.29. Takım 6 için delik sayısına bağlı moment ve ilerleme kuvvetlerindeki değişim	76
Şekil 5.30. Ömür deneylerinde delik sayısına bağlı olarak takım aşınmalarındaki değişim	77
Şekil 5.31. Ömür deneylerinde delik sayısına bağlı nozul yüzey pürüzlülüğündeki değişim	77
Şekil 5.32. Deneysel ve Teorik olarak takımların delik sayısına bağlı takım aşınmalarındaki değişim.....	78
Şekil 5.33. Delik sayısına bağlı olarak yüzey pürüzlülüğündeki değişim	80
Şekil 5.34. Seri üretim için hedef malzeme (a), tezgahta bağlama ve salgı kontrolü (b).....	80
Şekil 5.35. Seri üretilmiş ve kesit görüntüsü alınmış nozul geometrisi.....	81

SİMGELER VE KISALTMALAR

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

Simgeler

Açıklamalar

ψ	Uç açısı ($^{\circ}$)
d	Takım çapı (mm)
F_c	Esas kesme kuvveti (N)
F_t	İlerleme kuvveti (N)
F_r	Radyal kuvvet (N)
F_y	Teğetsel kuvvet (N)
K	Delinen malzemeye göre belirlenmiş sabit değer
M_z	Burulma momenti (Nm)
R_a	Ortalama yüzey pürüzlülüğü (μm)
S	İlerleme miktarı (mm/dev)
V_c	Kesme hızı (mm/dk)
V_f	İlerleme hızı (mm/dk)

Kısaltmalar

Açıklamalar

CAD	Computer Aided Design (Bilgisayar Destekli Tasarım)
GPT	General Purpose Twist (Genel Amaçlı Helisel)
HSS	High Speed Steel (Yüksek Hız Çeliği)

1. GİRİŞ

Dizel motorların gelişim sürecinde yakıt sistemleri elemanları, yakıt kalitesi, enjektör püskürtme açıları, yanma odası gibi bölümlerde gelişmeler olmuştur ve bu gelişmeler de dizel motorların teknik olarak üst seviyelere çıkmasıyla sonuçlanmıştır. Verimin daha üst seviyelere çıkması için enjektör sistemleri üzerindeki geliştirme faaliyetleri sürmektedir. En önemli çalışmalar ise enjeksiyon iç basıncını arttırmak için enjektör sisteminin kademelerini geliştirmek üzerine olmuştur.

Ayrıca dizel motorlu taşıtlar, dizel motorların termal verimlerinin daha yüksek olması sebebiyle, benzin motorlu taşıtlara göre daha az CO ve yanmamış HC açığa çıkarırlar. Fakat dizel motorlarda açığa çıkan PM ve NOx emisyonları, benzin motorlu taşıtlara göre daha yüksektir [1]. Bu etkileri azaltmak için çevreye daha duyarlı motor sistemlerinin geliştirilmesi ve kullanılması gerekmektedir. Bu gelişmeler de maliyet artışlarını beraberinde getirmektedir. Gelişmiş dizel güç aktarma sistemi ile ilgili ek maliyet, baz motor üzerinden 400 € - 900 € arasında değişmektedir. Yüksek iç akış dolayısıyla düşük emisyon değerleri için nozul kanal ve nozul deliği kısımlarının pürüzsüz olarak üretilmesi gerekmektedir. Kanal içinde olan yüzey sorunları hava ve yakıt karışımında iç enjektör akışından dolayı sorunlara neden olacaktır. Emisyon değerlerini düşürmek için nozul kanalının yüksek yüzey kalitesiyle işlenmesinin oldukça önemli olduğu bilinmektedir [2].

Euro 7 nozulların üretimi Euro 6 nozullara göre bazı sorunları beraberinde getirmiştir. Euro 7 nozulların dört kat daha yüksek yüzey kalitesi gereksinimi, yakıtın daha rahat akması için nozul iç bölgesinde açılı yerine daha radyuslu geçişler açılması ve bu ölçülerin de dört kat düşük toleranslarla üretilmesi hedeflendiğinden üretimi zordur. Euro 7 nozul geometrisinde, özellikle yüksek hassasiyet ve yüzey kalitesi gerektiren değişikliklere ihtiyaç duyulmaktadır. Bu zor hedeflere mevcut talaşlı imalat platformları cevap verememektedir. Nozul üreticilerinin 2 farklı üretim şekli vardır. İlki takımları da aktif olarak kullanan “dönen takım/dönen iş parçası” uygulamasıdır. Bu, yıldız şeklinde döner tablalı bir üretim yöntemi olduğundan en uzun süren operasyon süresi parçanın çıkış süresini ifade etmektedir. Diğer yöntemde ise sabit takım/döner iş parçası uygulaması söz konusu olup takımlama için en fazla 9 takımlık bir taret mevcuttur. Taretteki istasyonlardan tornalama işlemleri dışında maksimum altı istasyonun delik takımları için kullanılması mümkündür. Bu yöntemde

diğerine göre daha yavaş üretim yapılsa da hassasiyet ve yüzey kalitesi anlamında daha rijit ve hassas üretim gerçekleştirilmektedir. Bu yöntemin en büyük dezavantajı ise takım istasyon sayısının sınırlı olmasıdır. Yeni Euro 7 tipindeki gereksinimler ancak bu ikinci üretim yöntemi ile sağlanabilmektedir. Bundan dolayı Euro 7 için tasarlanacak olan takımların sayısı maksimum 9, delik operasyonları için de maksimum 6 adet olmalıdır. Oysaki Euro 7 nozul geometrisinde istenen profilin elde edilebilmesi için 8 ayrı delik işleminin gerçekleştirilmesi gerekmektedir. Bu kapsamda, yeni nesil Euro 7 nozulların üretiminde Euro 6 nozul üretiminde kullanılan takım tezgâhlarının kullanılabilmesi için takım sayısını minimize ederek en fazla 6 delik takımı kullanılarak üretimin sağlanabileceği bir takımlandırma sisteminin geliştirilmesi ve performanslarının laboratuvar ve saha testleri ile doğrulanması hedeflenmiştir.

Bu kapsamda prototip imalatı yapılmış olan 6 adet takım ile ön deneyler gerçekleştirilmiş, deney çıktıları doğrultusunda 4 parametre seti belirlenmiştir. Bu parametre setleri ile yapılan deneyler sonucunda en iyi sonuçları veren parametre seti ile performans deneylerine devam edilmiştir. Performans deneyleri sonucunda takım aşınması ve yüzey pürüzlülüğü değerleri ölçülmüş ve nozul yüzeylerindeki ortalama yüzey pürüzlük değeri $Ra=0,34 \mu m$ olarak tespit edilmiş ve istenilen yüzey kalitesinin elde edildiği gözlenmiştir. Takım aşınması için takım ömürleri hedeflerine ulaşmak amacıyla kabul edilen ($<0,06 mm$) değerlerden çok daha düşük aşınma sonuçları elde edilmiştir. Üretilen takımlarla sahada yapılan ömür testleri sonucunda takım ömürlerinin beklenen değerlerin üstünde ya da çok yakın değerler olduğu görülmüştür. Takım aşınması ve yüzey pürüzlülük değerleri üzerinden yapılan matematiksel modeller de takımların takım ömür hedeflerine ulaşabileceğini göstermiştir. Performans testleri sonucunda, tasarım ve üretim faaliyetlerinin başarılı olduğu ve geliştirilen takımlandırma sistemi ile mevcut üretim platformlarının Euro 7 Nozul üretimi için kullanılabileceği görülmüştür.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Dizel motorlarda karbon emisyon oranlarını ve yakıt tüketimini düşürmek için yeni tip motor parçaları geliştirilmektedir. Kabul edilen yeni normlarla birlikte üretilecek olan Euro 7 nozullarda bahsedilen değerlerin yakalanması için sıkıştırma oranının yüksek olması gerekmekte ve bunun sağlanabilmesi için Euro 6 tipi nozullara göre 4 kat daha yüksek yüzey kalitesi, yakıtın daha rahat akması için nozul iç bölgesinde daha radyuslu geçişler ve tüm bu ölçülerin de aynı zamanda 4 kat daha dar toleranslı ve arzu edilen yüzey pürüzlülük değerlerinde üretilmesi gerekmektedir. Bu koşullara uygun dizel enjektör parçaları için ise yüksek dayanımlı malzemelere ihtiyaç duyulmaktadır. Son geliştirilen ürünlerde Cr ve Ni alaşımlı malzeme kullanma eğilimi artmaktadır. Bu eğilim, parçanın basınca karşı dayanımını ve bu basınçlar altındaki sürtünme-aşınma davranışlarını iyileştirse de parçanın ihtiyaç duyulan yüksek hassasiyete sahip formlarda talaşlı imalatını oldukça zor bir hale getirmektedir. Özellikle konvansiyonel tezgahlarla optimum takım sayısı ile arzu edilen toleranslarda üretimin ekonomik olarak yapılması beklenmektedir. Bu alanda takım tasarımının geliştirilmesi ve buna bağlı olarak işleme parametrelerinin teorik ve deneysel çalışması literatür çalışmalarında oldukça önemli bir yer tutmaktadır. Özellikle delik delme ile ilgili teorik çalışmalar, takım malzemesi, çentik açısı, matkap çapı, kaplama gibi takım geometrisini ve kesme kuvvetlerini etkileyen parametreler için matematiksel modeller geliştirmeye ve bu parametre değerlerinin optimizasyonuna yönelmiştir. Yapılan literatür araştırmasında Euro 7 nozul geometrilerinin işlenmesi ile alakalı herhangi bir çalışmaya rastlanmamıştır. Bu kapsamda yapılan çalışmalar çalışmamızda “matkap geometrisi ile ilgili yapılan araştırmalar”, “delik delme ile ilgili yapılan araştırmalar” ve “östenitik paslanmaz çeliklerin işlenmesi ile ilgili yapılan çalışmalar” başlıkları altında incelenmiştir.

2.1. Matkap Geometrisi İle İlgili Yapılan Araştırmalar

Matkaplar en yaygın metal işleme takımları olmasına rağmen, talaş kaldırma mekanizması diğer yöntemlere göre daha karmaşık ve anlaşılması zordur. Delik delme işlemi ve delme performansını etkileyen birçok faktör mevcuttur. Bunlardan biri de matkap geometrisidir. Matkap uç geometrisi ile buna bağlı olarak oluşturulan matkap kanal formları matkabın en kritik tasarım kriterleridir. Bu geometrilerdeki en küçük değişiklik dahi talaş kaldırma performansını önemli ölçüde etkilemektedir [3]. Bu kapsamda literatürde araştırmacılar

tarafından yapılan birçok çalışma mevcuttur.

Sui ve ark. [4], yapmış oldukları çalışmalarında yanlış hizalamayı azaltmak, sıkı toleransı ve işleme verimliliğini artırmak için, alüminyum ve alüminyum alaşım yığınlarının tek adımda delinmesi sırasında yeni bir çift koni entegre takım geliştirmiş ve deneysel olarak araştırmışlardır. Bu özel takım geometrisinin, delme, raybalama ve havşa açma işlemlerini aynı anda tamamlayabildiği belirtilmiştir. İşleme özellikleri, bir dizi deney yoluyla standart bir döner matkap (referans matkap) ile karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Deneysel sonuçlar ile sırasıyla delme, raybalama ve havşa açma işlemleri için takım geometrisinin kesme kuvveti ve titreşim sinyalleri üzerindeki etkisi vurgulanmıştır. Sonuçlar, çift koni entegre matkabın, daha uzun kesme kenarı nedeniyle referans matkaptan biraz daha büyük ilerleme kuvveti indükleyebileceğini göstermiştir. Ayrıca farklı prosesler ve kesme varyasyonları tarafından üretilen talaş morfolojileri de karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir. Daha büyük bir ilerleme hızına sahip çift koni matkabın, daha küçük talaşlar üretmeye eğiliminde olduğu gözlenmiştir. Ayrıca, çift koni matkap, referans matkapla karşılaştırıldığında daha küçük çapaklar, daha iyi yüzey bütünlüğü ve daha az takım aşınması sağlayabildiği belirtilmiştir. Bu çalışmadan elde edilen bilgilerin, tek adımda delme işleminin daha iyi anlaşılmasını ve daha yüksek verimlilik ve daha iyi delik kalitesi elde etmek için rehberlik sağlayabileceği vurgulanmıştır.

Chen ve ark. [5], split uçlu matkaplarda ilerleme kuvvetlerini ve momenti tahmin etmek için split parametrelerini de içeren bir matematiksel model geliştirmişlerdir. Çentik açısının, ilerleme kuvvetleri ve moment üzerindeki etkisi, önerilen kuvvet modelinden de çıkarılmıştır. Bu matematiksel modelden elde ettikleri minimum kuvvet ve momentleri referans olarak optimum split-uçlu matkap geometrisini belirlemeye çalışmışlardır. Yapılan deneysel çalışmada çentik açısı değişiminin matkap ucuna etkiyen kuvvet ve momentlerin etkisini incelemişlerdir. Yaptıkları deneylerde iş parçası olarak 180x40mm boyutunda JIS S45C karbon çelik iş parçası ve 4 farklı çentik açısına sahip (65° , 60° , 55° , $57,7^\circ$) 8 mm çapında split uçlu matkaplar kullanılmıştır. Devir sayısı 1030 dev/dk, ilerleme oranı 0.12 mm/dev, delik derinliği 20 mm de sabit tutulmuştur. Yapılan deney sonunda hem ilerleme kuvvetleri hem de tork için deney sonuçlarına ve son noktadaki maksimum yer değiştirme ve maksimum gerilimin hesaplanan değerlerine göre, çentik açısının optimal değerini yaklaşık $57,7^\circ$ olarak tespit etmişlerdir.

Audy [6], sürekli delme işlemlerinde geliştirilmiş matkap performansının başarısının, büyük ölçüde, takım yüzey kaplamaları ve matkap geometrisinin modifikasyonları, yani matkap ağızları ve keski kenarı boyunca çentik açısı dağılımlarının optimizasyonu gibi önemli ilerlemelere dayandığını belirtmişlerdir. Çalışma, matematiksel bir bakış açısıyla, geometrik noktalar ile kesme kuvvetleri ve güç tarafından değerlendirilen performans ölçümleri arasındaki ilişkiyi belirlemeye ve tanımlamaya odaklanmış, sistematik- bilgisayar destekli bir çalışmanın sonuçlarını sunmaktadır. Tork ve güç üzerinde delme parametrelerinin tahmin edilen etkilerini inceleyen bir çalışma sunulmuştur. Sonuçlar, modern ticari takım yüzey kaplamaları ve iş parçası malzemelerinin farklı tipleri için ortaya konmuştur.

Audy [7], başka bir çalışmada, matematiksel bir bakış açısından, genel amaçlı helisel (GPT) matkaplarla Tip Bisalloy 360 çelik iş parçası malzemesinin delinmesinde, matkap uç geometrik özellikleri ile kesme kuvvetleri (ilerleme ve tork) ve kesme gücü açısından değerlendirilen performans ölçümleri arasındaki ilişkinin belirlenmesi ve tanımlanması üzerine odaklanmış, sistematik - bilgisayar destekli bir çalışmanın sonuçlarını sunmuştur. Mevcut çalışma, GPT matkaplarının delme performanslarını karşılaştırırken deneysel test ihtiyacını ortadan kaldırmak için yenilikçi bir tahmin stratejisi sunmaktadır. Yazılım altı matkap uç geometrik özelliklerini (D , $2W$, δO , ψ , CIO ve $2P$) değiştirirken matkap uçları ve keski kenar bölgeleri boyunca eğim açısı dağılımlarını analiz etmek ve delmede ilerleme, tork ve kesme gücü üzerindeki etkileri incelemek için gelişmiş bir bilgisayar destekli model kullanmaktadır. Matkap uç geometrik özelliklerinin değiştirilmesiyle kesme performansının optimizasyonunun kolaylaşacağı beklenmektedir.

Wang ve Zhang [8], yüksek dayanımlı çeliklerin delinmesi için modifiye edilmiş bir delme noktası tasarımına ilişkin bir çalışma sunulmuştur. Modifiye edilen matkap uç tasarımının, tüm ağızlarda ve kesici kenarın çevresinde boşaltılmış uçta pozitif normal talaş açısı verdiği bir geometrik analizde gösterilmiştir. Bu matkap geometrisinin kesme kuvvetlerini ve torku azaltması ve dolayısıyla yüksek dayanımlı çeliklerin delinmesinde olası matkap kırılmalarını azaltmasının beklendiği belirtilmiştir. Bir ASSAB 4340 yüksek gerilimli çeliğin 7–13 mm titanyum nitrit (TiN) kaplamalı yüksek hız çeliği (HSS) matkaplarla delinmesine yönelik deneysel bir çalışma, modifiye matkapların ilerlem kuvvetini % 46,9 kadar azaltabildiğini göstermiştir. Buna karşılık gelen kesme koşullarında helisel matkaplarda ortalama tork azalması %13,2'dir. Matkap ömrü testleri de gerçekleştirilmiş ve modifiye edilmiş matkapların geleneksel helisel matkaplar üzerindeki üstünlüğünü doğrulanmıştır. Bazı

durumlarda, geleneksel matkaplar iş parçasının içinde kırılırken, modifiye edilmiş matkapların aynı kesme koşullarında çok iyi performans gösterdiği belirtilmiştir.

Ema [9], düz ağızlı helisel matkapların kesme performansı üzerine uç geometrisinin etkilerini sistematik bir şekilde incelemiştir. Farklı öz kalınlıkları, uç, boşluk ve helis açıları ve kenar uzunlukları (zırh genişliği) olan birçok matkap kullanılmış ve delme işleminde tork ve ilerleme kuvveti ölçülmüştür. Deney sonuçları varyans analizi kullanılarak değerlendirilmiştir. Tork, öz kalınlık ve kenar uzunluğu ile önemli ölçüde artarken ve helis açısı ile azaldığı tespit edilmiştir. Torku en aza indirmek için optimum bir nokta açısı olduğu belirtilmiştir. İtme kuvvetinin, öz kalınlığı ve boşluk açısı ile önemli ölçüde artarken ve aksine uç açısı ve helis açısı ile azaldığı, 1,0 ila 1,5 mm arasında bir öz kalınlığına, yaklaşık 118° uç açısına, 8 ila 13° boşluk açısına, 29 ila 39° arasında bir helis açısına ve yaklaşık 1 mm'lik kenar uzunluğuna sahip matkapların torku ve ilerlemeyi azaltmak için etkili olduğu belirtilmiştir.

Hocheng ve Tsao [10], delmenin yapıların birleştirilmesine duyulan ihtiyaç nedeniyle elyaf takviyeli malzemeler için ikincil işlemenin en sık uygulanan işlemi olduğunu, delaminasyonun delme işleminde kritik öneme sahip olduğunu belirtmişlerdir. Yapılan deneysel çalışmada, delaminasyonun başlangıcında kritik ilerleme kuvvetinin teorik tahminleri incelenmiş ve farklı matkap uçlarının etkileri karşılaştırılmıştır. Sonuçların analitik bulguları doğrular ve endüstriyel deneyimle tutarlı nitelikte olduğu belirtilmiştir. Ultrasonik tarama, delme ile indüklenen delaminasyonun derecesini değerlendirmek için kullanılmıştır. Bu özel matkapların avantajları deneysel olduğu kadar matematiksel olarak da gösterilmiştir. İtme kuvvetleri merkezde yoğunlaşmak yerine matkap çevresine doğru dağıtılmıştır. Delaminasyona neden olmadan kabul edilebilir ilerleme oranının da artırıldığı belirtilmiştir.

Sambhav ve ark. [11], helisel matkaplarının geometrisini ve kuvvetlerini genel uç geometrisi ile modellemek için bir metodoloji sunmuşlardır. Kesici kenar ve kesici ağız için genel bir model sunmak üzere NURBS kullanılarak bi-parametrik yüzey yamaları açısından yivli büküm matkap için detaylı bir bilgisayar destekli tasarlanmış (CAD) geometrik modelden yararlanarak kuvvetleri tahmin etmek için mekanik bir model oluşturulmuştur. Yüzey parçalarının kesişim noktalarını elde etmek için optimizasyon tekniği uygulanmıştır. Kesici ağız ve kesici kenar üzerindeki eğik kesici elemanlarda normal ve sürtünme kuvvetleri için mekanik modelin kullanılmasıyla, kuvvet bileşenleri, matkabın genel profili için toplam

ilerleme ve tork değerleri için entegre edilmiştir.

Gökçe ve ark. [12], endüstride yaygın olarak kullanılan matkap tasarımları incelemiş ve imalata yönelik, parametrik ve matematiksel denklemlere bağlı özgün bir matkap geometrisi modellemişlerdir. Matkap gövdesinin oluşturulması için; matkap çapı, matkap gövde çapı, toplam uzunluğu ve gövde uzunluğu değişkenlerine ihtiyaç duyulduğu, bu parametre değerlerinin, talaş kaldıracak malzemenin mekanik, kimyasal ve boyutsal özellikleri ile ilgili olduğu belirtilmiştir. Bu nedenle, bu çalışma kapsamında kullanılacak parametreler, imalat sürecine uygun hazırlanmıştır. 3B modelin oluşturulmasında CATIA P3 V5-6R2015 BDT paket programı kullanılırken, matematiksel hesaplamalarda MATLAB R2015b paket programı kullanılmıştır. Parametrik modelleme yaklaşımı, birbirleri ile matematiksel ilişkili olan geometrilerin, yeniden türetilmesine olanak sağlamaktadır. Bu çalışmada, imalata yönelik, parametrik ve matematiksel denklemlere bağlı özgün bir matkap geometrisi modellenmiştir. Matkap geometrisini oluşturan geometrik unsurlar birbirleri ile matematiksel ilişki içerisinde hazırlanmıştır.

Matkap geometrisiyle yapılan çalışmalar yukarıda bahsedilen çalışmalarla sınırlı olmamakla birlikte literatürde bu konuyla alakalı pek çok çalışma mevcuttur. Özetlerde belirtilmiş olduğu gibi geometri ile ilgili çalışmalarda bilgisayar destekli analizler kullanılmış ve geliştirilen geometrelerin performansları kesme kuvvetleri (ilerleme ve tork) ve kesme gücü açısından değerlendirilen performans ölçümleri ile ortaya konulmaya çalışılmıştır. Literatür araştırmasında bütünleşik matkap geometrileriyle ilgili araştırmalara çok az rastlanmaktadır. Bu çalışmanın diğer çalışmalardan farkı; birleştirilen matkap geometrilerinin istenen nozul geometrisinin elde edilmesi için yapılan analizler ve sonucunda parametrelerin belirlenmesidir.

2.2. Delik Delme İle İlgili Yapılan Araştırmalar

Delik delme ile ilgili çalışmalar farklı işleme parametrelerinde yapılan deneyler sonucu ilerleme kuvveti, moment, titreşim, aşınma, yüzey pürüzlülüğü ve apak oluşumu gibi çıktıların kıyaslanması üzerine yoğunlaşmıştır. Bazı çalışmalarda aynı iş parçası üzerinde farklı parametreler denenirken, bazı çalışmalarda farklı iş parçası malzemeleri üzerinde deneyler gerçekleştirilmiş ve sonuçlar kıyaslanmıştır.

Kaplan [13], yaptığı çalışmada, delik delme sürecinde farklı parametrelerin ilerleme kuvveti, moment, titreşim, aşınma, yüzey pürüzlülüğü ve çapak oluşumuna etkisini incelemiştir. Deneysel çalışmalarda; iki farklı sertlikteki (20 HRC ve 28 HRC) soğuk iş takım çeliği (AISI D2 ve AISI D3) iki farklı çaptaki ($\varnothing 8$ mm ve $\varnothing 10$ mm) ve iki farklı uzunluktaki HSS kesici takımlarla işlenmiştir. Deneylerde üç farklı kesme hızı (5 m/dk, 10 m/dk, 15 m/dk) ve üç farklı ilerleme (0,04 mm/dev, 0,05 mm/dev, 0,06 mm/dev) değeri kullanılmıştır. Her bir deneye yeni bir kesici takımla başlanmış ve her kesici takımla uzunluğu 50 mm olan boydan boya 20 adet delik CNC tezgahında delinmiştir. Deneyler tam faktöriyel tertibinde yapılmış, sonuçlar MATLABR2008 paket programında çizilen grafikler ve SAS 9.0 programında yapılan varyans ve regresyon analizleriyle yorumlanmıştır. Ayrıca deneysel çalışmalar sonlandıktan sonra matkapların SEM analizi yapılarak aşınmalar yorumlanmıştır. Deney sonuçlarına göre, malzeme sertliğinin, matkap çapının, matkap boyunun, kesme hızının, ilerlemenin ve delik sayısının ilerleme kuvveti, moment ve titreşime etkili olduğu, ayrıca matkap çapı haricindeki diğer deney parametrelerinin yüzey pürüzlülüğü ve çıkış çapağı oluşumuna etkili olduğu görülmüştür.

Meral [14], delme işlemlerinde önemli yere sahip kesme kuvvetleri, yüzey kalitesi, delik çapındaki değişim, dairesellikten sapma ve silindiriklikten sapma deneysel olarak araştırmıştır. Deneylerde, endüstriyel uygulamalarda yaygın olarak kullanılan ve işlenebilirlik özellikleri iyi bilinen AISI 1050 çelik malzeme referans alınmıştır. Deneylerde 6, 8, 10 mm çaplarında kaplamasız ve PVD methodu ile TiAlN kaplanmış kaplamalı HSS matkaplar kullanılmıştır. Deneyler üç farklı kesme hızı (20, 30, 40 m/dk) ve üç farklı ilerleme (0,05; 0,1; 0,15 mm/dev) değerinde kuru delme şartlarında CNC dik işleme merkezinde yapılmıştır. Delik uygulama biçimi olarak boydan boya 17 mm uzunlukta delikler delinmiş, deliklerde ölçü tamlığı, delik dairesellikleri, delik giriş ve çıkış açzı arasındaki eksenel kaçıklık, delik boyunca oluşan yüzey pürüzlülüğü ve talaş kaldırma esnasında oluşan kesme kuvvetleri ölçülerek sonuçlar yorumlanmıştır. Deneyler sonucunda, kaplamalı matkaplar, kaplamasız matkaplara göre; tüm değerlendirme kriterleri için olumlu sonuçlar sergilemiştir. İlerleme kuvveti v üzerinde ilerleme hızının kesme hızına göre daha etkili bir parametre olduğu gözlenmiştir. Yüzey pürüzlülük değerleri artan kesme hızı değerlerine bağlı olarak azalırken, ilerleme hızındaki artışla artmıştır.

Bahçe ve ark. [15], Al-5005 malzemesinin delinmesinde delik çıkış bölgesinde oluşan çapak yüksekliklerinin değişimleri incelemiştir. Delme deneyleri farklı devir sayıları (400, 600,

800 ve 1000 dev/dk), ilerleme oranları (0.1, 0.15, 0.20 ve 0.25 mm/dev) ve matkap uç açıları (90, 118, 130 ve 140°) kullanılarak yapılmıştır. Deneylerde matkap uçlarının ilerleme ve devir sayılarının artmasına bağlı olarak çapak yüksekliklerinin arttığı ve uç açısı 130° olan matkap ile yapılan delme işlemlerinde en düşük çapak yüksekliğinin elde edildiği görülmüştür. Çalışma sonucunda minimum çapak yüksekliğinin düşük devir sayısı ve ilerleme oranında elde edildiği, matkap uç açısı artarken çapak yüksekliğinin düşmekte olduğu ancak 130°'den sonra çapak yüksekliğinin tekrar artmaya başladığı, delme sonucu düşük ilerleme ve devir sayılarında üniform çapak oluşurken yüksek devir sayısı ve ilerleme oranında taç çapak oluştuğu ve en düşük çapak yüksekliğine 400 dev/dk devir sayısında, 0,1 mm/dev ilerleme oranında ve 130° uç açısına sahip kesici takımla ulaşıldığı belirtilmektedir.

Taylan [16], ISO 1.2842 (90MnCrV8)'nin delinebilirliği için kuru kesme koşulları altında optimum delme şartlarının tespiti amacıyla, sertleştirilmiş çelik 90MnCrV8'in kaplamalı ve kaplamasız karbür matkaplarla delinmesi esnasında kesme parametrelerinin; kesme kuvvetleri ve takım aşınması üzerindeki etkisi incelenmiştir. Kaplamasız, AlTiN ve TiAlN kaplı karbür matkaplar kullanılarak kuru kesme şartlarında CNC dik işleme merkezinde talaş kaldırılmıştır. Taguchi Deney Tasarımı yöntemiyle planlanmış deneylerin sonuçlarına göre optimizasyon ve doğrulama deneyleri yapılmıştır. Kesme parametreleri olarak üç farklı kesme hızı 40, 45, 50 m/dk ve üç farklı ilerleme 0,006; 0,008; 0,01 mm/devir kullanılmıştır. Bu kesme parametreleri kullanılarak 3 mm çapında matkaplarla 12 mm derinliğinde kör delikler delinmiştir. Kesme kuvvetleri ve takım aşınma değerleri ölçülmüş ve bu ölçümler ışığında kesici takımlar arasında mukayese yoluyla bir değerlendirme yapılmıştır. 7 Bar basınçlı hava soğutma ile kuru kesme şartlarında 90MnCrV8'in delinmesinde en iyi performans AlTiN kaplı takımlardan alınırken, en kötü sonuçlar ise kaplamasız takımlardan alınmıştır.

Şekerci [17], delik delme esnasında farklı kesme parametrelerinin kesme bölgesi sıcaklığı, ilerleme kuvveti, moment, yüzey pürüzlülüğüne etkisini incelemiştir. Deneysel çalışmalarda; AISI 316L tipi östenitik paslanmaz çelik malzemesi iki farklı tipte (kaplamasız ve TiN/TiAlN/TiCN çok katmanlı kaplamalı) HSS kesici takımlarla delinmiştir. Deneylerde dört farklı kesme hızı (15 m/dk, 20 m/dk, 25 m/dk ve 30 m/dk) ve dört farklı ilerleme miktarı (0,15 mm/dev, 0,20 mm/dev, 0,25 mm/dev ve 0,30 mm/dev) değeri kullanılmıştır. Deneyler, sabit matkap-dönen iş parçası yöntemi ile her bir deney için yeni bir kesici takım kullanılarak

yapılmıştır. Delme işlemi esnasında oluşan kesme sıcaklıkları kaplamalı ve kaplamasız takımların soğutma kanalları içerisine yerleştirilmiş ısıl çiftler yardımıyla ölçülmüştür. Sıcaklık ve kesme kuvvetleri ölçümleri sırasıyla; K tipi ısıl çift uygulaması ve Kistler 9257 B model dinamometre yardımıyla gerçekleştirilmiştir. Yapılan deneylerden elde edilen sonuçlar değerlendirildiğinde; kesme bölgesindeki sıcaklığın artan ilerleme miktarı ile azaldığı gözlenmiştir. Kesici takıma kaplama uygulaması neticesinde, kesme bölgesindeki sıcaklıklar önemli ölçüde düşmüştür. Takıma kaplama yapılması değerlendirilen bütün parametreler açısından önemli avantajlar sağlamıştır.

Yağmur ve ark. [18], endüstriyel uygulamalarda yaygın olarak kullanılan AISI 1050 malzemelerin delinebilirliği; delik delmede delik tipi (ön delikli ve doluya delme), kesme parametreleri (60, 75, 90 ve 108 m/dk kesme hızları 0,15, 0,20 ve 0,25 mm/dev ilerleme miktarları) ve kesici takım tipi (kaplamasız ve TiN/TiAl/TiCN kaplamalı solid karbür) girdileri baz alınarak; talaş kaldırma sırasında oluşan sıcaklık açısından değerlendirmişlerdir. Matkap talaş yüzeyi boyunca meydana gelen kesme sıcaklıkları kaplamalı ve kaplamasız matkapların soğutma kanalları içerisine yerleştirilmiş K tipi ısıl çiftler yardımıyla gerçekleştirilmiştir. Yapılan deneylerden elde edilen sonuçlar değerlendirildiğinde; kesme bölgesindeki sıcaklığın artan ilerleme miktarı ile azaldığı gözlenmiştir. Kesici takıma kaplama uygulaması neticesinde, kesme bölgesindeki sıcaklıkla önemli ölçüde düşmüştür. Takıma kaplama yapılması değerlendirilen bütün parametreler açısından önemli avantajlar sağlamıştır.

Kıvak ve ark. [19], Inconel 718 süper alaşımının kaplamalı ve kaplamasız karbür matkaplarla delinmesi esnasında kesme parametrelerinin, yüzey pürüzlülüğü ve talaş oluşumu üzerindeki etkisini analiz etmişlerdir. Delme deneyleri kaplamasız, TiN ve TiAlN kaplı karbür matkaplar kullanılarak, kuru kesme şartlarında CNC dik işleme merkezinde, dört farklı kesme hızı (10, 12,5, 15, 17,5 m/dk) ve üç farklı ilerleme hızı (0,05, 0,075, 0,1 mm/dev) kullanılarak yapılmıştır. 5 mm çapında matkaplarla 8 mm derinliğinde kör delikler delinmiştir. Yüzey pürüzlülüğü ölçümleri ışığında kesici takımlar arasında karşılaştırma yapılmıştır. Genel olarak, yüzey pürüzlülüğü açısından en iyi sonuçlar kaplamasız takımla delinen deliklerden alınmıştır. Talaş oluşumu incelendiğinde yapılan bütün deneylerde, ilk delikte meydana gelen talaş şeklinin kopuk talaş ya da küçük adımlı helisel talaş şeklinde olduğu görülmüştür.

Uzun ve ark. [20], çeşitli sanayilerde sıklıkla tercih edilen ve işlenmesi zor malzemeler sınıfında olan Ti-6Al-4V malzemesinin delinebilirliğini incelemişlerdir. Deneyler sonucunda kesme parametrelerinin ilerleme kuvveti, kesme torku, takım aşınması ve delik kalitesi üzerine etkileri ile incelenmiştir. Deneyler sırasında 140° uç açısına sahip, 6.8 mm çapında karbür matkap kullanılmıştır. Deney parametresi olarak ıslak şartlarda, üç farklı kesme hızı (38, 41.8 ve 45.6 m/dk) ve sabit ilerleme miktarı (0.1 mm/dev) belirlenmiştir. Sonuç olarak kesme hızı ve kesme uzunluğu değiştikçe kesme kuvvetlerinin ve delik kalitesinin de değiştiği görülmüştür. Bu değişimlerin başlıca sebebi takım aşınması ile takım geometrisinin değişimi olarak ön görülmüştür. Çalışmada, en düşük ilerleme kuvveti değeri en düşük (38 m/dk) kesme hızında, en yüksek ilerleme kuvveti ise en yüksek takım aşınmasının olduğu 41.8 m/dk kesme hızında görülmüştür. Kesme mesafesinin artması ile ilerleme kuvveti %10 ile %16 arasında artış göstermiştir. Torkun 41.8 ve 45.6 m/dk kesme hızlarında daha düşük olduğu görülmüştür. Fakat kesme mesafesinin artışı ile takımlardaki aşınma miktarının artışıyla orantılı olarak kesme torkunda artışlar görülmüştür. Kesme hızının ve kesme mesafesinin artışı ile çapsal hata da artmıştır. 41.8 ve 45.6 m/dk kesme hızlarında çapsal hatada 0.005 mm ile 0.007 mm arasında artmıştır. Fakat 38 m/dk kesme hızında ise 0.013 mm çapsal hatanın azaldığı görülmektedir. En az dairesellikten sapma değeri en yüksek kesme hızı olan 45.6 m/dk da tespit edilmiştir. Fakat kesme mesafesi 900 mm geçmesi ile en az değer en düşük kesme hızı olan 38 m/dk kesme hızında görülmüştür. Dairesellikten sapma için en büyük farkın 41.8 m/dk kesme hızında olduğu görülmektedir.

Yapılan çalışmalara paralel olarak çalışmamızda da işleme parametrelerinin belirlenmesi amacıyla deneyler yapılmış, işleme sırasındaki kuvvet ve moment değerleri ile elde edilen nozul geometrilerinin yüzey pürüzlülük değerleri ve kullanılan takımlardaki aşınma değerleri ölçülmüştür. Çalışmamızda, daha önce yapılan çalışmalardan farklı olarak üretimi yapılan bütünleşik takımlarla işleme parametreleri belirlenmiş ve 6 adet farklı takımın elde edilmesi istenen nozul geometrisi üzerindeki performanları değerlendirilmiştir.

2.3. Östenitik Paslanmaz Çeliklerin İşlenmesi ile İlgili Yapılan Çalışmalar

Östenitik paslanmaz çelikler, günlük gereçlerin üretiminde kullanılmasının yanında yüksek krom içeriklerinden dolayı yüksek mukavemet, yüksek korozyon ve oksidasyon direnci nedeniyle mühendislik malzemesi olarak yaygın şekilde kullanılmaktadır.

AISI 304 paslanmaz çeliklerin işlenebilirlik karakteristikleri ile ilgili çalışmalarda, düşük ısı iletkenliğe ve gerinim ve gerilim oranına karşı gösterdikleri yüksek mekanik ve mikro yapısal hassasiyet nedenleriyle dikkat edilmelidir [21]. Delme, temel olarak bileşenlerin birleştirilmesi için kullanılan başlıca konvansiyonel işleme yöntemlerinden biridir [22]. Delme işleminde deliklerin kalitesi, işleme parametreleri ile kesici takım ve iş parçası konfigürasyonlarına bağlıdır. Kurt ve ark. [23], iş parçasının, matkap geometrisinin ve matkap ucu malzemesinin delinmiş deliğin daireselliğini etkileyen önemli parametreler olduğunu belirtmişlerdir.

Chatterjee ve ark. [21], dominant olmayan sıralama genetik algoritması (NSGA) kullanarak AISI-304 paslanmaz çeliğin delinmesinde çapak yüksekliği ve dairesellik için parametrik bir değerlendirme sunmuşlardır. Delme işleminde ortaya çıkan en büyük sorunun, pratik uygulamalarda deliklerin kalitesini ciddi biçimde etkileyen çapak ve konik formasyonun oluşması olduğunu belirtmişler ve delme parametrelerinin, mil devir sayısı, ilerleme hızı ve matkap ucu çapının çapak yüksekliği ve daireselliği üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Toplam yirmi deney gerçekleştirerek, iş mili hızının delinmiş deliğin daireselliği için önemli ölçüde etkili olduğunu, iş mili hızı, ilerleme hızı ve matkap çapı gibi tüm parametrelerin çap yüksekliği üzerinde etkisi olduğunu belirtmişlerdir.

Turgut ve ark. [24], kesici takımlar üzerine uygulanan çok katlı kaplamaların AISI 304 çeliğinin delinmesinde kesme kuvvetleri ve delik çapları üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Deneyleri kuru kesme koşullarında, çok katmanlı TiN / TiAlN ve tek katmanlı TiN ve TiAlN kaplamalı M35 HSS matkaplar (6 mm çapında) kullanarak, dört farklı kesme hızı (10, 12, 14, 16 m / dk) ve üç ilerleme hızı (0,04; 0,06; 0,08 mm/dev) ve 13 mm sabit delme derinliği kullanılarak gerçekleştirmişlerdir. Sonuç olarak, nominal çap değerine en yakın olan en düşük kesme kuvvetleri ve çap değerleri, sırasıyla çok katmanlı TiAlN / TiN, tek katmanlı TiAlN ve TiN kaplı matkaplarla elde edilmiştir.

Nordin ve ark. [25], çok katmanlı kaplamalarla kaplanmış semet karbür takımlar kullanarak östenitik paslanmaz çeliğin frezelenmesi hakkında aşınma ve bozulma mekanizmalarının anlaşılmasını kolaylaştırmak amacıyla bilgi vermişlerdir. Takım ömrünün temel olarak çatlak etkileşimi nedeniyle kesme kenarının yontulmasıyla sınırlı olduğu bulunmuştur. TiN ve TaN'dan yapılmış çok katmanlı kaplamaların, östenitik paslanmaz çeliğin frezelenmesi için uygun olduğu kanıtlanmıştır. TaN, tek katmanlı kaplamanın çok kırılğan olduğu,

bununla birlikte, TaN'nin TiN ile katmanlanmasıyla daha sert bir kaplama elde edilebileceği belirtilmiştir. Bu sayede, östenitik paslanmaz çelik ile daha az etkileşime girme eğilimi olan bir kaplama malzemesinin elde edildiği ve daha küçük etkileşimin bir sonucu olarak, daha az tarak çatlaklarının oluştuğu belirtilmiştir.

Tsao [26], delme parametrelerinin ve yanak aşınmasının niteliksel bir veri tabanını oluşturmak için Taguchi metotlarını kullanılmıştır. Radyal temel fonksiyon ağı (RBFN) çalışması için nitel bir veri tabanı oluşturulmuştur. JIS SUS 304 paslanmaz çeliğin çok katmanlı delme işlemi sırasında farklı şekilde kaplanmış matkapların aşınma tepkisi veri tabanının oluşturulması amacıyla, bu çalışmada üç farklı tipte HSS matkap ucu kullanılmıştır. Bunlardan ilki TiN tek tabaka kaplamalı iken, diğer iki HSS matkap ucu ise TiN yüzeyli çok katmanlı kaplamalı (yani TiN / TiCN / TiN / TiCN / TiN yüzeyli) ve TiCN yüzeyli çok katmanlı kaplamalı (yani TiN / TiCN) / TiN / TiCN / TiN / TiCN yüzey) uçlardır. RBFN' nin, JIS SUS 304 paslanmaz çelikler için farklı kaplamalı matkapların yanak aşınmasını doğru bir şekilde tahmin edebileceği belirtilmiştir. Simülasyon sonucu, maksimum matkap aşınma hatası üzerindeki RBFN' nin 0,0065 mm'ye ulaştığını ve ortalama mutlak hatanın % 0,4'e düştüğü görülmüştür.

Chen ve Liu [27], titanyum nitrit (TiN) ve titanyum karbonitrür (TiCN) sert kaplamaların, yüksek sertlik, aşınma direnci ve düşük sürtünme katsayısı nedeniyle kesici takımlarda yaygın olarak kullanıldığını belirtmişlerdir. JIS SUS 304 paslanmaz çeliğinin delinmesin farklı kaplamalı matkapların kesme kuvveti tepkilerini ve takım ömrünü deneysel olarak araştırmış ve karşılaştırmışlardır. Delme işlemlerinde kesme kuvveti tepkilerini ve delme ömrünü araştırmak için, bu çalışmada üç farklı tip yüksek hızlı çelik büküm matkapları araştırılmıştır. Bunlardan ilki TiN tek tabakalı kaplamalı büküm matkap, diğer ikisi ise TiN yüzey çok katmanlı (yani TiN / TiCN / TiN / TiCN / TiN yüzey beş kat) ve TiCN yüzey çok katmanlı (yani TiN / TiCN / TiN / TiCN / TiN / TiCN yüzey altı katman) kaplamalardır. Deney sonuçları, TiN yüzeyli çok katmanlı kaplamalı matkapların farklı delme koşullarında daha iyi kesme performansına sahip olduğunu göstermektedir. Kaplama malzemelerinin ve kaplama katmanlarının ilerleme kuvvetleri ve tork üzerindeki etkileri, ilerleme hızlarının ilerleme kuvvetleri ve tork üzerindeki etkileri, mil hızlarının ilerleme kuvvetleri ve tork üzerindeki etkileri ve kaplama malzemelerinin, kaplama katmanlarının ve delme koşullarının matkap ömrüne etkileri de tartışılmıştır.

Uysal [28], paslanmaz çelik parçaların işlenmesinde genellikle kenar ve düzensiz aşınma durumları yaşandığını, ayrıca, bu malzemelerin delinmesinde düşük yüzey pürüzlülüğü ve delme aletinin kırılması gibi çeşitli problemler ortaya çıktığını belirtmiştir. Bu çalışmada, nanokompozit kaplı ve kaplamasız Tungsten Karpit (WC) takımları, AISI 304L paslanmaz çelik iş parçalarının delinmesinde nanokompozit kaplamanın performansını belirlemek için karşılaştırılmıştır. Paslanmaz çelik parçaların delinmesinde nanokompozit kaplı ve kaplanmamış WC matkap takımlarında kırılmalar ve hasarlar ortaya çıkmıştır. Matkap alet ucu hasarları mikroskop ile incelenmiş ve delinmiş deliklerin yüzey pürüzlülük değerleri ölçülmüştür. Nanokompozit kaplı WC delici aletler, nanokompozit kaplamanın matkap aleti-iş parçası sürtünmesini azalttığı ve aşınma direncini artırdığı için kaplamasız WC delme aletlerinden daha az hasar görmüştür. Nano kompozit kaplamalı WC delme aletleri ile delinmiş deliklerin yüzey pürüzlülüğünün, kaplanmamış WC delme aletleriyle delinmiş deliklerden daha iyi olduğu belirtilmiştir. Kesme hızı arttığında, matkap aleti ve iş parçası ara sıcaklığı artmış ve talaşlar matkap ucuna, keski kenarına ve kesici kenara yapışmıştır. Böylece, nanokompozit kaplı ve kaplanmamış WC matkap aletleri ağır hasar görmüştür. Nanokompozit kaplama tabakasının matkap aleti - iş parçası sürtünmesini azaltması ve aşınma direncini artırması nedenleriyle nanokompozit kaplı WC matkap takımlarının kaplamasız matkap aletlerinden daha az hasar gördüğü sonucuna ulaşılmıştır. Nanokompozit kaplı WC matkap takımları kullanıldığında ve düşük kesme hızı seçildiğinde, daha az matkap ucu hasarı meydana gelmiştir. Kaplamasız matkap takımları kullanıldığında kesme parametrelerine bakılmaksızın ağır bir takım aşınması gözlenmesinin nedeni nanokompozit kaplama tabakası, matkap aleti - iş parçası arayüzü üzerindeki sürtünme katsayısını azaltması olarak belirtilmiştir. Nano kompozit kaplı WC delme aletleri ile delinmiş deliklerin yüzey pürüzlülüğü, kaplamasız WC delme aletleri ile delinmiş deliklerden daha iyi sonuç vermiştir. Delinmiş deliklerin yüzey pürüzlülüğü, genellikle takım aşınması ve / veya takımın zarar görmesi nedeniyle daha fazla sürtünme ve yüzey çizilmesi nedenleriyle takımın aşınmasının artması sonucu artmıştır.

Kaneriya ve Sharma [29], delme parametrelerini optimize ederek ve uygun matkap takım malzemelerini seçerek, AISI 304 östenitik paslanmaz çeliğin kuru delinmesi sırasında delme aletinde ortaya çıkan sıcaklığı azaltmak amacıyla; HSS, Kobalt kaplı HSS ve K20 Karbür matkapların performanslarını sıcaklık, malzeme kaldırma oranı ve matkap takım ömrü açısından değerlendirmişlerdir. Performans parametreleri olan ilerleme hızı ve iş mili hızı, matkap ucundaki sıcaklığı en aza indirmek için deneysel olarak incelenmiştir. Deneyler,

maksimum iş mili hızı 8000 rpm ve 15.8 kW tahrik motoru ile donatılmış dikey işleme merkezi (VMC 1050) üzerinde gerçekleştirilmiştir. VMC parça programları, Intel IV (1.0 GHz) kişisel bilgisayarında ProENGINEER CAD / CAM yazılımı ile oluşturulmuştur. Matkap ucu sıcaklık değerleri kızılötesi termometre kullanılarak ölçüldü. Deneyler, her bir matkap takımı malzemesi için 0,05 mm/dev sabit ilerleme hızında ve 1200 mm/dev'den 0,09 mm/dev'e değişen ilerleme hızında 1200 rpm'den 1500 rpm'ye değişen mil hızları ile gerçekleştirilmiştir. Deney sonuçları DEFORM 3D yazılımı ile simüle edilmiştir. İlerleme hızı ve iş mili hızı gibi sondaj parametreleri, sıcaklığı en aza indirecek ve çok amaçlı bir optimizasyon tekniği olan yanıt ölçüm metodolojisini (RSM) kullanarak malzeme çıkarma oranını (MRR) maksimuma çıkarmak için optimize edilmiştir. İlerleme oranının, AISI 304 östenitik paslanmaz çelik malzemenin kuru delinmesinde matkap ucu sıcaklığı üzerinde daha büyük bir etkiye, İş mili hızının, AISI 304 östenitik paslanmaz çelik malzemenin kuru delinmesinde büküm matkap ucu sıcaklığı üzerinde daha küçük bir etkiye sahip olduğu, HSS matkap kullanarak, AISI 304 östenitik paslanmaz çeliğin 1500 dev/dk mil hızıyla ve 0,06 mm / dev üzeri ilerleme hızında kuru delmenin ve 1500 dev/dk mil hızı ile kuru delinmesi ve kobalt kaplı HSS matkap kullanılarak 0,07 mm/devir üzerinde ilerleme hızı ile ekonomik olmadığı, K20 Solid Karbür matkap ucunun, HSS ve kobalt kaplı HSS matkap takımlarına kıyasla daha uzun takım ömrüne sahip olduğu ve minimum sıcaklık değerinin (190 ° C), K20 Katı Karbür delme aleti için 0,05 mm/devir ilerleme hızında ve 1200 dev/dk mil hızında gerçekleştiği sonuçlarına ulaşılmıştır.

Çaydaş ve ark. [30], AISI 304 östenitik paslanmaz çeliğin kuru delme işleminde HSS, K20 katı karbür ve TiN kaplı HSS aletlerinin performanslarını değerlendirmişlerdir. Mil hızı, ilerleme hızı, delme noktası açısı ve yüzey pürüzlülüğü üzerindeki delik sayısı, takım kenarı aşınması, çıkış çapası yüksekliği ve delik boyutunun büyütülmesi rolleri deneysel olarak incelenmiştir. Bu analizin yapısı, göreceli olarak az sayıda deney yapılmasını sağlayan deney tasarımı (DOE) adı verilen teknikle belirlenmiştir. Deneysel verileri toplamak için bir L9 ortogonal dizi kullanılmıştır. Deney sonuçları, yukarıda bahsedilen sondaj performanslarının kesme parametrelerine yanıt olarak artış eğilimi gösterdiğini göstermiştir. TiN kaplı HSS matkap, daha uzun takım ömrü ve daha yüksek delik kalitesi ile en yüksek performansı gösterirken, daha düşük yüzey pürüzlülüğü ile ardından K20 karbür ve HSS takımları gelmiştir. İşlenmiş deliklerin yüzey pürüzlülüğü, test edilen tüm malzemeler için delme parametrelerinin manipülasyonu ile daha istenmeyen bir hal almıştır. HSS takımlar en kötü sonuçları sağlarken TiN kaplamalı HSS büküm matkaplar en iyi sonuçları vermiştir.

Bu sonuçlar kaplamalı matkaplar için kaplama malzemesinin özellikleri ve HSS matkabı için BUE formasyonu ile ilişkilendirilmiştir. En düşük yüzey pürüzlülük değerleri, üç matkap tipi için 118° nokta açısında kaydedilmiştir. Delme parametrelerinin manipülasyonu yanak aşınmalarını arttırmıştır. Aşınma oranı üzerindeki en önemli faktör deliklerin sayısı olarak belirtilmiştir. HSS, düşük sertliği nedeniyle diğer matkaplar arasında en yüksek yıpranmaya sahipken, kaplanmış matkap termal stabilitesi nedeniyle en az aşınmış olanıdır. 50 delikten sonra, HSS aracı takım ömrünün sonuna ulaşmıştır. K20 karbür matkapları için kenar kırılmaları gözlemlendi. TiN kaplı matkapta, kaplama malzemesinin bir miktar kaybı ve sarmal kesme kenarları üzerinde çentik hasarı gözlemlenmiştir. HSS, K20 karbür ve TiN-kaplamalı HSS takımlar ile AISI 304 malzemesinin delinmesinde delinmesi sırasında sırasıyla kertik çapak, bir matkap kabı ile eşit çapak ve delik çevresinde herhangi bir bağlantı olmadan düzgün çapak oluşumu gözlemlenmiştir. TiN kaplı HSS matkap ile en küçük çıkış çapak yükseklikleri elde edilirken, bunu K20 ve HSS takımları takip etmiştir. HSS takım için daha büyük bir çap ölçülürken, bunu K20 karbür takım ve TiN kaplı HSS takım takip etmiştir. Takım ucunun delik sayısı ile aşınması, daha yüksek titreşimlere ve aletin dengesiz rotasyonuna yol açmıştır.

Balaji ve ark. [31], kesme hızı, ilerleme hızı ve helis açısı gibi kesme parametrelerinin takım ömrü üzerindeki etkisiyle ilgili çalışmışlardır. Deneyler, AISI 304 çeliğinin karbür matkap uçları ile delinmesi üzerine gerçekleştirilmiştir. Deney dizaynı Taguchi ortogonal L8 dizisine göre hazırlanmış ve iki kesme parametresi seviyesi ile deneyler yapılmıştır. Kesme parametrelerinin etkileri, matkap ucu titreşiminin genliği ve yüzey pürüzlülüğü değerlendirilerek analiz edilmiştir. Matkap ucu titreşiminin çevrimiçi veri toplanması için bir Lazer Doppler Vibrometresi (LDV) kullanıldı ve yüksek hızlı bir Fast Fourier Transform analiz cihazı, acousto optik emisyon (AOE) sinyallerini işlemek için kullanıldı. Matkap ucu titreşimlerini ve yüzey pürüzlülüğünü etkileyen önemli kesme parametrelerini belirlemek için Taguchi ve Varyans Analizi yöntemleri kullanıldı. Deney sonuçlarından, matkap ucunun titreşiminin, takım aşınmasının ilerlemesiyle arttığı bulunmuştur. Yüzey pürüzlülüğü için optimum kesme parametreleri 25 derece helis açısı, 12 mm/dk ilerleme hızı ve 800 dev/dk mil hızı olarak elde edilmiştir. Titreşimin hızlandırılması için optimum kesme parametreleri, 25 derece helis açısı, 10 mm / dk ilerleme hızı ve 600 dev/dk mil hızı olarak elde edilmiştir. Yüzey pürüzlülüğü üzerinde helis açısı belirgin olmakla birlikte, bunu sırasıyla % 78.22 ve % 50.02 katkısıyla matkap titreşim hızındaki artış izlemektedir.

Buytoz [32], 90° , 118° ve 130° uç açlarına sahip HSS, TiN kaplamalı HSS ve K20 karbür olmak üzere üç farklı matkap kullanarak, farklı ilerleme miktarı ve devir sayısı şartlarında, AISI 304 östenitik paslanmaz çeliklerin delinmesi işleminde oluşan yüzey pürüzlülüğü, takım aşınması, çıkış çapak yükseklikleri ve ölçü tamlıklarındaki farklılıkları deneysel olarak incelemiştir. Ayrıca, numunelerin mikrosertlik değerleri ile kesicilerin taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntüleri alınmıştır. Deneyler, Taguchi Ortogonal dizinleri kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Her bir ölçülen değer, bu dizin içerisinde uygun sütunlara atanmış ve Minitab R 15 paket programı yardımı ile sonuçlar analiz edilmiştir. İşleme parametrelerinin performanslar üzerindeki etkileri grafiksel olarak belirlenerek en uygun işleme şartları tespit edilmiştir. Sonuç olarak tüm kesici takımlar için yüzey pürüzlülüğü, devir sayısının azalması ve ilerleme miktarlarının artması ile kötüleşmiştir. En düşük yüzey pürüzlülüğü değerleri TiN kaplamalı HSS takımlarla elde edilirken, en yüksek yüzey pürüzlülüğü değerleri ise K20 karbür takımlarla elde edilmiştir. Matkap uç açısının 118° olduğu durumlarda optimum yüzey pürüzlülüğü elde edilirken, uç açısının 90° ve 130° olduğu durumlarda ortalama yüzey pürüzlülük değerleri, toplam ortalamaların üstünde olmuştur. En iyi yüzey pürüzlülüğü 118° uç açısında elde edilmiştir. Devir sayısının artması ile çapak yüksekliği de artmış, ilerleme miktarlarının artması ile ısı miktarı azalmış ve buna bağlı olarak da çapak yüksekliği azalmıştır. Kesme hızının ve dolayısıyla devir sayısının artması ile oluşan sıcaklık ve ısı miktarına bağlı olarak çapak yüksekliği de artmıştır. TiN kaplamalı takımlarda oluşan kaplar numune yüzeylerinin arka tarafından tamamen kopmuştur. Bu da çapak yüksekliği açısından bu takımların daha avantajlı olduklarını göstermiştir. Devir sayısı ve ilerleme miktarlarının artmasıyla yanak aşınması da artmaktadır. Matkap uç açısının artmasıyla yanak aşınması değerleri azalmaktadır. Aynı uç açlarına sahip matkaplarla sabit ilerleme ve devir sayısı şartlarında yapılan deneylerde, K20 takımın en az aşındığı görülmüştür. Bu sonuç, bu kesicinin yüksek sertliğe sahip olmasıyla ilişkilendirilmektedir. Delik sayısının artması ile matkaplardaki aşınma değerlerinin de doğru orantılı olarak arttığı, buna bağlı olarak da delik çapında ölçü farklılıklarının oluştuğu tespit edilmiştir. Delik çapında oluşan bu ölçü farklılıklarının en fazla olduğu sonuçlar, TiN kaplamalı HSS takımlarla yapılan deneylerde meydana gelmiştir. Bu sonuçları HSS ve K20 matkapların takip ettiği görülmüştür. 716 dev/dk, 0,12 mm/dev ve 118° uç açısı şartlarında ölçü tamlığı açısından en iyi sonuçlar elde edilmiştir. Mikrosertlik değerleri tüm kesici takımlar için benzer eğilim göstermektedir. En yüksek mikrosertlik değerleri HSS takımla elde edilirken, en düşük değerler ise K20 karbür takımlarda ölçülmüştür. Ancak, sertlik değerlerindeki bu farklılıklar 146 ila 222 HV arasında seyretmektedir. Bu da, belirgin bir

farkın olmadığını göstermiştir. Mikrosertlik değerleri, 50 delik sonrasında 194 HV ila 244 HV arasındadır. Bu değerler yaklaşık olarak 20 delik sonrasında elde edilen değerlerden %16 fazladır. Dolayısıyla delik sayısının ve matkap cinsinin mikrosertlik üzerinde belirgin bir etkisinin olduğu belirtilmiştir.

Lin [33], değişken ilerleme ve değişken hızlı işlemenin, sert ve işlenmesi zor malzemelerin işlenmesinde kesme performansını iyileştirmek için önemli bir yöntem olduğunu belirtmiştir. TiN kaplı karbür matkaplar kullanarak paslanmaz çelik delme için değişken ilerleme ve hız ile takım aşınmasının optimize edilmesine yönelik testler rapor edilmiştir. Çalışmada, sırasıyla ilerleme ve hız değişimlerinin modellenmesi önerilmektedir. Sonuçlar, değişken ilerlemenin, takım ömrü, çapak yüksekliği ve yüzey pürüzlülüğü açısından sabit ilerlemeye göre üstün olduğunu göstermiştir. Besleme varyasyonunun genliğinin, $a = 0,8$ ve hız değişiminin genliğinin, $b = 0,07$, maksimum takım ömrü için optimum olduğu belirtilmiştir. Değişken ilerleme ve değişken hızdan oluşan yüzey pürüzlülüğü aralığının $0,7 \mu\text{m}$ ila $3 \mu\text{m}$ arasında kaldığı, kesme kenarı ve dış köşe aşınmalarının, matkap aşınmasının baskın mekanizmaları olduğu, takım ömrü, çapak yüksekliği ve yüzey pürüzlülüğü açısından, hız değişiminin en uygun genlik aralığının $0-0,07$ olduğu ortaya konulmuştur. Çalışmada delme deneyleri için $150 \text{ mm} \times 100 \text{ mm} \times 15 \text{ mm}$ SUS 304 östenitik paslanmaz çelik levhalar kullanılmıştır.

Lin ve Shyu [34], değişken ilerlemeli işlemenin, kesici takım ömrünü iyileştirmek ve çıkış çapak yüksekliği açısından sert ve işlenebilirliği zor malzemelerin işlenmesinde önemli bir yöntem olduğunu belirtmişlerdir. Bu çalışmada, TiN, TiCN, CrN ve TiALN olmak üzere dört kaplamalı matkap test edilmiştir. Sonuçlar, ilerleme varyasyonu genliğinin, $a = 0.6$, maksimum takım ömrü veya minimum çapak yüksekliği için optimum olduğunu göstermektedir. Paslanmaz çeliğin delinmesinde TiN kaplamalı veya TiCN kaplı matkapların CrN kaplı veya TiALN kaplı matkaplardan daha üstün olduğu belirtilmiştir. Kesme kenarı ve dış köşe aşınmalarının, matkap aşınmasının baskın mekanizmaları olduğu, çıkan talaşın uzun bir şerit şeklinde ve zayıf yüzey kalitesine sahip olması takımın başarısız olduğu belirtilmiştir. Çalışmada delme deneyleri için $150 \text{ mm} \times 100 \text{ mm} \times 15 \text{ mm}$ SUS 304 östenitik paslanmaz çelik levhalar kullanılmıştır.

2.4. Literatür Araştırmasının Değerlendirilmesi

Literatür taraması sonucunda; araştırmacıların genellikle farklı malzeme yapısına sahip ve farklı kaplama malzemeleri ile kaplanmış takım uçları ile östenitik paslanmaz çelikler ve özelinde AISI 304 paslanmaz çeliğin işlenmesi sırasında karşılaşılan takım aşınması problemlerinin önlenmesine ve delik kalitesinin artırılmasına yönelik olarak optimum işleme parametrelerinin belirlenmesi ve halihazırda mevcut olan takımlar arasında kıyaslama yapılması şeklinde çalışmalar yaptıkları tespit edilmiştir. Bu çalışmalar yüzey pürüzlülüğü, çapak ve konik oluşumu gibi delik kalitesini etkileyen değerler üzerinde ve iş mili hızı, ilerleme hızı, devir sayısı gibi işleme parametreleri ve uç açısı ve takım malzemesi ve kaplama türü gibi takım özellikleri üzerinde yoğunlaşmıştır. Literatürde AISI 304 östenitik paslanmaz çeliğin delinmesi üzerine yapılmış çalışmalar mevcut olmakla birlikte Euro 7 nozulların üretimi sürecinde gerçekleştirilecek deliklerin delinmesinde takım geometrisinin tasarımında değerlendirilmesi gereken hususların tespitine ve farklı takım geometrisinin geliştirilmesine yönelik olarak çalışmalara ihtiyaç devam etmektedir. Çünkü yüksek basınçlı iç akış dolayısıyla düşük emisyon değerleri için nozul kanal ve nozul deliği kısımlarının pürüzsüz olarak üretilmesi gerekmektedir. Kanal içinde olan yüzey sorunları hava ve yakıt karışımında iç enjektör akışından dolayı sorunlara neden olmaktadır. Bu nedenden ötürü nozul kanalının arzu edilen kalitede işlenmesi büyük önem arz etmektedir. Kaliteli bir nozula sahip motorda emisyon özelliklerinin azaldığı bilinmektedir [35-37].

Euro 7 tipi nozullar Euro 6 tipi nozullara göre üretiminde bir takım sorunlara sahiptir. Euro 7 tipi nozulların dört kat daha yüksek yüzey kalitesine sahip olması, yakıtın istenilen oranda akması için nozul iç bölgesinde açılı yerine daha radyuslu geçişli formların oluşturulması ve bu ölçülerin de dört kat daha az toleranslı olarak üretilmesi hedeflendiğinden dolayı üretimi zordur [38-40]. Çünkü yüksek dayanımlı Cr-Ni alaşımlı malzemeler kullanıldığından ötürü bu malzemeleri yüksek hassasiyetle işlemek zordur. Bu hedeflerin zorluğu şu an var olan talaşlı imalat takımlarının gerekli şekilde üretime cevap verememektedir [41].

Geleneksel talaşlı imalat yöntemlerinin ülkemiz imalat alt yapısında yaygın olarak kullanımı değerlendirildiğinde bu tip tezgahlarla Euro 7 tip nozulların üretimi kısıtlı olmaktadır. Mevcut talaşlı imalat altyapısının etkin kullanılabilirliğinin sağlanmasının yolu, bu takımların doğru işlem adımları ile bu tezgahlar için uygun takım tasarımı ve üretimi sayesinde mümkün olacaktır. Euro 7 tip nozulları yüksek verimlilikte işleyebilmek için dokuz adetten

oluşan hassas özel kesici takım seti oluşturmak en iyi sonucu verecek öngörü olarak belirlenmiştir. Bu takımlardan bir adet torna ucu ve bir adet nozul delik içi çapak temizleme ucu zorunlu olarak kullanılmakta geriye kalan yedi uç ise birbirinden farklı olmak üzere döner tipte şaftlı yapıdadır. Nozulun iç delik kısmını üreten bu yedi uç, yapı itibari ile kademeli matkap uçlarından, rayba uçlarından, mikro uçlardan ve form takımlardan oluşmalıdır. Böylelikle farklı takımlarla kaliteli bir nozul yapısı oluşturulmasının mümkün olduğu bilinmektedir [42].

Sonuç olarak, yapılan çalışmada geleneksel talaşlı imalat tezgahlarına uygun takım tasarımının yapılarak arzu edilen standartlarda Euro 7 nozul üretimiminin en az takım aşınması ve dolayısı ile düşük maliyet kazancı ile elde ediniminin sağlanması benzersiz bir çalışma olarak literatürden farklılığını ortaya koymaktadır.

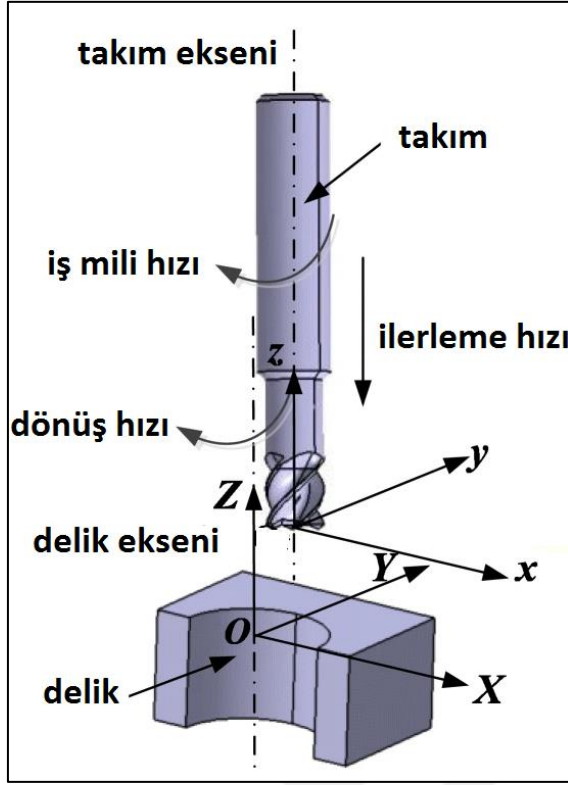
3. KURAMSAL TEMELLER

3.1. Delme Teknolojisi

Delik delme işlemi, matkap kullanarak dairesel kesitli delik açmak için yapılan bir kesme işlemidir ve geniş uygulama alanına sahip önemli işleme süreçlerinden biridir. Delme, katı geometrili metalik iş parçalarında delik açmanın en verimli ve etkili yolu olarak kabul edilmekle birlikte, tek bir matkap ile delinebilecek maksimum delik çapının bir sınırı bulunmaktadır. Genel olarak demir alaşımları için bu çap sınırı 9 ile 13 mm arasında değişmektedir. Çalışma malzemesi ne kadar güçlü olursa, sınırlama değeri o kadar küçük olmaktadır [43].

Tornalama ile birlikte delme, tüm metal kesme işlemlerinin yaklaşık % 30'unu (% 22 katı delme) oluşturan en önemli metal kesme işlemlerinden biridir. Talaş oluşumunun kapalı alanda gerçekleşmesi ve matkabın yivlerindeki sınırlı talaş kaldırma alanı ve talaş - iş parçası malzemesi arasındaki sürtünme nedeniyle ortaya çıkan ısının tahliyesi, delme işlemini diğer talaş kaldırma proseslerine göre daha zor hale getirmektedir. Ayrıca dönme ekseninde sıfır olan kesme kenarı boyunca değişken kesme hızı önemli bir sorundur. Bu nedenle, matkap takımının ve işlemin belirli işleme görevine, iş malzemesine, oluşturulacak deliğin kalitesine ve gerekli işlem güvenilirliği düzeyine uyarlanması gerekmektedir. Bunlar, çok sayıda takım geometrisi ve takım malzemesinin yanı sıra delme ve delik delme stratejilerinin geliştirilmesinin nedenleridir [44].

Delik delme işlemi önemli talaşlı imalat tekniklerinden biri olup, matkap adı verilen özel imal edilmiş kesici takımlarla iş parçası üzerine silindirik boşluk oluşturma işlemidir. Delik delme işleminde talaş kaldırma, Şekil 3.1'de görüldüğü gibi kesici takımdaki veya iş parçasındaki dönme ve öteleme (doğrusal) şeklindeki hareketlerle gerçekleşir.



Şekil 3.1. Delik delme işleminin şematik gösterimi [45].

Matkapların karmaşık geometrisi nedeniyle delme işlemi en karmaşık işleme süreçlerinden biridir. Son zamanlardaki gelişmelerle matkap tutarlılığı büyük ölçüde artmış olsa da, tutarlı geometrilere sahip matkaplar üretmenin zorluğu bilinmektedir. Takım geometrisinin karmaşıklığı yeni takım malzemelerinin kullanılmasını engellemiştir, bu nedenle son 30 yılda tornalama ve frezelemede yapılanların gerisinde kalmıştır. Delme, çoğunlukla metal malzemelerin işlenmesi için kullanılmıştır. Son yıllarda, metalik olmayan malzemeler (plastikler, seramikler ve kompozit malzemeler), çeşitli endüstrilerde sürekli olarak metal parçaların yerini almaktadır. Delme performansı, işlenen malzemeye, matkap geometrisine, kesme parametrelerine (iş mili hızı ve eksenel ilerleme hızı) ve işlem koşullarına bağlıdır [46].

3.2. Delme Parametreleri

Delik delme işleminde takımın kendi etrafında dönüşü ve ilerleme hareketi olmak üzere iki hareket söz konusudur. Bu hareketler kesme hızı ve ilerleme hızı parametrelerini belirler. Aynı zamanda takım geometrisi ile birlikte bu iki hareket talaş kesitini belirlemektedir [47].

Kesme hızı (V_c)

Delme işlemlerinde matkap üzerindeki bir noktanın dakikada metre cinsinden aldığı yola kesme hızı denir. Kesme hızı (V_c), dönme hareketi nedeniyle çevresel hız kullanılarak belirlenir. Takım çapı (D) olmak üzere matkap bir dönüşte çevresi $\pi \cdot D$ olan bir daire çizer ve dönme hareketinden kaynaklı dakikadaki devir sayısına (n) bağlı olarak kesme hızı;

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

Eş. 3.1

olarak hesaplanır.

Kesme hızı takım ömrünün belirlenmesinde temel faktördür ve ayrıca güç tüketimini de etkiler.

Aşırı yüksek kesme hızları;

- Matkap üzerinde hızlı yüzey aşınmasına,
- Kesme kenarlarında plastik deformasyona,
- Düşük delik kalitesine,
- Tolerans dışı sonuçlara

yol açabilmektedir

Çok düşük kesme hızları ise;

- Matkap üzerinde talaş yığılması oluşumuna,
- Talaş tahliyesinin olumsuz etkilenmesine,
- Düşük verimlilik/delik başına yüksek maliyete

sebeplenebilmektedir.

İlerleme hızı (V_f)

İlerleme hızı, genel olarak kesici takımın iş parçası üzerinde birim zamanda milimetre olarak aldığı mesafedir. Delme için besleme hızı, malzemenin sertliğine, matkabın yapıldığı malzemenin türüne ve matkap ucunun boyutuna bağlıdır. İlerleme hızıyla doğru orantılı olduğundan daha yüksek ilerleme hızı, daha yüksek malzeme kaldırma oranını göstermektedir. Bu nedenle, daha yüksek ilerleme hızının üretkenliğe ve talaş kontrolüne olumlu etkisi görülmektedir. Ancak daha yüksek ilerleme hızı, düşük yüzey kalitesine ve dolayısıyla yüzey pürüzlülüğü değerinin daha yüksek olmasına neden olmaktadır.

İlerleme hızı;

$$Vf = f \cdot n \text{ (mm/dk)}$$

Eş. 3.2

olarak hesaplanır. Bu eşitlikte;

Vf : İlerleme hızı (mm/dk),

f : Devir başına ilerleme (mm/dk),

n : Devir sayısı,

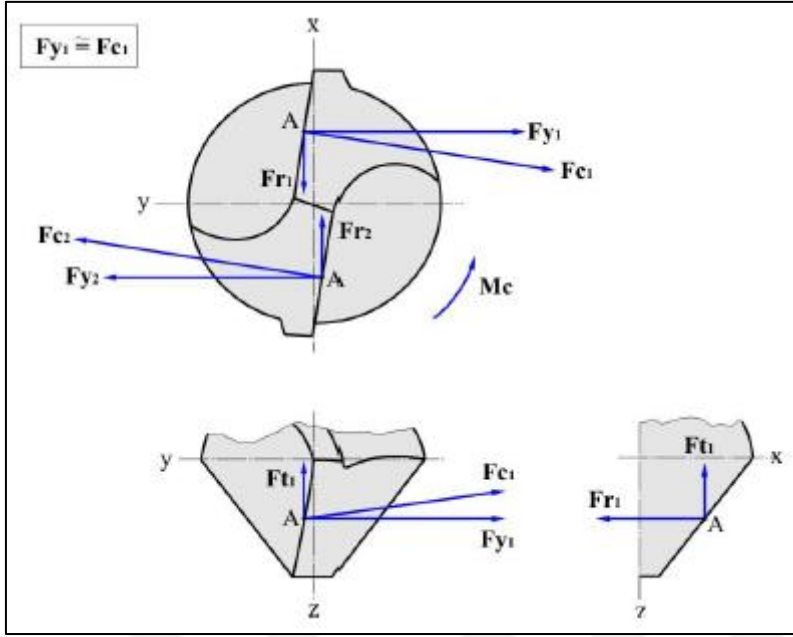
ifade etmektedir.

3.3. Delik Delme İşlemlerinde Kesme Kuvvetleri ve Moment

Delik delme işlemlerinde özgül kesme kuvveti, 1 milimetre karelik bir talaş kesit alanını kesmek için gerekli olan teğetsel kuvveti veya efektif kesme kuvvetinin teorik talaş alanına oranı olarak tanımlanır [48]. Delik delme işleminde matkap, delik boyunca ilerlemek ve talaş kaldırmak için enerji harcar. Matkabin kesici kenarları talaş kaldırmaya başladığı an kesme kuvvetleri matkabin kesici kenarlarına etki etmeye başlar ve bu işlem için bir miktarda güç gereklidir. Gerekli olan bu güç, iş parçası malzemesinin cinsine göre farklılık gösterdiği için gücün, momentin ve ilerleme kuvvetinin hesaplanmasında özgül kesme kuvvetine (kc-N/mm²) ihtiyaç vardır [49].

Kuvvetlerin hesaplanması

Delme işlemi esnasında matkabin bir ağzına gelen talaş kaldırma kuvveti bileşenleri Şekil 3.2’de görüldüğü gibi kesme kuvveti ($F_c = F_y$), ilerleme kuvveti (F_t) ve radyal kuvvetten (F_r) oluşmaktadır.



Şekil 3.2. Matkap ucunu etkileyen kuvvetler [49].

Matkapta bulunan ağızların konumu itibarıyla her ağızda oluşan radyal kuvvetler birbirini dengelemektedirler. Bundan dolayı delme işleminde sadece F_c ve F_t kuvvetleri hesaba katılmaktadır[50]. Matkap ucu incelendiğinde, kesici ağızlardan birinin üç kuvvetin etkisi altında olduğu görülür. Takımın iki kesici ağızdan oluştuğu kabulü ile;

$$F_t = F_{t1} + F_{t2} \text{ (eksenel kuvvet)} \quad \text{Eş. 3.3}$$

$$F_{y1} = F_{y2} \text{ (teğetsel kuvvet)} \quad \text{Eş. 3.4}$$

$$F_{c1} = F_{c2} \text{ (kesme kuvveti)} \quad \text{Eş. 3.5}$$

İlerleme kuvveti (F_t) genelde deneysel yollarla belirlenir. F_y teğetsel kuvvet ile F_c kesme kuvveti pratikte birbirine eşit olarak kabul edilir. Bugüne kadar yapılan çalışmalar neticesinde ilerleme kuvveti;

$$F_t = 2F_c \cdot \sin \psi/2 \text{ (N)} \quad \text{Eş. 3.6}$$

$$F_t = K \cdot (s.d)0.8 \text{ (N)} \quad \text{Eş. 3.7}$$

Yazılan bu eşitliklerden $F_t = K \cdot (s.d)0.8 \text{ (N)}$ gerçeğe daha yakın sonuçlar verdiği için ilerleme kuvveti hesaplamalarında daha çok tercih edilmektedir. Bu eşitliklerde;

F_c : Esas kesme kuvveti (N),

S : İlerleme miktarı (mm/dev),

d: Takım çapı (mm),

ψ : Uç açısı,

K: Delinen malzemeye göre belirlenmiş sabit değeri

ifade etmektedir [50].

3.4. Euro 7 Normları

İçten yanmalı motorlarda, yanma sırasında yakıt içerisindeki Hidrokarbonlar, hava içindeki Oksijen ile birleşerek çeşitli bileşikler oluşturur, bunların % 99'u Su, Azot, Oksijen ve Karbondioksit gibi zararsız gazlardır. Çevre ve İnsan sağlığına zararlı bileşikler ise; Karbon Monoksit (CO), Hidrokarbonlar (HC), Azot Oksitler (NO_x) ve Katı Parçacıklar (PM) olarak sıralanmaktadır. Dünyada Emisyonlara yönelik ilk düzenlemeler 1968 yılında California'da, ilk sınırlama ise 1972 yılında Avrupa Birliği ülkelerinde ECE R 15.00 Regülasyonu ve EEC 72/220 Yönetmeliği ile başlamıştır. Günümüzde; tüm gelişmiş ve gelişme yolundaki dünya ülkeleri, çeşitli standartlarla (EEC/ECE, EPA, JIS) Egzoz Emisyonlarına denetimler uygulamaktadır.

Karbon dioksit (CO₂), Avrupa Birliği binek otomobil emisyon politikaları için tarihsel olarak önemli bir itici güç olmuştur. 1998 Kyoto Protokolü çerçevesinde, Avrupa Otomobil Üreticileri Birliği, yeni otomobillerden ortalama CO₂ emisyonlarını 2008 yılına kadar 140 g/km'ye düşürmek için Avrupa Komisyonu ile gönüllü bir anlaşmaya varmışlardır [51]. Emisyon sınırları; araç sayısı ve çevresel etkilerinin artması, gelişen teknoloji, küresel ısınmada araçların rolü gibi etkenlerle ve atmosfere CO₂ emisyonlarının azaltılması (KYOTO) gibi hedeflerle, her dört -beş yılda bir gittikçe düşürülerek sıkılaştırılmaktadır. Bazı yerel yönetimler (California, Londra, Milano vb.) "Low Emission Zone" amaçlı veya aşırı kirlilik nedeniyle daha da düşük limitler (EEV) talep edebilmektedir. Emisyon sınırlarına uyum için motorlar sürekli geliştirilmekte, günümüzde motorlarda son derece kompleks ve pahalı teknolojiler kullanılmaktadır. Gelecekteki "Sıfır Emisyon" hedefi için, Elektrik veya Hidrojen gibi alternatif enerjiler kullanan "Hibrid" motorların geliştirme süreci başlamıştır.

Günümüzde, otomotiv emisyonları hava kirliliğine neden olan en önemli etkenlerdendir. Geçtiğimiz yirmi yıl boyunca, Avrupa Komisyonu (AK), özellikle göze çarpan iklim

değişikliği üzerindeki etkisini azaltmak için özellikle yolcu taşıtlarına yönelik CO₂ emisyonlarının azaltılmasına odaklanmıştır [52]. NO_x, CO₂ ve CO gibi egzoz gazları atmosferin ve çevrenin bozulmasının başlıca nedenleridir ve solunum ve cilt hastalıklarına yol açmaktadır. Emisyon düzenlemeleri, egzoz gazı emisyonlarını zamanla sıfıra indirmek için tasarlanmıştır. Avrupa emisyon düzenlemeleri 1992 yılında yürürlüğe girmiş olup, Eylül 2014 tarihinden itibaren geçerli olmak üzere Euro 6 düzenlemeleri yapılmıştır. Yapılan düzenlemeler sonucunda belirlenen dizel motorlu binek taşıtları için emisyon değerleri Çizelge 3.1’de görülmektedir [53].

Çizelge 3.1. Dizel motorlu binek taşıtları için AB emisyon standartları (g/km) [53].

	Tarih	CO	HC+NO _x	NO _x	PM
Euro 1	07.1992	2,72	0,97	-	0,14
Euro 2	01.1996	1	0,7	-	0,08
Euro 3	01.2000	0,64	0,56	0,5	0,05
Euro 4	01.2005	0,5	0,3	0,25	0,025
Euro 5	09.2009	0,5	0,23	0,18	0,005
Euro 6	09.2014	0,5	0,17	0,08	0,005

Dizel motorlarda emisyon oranlarını düşürmek için yakıt tüketimini minimum seviyelerine indirmek hedeflenmekte ve bu amaçla yeni tip enjektör ve dizel motor parçaları geliştirilmektedir. Bunun yolu ilk olarak enjektör ve nozullardaki sıkıştırma oranını yani basıncı yüksek seviyeleri çıkarmaktan geçmektedir. Bu koşullara uygun dizel enjektör parçalarının malzeme yapıları ise dayanımı yüksek malzemelere ihtiyaç göstermekte, son geliştirilen ürünlerde Cr ve Ni alaşımlı malzeme kullanma eğilimi artmaktadır. Bu eğilim, parçanın basınca karşı dayanımını ve bu basınçlar altındaki sürtünme-aşınma davranışlarını iyileştirse de parçanın ihtiyaç duyulan yüksek hassasiyete sahip formlarda talaşlı imalatını oldukça zor bir hale getirmektedir. Bu kapsamda yeni nesil dizel motor parçalarındaki gelişmeler maliyetleri de arttırmaktadır.

Son 15 yılda, araç emisyon kontrol sistemlerinin ve diğer güç aktarma önlemlerinin artması nedeniyle Avrupa Birliği hava kalitesi genel olarak iyileşmiştir; ancak şehirler hala hava kalitesi sınır aşımaları yaşamaktadır. 17 Avrupa Birliği Üye Devletleri şu anda NO₂ ve / veya PM ve araç egzoz gazının zararlı bileşenlerine halkın maruz kalmasını azaltmak için daha fazla önlem alınması gerektiği düşünülmektedir.

Dizel araçlardan ek vergi almak için Avrupa şehir yasalarıyla birleştirilmiş Euro 7 emisyon

normları, dizel pazar payını etkileyecektir. Frost & Sullivan analizine göre, Batı Avrupa'daki dizel pazar payının mevcut % 53'ten % 50'nin altına düşmesi beklenmektedir. Bu durum, şu anda pahalı olan, seçici katalitik indirgeme sistemleri (SCR'ler) gibi ileri partikül madde kontrol teknolojilerinin ek maliyetlerinden kaynaklanmaktadır, ancak fiyatların 2020'ye kadar kabul edilme oranlarının % 15 ila % 20 oranında düşmesi beklenmektedir. Bu, dizel otomobillerin merkezi iş bölgelerine girmesini engelleyen farklı Avrupa şehir politikaları ile ek vergilere sahip özel ultra düşük emisyon bölgeleri ile birlikte, dizel piyasasını küçültmeye zorlayacaktır. 3 Alman üreticinin, benzinli aktarma organları portföyündeki yeni plug-in ve full hibrid modellerin piyasaya sürülmesi ile dizel bağımlılıkların azaltılması beklenmektedir. Dizel emsallerinin hibridizasyonu, bir dizel motorunun hibridize edilmesindeki maliyet farkları nedeniyle aynı hıza şahit olabilmektedir. Gelişmiş dizel güç aktarma sistemi ile ilgili ek maliyet, baz motor üzerinden 400 € - 900 € arasında değişmektedir. Sürekli değişken valf teknolojisi (CVVT), doğrudan benzin enjeksiyonu (GDI) ve küçültme gibi teknolojilerin uygulanması, bir benzinli motorun selefine göre yakıt tasarrufu potansiyelini % 20 ila % 25 oranında artırmaktadır. Orjinal parça üreticileri, 2018 yılına kadar her otomobil segmentinde GDI ve CVVT'li küçültülmüş motorları piyasaya sürmeye çalışmaktadır. Bu, start stop, yalın yanma stratejisi ve gelişmiş şanzımanlar (CVT ve DCT) gibi teknolojilerle birleştiğinde, üreticilerin 2020 CO₂ hedeflerine ulaşmalarında yardımcı olacağı görülmektedir. Küçültme ile ilgili ek maliyet, yaklaşık 1.700 ila 2.000 € arasında olacaktır [2]. Bu durum düşük segmentteki dizel otomobil pazarını olumsuz yönde etkileyecektir.

17 Nisan 2019'da, Avrupa Parlamentosu ve Konsey, 2020 sonrası dönemde AB'de yeni binek ve hafif ticari araçlar (minibüsler) için CO₂ emisyon performans standartlarını belirleyen 2019/631 sayılı Tüzüğü (AB) kabul etmiştir.

Beklenen faydalar arasında;

- 2030 yılında 2005 yılına kıyasla karayolu taşımacılığında kaynaklanan sera gazı emisyonlarının %23 oranında azaltılması ve Üye Devletlerin Çaba Paylaşım Yönetmeliği uyarınca ulusal hedeflerine ulaşmalarının desteklenmesi;
- 2030'da satın alınan ortalama yeni bir otomobilin ömrü boyunca ortalama 1,100 Euro ve ortalama yeni bir kamyonet için yaklaşık 4,000 Euro olan tüketiciler için tasarruf elde edilmesi;

- 2030'da yaratılan yaklaşık 60.000 iş ve AB'de piller üretilirse 80.000'e kadar olan istihdamın toplam ekonomi üzerindeki olumlu etkileri;
- Otomotiv sektöründeki çalışanların yeterli şekilde yeniden toplanmasını ve yeniden tahsis edilmesini sağlamak için yeterli zaman sağlayan sıfır emisyonlu mobiliteye doğru yumuşak ve kademeli bir geçiş;
- Yatırımcılara, altyapının yeniden yakıt doldurulması ve yeniden doldurulması konusunda bir sinyal vermesi; sıfır ve düşük emisyonlu araçların kullanılmasına olanak tanıyan koşulların yerine getirilmesinin sağlanacağı belirtilmektedir [54].

Ragon ve Rodriguez [55], yaptıkları çalışmada Avrupa Komisyonu tarafından Euro 7 standartlarının gereksinimlerini geliştirmesi doğrultusunda, üreticilerin söz konusu yeni limitlere uymak için katlanmak zorunda kalacakları artan maliyetlerin tahmini hakkında bilgi açığını kapatmayı amaçlamışlardır. Ağır vasıtalar için bu tür teknolojilerin geliştirilmesiyle ilgili maliyetlere ilişkin bulguların;

- Genel olarak, Euro 6 uyumlu emisyon kontrol sistemine kıyasla Euro 7 standartlarını karşılamının artan maliyetlerinin 2025'te 1.500 ile 4.700 Euro arasında ve 2030'da 1.400 ile 4.300 Euro arasında olacağı ve bu nedenle Euro 7'nin Euro 6 araçların mevcut fiyatına göre %2 ila %5 arasında bir maliyet artışına neden olacağı,
- Kullanım ömrünün 1,3 milyon kilometreye çıkarılması, sistem maliyetlerini yaklaşık 1.000 € veya kamyon fiyatının %1'i kadar artıracığı, gerekli tam faydalı ömür gereksinimlerinin mevcut 700.000 km'den 970.000 km'ye ve 1.300.000 km'ye çıkarmanın, 2025'te sırasıyla yaklaşık 700 € ve 1.000 € ortalama ek maliyete yol açacağı, şeklinde olduğu belirtilmiştir.

3.5. Dizel Enjektör Nozul Tasarımı ve Üretimindeki Değişiklikler

Euro 7 standartlarının gereksinimleri kapsamında daha az emisyon değerlerine sahip olan uygun dizel motoru geliştirme çalışmaları devam etmektedir. Euro 7 motorunun geliştirilebilmesi için dizel motorların vazgeçilmezi olan dizel enjektörlerinin daha da geliştirilmesi gerekmektedir. Enjektör nozulu bir dizel motoru için oldukça önemli parçalarından biridir. Çünkü enjektörler içten yanmalı motorların silindirlerine yakıt verme amacıyla kullanılan yapıdır. Enjeksiyonlu dizel motorların iyi bir şekilde çalışması hava

yakıt karışımı olan sprey kalitesine bağlıdır. Nozul kısımlarında yapılacak olan iyileştirmeler spreylemenin de kalitesini arttıracaktır [56, 57]. Nozul delik ve kanal geometrisinin işleme kalitesi püskürtme karakteristiklerini ve bundan dolayı motor performansı ve kirletici oluşumu için belirleyici olan atomizasyonu etkiler. Böylece emisyon değerlerinin değişmesine neden olur [58-62].

Dizel motorlarının yüksek verimi, düşük kullanım maliyeti, yüksek dayanım ve güvenilirlikleri onları pazarda lider duruma getirmiştir. Dizel motor pazarının bu denli hızlı bir şekilde büyümesi, çevreyle ilgili oluşabilecek sorunların dikkatli bir biçimde incelenmesi ve değerlendirilmesini gerektirmiştir. Dizel motorlarında yanma sonucu oluşan egzoz gazındaki kirleticilerin en önemlileri; partikül madde (PM), azot oksit (NO_x), hidrokarbon (HC) ve karbon monoksit (CO) emisyonlarıdır. Dizel motorlu taşıtlar, dizel motorların termal verimlerinin daha yüksek olması sebebiyle, benzin motorlu taşıtlara göre daha az CO ve yanmamış HC açığa çıkarırlar. Fakat dizel motorlarda açığa çıkan PM ve NO_x emisyonları, benzin motorlu taşıtlara göre daha yüksektir [1].

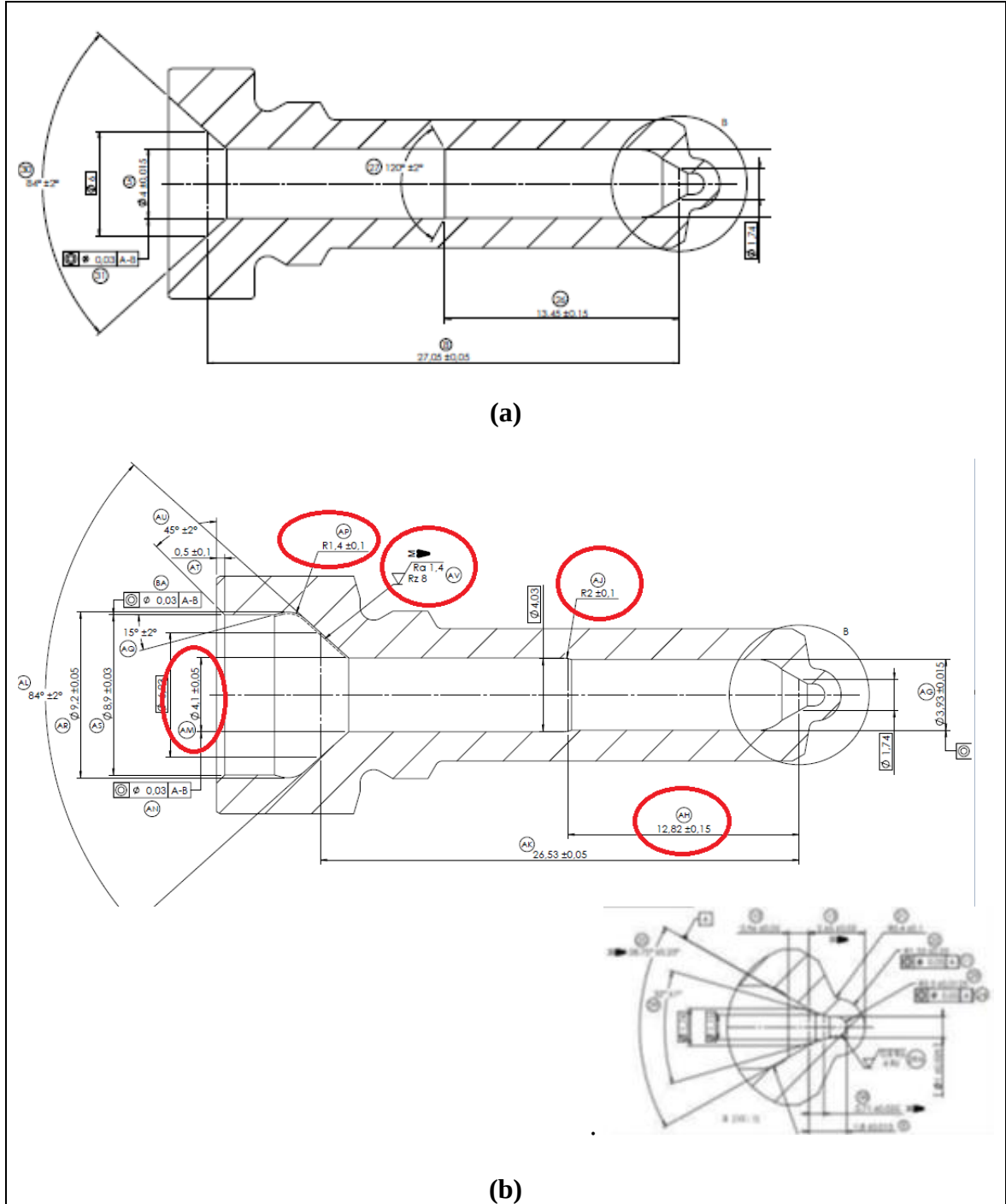
Euro emisyon standartları Avrupa Birliği ülkelerinde geçerli olup, egzozdan çıkan zararlı gaz ve partikülleri, kademeli olarak ve belirli bir takvim içerisinde azaltma programının genel tanımıdır. Bu gazların zamanla kademeli olarak azaltılması hedeflenmektedir. Euro standardında rakam büyüdükçe taşıtların çevreye verdiği zarar azalmaktadır. Dünyada California'da emisyonlara yönelik ilk düzenlemeler 1968 yılında, ilk sınırlama ise 1972 yılında Avrupa Birliği ülkelerinde ECE R 15.00 Regülasyonu ve EEC 72/220 Yönetmelik'i ile başlamıştır. Euro 6 Avrupa Birliği ülkelerinde Eylül 2014 itibarıyla yürürlüğe girmiş ve tüm yeni taşıtların Euro 6 limitlerini karşılaması zorunlu olmuştur. Avrupa Birliği (AB) ülkeleri ve düzenleyicileri, benzin araçların dizelden daha fazla karbondioksit salınımına sebep olduğu için dizel araçlara önemli destekler vermiş ve bu sayede yukarıda adı geçen dev otomotiv firmaları dizel araç teknolojileri için milyarlarca Euro'luk yatırımlar yapmışlardır. VW emisyon skandalıyla birlikte dizel konusunda daha sert kararlar alınacağı ortada olup bu amaçla Euro 7 standardı hazırlanmış ve 2021 yılı itibarıyla de yürürlüğe girmesi planlanmıştır. Bu durum dizel motorlar için parça üreten firmaları şimdiden hareket geçirmiş ve normun ihtiyaçlarını karşılayabilmek için prototip üretme çalışmaları başlamış, en önemli bileşen konumunda olan Euro 7' ye uygun dizel yakıt enjektörleri için nozul tasarımları geliştirmişlerdir. Ancak bu tasarımların ihtiyaç gösterdiği kompleks geometri, yüksek hassasiyet ve yüksek dayanım ihtiyacı mevcut üretim platformlarındaki üretimi

güçleştirmiş, prototiplerde ciddi problemlerle karşı karşıya kalmışlardır. Bu sebeple nozul üreticisi firmalar, yüksek maliyetli makine parkına yatırım yapmaktan çok mevcut üretim platformuna uygun takımlama sistemlerinin geliştirilmesine ihtiyaç duymuşlardır. Bu takımlamanın performansı gelecek nesil Euro 7 normlarına uygun taşıtların fiyatları üzerinde de etkili olacağından bir anlamda bu sıkı normların yaratacağı yüksek ek maliyetlerin düşürülmesiyle dizel motorların geleceği de şekillenmiş olacaktır.

2018 yılı itibariyle üretilecek olan dizel motorlara takılması planlanan yeni tip nozullar sektörün dev firmaları tarafından tasarlanmış olmakla birlikte prototip üretimlerinde dahi bir çok sıkıntılar yaşanmaktadır. Şekil 3.3'te görüldüğü gibi Euro 7 nozullarda;

- Bir önceki Euro 6 tipi nozullara göre 4 kat daha yüksek yüzey kalitesi,
- Yakıtın daha rahat akması için açılar yerine nozul iç bölgesinde daha radyuslu geçişler ve
- Tüm bu ölçülerin de aynı zamanda 4 kat daha dar toleranslı üretilmesi beklenmektedir.

Nozul üreticilerinin 2 farklı üretim şekli vardır. İlki takımları da aktif olarak kullanmaktadır (döner takım/döner iş parçası). Yıldız şeklinde döner tablalı bir üretim yöntemi olduğundan en uzun süren operasyon süresi parçanın çıkış süresini ifade etmektedir. Diğer yöntemde ise sabit takım/döner iş parçası uygulaması söz konusu olup takımlama için maks. 9 takımlık bir taret mevcuttur. Taretteki istasyonlardan tornalama işlemleri dışında maksimum altı istasyonun delik takımları için kullanılması mümkündür. Bu yöntemde diğerine göre daha yavaş üretim yapılsa da hassasiyet ve yüzey kalitesi anlamında daha rijit ve hassas üretim gerçekleştirilmektedir. Bu yöntemin en büyük dezavantajı ise takım istasyon sayısının sınırlı olmasıdır. Yeni Euro 7 tipindeki gereksinimler ancak bu ikinci üretim yöntemi ile sağlanabilmektedir. Bundan dolayı Euro 7 için tasarlanacak olan takımların sayısı maksimum 9, delik operasyonları için de maksimum 6 adet olmalıdır. Oysaki Euro 7 nozul geometrisinde 8 ayrı delik işleminin gerçekleştirilmesi gerekmektedir. Bu kapsamda yeni nesil Euro 7 nozulların üretimi için takım sayısını minimize ederek en fazla 6 delik takım kullanılarak üretimin sağlanabileceği bir takımlama sisteminin geliştirilmesi, tasarımı ve prototip üretimin gerçekleştirilmesi hedeflenmiştir.



Şekil 3.3. (a) Euro 6 ve (b) Euro 7 nozul tipleri

Enjektör ve nozullardaki sıkıştırma oranını yani basıncı yüksek seviyeleri çıkarmak için enjektör parçalarının malzeme yapıları dayanımı yüksek malzemelere ihtiyaç göstermektedir. Bu kapsamda son geliştirilen ürünlerde Cr ve Ni alaşımlı malzeme kullanma eğilimi artmaktadır. Bu eğilim, parçanın basınca karşı dayanımını ve bu basınçlar altındaki sürtünme-aşınma davranışlarını iyileştirse de parçanın ihtiyaç duyulan yüksek hassasiyete sahip formlarda talaşlı imalatını oldukça zor bir hale getirmektedir.

4. MATERYAL VE METOT

Bu çalışmada, yüksek hassasiyet ve yüzey kalitesine ihtiyaç duyan ve Euro 6 nozul geometrisine kıyasla daha karmaşık bir geometriye sahip Euro 7 nozulların mevcut talaşlı imalat platformları ile üretilmesi amacıyla yeni bir takımlama sistemi tasarımı ve üretimi gerçekleştirilmiştir. Geliştirilen özgün matkap geometrilerinin, nozul malzemesi ile aynı kimyasal kompozisyona sahip AISI 304L malzemesi ile yapılan deneysel çalışmalarla Euro 7 nozul gereksinimlerine uygunluğu araştırılarak en uygun kesme parametrelerinin belirlenmesi sağlanmıştır.

Bu çalışmada, geliştirilen matkap geometrileri; ilerleme kuvveti, moment ve delik kalitesi (yüzey pürüzlülüğü ve geometrik toleranstan sapmalar) verilerine göre deneysel olarak karşılaştırılmıştır. Sanal simülasyonlar Deform® yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiş, deneysel ve sanal simülasyon analizlerinin sonuçları değerlendirilerek optimum geometri ve optimum işleme şartları belirlenmiştir. Elde edilen özgün kanal formuna sahip matkap prototipleri, işlenebilirlik testlerine tabi tutulmuştur. Yüksek mukavemetli nozul malzemesi üzerinde yapılan deneysel ve sanal simülasyon analizlerinin sonuçları değerlendirilerek optimum işleme parametreleri belirlenmiştir.

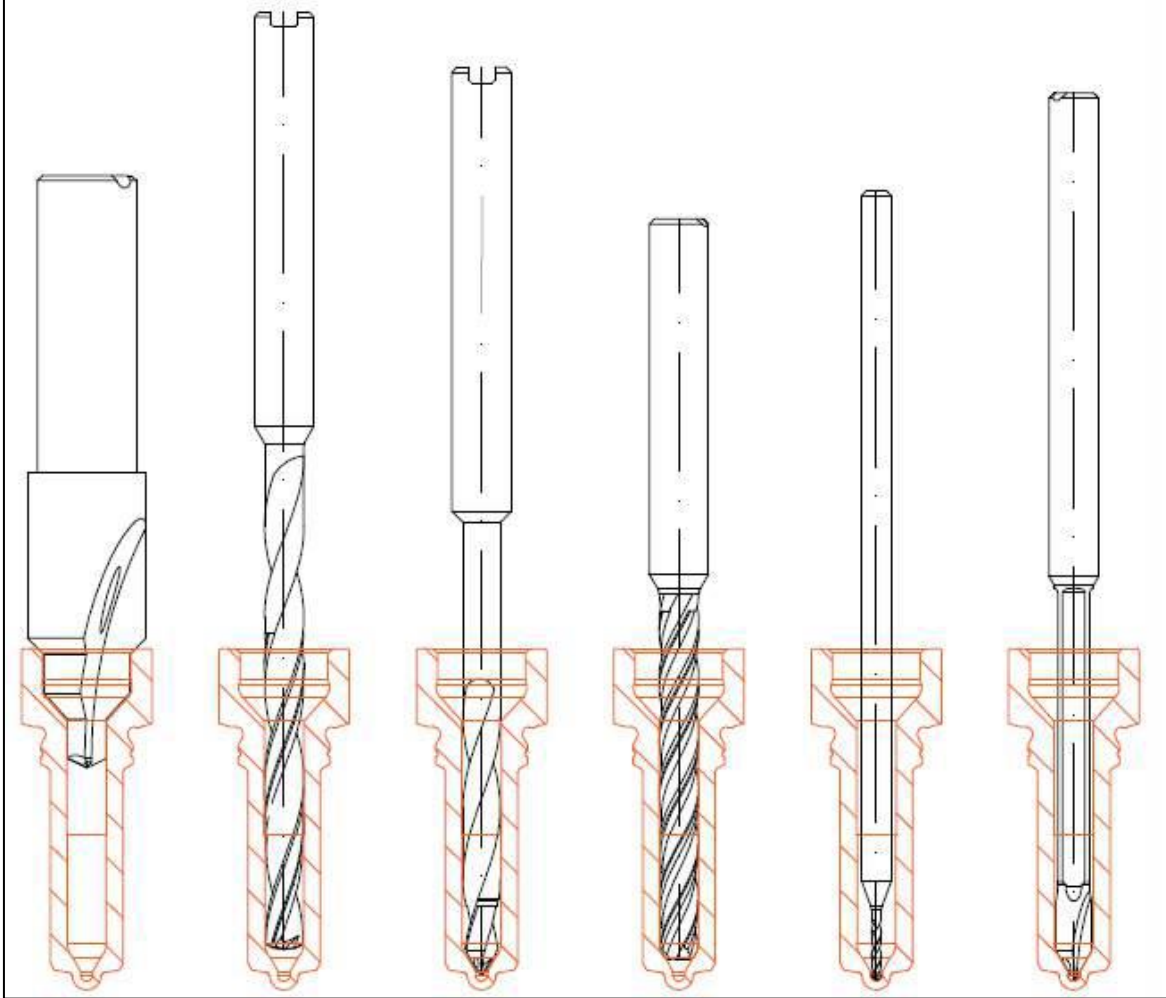
Sonuç olarak, delik delme operasyonlarında matkap geometrisinin ve diğer işleme parametrelerinin belirlenmesinde, farklı yaklaşımların deney sonuçları üzerindeki önemi ve etki oranları ortaya konmuştur. Bu çalışmaların gerçekleştirilmesi için kullanılan malzeme ve yöntem bu bölümde “Analitik Çalışmalar” ve “Deneysel Çalışmalar” ana başlıkları altında incelenmiştir.

4.1. Analitik Çalışmalar

Tez kapsamında yapılan analitik çalışmalar, takım tasarımı ve delme analizleri olarak iki başlık altında değerlendirilmiştir.

4.1.1. Takım tasarımı

Takımlandırmanın yapılması için Şekil 3.3. (b)'de görülen Euro 7 detay geometrisi üzerinde çalışılmış ve Şekil 4.1'de görüldüğü üzere nozulun geometrisini elde edebilmek amacıyla 6 adet takım ile takımlandırılmıştır.

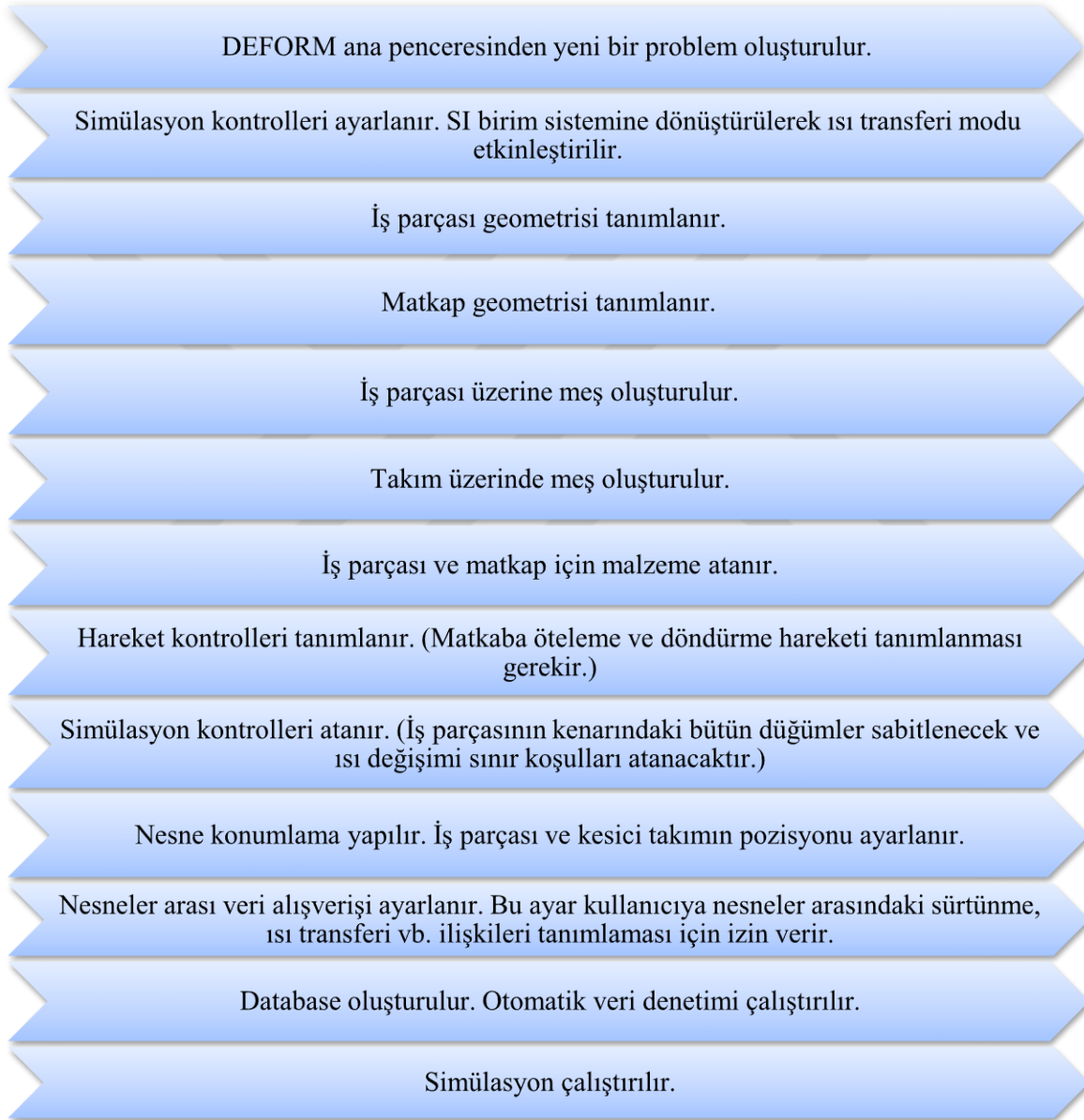


Şekil 4.1. Euro 7 nozul takımlandırması

4.1.2. Delme analizleri

Talaş kaldırma simülasyonlarında modelleme kısmı, doğru sonuçlara ulaşmak için önemli bir adımdır. Deform-3D® Sonlu Elemanlar Metodu kullanılarak çeşitli analizler yapılabilmektedir. Takım - iş parçası ısı analizleri ve takım kuvvet analizi bu analizlere örnek olarak yapılmıştır. Söz konusu analizler deneysel çalışma öncesi sonuçların tahmininde önemli rol oynamaktadır. Bu analizler ile takımların, deneysel çalışmalara

geçilmeden, ilgili delme işlemlerini gerçekleştirebileceği sanal ortamda test edilmiş ve uygulanabilir esas işleme parametrelerinin belirlenmesi amacıyla deneysel çalışmalara bu sonuçlar ışığında devam edilmiştir. Oldukça maliyetli ve zaman kaybettiren atölye deneme-yanılma çalışmalarının yerine bu yazılım kullanılmış ve gerçeğe yakın sonuçlar elde edilmiştir. Çalışmanın algoritması Şekil 4.2’de sırasıyla gösterilmiştir.



Şekil 4.2. Deform-3D sonlu elemanlar metodunun aşamaları

4.2. Deneysel Çalışmalar

Analitik çalışmaların ardından Euro 7 nozul malzemesi ile aynı kimyasal kompozisyona

sahip AISI 304L malzemesinin, deneylerde kolay işlenebilirliğin sağlanabilmesi ve kuvvet, moment ölçümlerinin kolayca yapılabilmesi amacıyla belirli ebatlarda kesilmiş halde sertifikalı olarak temini gerçekleştirilmiştir. Nozul geometrisinin elde edilmesi amacıyla 6 adet takımın prototip imalatı gerçekleştirilmiş ve bu takımlarla ön deneylere geçilmiştir. Ön deneylerin ardından işleme parametrelerinin belirlenmesi amacıyla deneyler yapılmış ve üretim aşamasında kullanılacak en uygun parametre değerleri belirlenmiştir. Takım performanslarının belirlenmesi ve elde edilen nozul geometrilerin doğrulması amacıyla yüzey pürüzlülük değerleri ölçülmüştür. Bu değerlerin istenen sonuçları vermesinin ardından performans deneyleri ve ömür testlerine geçilmiştir.

4.2.1. Malzeme bilgisi

Euro 7 nozulların üretimde kullanılan malzeme ile aynı kimyasal kompozisyona sahip AISI 304L malzeme kullanılmıştır. Sertifikalı olarak temin edilen malzemenin kimyasal kompozisyonu Çizelge 4.1’de verilmiştir. Performans testlerinde seri işleme yapabilmek için deney numuneleri kuvvet/moment ölçümleri için kullanılacak dinamometreye uygun olarak 80x80x40 boyutlarında kesilerek hazırlanmıştır.

Çizelge 4.1. AISI 304L östenitik paslanmaz çeliğin kimyasal kompozisyonu [63].

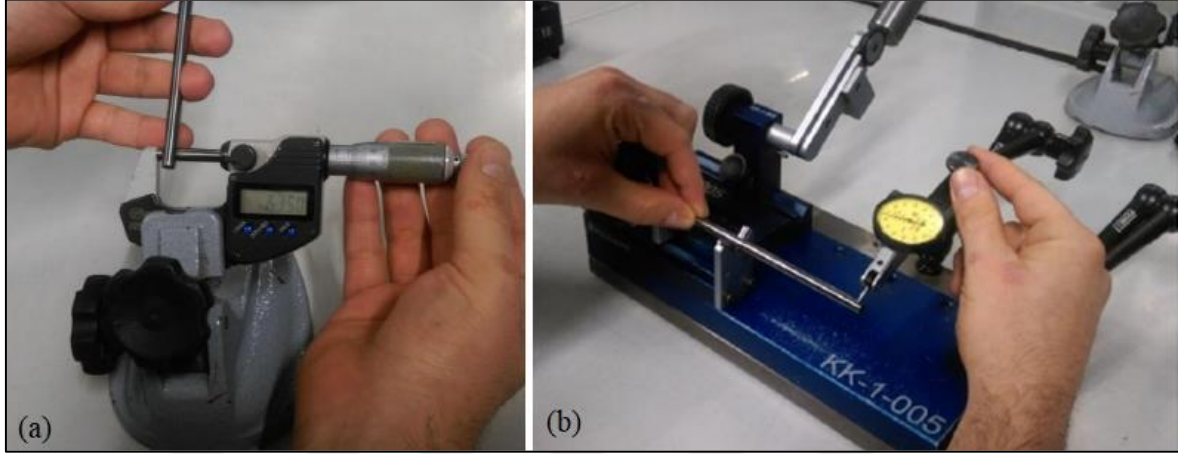
C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu
0,059	0,581	1,08	0,029	0,001	18,06	8,15	0,064	0,15

4.2.2. Takım imalatı / geometri ve ölçü kontrolü

Nozul geometrisini elde edebilecek 6 adet takımın prototip imalatlarının elde edilmesi amacıyla,

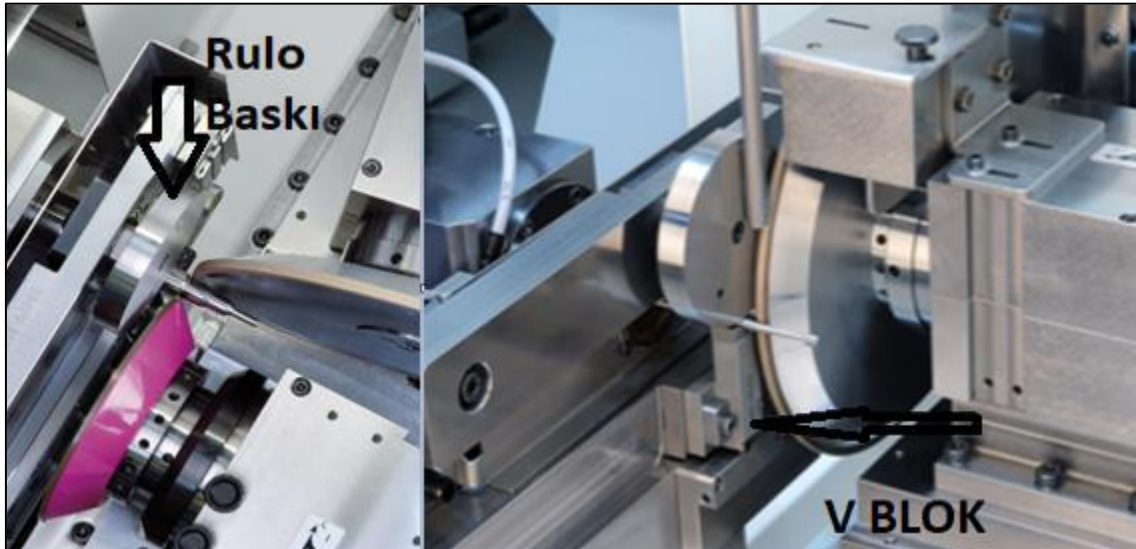
- Ürün taslaklarının hazırlanması ve kontrolü,
- Geometrilerin taşlanması için kullanılacak taş setlerinin hazırlanması ve kontrolü,
- Prototip ürünlerin taşlanması ve kontrolü yapılmıştır.

Ürünlerin hammadde temini istenen kalite ve formda (özel içten soğutma kanallı) yapılmıştır. Hammadde kaynaklı problem yaşanmaması sebebiyle Şekil 4.3'te görülen araçlar ile çap, salgı, ovalite kontrollerinin ardından silindirik taşlama prosesine geçilmiştir.



Şekil 4.3. (a) Dijital mikrometre ile çap ve (b) özel V yataklı manuel salgı kontrolü

Ürünlerin silindirik taşlama sürecinde hassas çap ve salgı toleransları sebebiyle Şekil 4.4'te görülen V blok ve rulo baskı yardımıyla Çizelge 4.2'de teknik özellikleri verilen silindirik CNC (Rollomatic NP5) taşlama tezgahında çap ve yüzey kalitesi değerleri yakalanması sağlanmıştır.



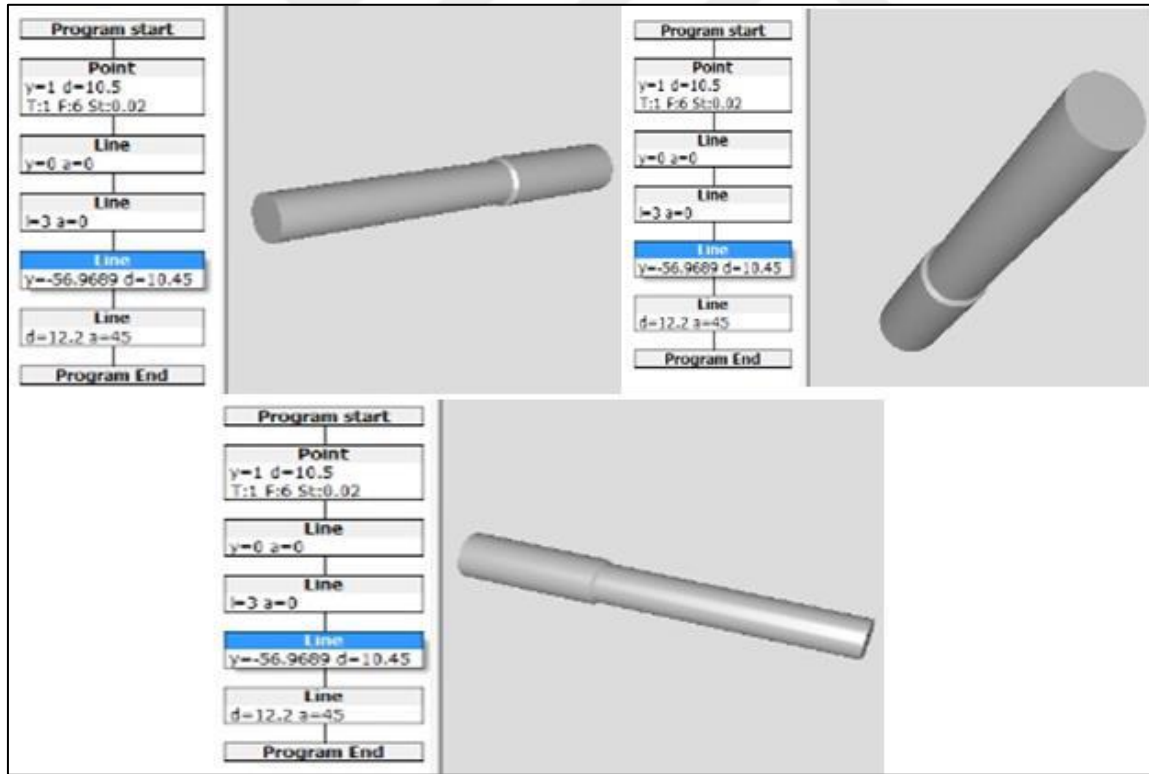
Şekil 4.4. Rulo baskı ve V blok

Silindirik taşlama için her bir takımın resimlendirmesi yapılmıştır. Bu resimler doğrultusunda Şekil 4.5'te gösterildiği gibi simülasyon programında (Smart Grinder)

silindirik taşlama simülasyonları yapılmıştır. Taşlama resimlerinde istenen çap ve salgı toleransları verilmiştir.

Çizelge 4.2. Rollomatic NP5 CNC taşlama tezgahı teknik özellikleri

TORNALAMA KAPASİTESİ	Maksimum Çevirme Çapı	mm	605
	Maksimum Tornalama Çapı	mm	565
	Maksimum Tornalama Boyu	mm	955
	Çubuk Kapasitesi	mm	85
	Standart Ayna Ebadı	inch	10"(12" ops)
FENER MİLİ	Fener Mili Hızları	dev/dk	20-2000
	Fener Mili Delik Çapı	mm	85
	Fener Mili Rulman Çapı	mm	150
TURRET	Takım İstasyon Adedi		8
	Turret Tipi		hidrolik
EKSENLER	X Eksen Kurs Boyu	mm	240
	Z Eksen Kurs Boyu	mm	1000
	Hızlı İlerlemeler	m/dk	15/17



Şekil 4.5. Smart Grinder programında hazırlanan taşlama simülasyon görüntüleri

Silindirik taşlama sonrasında yine Walter Helicheck, Zoller Genius yardımıyla boy ve çap kontrolleri yapılırken, Şekil 4.6'daki yüzey pürüzlülüğü ölçüm cihazı (Mitutoyo SJ400) ile yüzey pürüzlülüğü kontrolü yapılmakta, özel V yataklı komparatör ile salgıları kontrol

edilmektedir. Yüzey pürüzlülüğü değerleri teknik resimlerde istenen toleranslar içinde ise, sonraki operasyon olan CNC geometri taşlamaya geçilmektedir.



Şekil 4.6. Yüzey pürüzlülüğü ölçüm cihazı

Takımların tasarım aşamasında çizilen resimleri doğrultusunda kompleks geometrili özel takımların programlanması için kullanılan bir yazılımında (Numroto) modelleri yapılmıştır. Katı modellemede, ihtiyaç olan elmas taşlar belirlenmiştir. Elmas taşların geometrileri, takım geometrilerine uygun seçilirken bağlayıcı yapısı ve tanecik boyutları ise, istenen yüzey kalitesine, işleme parametrelerine bağlı olarak değişkenlik göstermektedir. Bu nedenle, işleme esnasında uygunsuzluk tespit edilmesi durumunda taşların bağlayıcı yapıları ve/veya tanecik boyutları farklı olan taşlarla değiştirilmesi gerekmektedir. Takımların imalatı ise Karcan Ar-Ge Merkezi Prototip atölyesinde bulunan Çizelge 4.3'te teknik özellikleri verilen TTB tezgâhında yapılmıştır.

Çizelge 4.3. TTB silindirik taşlama tezgâhı teknik özellikleri

Takım verileri	
Katı malzemeden minimum çap	0,1 mm
Katı malzemeden maksimum çap	12,7 mm
Maksimum yeniden bileme çapı	30 mm
Maksimum taşlama uzunluğu	200 mm
X eksen	
Çalışma aralığı	530 mm
İlerleme hızı	0 - 15 m/dk
Z eksen	
Çalışma aralığı	320 mm
İlerleme hızı	0 - 15 m/dk
Y eksen	
Çalışma aralığı	400 mm
İlerleme hızı	0 - 15 m/dk

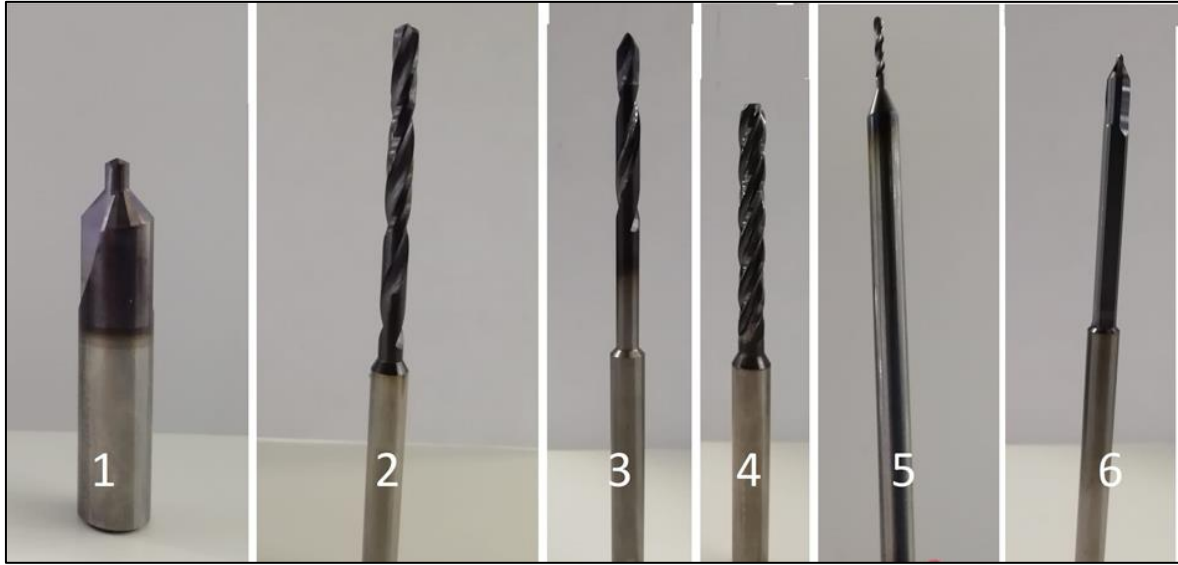
Takımların karmaşık geometri ölçüleri (kanal içi talaş açıları, kesme açıları ve kesme yüzeyi genişlikleri, alın sivriltme açıları, kademe boşaltma açıları vb) Karcan Ar-Ge merkezi bilgi birikiminde tasarlanmış ve uygulanmıştır. Talaş formu, işlenen yüzey kalitesi, takım ömrü, aşınma spekleri gibi sonuçlar, verilen geometrilerin uygunluğunu teyit etmektedir.

6 farklı takım imalatının yapılması ve takımlardaki tüm yüzeylerin farklı geometri ve özellikte (bağlayıcı özellikleri, tanecik büyüklükleri vb) olması nedenleriyle Şekil 4.7'deki gibi birçok farklı taş seti oluşturulmuştur.



Şekil 4.7. Oluşturulan taş seti örnekleri

Taşların geometrilerinin hazırlanması taş honlama tezgâhı ile yapılmıştır. İmalat sırasında taşların aşınması sonrasında taşlar tekrar honlanıp, kontrol edilmiştir. CNC imalat sonrasında ise takımların kontrolleri yapılmıştır. İmalat sonrası üretilen takımlar Şekil 4.8'de görülmektedir.



Şekil 4.8. Üretilen takımların görseli

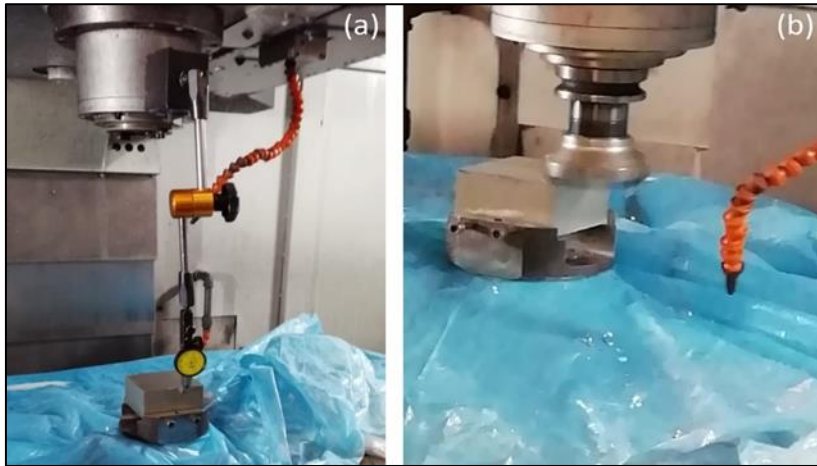
4.2.3. Ön deneyler

Prototip takımların pilot testleri, teknik özellikleri Çizelge 4.4'te verilen ARION IMM-1100 hassas dik işleme merkezi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışmalarda, seri işleme yapabilmek için hedef malzeme ile aynı kimyasal kompozisyona sahip AISI 304L östenitik paslanmaz çelik malzemesi 80x80x40 boyutlarında kesilerek hazırlanmıştır. Her blok üzerinde, talaş kaldırma sırasında oluşacak ısıl değişimlerden etkilenmeyecek şekilde 25 adet ve 50 adet Euro 7 dizel enjektör nozul geometrisinin 6 takımla seri olarak delinmesi hedeflenmiştir. Hedef malzeme, takımların salgı kontrolü yapılarak takımların delik giriş yüzeyleri frezelenmek suretiyle yüzey kontrolü sağlanmıştır. Tüm deneyler sahadaki uygulamalarına benzer şekilde, ıslak şartlarda gerçekleştirilmiş, kesme sıvısı olarak % 6 konsantrasyona sahip bor yağı emülsiyonu kullanılmıştır.

Şekil 4.9'da görüldüğü gibi takımların salgı ölçümü ve tezgah sıfırlamaları tamamlandıktan sonra, hazırlanan CAM programı ile CNC tezgahta, takımların kullanım sırası çerçevesinde işleme deneyleri yapılmıştır.

Çizelge 4.4. ARION IMM-1100 dik işleme merkezinin teknik özellikleri

X Ekseni hareketi (mm)	1100
Y Ekseni hareketi (mm)	600
Z Ekseni hareketi (mm)	600
Tabla Ölçüsü (mm)	1100*560
Tabla Adedi (adet)	1
Maks. Tabla Yüğü (kg)	900
İş mili ile tabla arası mesafesi (mm)	120-720
Tabla Zemin Mesafesi (mm) 910	910
İş mili Devri (rpm)	8000 (Ops. 10000,12000)
İş mili Koniği	BT40 (Ops. BBT40)
İş mili Motoru (kw)	11/7,5 (Ops. 15/11)
X-Ekseni hızlı ilerleme (mm/min)	30000
Y-Ekseni hızlı ilerleme (mm/min)	30000
Z- Ekseni hızlı ilerleme (mm/min)	24000
Kesme İlerlemesi (mm/min)	1-12000
Takım Magazin kapasitesi (adet)	24
Maks. Takım Çapı / Yan pot boşken (mm)	75/150
Maksimum Takım Boyu (mm)	300
Maksimum Takım Ağırlığı (kg) 7	7
Pozisyonlama Hassasiyeti (JIS B 6338)	0.004/300mm
Tekrarlama Hassasiyeti (JIS B 6338)	±0,004mm
CNC kontrol Ünitesi	Mitsubishi M70
Yağlama tank kapasitesi (litre)	4
Bor yağ tankı kapasitesi (litre HP)	400



Şekil 4.9. (a) İş miline bağlı takım salgı kontrolü ve (b) malzeme yüzeyinin temizlenmesi

Ön deneyler için işleme parametreleri ve deney şartları Çizelge 4.5'te verilmiştir. Bu parametreler ile yapılan deney sonuçlarına bulgular bölümünde yer verilmiştir.

Çizelge 4.5. Pilot testlerdeki işleme parametreleri

Takım	Delik No	Devir(dev/dk)	İlerleme (mm/diş)	İlerleme Hızı (mm/dk)	Operasyon Notları
Birinci Takım	1	4000	0,08	640	
	2				
	3	4000	0,038	300	
	4	4000	0,019	150	
İkinci Takım	1	2800	0,04	224	5 mm gagalama
		2800	0,03	168	
	3	3000	0,02	130	
Üçüncü Takım	1	2800	0,018	100	0,7 mm gagalama Son paso 0,4 mm

4.2.4. İşleme parametrelerinin belirlenmesi

İşleme parametrelerinin deneysel optimizasyonu için potansiyel müşterilerin önerileri ve kullanılan tezgahın teknik olanakları göz önüne alınarak dört tip parametre grubu belirlenmiştir. Buna göre öncelikle Çizelge 4.6’da sunulan parametre setleri belirlenmiştir. Planlanan parametre değerleri hedef malzeme üzerinde kullanılarak 49 delik için nozul yapısının başarılı bir şekilde oluşturulup oluşturmadığı gözlenmiştir.

Çizelge 4.6. Parametre seti 1, 2, 3

		Parametre Seti 1		Parametre Seti 2		Parametre Seti 3	
Takım	Operasyon	Devir (dev/dk)	İlerleme (mm/diş)	Devir (dev/dk)	İlerleme (mm/diş)	Devir (dev/dk)	İlerleme (mm/diş)
Takım 1	1. Operasyon	3000	0,02	4000	0,02	6000	0,02
	2. Operasyon	1500	0,02	2000	0,02	3000	0,02
Takım 2	1. Operasyon	2800	0,02	4000	0,02	6000	0,02
	2. Operasyon		0,03		0,03		0,03
Takım 3	1. Operasyon	2800	0,01	4000	0,01	6000	0,01
	2. Operasyon		0,02		0,02		0,02
Takım 4	Tek operasyon	6000	0,0625	7000	0,0625	8000	0,0625
Takım 5	Tek operasyon	6000	0,015	7000	0,015	8000	0,015
Takım 6	Tek operasyon	4500	0,01	6000	0,01	8000	0,01

Takım 1'in operasyonu ikiye ayrılmıştır. Bunun nedeni takım uç kısmı çapının küçük olmasından kaynaklanmaktadır. Bundan dolayı Takım 1'in ilk operasyonundaki devir hızı ikinci operasyondaki devir hızından daha yüksektir. Belirlenen üç ayrı parametre seti için Çizelge 4.7'de de görüldüğü gibi operasyon başarı ile gerçekleşmiştir.

Takım 2 ve Takım 3 için ise belirlenen parametre seti 1 ve parametre seti 2 değerleri ile delme işlemi başarı ile gerçekleştirilememiştir. Yapılan ilk iki deneme sonucunda da Şekil 4.10'da gösterildiği üzere her iki takım şaft kısmından kırılmıştır. Bu nedenle Çizelge 4.7'de belirtildiği üzere, parametre seti 3 değerleri denenmemiştir.

Çizelge 4.7. Belirlenen parametre setleri için 1. 2. ve 3. takımların başarı durumları

		1. Takım	2. Takım	3. Takım
Parametre Seti 1	1. Operasyon	Başarılı	Başarılı	Başarılı
	2. Operasyon	Başarılı	Başarısız	Başarısız
Parametre Seti 2	1. Operasyon	Başarılı	Başarısız	Başarısız
	2. Operasyon	Başarılı	Başarısız	Başarısız
Parametre Seti 3	1. Operasyon	Başarılı	Denenmedi	Denenmedi
	2. Operasyon	Başarılı	Denenmedi	Denenmedi



(a)



(b)

Şekil 4.10. Parametre seti denemeleri için 2. takım (a) ve 3. takım(b) kırılması

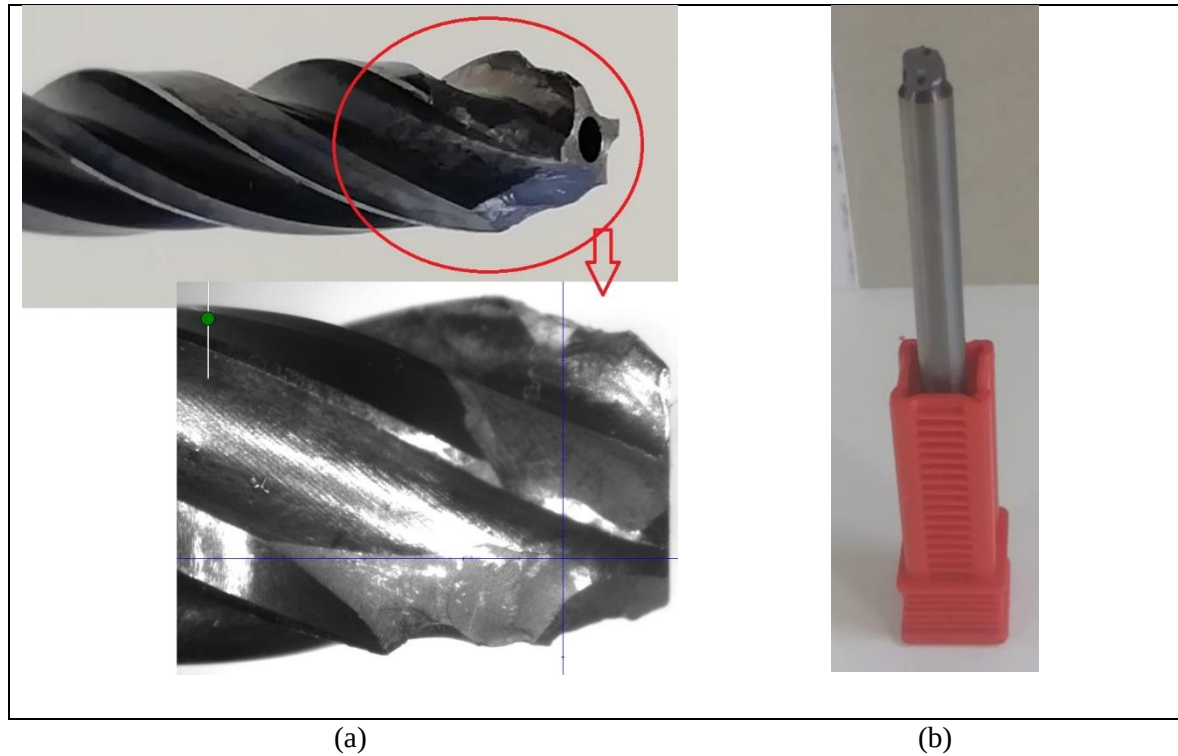
Takım 4 için belirlenen üç parametre seti değerleri ile denemeler gerçekleştirilmiştir. İlk iki değer ile Çizelge 4.8'de belirtildiği gibi delme işleminde başarı sağlanmış iken parametre

seti 3 değeri için Şekil 4.11 (a)'da görüldüğü gibi takım Radius kısımlarında kırılma meydana gelmiştir. Parametre seti 3 değerinin başarısızlık ile sonuçlanması sonrası diğer takımların delme işlemi gerçekleştirebilmesi için başarılı olan parametre seti 2 değeri ile devam edilmiştir.

Takım 5 için denenen parametre seti değerleri için işlemler Çizelge 4.8'de görüldüğü üzere başarı ile sonuçlanmıştır. Takım 6 için ise belirlenen parametre seti 1 değeri başarı ile gerçekleştirilirken parametre seti 2 değerinin denenmesi Şekil 4.1 (b)'deki gibi takımın kırılması ile sonuçlanmıştır. Bu nedenle Takım 6 için Çizelge 4.8'de de belirtildiği üzere parametre seti 3 değeri için deneme gerçekleştirilmemiştir.

Çizelge 4.8. Belirlenen parametre setleri için 4. 5. ve 6. takımların başarı durumları

		4. Takım	5. Takım	6. Takım
Parametre Seti 1	Tek operasyon	Başarılı	Başarılı	Başarılı
Parametre Seti 2	Tek operasyon	Başarılı	Başarılı	Başarısız
Parametre Seti 3	Tek operasyon	Başarısız	Başarılı	Denenmedi



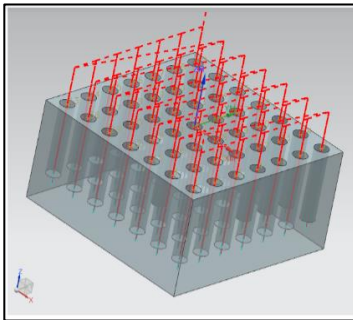
Şekil 4.11. Parametre seti 3 denemelerinde 4. takım kırılması (a) parametre seti 2 denemelerinde 6. takım kırılması (b)

Parametre setlerinin hedef malzeme üzerinde denenmesi ve sonuçlarının irdelenmesinin ardından bazı takımlarda görülen olumsuzluklar dikkate alınarak Çizelge 4.9’da sunulan Parametre Seti 4 olarak adlandırılan yeni bir parametre seti oluşturulmuştur.

Çizelge 4.9. Parametre seti 4

Takım	Devir (dev/dk)	İlerleme (mm/diş)	Operasyon Notları
Birinci Takım	1500	0,02	
İkinci Takım	2800	0,02	3 mm gagalama
	2800	0,015	
Üçüncü Takım	2800	0,01	0,7 mm gagalama
			0,4 mm son paso
Dördüncü Takım	6000	0,05	
Beşinci Takım	4500	0,015	0,5 mm gagalama
Altıncı Takım	3000	0,01	Dipte 0,1 sn bekle

Yeni parametre seti kullanılarak Şekil 4.12 (a)’da görüldüğü üzere NX10 CAM programı ile 25 nozul deliği yerine ömür deneylerine devam edilebilmesi için 49 nozul eldesi planlanmış ve ARION IMM-1100 Dik İşleme tezgahı ile Şekil 4.12 (b)’de görüldüğü gibi başarı ile elde edilmiştir. Numune malzeme üzerindeki nozul sayısının arttırılmasının amacı numune değişimden dolayı oluşabilecek değişimlerin önüne geçebilmek ve delinebilecek olan delik sayısının artırımı ile takım ömür değerleri hakkında daha spesifik bilgi edinebilmektir.



(a)

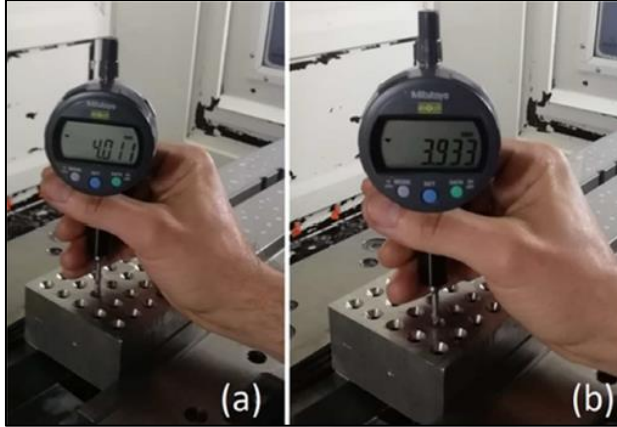


(b)

Şekil 4.12. İş parçası üzerinde delik tasarımı (a) ve nihai nozullar (b)

Malzemelerin işlenebilirliğinin değerlendirilmesinde kullanılan en önemli kriterlerden birisi işlenen yüzeylerden ölçülen yüzey pürüzlülük değerleridir. Deney numuneleri üzerindeki ölçümler, delik giriş ve dip çaplarının ölçülmesi suretiyle gerçekleştirilmiş ve bu ölçümler

ile Şekil 4.13'te görüldüğü gibi ölçüsel tamlıkla doğrulanmıştır. Yapılan testlerde elde edilen nozul geometrilerinin ve yüzey kalitesinin doğrulanması için deney numuneleri delik eksenine alınarak tel elektro erozyon tezgahı kullanılarak kesilmiştir. Kesim sonrası nozul yüzeylerindeki ortalama yüzey pürüzlülük ölçümleri yapılmış ve ortalama yüzey pürüzlülük değerleri tespit edilmiştir. Nozulun geometrik yapısı Şekil 4.14'te görülmektedir.



Şekil 4.13. Delik giriş (a) ve dip çap kontrolü (b)

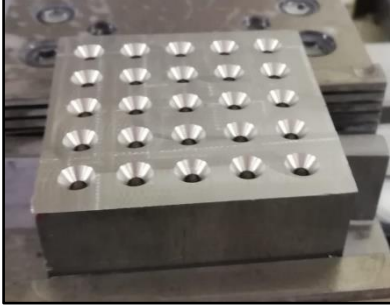


Şekil 4.14. Telli elektro erozyon ile kesim sonrası nozulların görünümü

4.2.5. Performans deneyleri

İşleme parametrelerinin belirlenmesinin ardından performans deneylerine geçilmiştir. Üretilen takımların performans testleri için hedef malzeme ile aynı kimyasal kompozisyona sahip AISI 304 L malzeme kullanılmıştır. Performans testlerinde seri işleme yapabilmek için deney numuneleri kuvvet/moment ölçümleri için kullanılacak dinamometreye uygun olarak 80x80x40 mm boyutlarında kesilerek hazırlanmıştır. Her blok üzerinde, talaş kaldırma sırasında oluşacak ısı değişimlerinden etkilenmeyecek şekilde 25 adet Euro 7 dizel enjektör

nozul geometrisinin 6 takımla seri olarak delinmesi hedeflenmiştir. Şekil 4.15'te görüldüğü üzere 25 nozul başarı ile işlenmiştir.



Şekil 4.15. Performans testleri sonucu elde edilen delikler

Kesme kuvvetlerinin ve momentin deneysel olarak belirlenmesi için üç kesme kuvveti bileşenini (F_x , F_y , F_z) ve momentini (M_z) aynı anda ölçme kapasitesine sahip, kuartz kristal esasıyla çalışan teknik özellikleri Çizelge 4.10'da verilen KISTLER 9272 tipi dinamometre ve Şekil 4.16'da gösterilen Kistler 5070 amplifier kullanılmıştır. Dinamometre tezgah tablasına, deney numunelerin bağlamak için Şekil 4.17'de gösterilen özel tasarlanan bağlama aparatı da dinamometreye bağlanmış ve dinamometrenin işlem öncesi soğutma sıvısından etkilenmemesi ve alınacak ölçümlerin doğru sonuç vermesi için su ve hava geçirmez streç film ile kaplanmıştır. Ölçülen değerler DynoWare programı yardımı ile sayısal değerlere dökülmüştür. DynoWare programında ilerleme kuvveti ve moment ölçümünü gösteren grafik Şekil 4.18'de verildiği gibi elde edilmektedir. Bu grafiklerin düzenli eğilim sergilediği bölgelerden alınan ortalamalar sonuçların değerlendirilmesi için kullanılmıştır.

Çizelge 4.10. KISTLER 9272 dinamometrenin teknik özellikleri

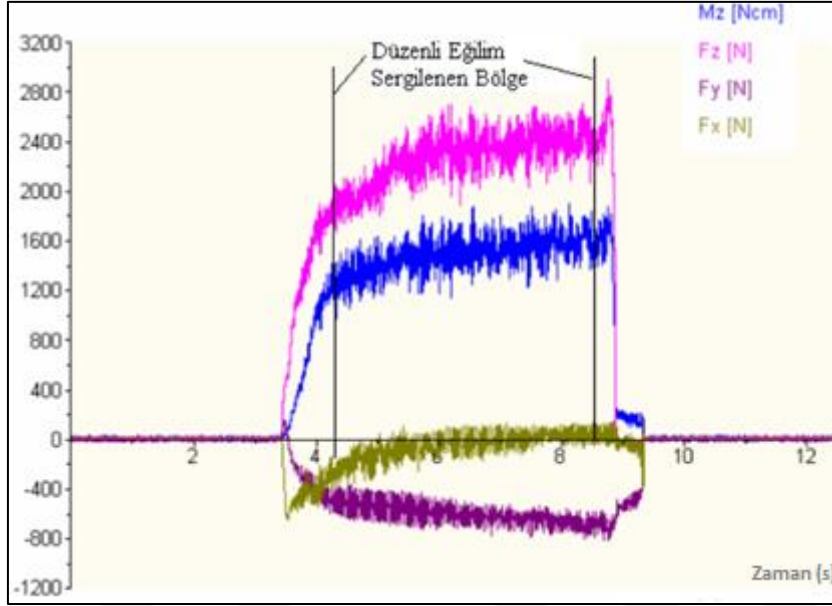
Ölçme Aralığı F_x , F_y	-5....5 kN
F_z	-5....20 kN
M_z	-200...200 Nm
Hassasiyet F_x , F_y	-7,8 pC/N
Hassasiyet F_z	-3,5 pC/N
Hassasiyet M_z	-160 pC/Nm
Doğrusallık	$\% \leq \pm 1$ FSO
Histezisx	$\% \leq 1$ FSO
Kapasitans F_x , F_y ; F_z	185 pF
Kapasitans M_z	420 pF



Şekil 4.16. Ölçümde kullanılan bilgisayar ve Kistler 5070 amplifier



Şekil 4.17. Dinamometreye bağlanmış bağlama kalıbı ve dinamometre koruma



Şekil 4.18. DynoWare programındaki grafik görüntüsü

Takım aşınması ve nozul yüzey pürüzlülük değerleri için uygun kabul edilen işleme parametreleri ile her bir takımın performans göstergelerini belirleyebilmek amacıyla deneyler gerçekleştirilmiştir. Deneyler sırasında her bir operasyon ve her bir delik için kesme kuvvetleri (F_x , F_y ve F_z) ve moment (M_z) değerleri ölçülerek kaydedilmiş, Kistler Dynaware yazılım ile değerlendirilen grafiklerden alınan ortalama kuvvet ve moment değerleri ölçülmüştür. Takımların performans deneyleri yinelenmiş, her bir numune üzerinde ardışık olarak tüm takımların çalışmasıyla, 25 adet Euro 7 nozul geometrisi elde edilmiştir. Talaş yükü yüksek olan takımlar için öngörülen gagalama dışında delme işlemlerinin, saha uygulamalarında olduğu gibi, iki aşamada tamamlanması uygun bulunmuştur. Tasarım/Üretim doğrulama faaliyetleri sonrasında yapılan tüm testler ilk pilot denemelerde olduğu gibi aynı cihaz ve donanım kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Farklı olarak sadece dinamometre doğrudan tezgâh tablasına değil de tezgah mengenesine bağlanarak F_z yönündeki ön yüklemeler azaltılmıştır. Elde edilen değerler ışığında, delik sayısına bağlı olarak delme işlemlerindeki en önemli parametreler olan ilerleme kuvveti (F_z) ve takım burulma momenti (M_z) değişimleri belirlenmiştir.

4.2.6. Ömür testleri

Performans deneyleri sonucunda karar verilen işleme parametreleri ile takımların ömrünün tespit edilmesi amacıyla toplam 295 adet nozul ardı sıra her bir takımla işlenmiştir. Delik

sayısına bağlı olarak takım aşınma değerleri ve tel elektro erozyon yöntemi ile elde edilen nozul yapılarının ölçülen yüzey pürüzlülük değerleri ölçülmüştür. Bu ölçüm değerleri ile aşınma değerleri – delik sayısı ve delik yüzey pürüzlülüğü – delik sayısı grafikleri elde edilmiştir. Ömür deneyleri sonuçları, bu sonuçların kıyaslanması ve bu değerler kullanılarak elde edilen matematiksel modellere 6. bölümde yer verilmiştir.





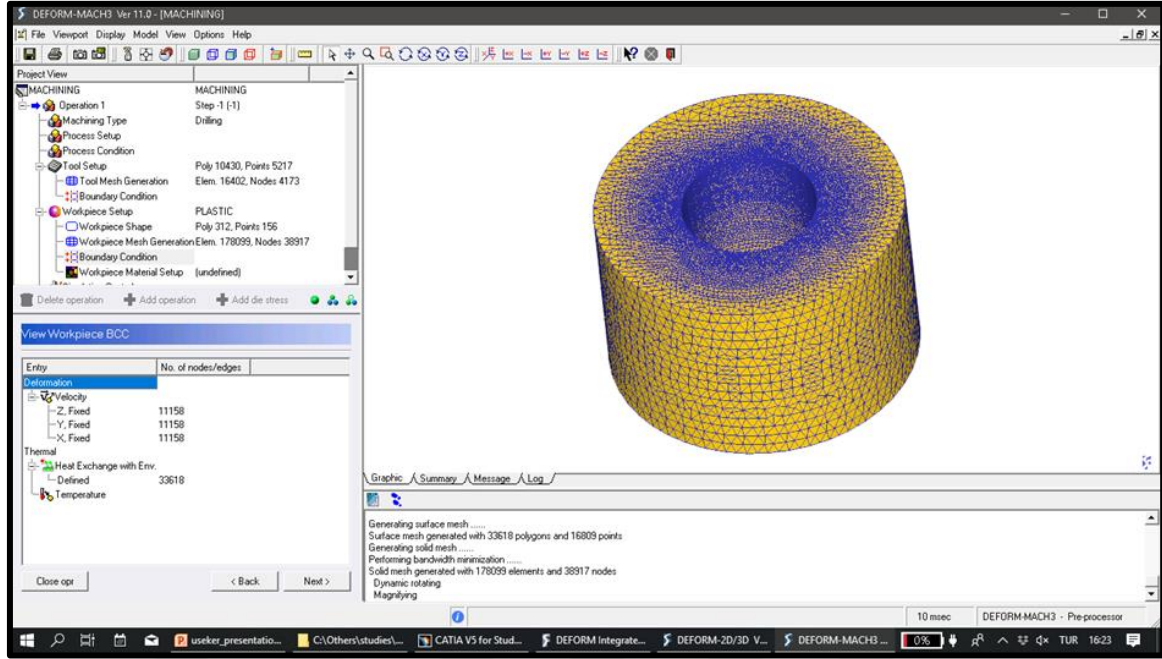
5. BULGULAR VE TARTIŞMA

5.1. Analitik Bulgular

Bu bölümde takım, iş parçası modellenin oluşturulması ve kesme sisteminin detayları ele alınmıştır. Talaş kaldırma simülasyonları 3B (Üç Boyutlu) olarak hazırlanmıştır. 3B gerçekleştirilen talaş kaldırma simülasyonları düzlem gerinme kabulü ile dikey kesme modeli kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Analizlerde Lagrange formülasyon metodunu kullanarak çözüm yapılmaktadır. Kullanılan eleman topolojisi, dört yüzlü üçgen elemanlar olup bir yüz toplamda üçü köşe üçü orta noktada olmak üzere 6 düğüme sahiptir. Program yüksek deformasyonlardan dolayı eleman bozulmasını düzeltmek için sürekli adaptif meş yenilemesi kullanmaktadır. Bu işlem gerekli yerlerde büyük elemanlarının küçük elemanlara bölünmesini ve küçük elemanların büyütülmesini sağlar.

İş parçası modellemesi

İş parçası geometrisi; .STL uzantılı dosyalardan import edilebilir. İş parçası şekli basit bir silindir veya küpse Deform-3D’de var olan ilkel geometrik şekillerden oluşturulabilir. Şekil değişimine uğrayacak parça iş parçası olduğundan obje tipinin “plastic” olması gerekir. Karmaşık geometriye sahip bir matkap bir CAD sisteminden import edilmelidir. En yaygın format .STL dosyasıdır. İmport edilen model tek bir yüzeye sahip olmalı, bir veya birden fazla nokta, kenar ve yüzeye sahip olmamalıdır. Birden çok yüzeyler muhtemelen meş (mesh) oluşumu gibi sorunlara neden olur. Birçok CAM paketi hata kabul etmez, yüzeyler üretmezler. CAD sisteminizde X, Y, Z orjininde matkap ucunun merkezini konumlamak en iyisidir. Obje tipinin “Rijit” olarak ayarlanır. Çalışmada, iş parçası raybalama takımlarında iş parçası içerisine önceden bir delik var olması gerekliliğinden dolayı CATIA V5 yazılımı içerisinde modellenerek Deform-3D içerisinde import edilmiştir. Şekil 5.1’de Deform-3D iş parçası modeli görülmektedir.



Şekil 5.1. Deform-3D iş parçası modeli

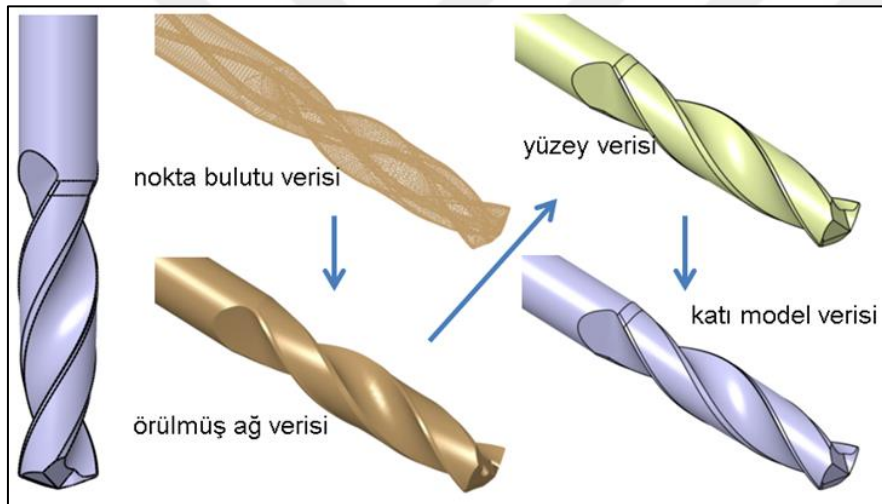
Sonlu elemanlar metodunda temelde iki ana meş türü vardır. Bunlardan ilki Lagrangian meş, diğeri ise Eularian meş'tir. Lagrangian meş talaş kaldırma sürecinde oluşan talaşı ve çapağı modelleme kabiliyetine sahiptir. Ayrıca simülasyon herhangi bir sebeple durduğunda, simülasyonun kaldığı yerden devam edebilmesi açısından Lagrangian meş daha avantajlıdır. Bu çalışmada “Lagrangian Mesh” kullanılmıştır.

İş parçasının meş edilmesi, matkabın meş 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 20.000 meş yeterli olmaktadır. Bu çalışmada kesici takım için 50.000 meş ve en küçük meş boyutu 0,1 mm olarak seçilmiştir. Analiz süresini belirleyen en önemli etken en küçük ağ geometrisidir. En küçük ağ boyutu matkabın kesici ağzı başına düşen ilerleme miktarı kadar seçildiğinde hesaplama süresi, Deform-3D firmasının tavsiye ettiği matkabın ilerleme oranının dörtte biri olarak belirlenmesine göre nispeten kısa sürmektedir. Meş boyutunun büyümesi hassasiyeti ve sonuçları etkilediğinden yazılım üreticisi firmanın tavsiye ettiği değerlere göre hesaplamalar yapılmıştır. Meş boyutu ilerleme oranının dörtte biri olan 0,075 mm olarak seçilmiştir. Elde edilecek meş sayısını azaltmak için, iş parçasının matkap ile temas halinde olduğu kesme bölgesinde hassas meş, diğ

kısımlarında kaba meş oluşturulmuştur. İş parçası üzerinde 62874 elemanlı meş modelleme yapılmıştır.

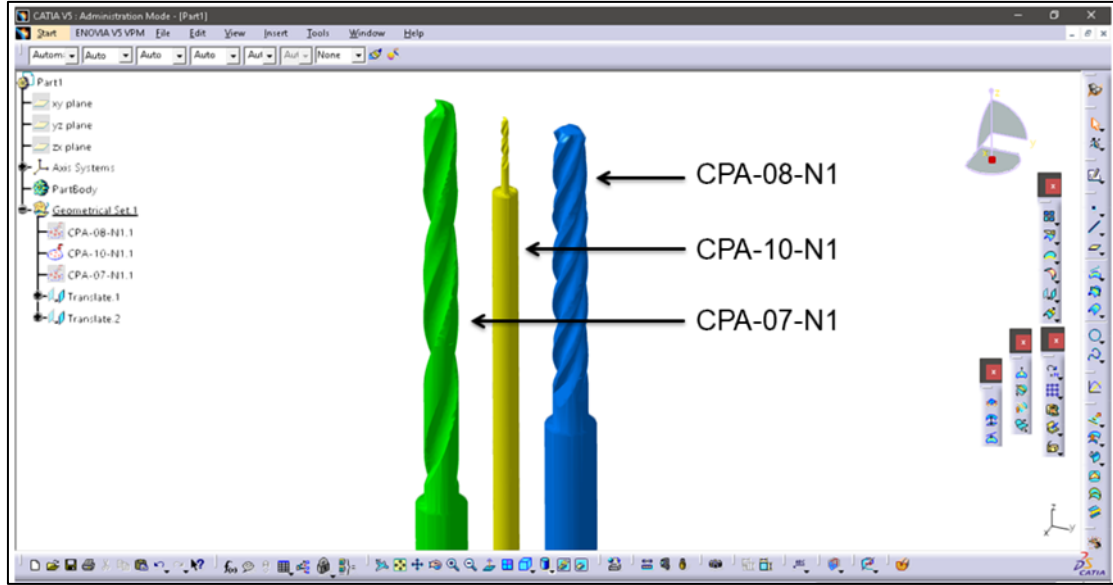
Kesici takımların modellenmesi

Kesici takım geometrileri, deneysel yöntemlerden elde edilen tecrübeye dayalı olarak takım taşlama tezgahı üzerindeki parametreler yardımı ile elde edilmektedir. Tezgah kontrol panelinden elde edilen *.stl (Steorolographic) nokta bulutu verisinin Bilgisayar Destekli Mühendislik (CAE) yazılımlarında işlenebilir olması için tersine mühendislik yaklaşımlarından faydalanılmaktadır. Bu kapsamda CPA-07-N1, CPA-08-N1 ve CPA-10-N1 takımları için Şekil 5.2’de gösterilen adımlar uygulanmıştır.



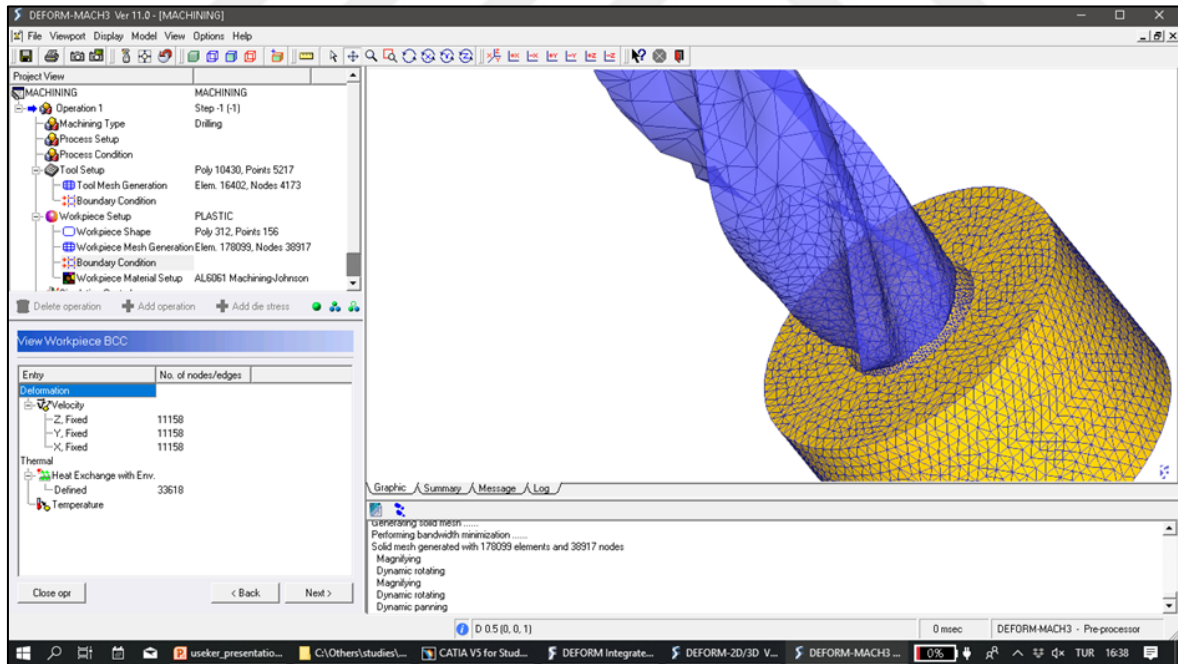
Şekil 5.2. Kesici takım tersine mühendislik yöntemi ile inşası

Tezgah üzerinden alınan nokta bulutu verisi ilk olarak CATIA V5 yazılımının tersine mühendislik modülü olan Quick Surface Recognition ve Digitized Shape Editor içerisinde örülmüş ağ verisine dönüştürülür. Ardından yüzey geliştirme takımları kullanılarak Generative Shape Design ve Part Design modülleri ile katı takım modeli elde edilmiş olur. Bu adım her takım için ayrı ayrı hazırlanır. Şekil 5.3’te CATIA V5 yazılımı ile tasarlanan takımlar görülmektedir.



Şekil 5.3. Kesici takımların CATIA V5 yazılımı ile tasarlanması

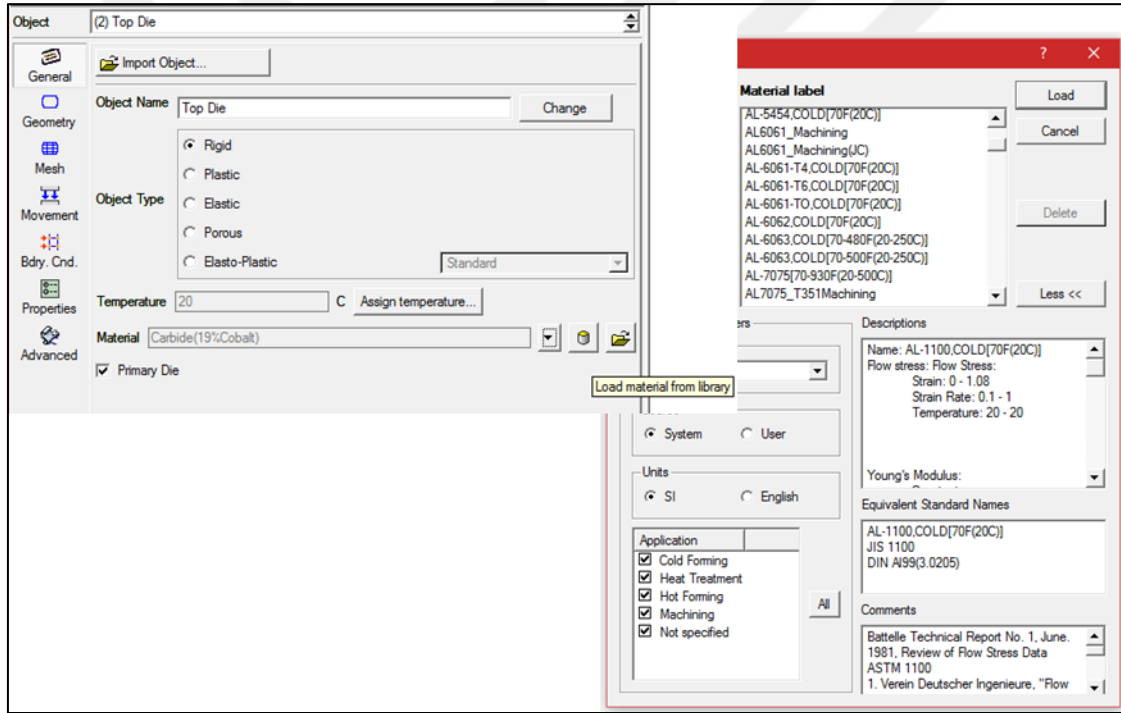
Şekil 5.4'te ise kesici takım ve iş parçası çiftinin sonlu elemanlar analizi ağ görüntüsü görülmektedir.



Şekil 5.4. Kesici takım ve iş parçası çiftinin SEA ağ görüntüsü

İş parçası ve kesici takım malzemelerinin belirlenmesi

Deform 3D sonlu elemanlar yazılımında iş parçası ve kesici takım için önceden tanımlanmış malzeme kütüphanesi vardır. Ancak kütüphane içinde bulunmayan yeni bir malzemenin kütüphaneye eklenmesine de olanak sağlamaktadır. Kütüphaneye eklenecek yeni malzeme, önceden yapılmış birçok deney sonucunda ulaşılmış, malzemenin deformasyon hızı, gerilmeleri, elastik modülü, termal genleşme katsayısı, sertlik, termal iletkenlik ve emisivite vb. verileri içermelidir. Bu çalışmada kesici takım malzemesi kütüphaneden %15 kobalt içerikli karbür olarak seçilirken, iş parçası malzemesi olarak 304 paslanmaz çelik malzeme kütüphanesinden seçilmiştir (Şekil 5.5).



Şekil 5.5. Malzeme seçim ekranı ve kütüphanesi

Proses parametrelerinin belirlenmesi

Her bir takım için deneysel bulgulardan elde edilen kesme parametreleri aşağıda verilmiştir. Verilen devir sayısı ve ilerleme miktarı Deform-3D içerisinde aşağıda Şekil 5.6'da gösterilen ekrana girilir.

CPA08 : S=2800 , F=0,04

CPA10 : S=3000 , F=0,01

CPA14 : $S=2800$, $F=0,01$

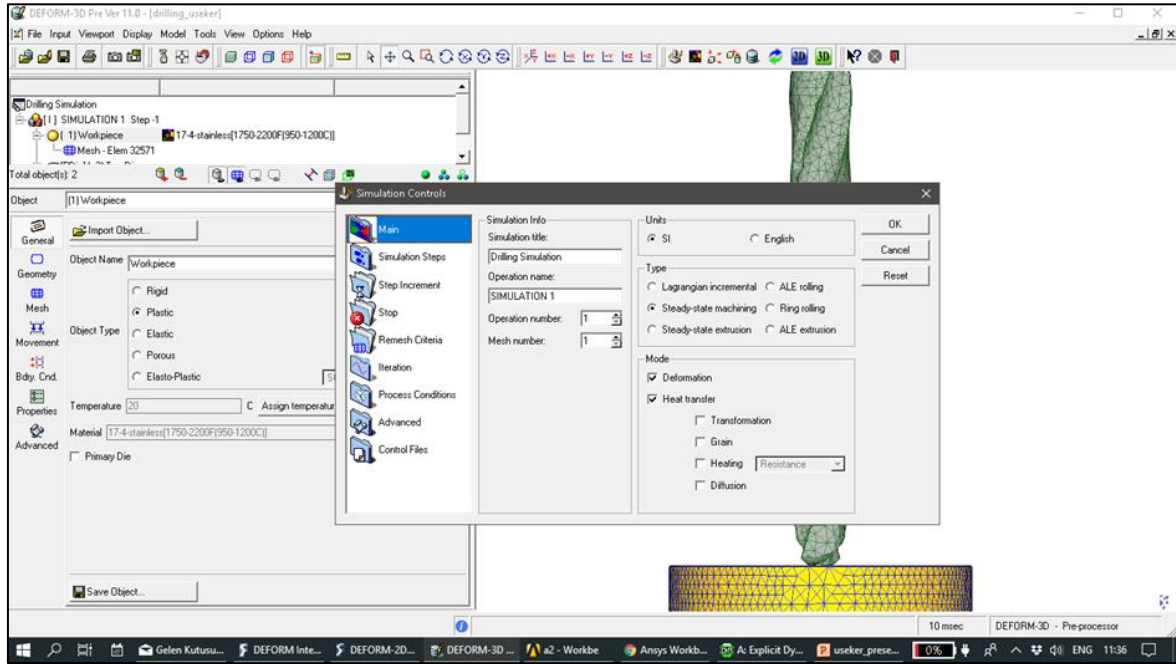
CPA07 (gagalama yapıyor) : $S=2800$

$F=0,04$ (24 mm delik)

$F=0,25$ (18 mm çıkıyor)

$F=0,25$ (17,8 mm tekrar giriyor)

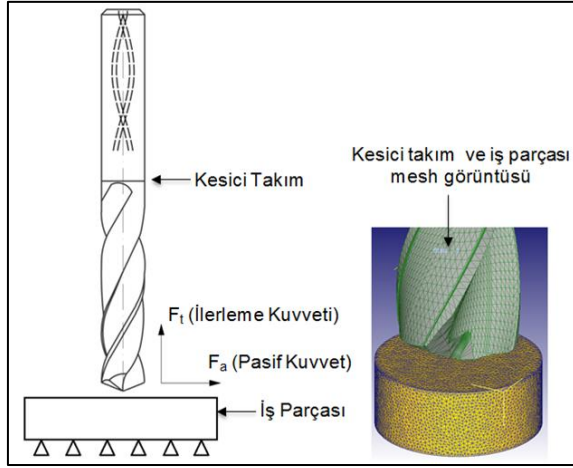
$F=0,03$ (6 mm delik)



Şekil 5.6. Simülasyon parametre ekranı

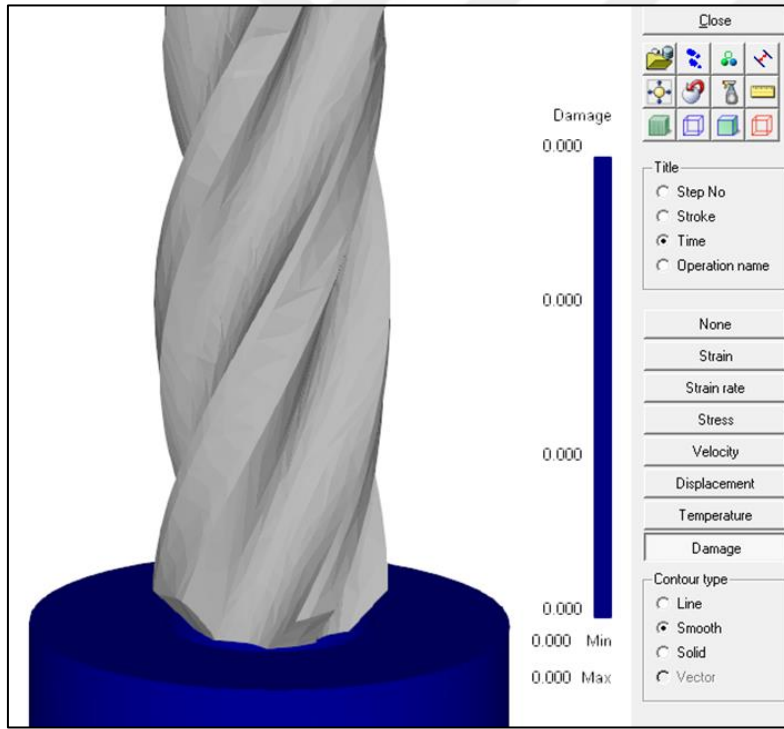
Sınır koşullarının belirlenmesi

İş parçasının yan yüzeyi üzerindeki tüm noktalar X, Y ve Z eksenî yönlerinde sabitlenmiştir. Nesneler arası veri alışverişi ayarlanır. Bu ayar kullanıcıya nesneler arasındaki sürtünme, ısı transferi, vb ilişkileri tanımlaması için izin verir. Talaşın İş parçasına dokunması muhtemel olduğundan, bu olası temas modunu araştırmak için sisteme talimat verilmesi gerekir. Takım ve iş parçası arasındaki ilişki burada da uygulanır. Takım ve iş parçası üzerinde ısı değişimi sınır koşulları eklenir (Şekil 5.7).

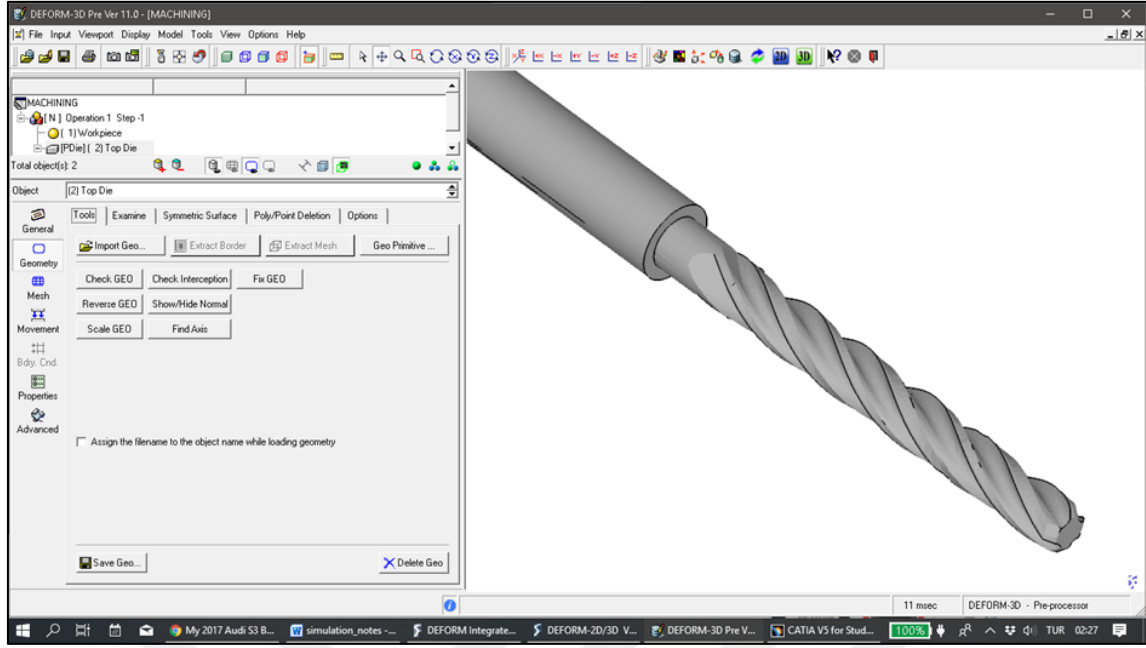


Şekil 5.7. Kesici takım ve iş parçası sınır koşulları

Analizlere Şekil 5.8’de oluşturulmuş olan CPA-08-N1 takım geometrisi ile devam edilmiştir. CPA-08-N1 takım geometrisi Şekil 5.9’da gösterilen ekrandan tanımlanmıştır.

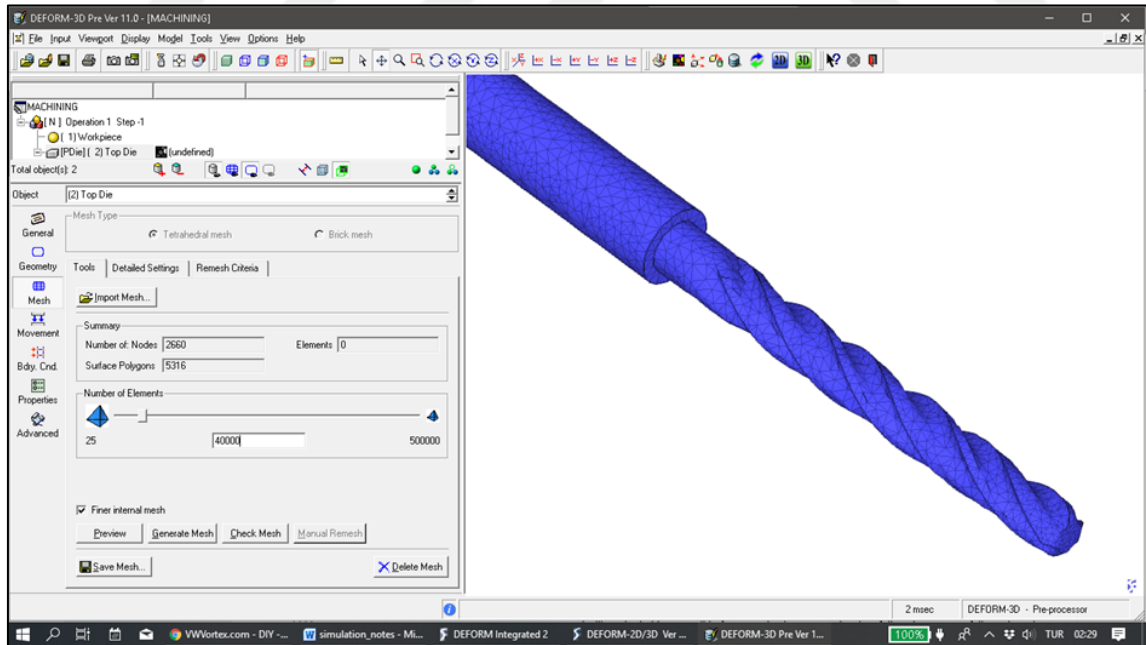


Şekil 5.8. CPA-08-N1 takım geometrisi

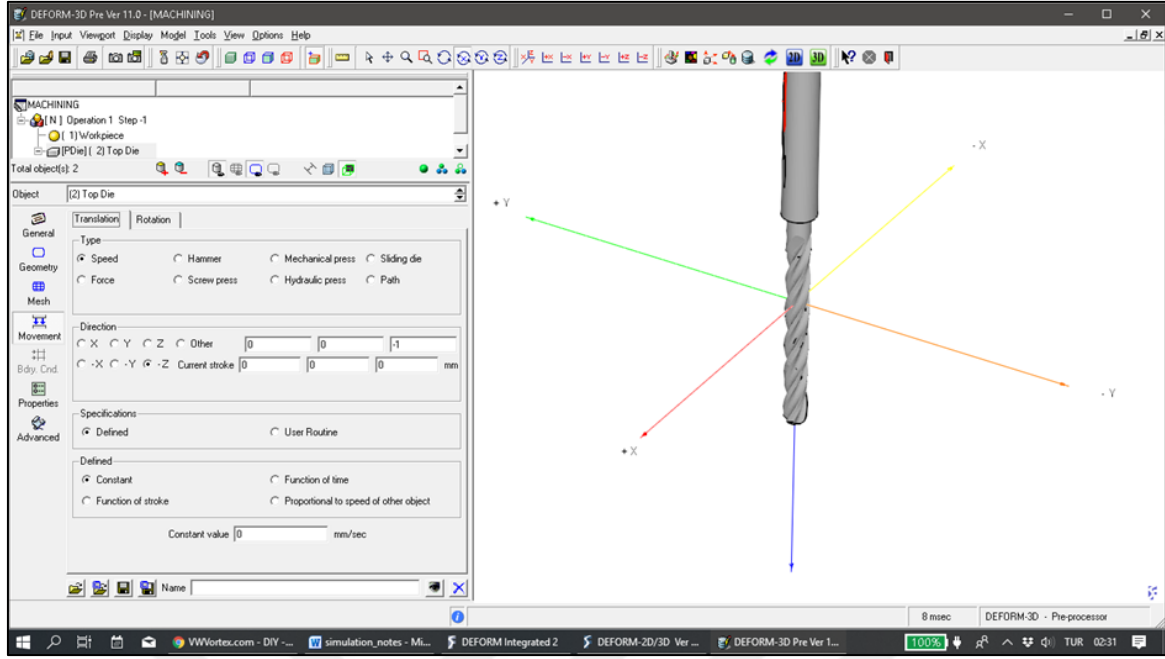


Şekil 5.9. Deform 3D programında takım geometrisinin tanımlanması

Devamında Şekil 5.10'da gösterildiği gibi takım geometrisinin meş yapısı oluşturulmuş ve Şekil 5.11'de görüldüğü gibi takım konumu belirlenmiştir.

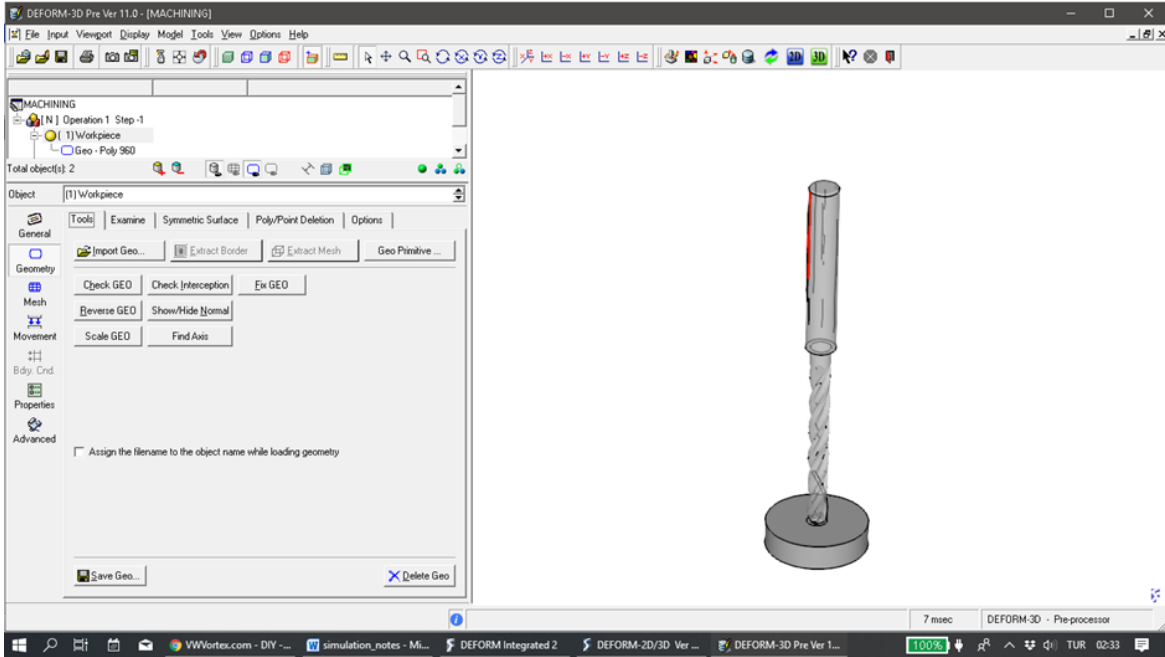


Şekil 5.10. Takım geometrisinin meş yapısının oluşturulması

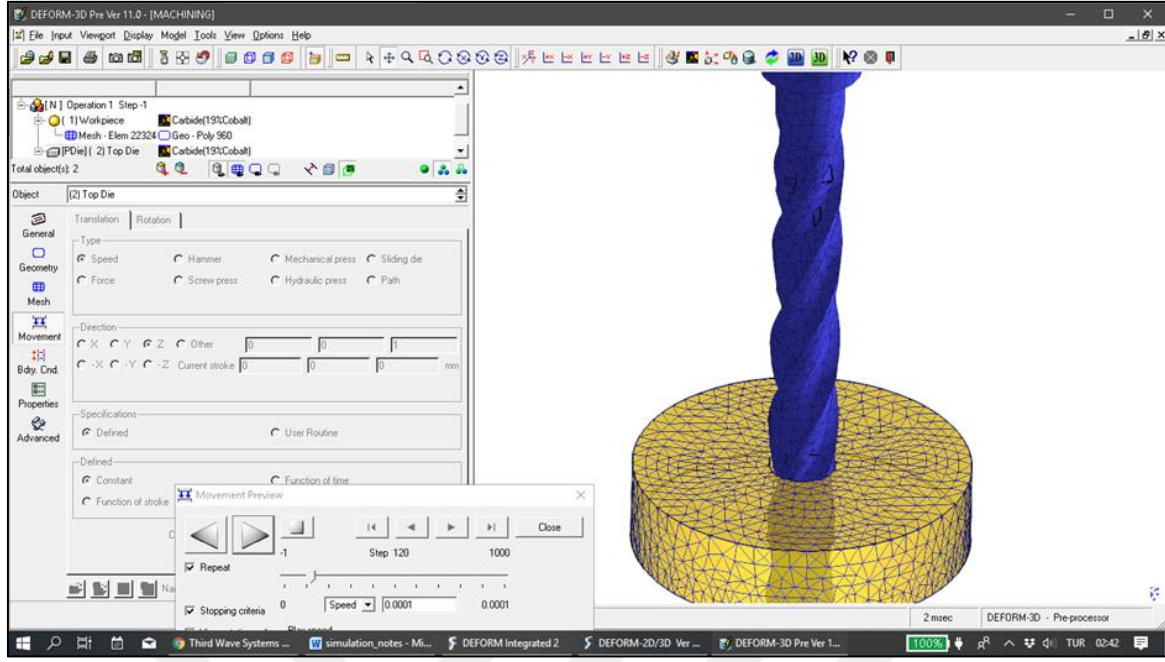


Şekil 5.11. Takım konumunun belirlenmesi

Deform-3D Sonlu Elemanlar Metodunun devam aşamasında takım – iş parçası konumlandırılması (Şekil 5.12) yapılarak takım ilerlemesi için gerekli değerler programa girilmiştir (Şekil 5.13).

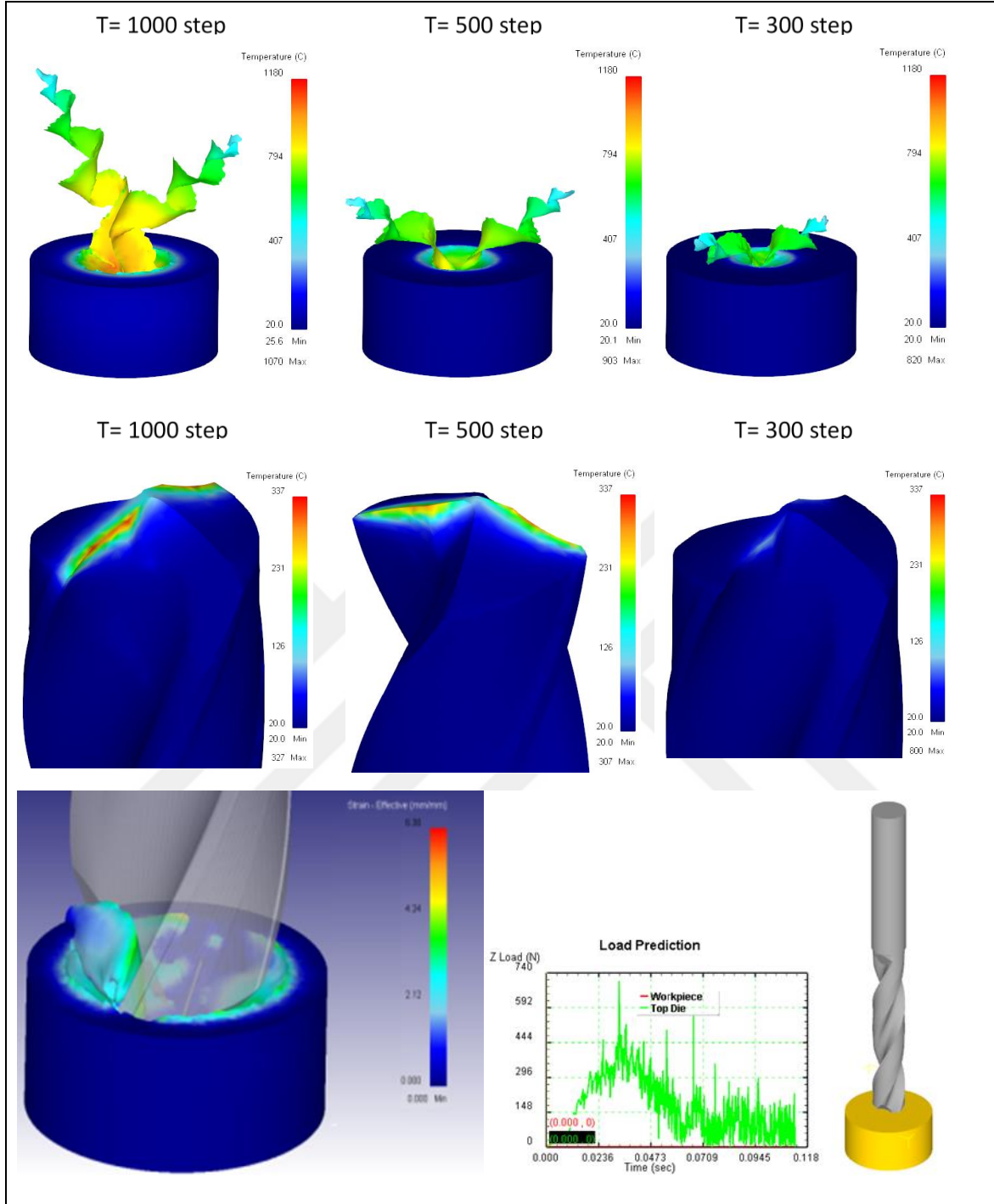


Şekil 5.12. Takım – İş parçası konumlandırılması



Şekil 5.13. Takım ilerlemesinin ayarlanması

Deform-3D Sonlu Elemanlar Metodu kullanılarak çeşitli analizler yapılabilmektedir. Takım - iş parçası ısı analizleri ve takım kuvvet analizi bu analizlere örnek olarak yapılmıştır (Şekil 5.14). Söz konusu analizler deneysel çalışma öncesi sonuçların tahmininde önemli rol oynamaktadır. Bu analizler sonucunda takımların deneysel çalışmalara geçilmeden ilgili delme işlemlerini gerçekleştirebileceği sanal ortamda test edilmiş ve çalışmaya esas işleme parametrelerinin belirlenmesi amacıyla deneysel çalışmalarla devam edilmiştir.



Şekil 5.14. Takım-iş parçası ısıl analizleri ve takım kuvvet analizi

5.2. Ön Deneylerden Elde Edilen Bulgular

Ön deneyler için belirlenmiş parametreler çerçevesinde denenen birinci takımın ilk örneği belirtilen ilerleme hızında toplam iki delik delebilmiş ve takım ikinci delikte kırılarak delik içinde kalmıştır. Birinci takımın ikinci ve üçüncü örnekleri ise birer delik delebilmiştir.

Üçüncü örnek ucu delikte kırılmış ve kalmıştır. Böylece hedef malzeme üzerinde işleme devam edilebilecek olan Şekil 5.15'te gösterilen 1 ve 3 numaralı delikler kullanılmıştır. Şekil 5.16'da sırasıyla kırılan birinci takım, kırılan takımın uç kısmı ve delme esnasında oluşan talaş görülmektedir.

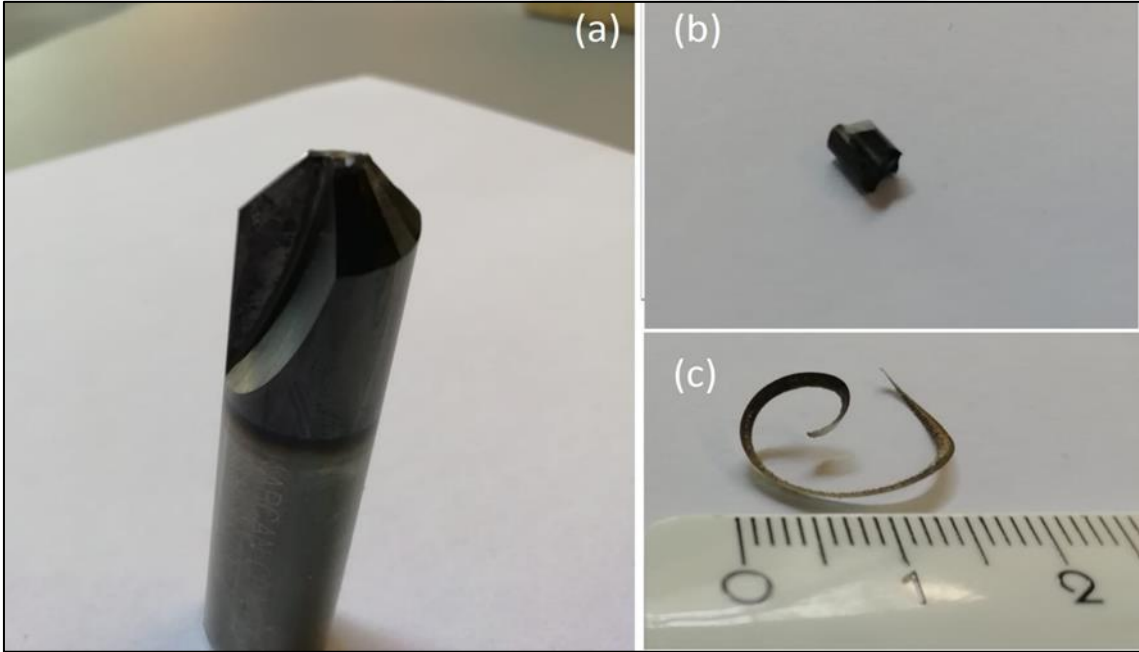
İkinci takım ise birinci takımın delebildiği delikler olan Şekil 5.15'te gösterilen 1 ve 3 numaralı deliklerde işleme alınmıştır. İkinci takımın ilk numunesi 1 numaralı delikte işlem yaptıktan sonra kırılır iken 3 numaralı deliği delen ikinci takımın ikinci numunesi ise kırılarak delik içinde kalmıştır. Şekil 5.17'de kırılan takımın bir görseli ve işlem anında oluşan talaşın resmi bulunmaktadır.

Üçüncü takım denemesi ise takım sırası ile işlem yapılabilen Şekil 5.15'te görülen 1 numaralı delikte gerçekleştirilmiştir. Deneme esnasında takım Şekil 5.18'de görüldüğü gibi kırılmış ve kırılan parça deliğin içinde kalmıştır. Ayrıca takımda talaş sarması da gözlenmiştir.

Takımların Euro 7 nozul formunu sırayla çalışarak oluşturacağı dikkate alındığında, ilk üç takımda yaşanan problemler diğer üç takımın pilot denemelerde kullanımını engellemiştir. Elde edilen bu deneysel bulgular çerçevesinde ilk üç takım üzerinde tasarımın ve imalatın revize edilmesi ve tekrar üretilerek pilot çalışmalar devam edilmesi kararlaştırılmıştır. Birinci takım için farklı ilerleme hızlarında dinamometreden elde edilen kuvvet ve moment grafikleri Şekil 5.19'da, ikinci takım için 130 m/dk ilerleme hızında dinamometreden elde edilen kuvvet ve moment grafikleri Şekil 5.20'de ve üçüncü takım için 100 m/dk ilerleme hızında dinamometreden elde edilen kuvvet ve moment grafikleri Şekil 5.21'de gösterilmiştir. Pilot testlerde kırılan takımlar için elde edilen ortalama kuvvet ve moment değerleri ise Çizelge 5.1'de özet olarak sunulmuştur.



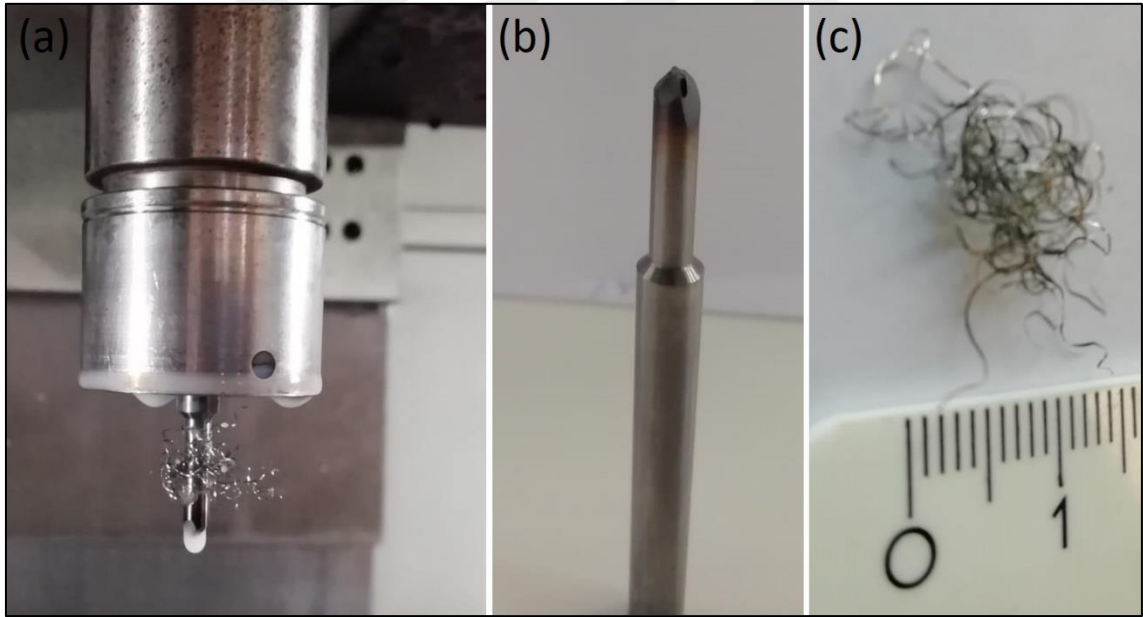
Şekil 5.15. Hedef malzeme üzerindeki pilot takım denemeleri



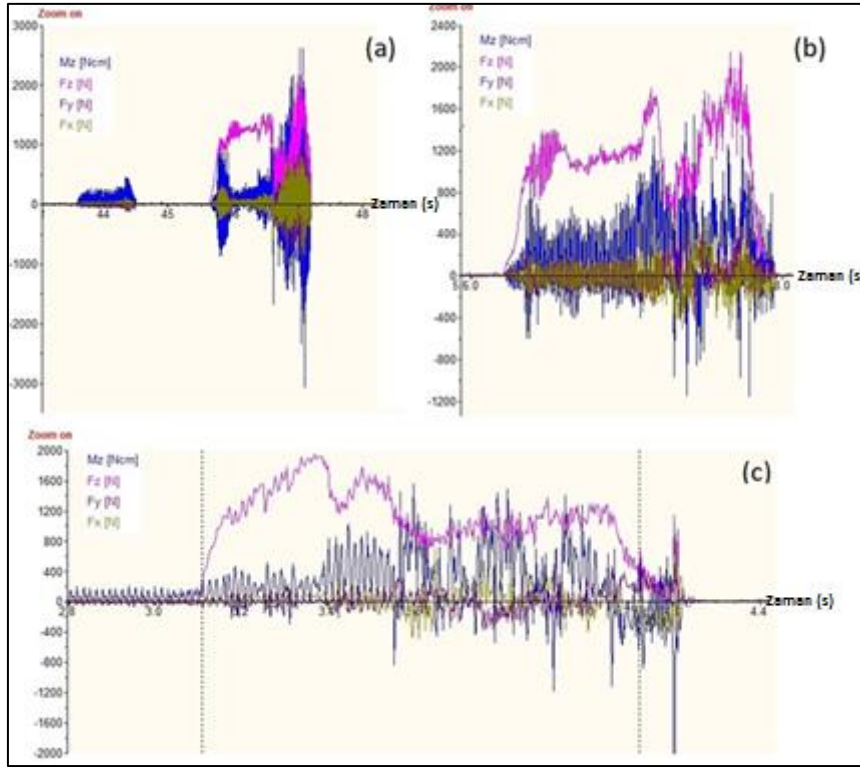
Şekil 5.16. (a) Kırılan ilk takım, (b) uç kısmı ve (c) talaşı



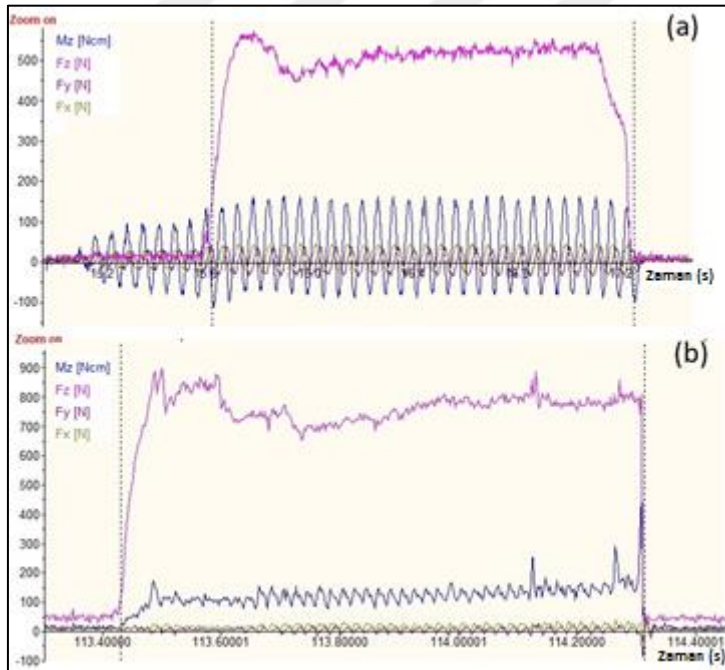
Şekil 5.17. (a) Kırılan ikinci takım ve (b) talaşı



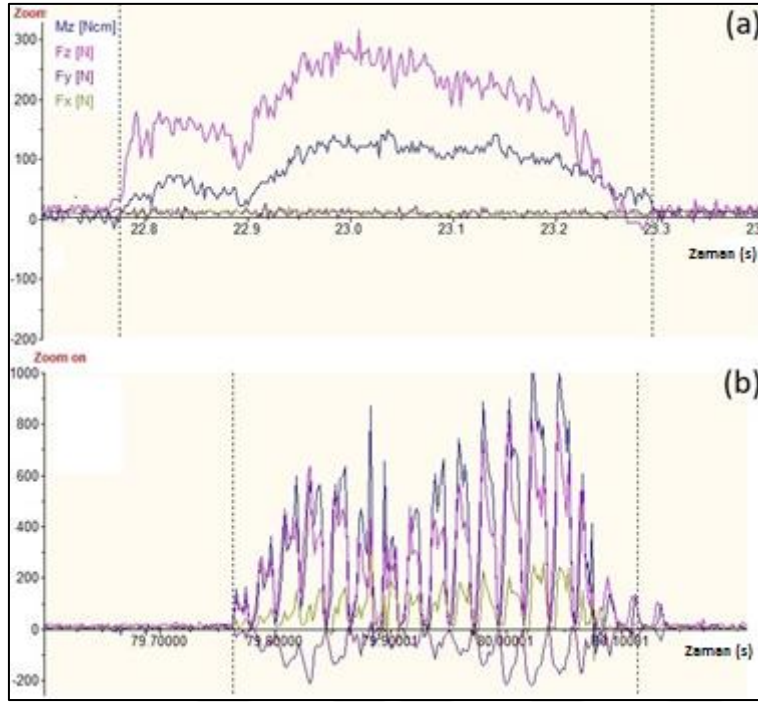
Şekil 5.18. (a) Üçüncü takımın talaş sarması, (b) talaş sarılan takım ve (c) talaş



Şekil 5.19. Birinci takım için (a) 640, (b) 300 ve (c) 150 m/dk ilerleme hızlarında dinamometreden elde edilen kuvvet ve moment grafikleri



Şekil 5.20. İkinci takım için 130 m/dk ilerleme hızında dinamometreden elde edilen (a) kuvvet ve (b) moment grafikleri



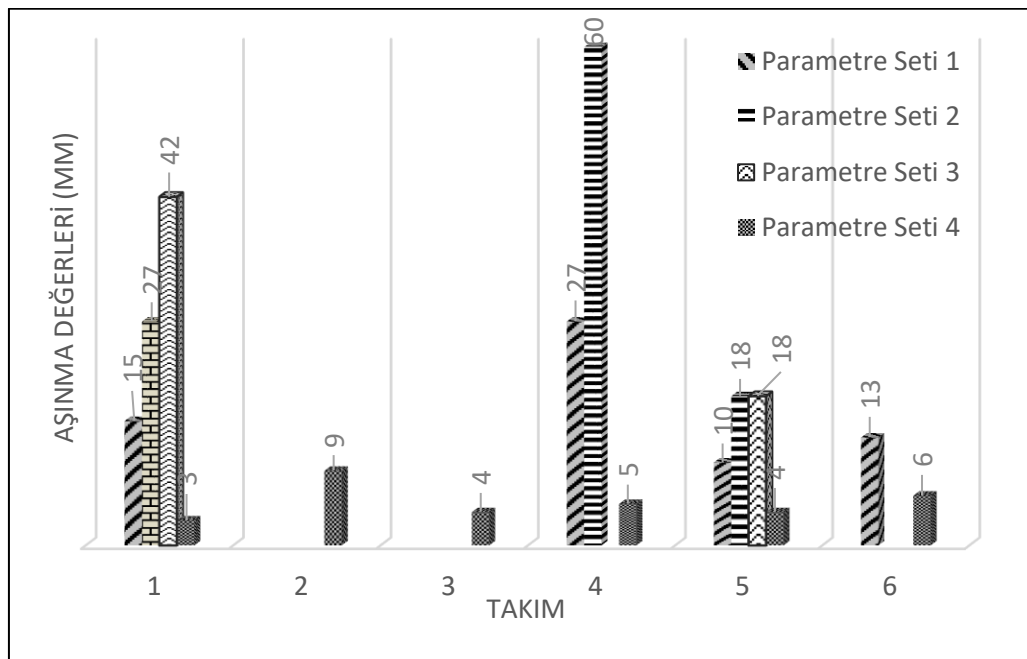
Şekil 5.21. Üçüncü takım için 100 m/dk ilerleme hızında dinamometreden elde edilen (a) kuvvet ve (b) moment grafikleri

Çizelge 5.1. Pilot testlerde kırılan takımlar için ortalama kuvvet ve moment değerleri

Takımlar	İlk Gagalama İşlemleri	Kırılmadan Önce
Birinci Takım Birinci Deneme	Mz	140,55 Ncm
	Fz	1043,05 N
Birinci Takım İkinci Deneme	Mz	238,43 Ncm
	Fz	1098,04 N
Birinci Takım Üçüncü Deneme	Mz	297,49 Ncm
	Fz	1166,75 N
İkinci Takım Deneme	Mz	39,88 Ncm
	Fz	498,05 N
Üçüncü Takım Deneme	Mz	81,82 Ncm
	Fz	177,7 N

5.3. İşleme Parametreleri Deneylerinden Elde Edilen Bulgular

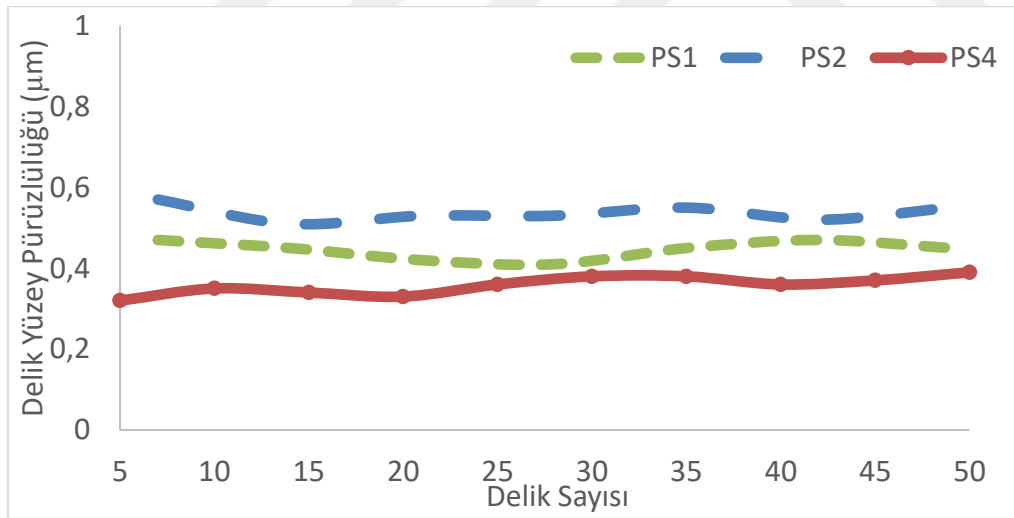
İşleme parametrelerinin belirlenmesi amacıyla dört tip parametre grubu ile deneyler gerçekleştirilmiştir. Yapılan deneyler sonucunda takımların başarı durumları ve deneyler sonucu takım aşınması ve elde edilen nozul geometrilerinden ölçülmüş yüzey pürüzlülük değerleri elde edilmiştir. Devir hızı arttırıldığında takımlarda meydana gelen aşınma miktarları çok artmış ve bu durum takımın daha kısa ömürlü olmasına neden olmuştur. Şekil 5.22’de belirlenen parametrelerde takım aşınmalarındaki değişim görülmektedir.



Şekil 5.22. Elli delik sonrası kesme hızına bağlı takım aşınmalarındaki değişim

Takım aşınması için takım ömürleri hedeflerine ulaşmak amacıyla kabul edilen ($<0,06$ mm) değerlerden çok daha düşük aşınma sonuçları elde edilmiştir. Takım 1 ile yapılan dört farklı parametre seti ile yapılan çalışmada 1500 dev/dk ve 0,02 mm/diş ile en iyi 0,003 mm aşınma değeri elde edilmiştir. Aynı ilerleme değeri için 3000 dev/dk, 4000 dev/dk ve 6000 dev/dk aşınma değerleri sırasıyla 0,015 mm, 0,027 mm ve 0,042 mm olarak bulunmuştur. Takım 2 için iki adımda işleme sonucu optimum değerlerin bulunması hedeflenmiştir. 2800 dev/dk 0,02 ve 2800 dev/dk, 0,015 mm/diş değerleri ile en iyi aşınma sonucu olan 0,09 mm olduğu için bu değerler optimum değer olarak kabul edilmiştir. Diğer işleme parametrelerinde yüzey pürüzlülük değerleri çok yüksek olduğu için grafikte gösterilmemiştir. İki operasyonda gerçekleşen Takım 3 için işleme parametre değerleri birinci operasyon için 2800 dev/dk 0,01

mm/diş ve ikinci operasyon 2800 dev/dk 0,02 mm/diş değerleri sonucu takım aşınması 0,004 mm ölçülmüştür. Benzer şekilde diğer parametre değerleri kabul görmemiştir. Tek operasyon sonucu Takım 4 ile işlemler dört farklı işleme parametrelerinde gerçekleşmiştir. Kabul edilen aşınma değerleri 0,005 mm, 0,027mm ve 0,060 mm aşınma değerleri sırasıyla 6000 dev/dk, 0,05 mm/diş; 6000 dev/dk, 0,0625 mm/diş ve 7000 dev/dk, 0,0625 mm/diş için ölçülmüştür. 8000 dev/dk, 0,0625 değeri çok yüksek bulunduğu dikkate alınmamıştır. Takım 5 ile tek bir 0,015 mm/diş ilerleme değeri ile dört farklı 4500 dev/dk, 6000 dev/dk, 7000 dev/dk ve 8000 dev/dk sonuçları sırasıyla 0,004 mm, 0,01 mm, 0,018 mm ve 0,018 mm olarak ölçülmüştür. En iyi parametre değerinin 4500 dev/dk ve 0,015 mm/diş parametresi sonucu elde edilmiştir. Takım 6 için ise 0,01 mm/diş ilerleme ve dört farklı 3000 dev/dk, 4500 dev/dk, 6000 dev/dk ve 8000 dev/dk değerlerinde işlemler gerçekleştirilmiştir. 6000 dev/dk ve 8000 dev/dk değerleri için aşınma sonuçları yüksek bulunduğu sadece 3000 dev/dk ve 4500 dev/dk sonucu elde edilen 0,006 mm ve 0,013 mm aşınma değerleri dikkate alınmıştır. Sonuç olarak en iyi parametre setinin 0,001 mm/diş ilerleme ve 3000 dev/dk için uygun olduğuna karar verilmiştir.



Şekil 5.23. Belirlenen parametre setlerinde yüzey pürüzlülüğündeki değişim

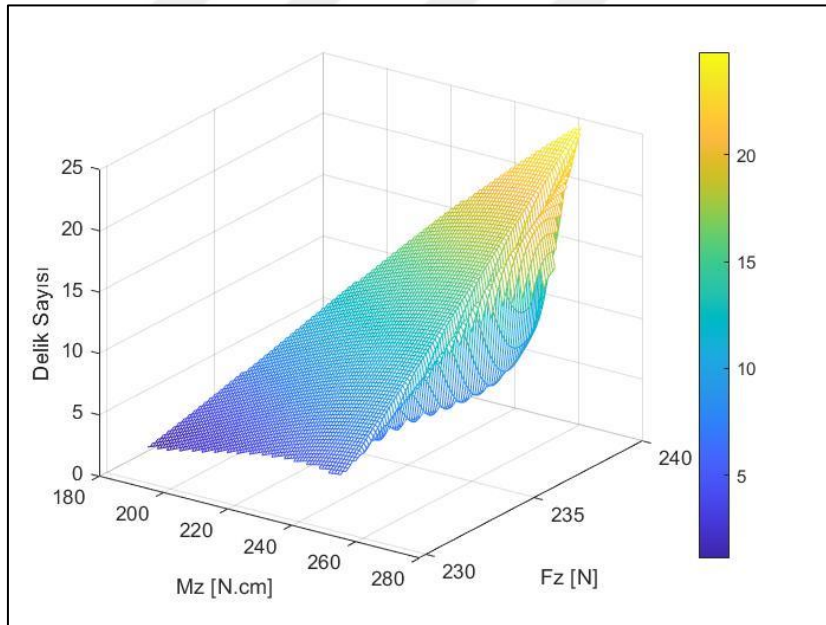
Takım devirlerindeki artış hedef parça üzerinde 49 delik için yüzey pürüzlülük değerlerinin artmasına neden olmuştur. En uygun parametre setleri sonucu elde edilen nozul iç yüzey pürüzlülük değerleri Şekil 5.23'te sunulmaktadır. Parametre Seti 4 (PS4) ile yapılan çalışmalar sonucu en iyi takım aşınması elde edilirken benzer şekilde nozul iç yüzey pürüzlülük değerleri de en düşük olarak bu set ile elde edilmiştir. Parametre Seti 1 (PS1) ve Parametre Seti 2 (PS2) ile yapılan işlemler sonrası yüzey pürüzlülükleri kabul edilebilir

değerlerde olmasına karşın en iyi takım aşınmasının elde edildiği Parametre Seti 4 değerleri ile çalışmalara devam edilmiştir.

5.4. İlerleme Kuvveti ve Moment

Performans testlerinde 80x80x40 mm boyutlarında kesilerek hazırlanmış iş parçaları üç kesme kuvveti bileşenini (F_x , F_y , F_z) ve momenti (M_z) aynı anda ölçme kapasitesine sahip, kuartz kristal esasıyla çalışan KISTLER 9272 tipi dinamometre bağlanmış ve ölçülen değerler Kistler 5070 amplifier ve DynoWare programı yardımı ile sayısal değerlere dökülmüştür. Elde edilen değerler ışığında, delik sayısına bağlı olarak delme işlemlerindeki en önemli parametreler olan ilerleme kuvveti (F_z) ve takım burulma momenti (M_z) değişimleri belirlenmiştir.

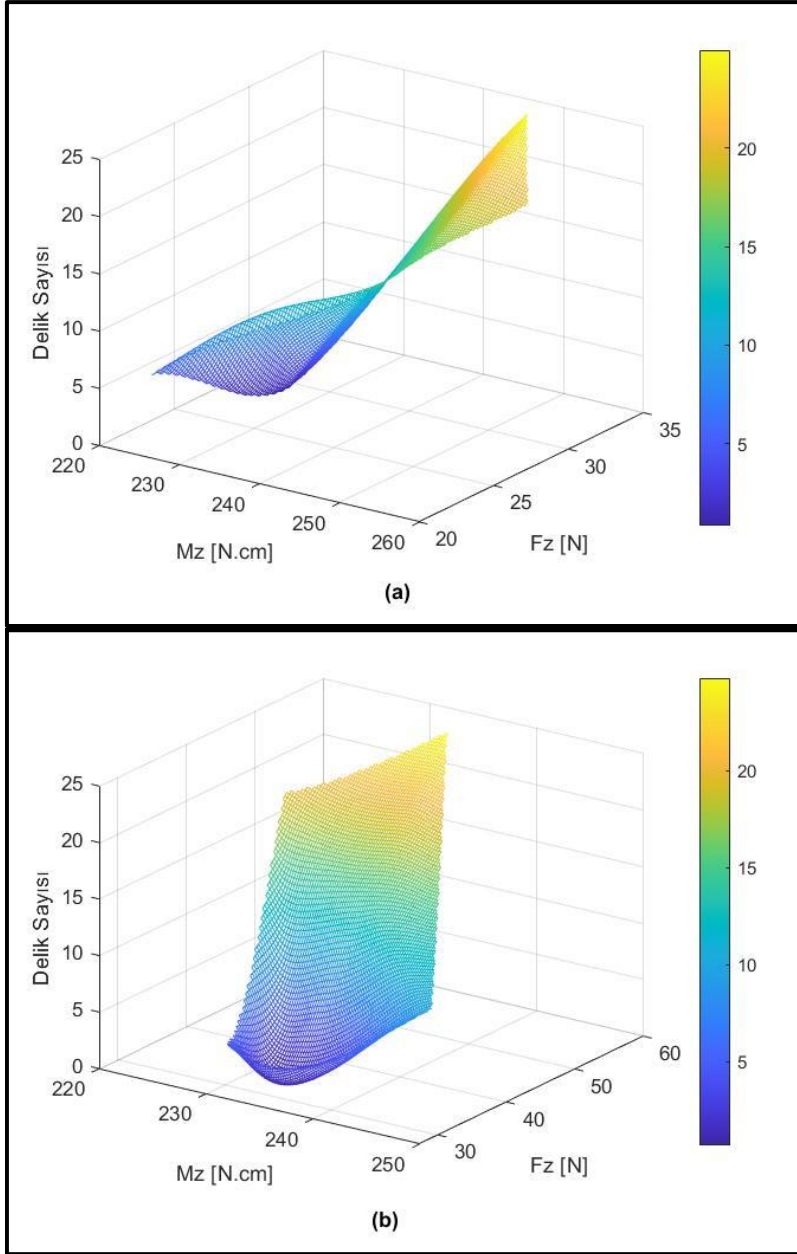
Şekil 5.24'te görüldüğü gibi Takım 1 için tek operasyonda nozulların seri olarak işlenmesi sonucu artan delik sayısına bağlı olarak $F_z = 239,80$ N ve $M_z = 263$ Ncm değerlerinin arttığı görülmüştür.



Şekil 5.24. Takım 1 için delik sayısına bağlı moment ve ilerleme kuvvetlerindeki değişim

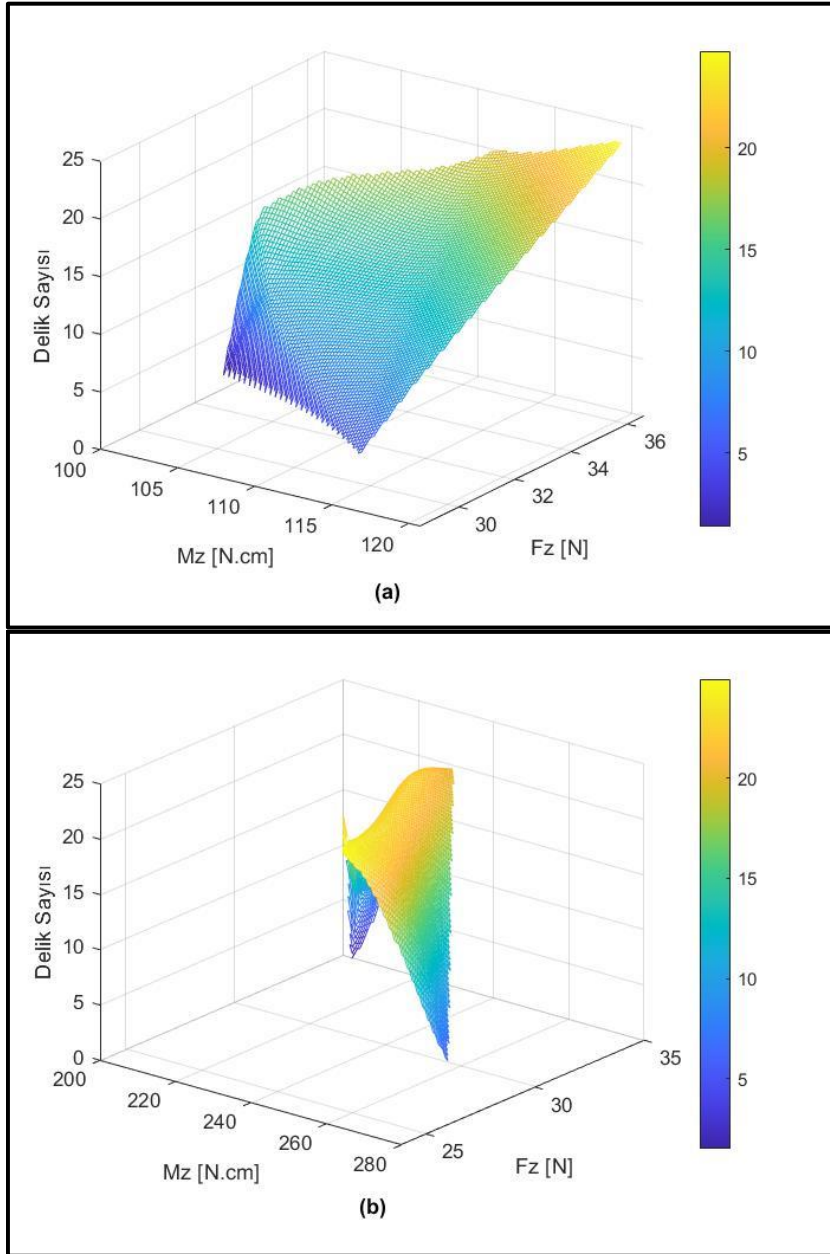
Benzer olarak Şekil 5.25'te görüldüğü gibi iki farklı kademedeki işleme gerçekleştirilen takım 2 için F_z ve M_z değerlerinin delik sayısı ile arttığı görülmüştür. Bu değerler birinci kademedeki en fazla $F_z = 33,6$ N ve $M_z = 248$ Ncm, ikinci kademedeki ise $F_z = 55,42$ N ve

$M_z=234,6$ Ncm olarak ölçülmüştür. Birinci takıma kıyasla ilerlemenin aynı kalmasına rağmen, devir hızının artmasıyla ilerleme kuvvetinin azaldığı görülmüştür. Nozul ve takım geometrisi göz önüne alındığında birinci takımın işleme değerlerine kıyasla ilerleme kuvvetindeki kayda değer düşüşün nedeninin birinci takımın uzun kesme kenarından ve devir artışından kaynaklandığı anlaşılmaktadır[4, 64].



Şekil 5.25. (a) Takım 2 için 1. kademede delik sayısına bağlı moment ve ilerleme kuvvetlerindeki değişim (b) Takım 2 için 2. kademede delik sayısına bağlı moment ve ilerleme kuvvetlerindeki değişim

Takım 3 için Şekil 5.26'da görüldüğü gibi en yüksek değerler birinci kademedeki en fazla $F_z=36,65\text{N}$ ve $M_z=121\text{ Ncm}$, ikinci kademedeki ise $F_z=34,78\text{ N}$ ve $M_z=265\text{ Ncm}$ olarak ölçülmüştür.

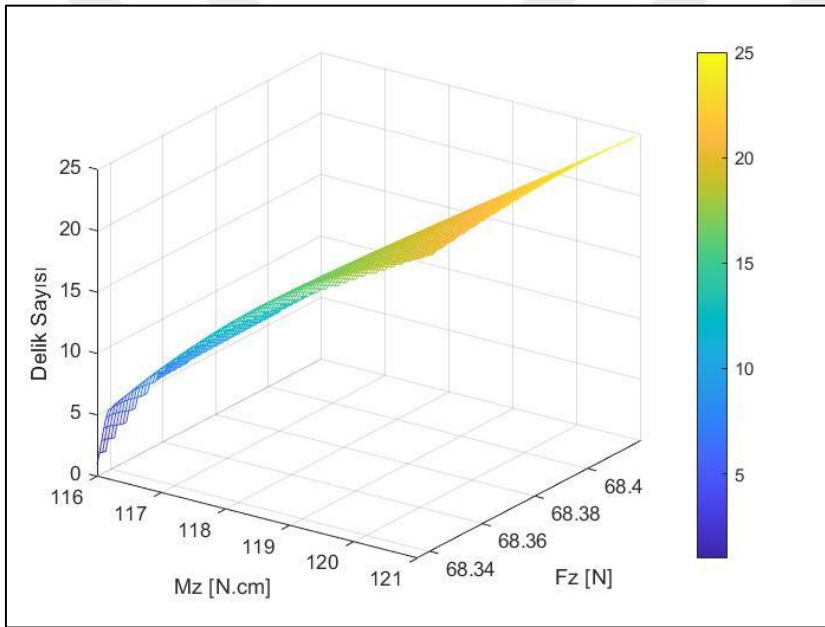


Şekil 5.26. (a) Takım 3 için 1. kademedeki delik sayısına bağlı moment ve ilerleme kuvvetlerindeki değişim (b) Takım 3 için 2. kademedeki delik sayısına bağlı moment ve ilerleme kuvvetlerindeki değişim

Bütün delmeler sonucu ortalama delik değerleri birinci kademe $34,25\text{ N}$ ve $103,84\text{ Ncm}$ ve ikinci kademe $30,69\text{ N}$ ve $258,80\text{ Ncm}$ olarak ölçülmüştür. Kuvvetlerde görülen bazı

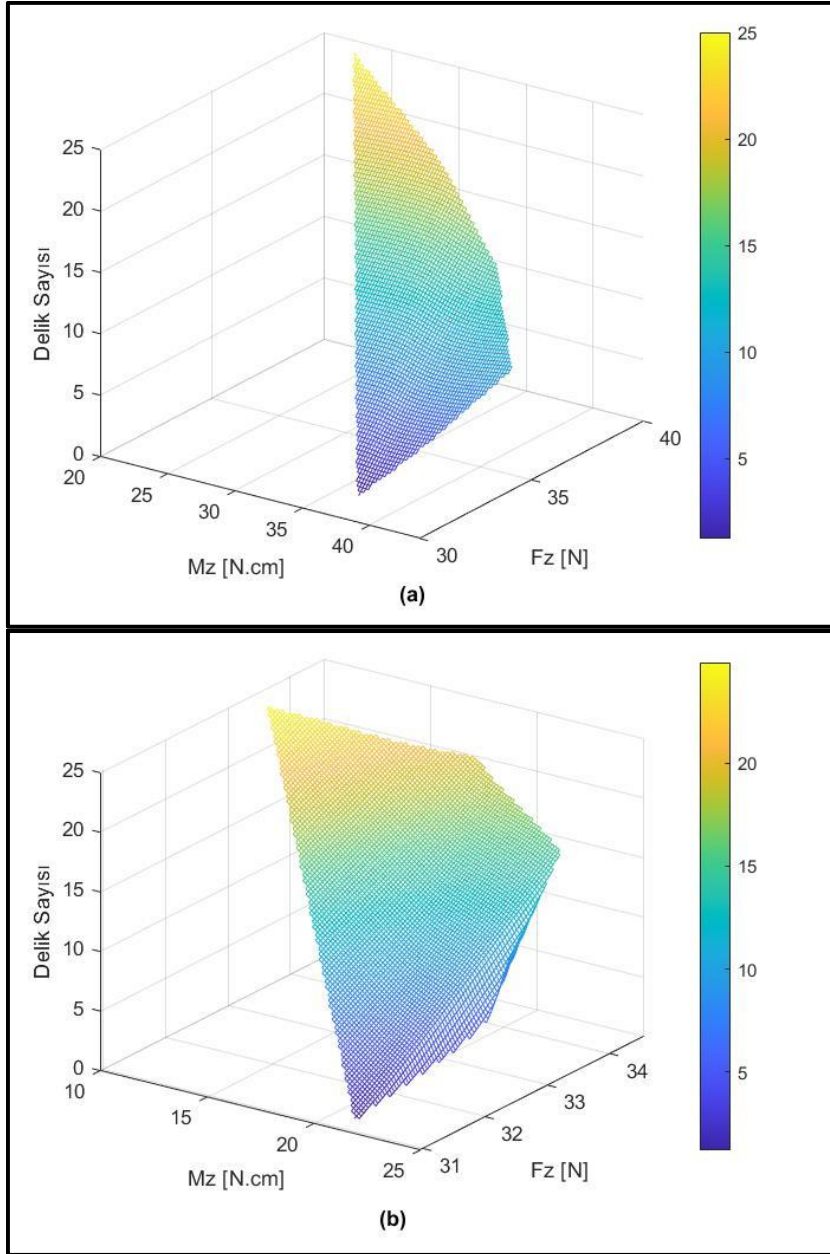
dalgalanmalar ise, malzemenin nikel bileşenine bağlı olarak çıkan talaşın takıma dolanmasına ve yeniden kesilme eğilimi sergilemesine atfedilmiştir [65].

Takım 4 ile belirlenen parametrelerle yapılan işlemler sonucu Şekil 5.27'deki gibi bir değişim elde edilmiştir. Tek operasyonda gerçekleşen bütün deliklerin işlenmesi sonucu elde edilen en yüksek F_z ve M_z değerleri sırasıyla 68,42 N ve 121 Ncm iken ortalama değerler 68,36 N ve 118 Ncm olarak belirlenmiştir. Bir önceki takım ile işlemeye göre F_z kuvvetindeki artışın nozul içindeki çap genişletmeyle artması, benzer şekilde M_z momentindeki azalmanın ise çap genişletme sonucu F_x ve F_y yönündeki kuvvetlerdeki azalma sonucu olduğu yorumlanmıştır [66].



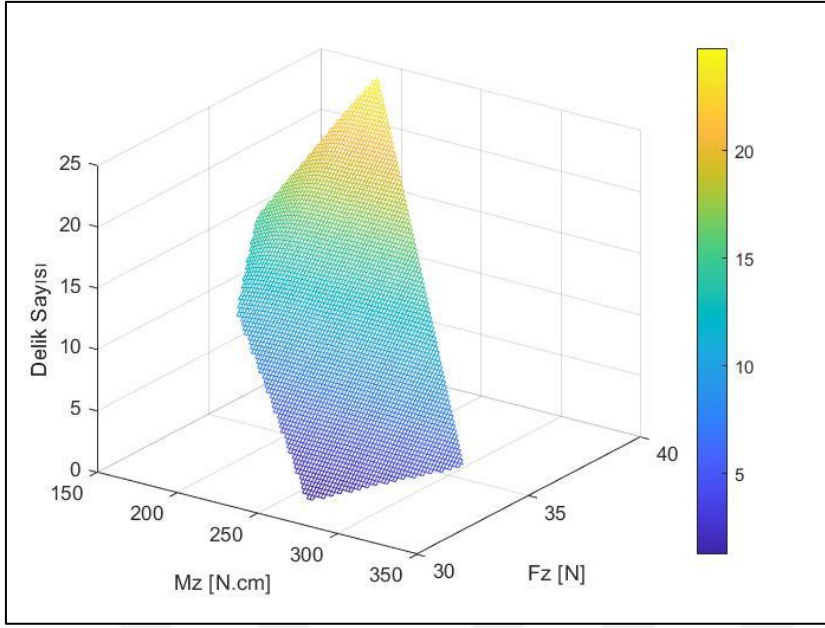
Şekil 5.27. Takım 4 için delik sayısına bağlı moment ve ilerleme kuvvetlerindeki değişim

Takım 5 için en yüksek değerlerin birinci kademedeki en fazla $F_z = 39,46$ N ve $M_z = 44$ Ncm, ikinci kademedeki ise $F_z = 34,58$ N ve $M_z = 23$ Ncm olarak ölçüldüğü Şekil 5.28'de görülmektedir. Bütün delmeler sonucu ortalama delik değerleri birinci kademedeki 34,04 N ve 36,33 Ncm ve ikinci kademe 33,13 N ve 19,67 Ncm olarak ölçülmüştür. Nozul uç formunu oluşturan bu takımın küçük talaş kaldırma hacmini elde ettiğimiz bu işleme sonucu düşük ilerleme ve yüksek devirde işleme ile beklendiği gibi düşük ilerleme ve moment değerleri elde edilmiştir. Söz konusu değerlerin nedenleri, düşük kesme kenarları ve düşük uç açısına bağlanmıştır [9].



Şekil 5.28. Takım 5 için 1. kademede delik sayısına bağlı moment ve ilerleme kuvvetlerindeki değişim (b) Takım 5 için 2. kademede delik sayısına bağlı moment ve ilerleme kuvvetlerindeki değişim

Son takımın tek operasyonla işleme sonrası nozul geometrisi nihai hale getirilmiştir. En yüksek F_z ve M_z değerleri sırasıyla 40,76N ve 272 Ncm iken ortalama değerlerin 34,66 N ve 209,13 Ncm olarak belirlenmiştir. Grafikler incelendiğinde, delik sayısındaki artışa bağlı olarak genel olarak F_z kuvvetinde de bir artış eğilimi gözlenmiştir. Ancak Şekil 5.29’da da görüldüğü gibi bu artış eğilimi, takım performansını olumsuz etkileyecek bir seviyeye ulaşmamıştır.

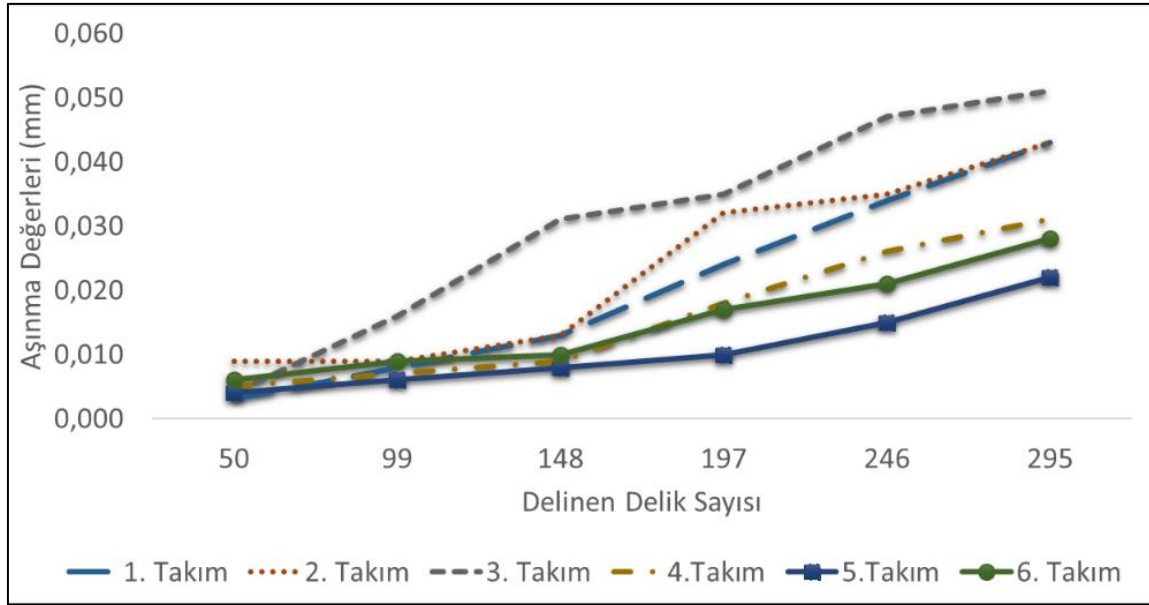


Şekil 5.29. Takım 6 için delik sayısına bağlı moment ve ilerleme kuvvetlerindeki değişim

25 nozul eldesi sonucunda takımlarda herhangi bir aşınma eğilimi ve performans kaybı gözlenmemiştir. Yapılan tasarım ve üretim faaliyetlerinin başarılı olduğu görülmektedir. İtme Kuvveti (F_z) açısından en kararlı veriler 4 numaralı takım olan raybalama takımlarında gözlenmiştir. Bu durum, raybalama işleminin doğası olarak, raybalama takımlarına bırakılan düşük kesme derinliğine atfedilmiştir [67]. Takım burulma momenti (M_z) grafikleri değerlendirildiğinde de genel eğilimin F_z kuvvetindeki eğilime paralellik arz ettiği görülmektedir. Burulma Momenti değerleri her bir takımın talaş yüküne bağlı olarak F_x ve F_y kuvvetlerinden etkilendiği için daha geniş bir aralığa yayılmış, delik sayısındaki artışa paralel bir miktar artma eğilimi sergilemiştir.

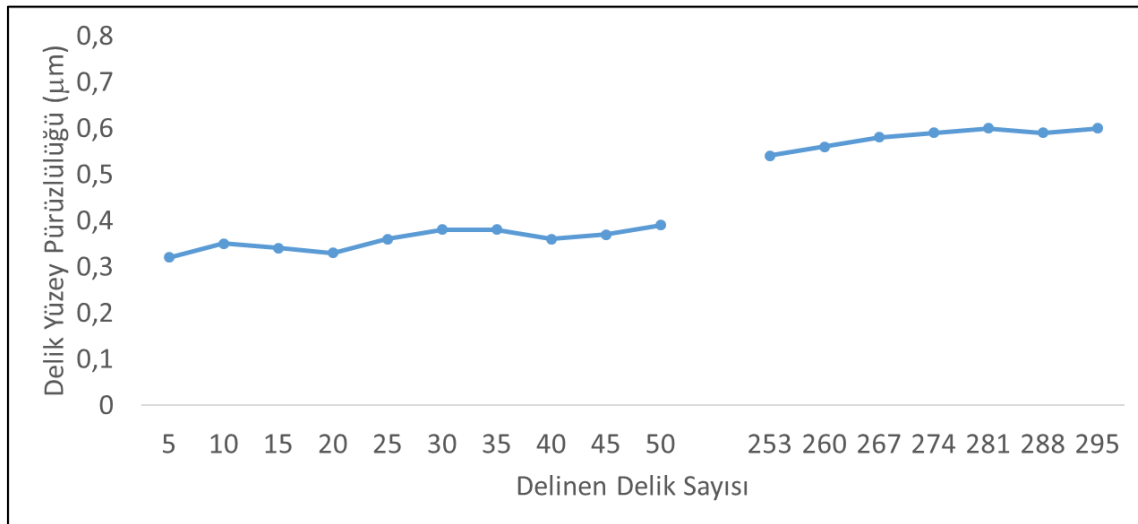
5.5. Doğrulama Ölçümleri

Parametre ve performans deneylerinden sonra toplam 295 adet nozul ardı sıra her bir takım ile işlenmiştir. Şekil 5.30'da görülen grafikteki eğriler yardımıyla aşınma değerlerinin makul seviyede olduğu ($\leq 0,06$ mm) ve takımlar için belirlenen ömür değerlerine ulaşılacağı anlaşılmıştır.



Şekil 5.30. Ömür deneylerinde delik sayısına bağlı olarak takım aşınmalarındaki değişim

Ayrıca Şekil 5.31’de tel elektro erozyon yöntemi ile elde edilen nozul yapılarının ölçülen yüzey pürüzlülük değerleri gösterilmiştir. Çalışmada, 295 delik delme sonrası elde edilen nozul yüzeyinin pürüzlülük değerlerinin kabul edilebilir seviyede olduğu görülmüştür.



Şekil 5.31. Ömür deneylerinde delik sayısına bağlı nozul yüzey pürüzlülüğündeki değişim

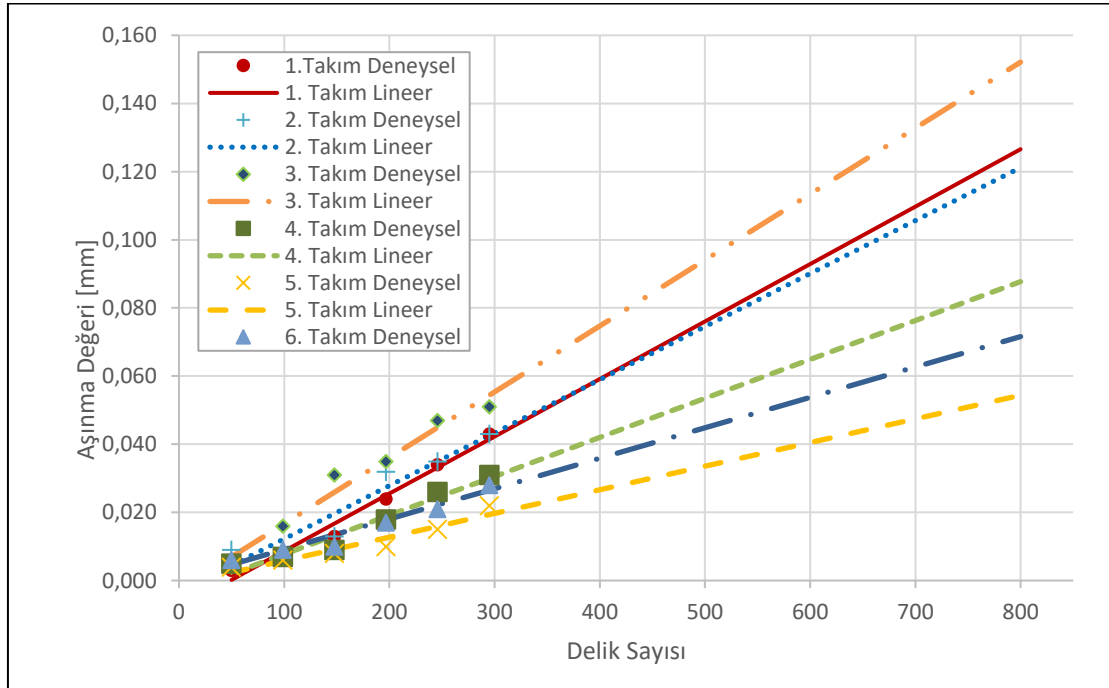
5.6. Matematiksel Modelleme ve Deneysel Sonuçların Karşılaştırılması

Yüzey pürüzlüğü ve takım aşınması değerleri için grafiksel benzetim yöntemiyle lineer bir model gerçekleştirilmiştir. Çizelge 5.2’de gösterilen takım aşınması değerleri için grafiksel benzetim yöntemi kullanılarak matematiksel bir model oluşturulmuştur.

Çizelge 5.2. Delik sayısına göre takım aşınma değerleri

Delik Sayısı	1. takım	2. takım	3. takım	4. takım	5. takım	6. takım
50	0,003	0,009	0,004	0,005	0,004	0,006
99	0,008	0,009	0,016	0,007	0,006	0,009
148	0,013	0,013	0,031	0,009	0,008	0,010
197	0,024	0,032	0,035	0,018	0,010	0,017
246	0,034	0,035	0,047	0,026	0,015	0,021
295	0,043	0,043	0,051	0,031	0,022	0,028

Şekil 5.32’de görülen noktalarla belirtilmiş, her bir takımın delik sayısına bağlı olarak değişen aşınma değerleri yardımıyla lineer benzetim yöntemiyle doğrusal grafikleri çizilmiştir. Bu grafikleri kullanarak Çizelge 5.3’te görülen belirleme katsayıları yani R^2 değerleri hesaplanmıştır.



Şekil 5.32. Deneysel ve Teorik olarak takımların delik sayısına bağlı takım aşınmalarındaki değişim

Çizelge 5.3. Her bir takım için hesaplanan R^2 değerleri

	1. takım	2. takım	3. takım	4. takım	5. takım	6. takım
R^2	0,978	0,913	0,969	0,946	0,916	0,953

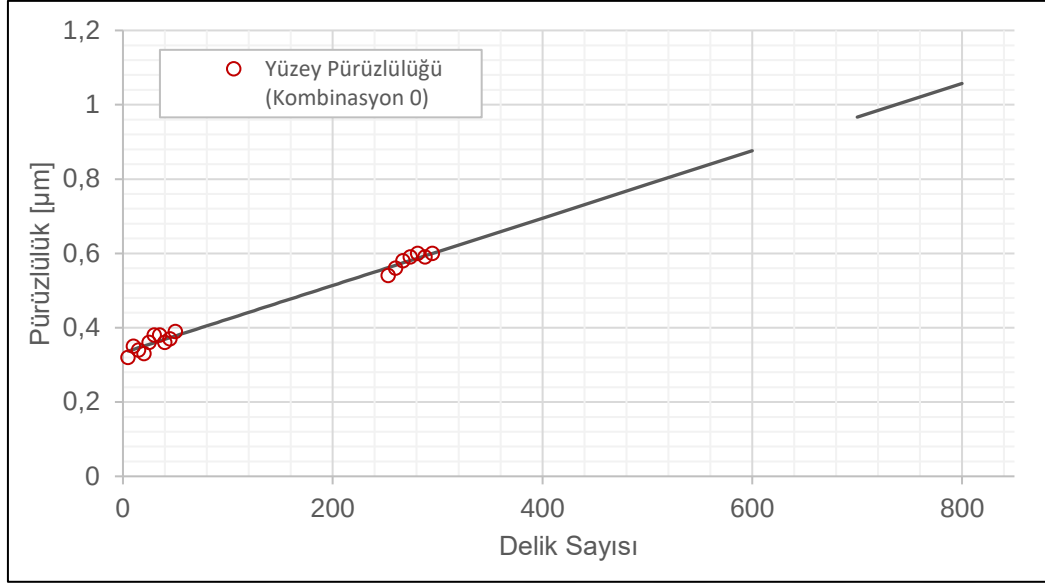
Bu değerler incelendiğinde modelin her bir takım için %90 üzerinde doğrulukla uyumlu olduğu görülmektedir. Her bir takım aşınması için matematiksel modeller oluşturulmuştur.

1. Takım Aşınma Değeri = $-0.00824 + 0.000168513 \times \text{Delik Sayısı}$
2. Takım Aşınma Değeri = $-0,00336 + 0,000155685 \times \text{Delik Sayısı}$
3. Takım Aşınma Değeri = $-0,00273 + 0,000193586 \times \text{Delik Sayısı}$
4. Takım Aşınma Değeri = $-0,00371 + 0,000114286 \times \text{Delik Sayısı}$
5. Takım Aşınma Değeri = $-0,00114 + 0,0000693878 \times \text{Delik Sayısı}$
6. Takım Aşınma Değeri = $0,000222546 + 0,0000892128 \times \text{Delik Sayısı}$

Deneysel çalışmaların bir başka çıktısı olan yüzey pürüzlülüğünün delik sayısına bağlı olarak değerlerinden yola çıkılarak oluşturulan modelin grafiği Şekil 5.33'te görülmektedir. Takım aşınması için oluşturulan modeller ile aynı doğrultuda adımlar izlenerek hesaplanan belirleme katsayısı R^2 değerinin 1'e çok yakın bir değer olduğu görülmüştür. Oluşturulmuş matematik model;

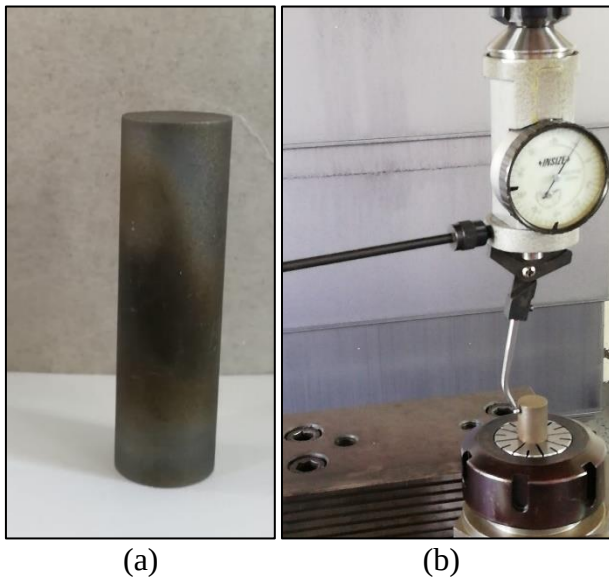
$$Ra = 0.33256 + 0.00090584 \times \text{Delik Sayısı}$$

olarak ortaya çıkmıştır.



Şekil 5.33. Delik sayısına bağlı olarak yüzey pürüzlülüğündeki değişim

Elde edilen işleme parametreleri ile doğrulama işlemleri, Euro 7 nozul üretimi yapan Romanya’da bulunan işletmede gerçekleştirilmiştir. Bu firmada kullanılan yatay işleme CNC tezgahı özel olarak nozul iç yapısını işlemesi amacıyla dizayn edilmiş bir tezgahdır. Yatay işleme ile takımda oluşabilecek olan talaş sarmasının önüne geçilebilmektedir. Nozul yapısının oluşturulacağı hedef malzeme Şekil 5.34 (a)’da gösterildiği gibidir. Hedef malzemenin tezgaha bağlama biçimi ve salgı kontrolü Şekil 5.34 (b) ve üretim sonrası kesiti alınmış nozul geometrisi Şekil 5.35’te gösterilmiştir.



Şekil 5.34. Seri üretim için hedef malzeme (a), tezgahta bağlama ve salgı kontrolü (b)



Şekil 5.35. Seri üretilmiş ve kesit görüntüsü alınmış nozul geometrisi

Geliştirilen takımlarla sahada seri üretim şartlarında yapılan deneylerde elde edilen geometrik tamlık ve yüzey kalitesi ürün speklerinde belirtilen sınırlar içinde kalmış ve takımların performansı doğrulanmıştır. Böylelikle seri üretim yapan bir firmada takımların denenmesi ile proje kapsamında geliştirilen takımların çalışma veriminin yüksek olduğu görülmüştür. Euro 7 nozulları için sahada takım denemesinde kullanılan parametreler orijinal ömür parametreleri olup ömür hedeflerinin Çizelge 5.4'teki gibi olduğu tespit edilmiştir.

Çizelge 5.4. Takım ömür hedefleri

	Planlanan Hedef (Adet)	Ulaşılan Hedef (Adet)
Takım 1	800	842
Takım 2	800	795
Takım 3	800	786
Takım 4	500	652
Takım 5	800	924
Takım 6	800	936

Belirlenen işleme parametreleri ile Euro 7 nozul yapısının takımlandırmasında takım ömürleri 1., 4., 5. ve 6. takımlar için beklenen değerlerin üstünde, 2. ve 3. takımlar için beklenen değerlere çok yakın olarak gerçekleşmiştir. Ayrıca belirlenen işleme parametreleri ile elde edilen nozul yüzeylerinde, yüzey pürüzlülük değerlerinin de beklenen kriterler içinde kaldığı tespit edilmiştir. Üretim süresi olarak proje kapsamında belirtilen sürenin altında kalınmış olup bir nozul yapısının tamamlaması yaklaşık olarak 72 saniye sürmüştür.

Delik sayısına göre takım aşınma değerleri ve delik sayısına baēlı olarak yüzey pürüzlülüēündeki deēişim grafikleri ve oluşturulmuş olan matematiksel modeller de üretilmiş olan takımların takım ömür hedeflerine ulaşabileceēini göstermektedir.



6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Euro 7 nozullarının üretimi sürecinde gerçekleştirilecek deliklerin delinmesinde takım geometrisinin tasarımında değerlendirilmesi gereken hususların tespitine ve farklı takım geometrisinin geliştirilmesine yönelik olarak deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Altı farklı geometriye sahip matkapların kullanıldığı seri nozul delme işleminde yüzey pürüzlülüğü, çeşitli kesme hızı ve ilerleme hızına bağlı olarak çok sayıda delme işlemi uygulanmıştır. Çalışmanın ana katkısı, aynı matkaplarla çok sayıda delik delinerek minimum yüzey pürüzlülüğüne ve takım aşınmasına uygun optimum delme koşullarını belirlemektir.

Yapılan modelleme ve optimizasyon, deneysel çalışma sayısının azaltılabileceğini göstermiş ve sistematik ve etkili bir metodoloji sağlamıştır. Modelleme sonuçlarından tahmin edilen ve ölçülen değerler oldukça yakındır, bu da geliştirilen modelin yüzey pürüzlülüğünü ve takım aşınmasını tahmin etmek için etkili bir şekilde kullanılabileceğini göstermektedir. Bu model kullanılarak, zaman ve maliyette kayda değer bir tasarruf sağlanmıştır. Bunun üzerine yapılan ön deneme çalışmalarının optimum parametrelerin belirlenmesinde fayda sağladığı görülmüştür. İşleme parametrelerinin belirlenmesi amacıyla dört tip parametre grubu belirlenmiştir. İlk üç takım ile yapılan çalışmalarda arzu edilen delik geometrik formları oluşturulmuş ancak sonraki deliklerde kırılma yaşanmıştır. Elde edilen bu deneysel bulgular çerçevesinde ilk üç takım üzerinde tasarım ve imalat revize edilerek ve tekrar üretilerek pilot çalışmalara devam edilmiştir. Yapılan performans deneyleri ile takımların başarı durumları, takım aşınması ve nozul geometrisinin işleme tamlığı doğrulanmıştır.

- İlk dört ön deneme parametre seti ile yapılan deneylerde devir sayısı artırıldığında takım aşınmasının çok arttığı görülmüştür. Özellikle Parametre Seti 2’de üç nolu takımda devir sayılarındaki artış nedeniyle 60 μm , Parametre Seti 3’te 42 μm olarak yüksek bir değer çıkmasına karşın sınır kabul edilen 60 μm değeri elde edilmiştir. Benzer şekilde devir sayılarındaki artışlar nedeniyle nozul yüzey pürüzlülüklerinde de artış gözlenmiştir. En iyi sonuç Parametre Seti 4 ile sağlanmıştır. Deneylere bu parametre seti ile devam edilmiştir.
- Performans testlerinde delik sayısındaki artışa bağlı olarak ilerleme kuvvetlerinde ve burulma momentlerinde bir artış eğilimi görülmekle birlikte takım aşınması ve nozul iç yüzey kalitesinin kabul edilebilir seviyelerde olduğu gözlenmiştir.

- Kuvvetlerde ve burulma momentlerinde görülen bazı dalgalanmalar ise, malzemenin nikel bileşenine bağlı olarak çıkan talaşın takıma dolanmasına ve yeniden kesilme eğilimi sergilemesine atfedilmiştir.
- Takım 1’de F_z değeri 238,74 N ve M_z değeri 261 Ncm elde edilmiştir. Nozul giriş formunun oluşmasında etkin rol oynamasından dolayı Takım 1’deki F_z yüksek değerinin büyük hacimde talaş kaldırması ile ilişkili olduğu anlaşılmaktadır.
- Takım 2 için birinci kademede ortalama $F_z = 30,6$ N ve $M_z = 232,4$ Ncm, ikinci kademede ise $F_z = 41,62$ N ve $M_z = 238,66$ Ncm olarak ölçülmüştür. Birinci takımındaki devir sayısının neredeyse iki katına çıkması ve nozul formuna bağlı daha düşük hacimde talaş kaldırması nedenleriyle ilerleme kuvvetinde ve momentte azalma meydana gelmiştir.
- Nozul burun formunu kabaca oluşturmak için kullanılan Takım 3 için ortalama değerler birinci kademede $F_z = 34,25$ N ve $M_z = 103,84$ Ncm, ikinci kademede ise $F_z = 30,69$ N ve $M_z = 258,80$ Ncm olarak ölçülmüştür. Düşük ilerleme ve küçük hacimde talaşın uzaklaştırılması bunun nedeni olarak değerlendirilmiştir.
- Raybalama görevi yapan Takım 4 için tek operasyonda gerçekleşen bütün deliklerin işlenmesi sonucu elde edilen ortalama F_z ve M_z değerleri sırasıyla 68,36 N ve 118 Ncm olarak ölçülmüştür. Nozul delik çapının artması sonucu bir önceki takım ile işleme göre F_z kuvvetindeki artışa ve F_x ve F_y yönündeki kuvvetlerinde azalmaya ve dolayısı ile M_z momentindeki düşüşe sebep olmuştur.
- Takım 5 için ortalama değerler, birinci kademede $F_z = 39,46$ N ve $M_z = 44$ Ncm, ikinci kademede ise $F_z = 33,13$ N ve $M_z = 19,67$ Ncm olarak ölçülmüştür. Küçük talaş kaldırma hacmini elde ettiğimiz bu işleme sonucu, düşük ilerleme ve yüksek devirde işleme ile beklendiği gibi düşük ilerleme ve moment değerleri elde edilmiştir.
- Takım 6 ile tek operasyonla işleme sonrası nozul geometrisi nihai hale getirilmiştir. Ortalama değerler 34,66 N ve 209,13 Ncm olarak belirlenmiştir.
- Aynı takım ile çok sayıda yapılan delik delmeler sonucu her bir takımın aşınma değerleri ölçülmüş ve aşınma değerlerinin kabul edilen 0,06 mm’nin altında olduğu görülmüştür. En yüksek aşınma değeri Takım 2, Takım 3 ve Takım 5 ile elde edilmiştir. Takım 2’de nozul geometrisine bağlı olarak diğer takımlara göre derin delik delme işlemini gerçekleştirdiği için daha yüksek takım aşınması gözlemlenmiştir. Bununla birlikte Takım 3 ve Takım 5 ile dar alanda yüksek devirde talaş kaldırılması sonucu diğer takımlara göre daha yüksek aşınma meydana gelmiştir.

- Delinen delik sayısı arttıkça nozullarda oluşan yüzey pürüzlülüğü takım aşınmasındaki artışa bağlı olarak artmıştır.
- Yüzey pürüzlüğü ve takım aşınması değerleri için grafiksel benzetim yöntemiyle lineer bir model gerçekleştirilmiştir. Delik sayısına göre takım aşınma değerleri ve delik sayısına bağlı olarak yüzey pürüzlülüğündeki değişim grafikleri ve oluşturulmuş olan matematiksel modeller de üretilmiş olan takımların takım ömür hedeflerine ulaşabileceğini göstermiştir.
- Euro 7 takımlandırmasında kullanılan takımlar için belirlenen ömür hedeflerine ulaşıldığı görülmüştür. Geliştirilen Euro 7 takımlarından takım 1'in, takım 4'ün, takım 5 ve takım 6'nın belirlenen yüksek devir hızlarında çalıştığı ve nozul yapısını oluşturduğu ve bazı takımların ise hedeflenen ömürden daha uzun çalıştığı görülmüştür.
- Dikey CNC işlemede takım 2 ve takım 4'ün talaş sarma sorunu olmasına rağmen Romanyadaki işletmede yapılan denemeler aracılığı ile yatay CNC işlemede takımların talaş sarma sorunu ortadan kalkmıştır.
- Performans testleri sonucu nozul iç yüzeylerinde elde edilen ortalama yüzey pürüzlük değeri ($R_a=0,34 \mu m$) belirlenen parametrelerin Euro 7 Nozul üretimi için kullanılabileceğini göstermiştir.

Bu çalışmanın sonucu üretilen takım seti ve belirlenen parametrelerle Euro 7 tip nozulların üretimine Bosch firmasında başlanmıştır.



KAYNAKLAR

1. Çanakçı M. ve Önsezen. A. N., (2004). Dizel motorları yardımcı ekipmanlarındaki gelişmeler. *Mühendis ve Makina*, 45: 37-42.
2. Regulation (EU) 2019/631 of the European Parliament and of the Council of 17 April 2019 setting CO2 emission performance standards for new passenger cars and for new light commercial vehicles, and repealing Regulations (EC) No 443/2009. URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A02019R0631-20210301>. Son Erişim Tarihi: 17.12.2021.
3. Tsai, W.D., and Wu S.M., (1979). A mathematical model for drill point design and grinding. *Journal of Engineering for Industry*, 101(3), 333-340.
4. Sui, S., Song, G., Sun, C., Zhu, Z., Guo K. and Sun, J., (2020). Experimental investigation on the performance of novel double cone integrated tool in one-shot drilling of metal stacks. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 109(1): 523-534.
5. Chen, W.-C., et al., (1996). Design optimization of a split-point drill by force analysis. *Journal of Materials Processing Technology*, 58(2): 314-322.
6. Audy, J., (2008). A study of computer-assisted analysis of effects of drill geometry and surface coating on forces and power in drilling. *Journal of Materials Processing Technology*, 204(1): 130-138.
7. Audy, J., (2008). A study of computer assisted analysis of effects of drill point geometrical features on forces and power in drilling with general purpose twist drills. *MM Science in MM Prumyslove Spectrum*, 4(1), 4-9.
8. Wang, J. and Zhang, Q., (2008). A study of high-performance plane rake faced twist drills.: Part I: Geometrical analysis and experimental investigation. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 48(11): 1276-1285.
9. Ema, S., (2012). Effects of twist drill point geometry on torque and thrust. *Science Report of the Faculty of Education*, Gifu University, 36: 165–174.
10. Hocheng, H. and Tsao, C.C., (2006) Effects of special drill bits on drilling-induced delamination of composite materials. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 46(12): 1403-1416.
11. Sambhav, K., Dhande, S., and Tandon, P., (2013). CAD based mechanistic modeling of forces for generic drill point geometry. *Computer-Aided Design and Applications*, 7: 809-819.
12. Gokce, H., Yavuz, M., ve Şeker U., (2017, 1-03 Temmuz). *Matkap geometrisinin oluşturulmasında parametrik modelleme yaklaşımı*. UTIS 8. International Symposium on Machining Sempozyumunda sunuldu, Antalya.

13. Kaplan, Y., (2010). *Delik delmede farklı parametrelerin kesme kuvveti, moment, titreşim, yüzey pürüzlülüğü, aşınma ve çapak oluşumuna etkileri*, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 108-109.
14. Meral, G., (2010). *AISI 1050 malzemenin delinmesinde delme parametrelerinin kesme kuvvetleri ve delik kalitesi üzerindeki etkisinin araştırılması*, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 95-96.
15. Bahçe E., Kılıçkap. E. ve Özel C., (2010) *Al-5005'in delinmesinde delme parametrelerinin çapak oluşumuna etkisinin araştırılması*, 2. Ulusal Tasarım İmalat ve Analiz Kongresi, Balıkesir, 242-250.
16. Taylan, M., (2011). *Sertleştirilmiş takım çeliklerinin delinmesinde kesme parametrelerinin takım aşınması ve talaş oluşumuna etkisinin deneysel olarak incelenmesi*, Makine Eğitimi Anabilim Dalı., Süleyman Demirel Üniversitesi, Isparta.
17. Şekerci, K. N., (2012). *AISI 316L malzemesinin delinmesinde kesme parametrelerinin kesme sıcaklığı, kesme kuvvetleri ve delik kalitesi üzerindeki etkisi*, Yüksek Lisans Tezi Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 87-88.
18. Yağmur, S., Acır, A., Şeker, U., ve Günay, M., (2013). Delik delme işlemlerinde kesme parametrelerinin kesme bölgesindeki sıcaklığa etkisinin deneysel incelenmesi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 28: 1-6.
19. Kıvak, T., Habalı, K. ve Şeker, U., (2013). Inconel 718'in delinmesinde kesme parametrelerinin yüzey pürüzlülüğü ve talaş oluşumu üzerindeki etkisinin araştırılması. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 25(2): 1-6
20. Uzun, G., Yaşar, S. A., Korkut, İ., (2017). Ti-6Al-4V Alaşımının delinmesinde kesme parametrelerinin kesme kuvvetlerine ve delik kalitesine etkisinin incelenmesi. *Karaelmas Fen ve Mühendislik Dergisi*, 7: 469-475.
21. Chatterjee, S., Abhishek, K., Mahapatra, S. S., Datta, S. and Yadav, R. K., (2014). NSGA-II approach of optimization to study the effects of drilling parameters in aisi-304 stainless steel. *Procedia Engineering*, 97: 78-84.
22. Lee, S. M., Chow, H. M., Huang, F. Y. and Yan, B. H., (2009). Friction drilling of austenitic stainless steel by uncoated and PVD AlCrN- and TiAlN-coated tungsten carbide tools. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 49(1): 81-88.
23. Kurt, M., Bağcı, E. ve Kaynak, Y., (2009). Application of Taguchi methods in the optimization of cutting parameters for surface finish and hole diameter accuracy in dry drilling processes. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 40: 458-469.
24. Turgut, Y., Çiçek, A., Kıvak T., Uygur İ. ve Ekici E., (2011). *Çok Katlı Kaplamaların AISI 304 Paslanmaz Çeliğin İşlenebilirliği Üzerindeki Etkileri*, 6th International Advanced Technologies Symposium, Elazığ, Turkey.
25. Nordin, M., Sundström, R., Selinder, T. I. and Hogmark, S., (2000). Wear and failure mechanisms of multilayered PVD TiN/TaN coated tools when milling austenitic stainless steel. *Surface and Coatings Technology*, 133-134: 240-246.

26. Tsao, C.-C., (2002). Prediction of flank wear of different coated drills for JIS SUS 304 stainless steel using neural network. *Journal of Materials Processing Technology*, 123(3): 354-360.
27. Chen, W. C. and. Liu, X. D., (2000). Study on the various coated twist drills for stainless steels drilling. *Journal of Materials Processing Technology*, 99(1): 226-230.
28. Uysal, A., (2014). A study on drilling of AISI 304L stainless steel with nanocomposite-coated drill tools. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 39: 8279-8285.
29. Nayan G Kaneriy, G.K.S., (2014). *Experimental evaluation and optimization of dry drilling parameters of AISI 304 austenitic stainless steel using different twist drills*, 5th International & 26th All India Manufacturing Technology, Design and Research Conference, Guwahati, Assam, India.
30. Çaydaş, U., Haşçalık, A., Buytoz, Ö. and Meyveci, (2011). A performance evaluation of different twist drills in dry drilling of AISI 304 austenitic stainless steel. *Materials and Manufacturing Processes*, 26:8, 951-960.
31. Balaji, M., Murthy, B.S.N. and Rao, N.M., (2016). Optimization of cutting parameters in drilling of AISI 304 stainless steel using Taguchi and ANOVA. *Procedia Technology*, 25: 1106-1113.
32. Buytoz, Ö., (2010). *AISI 304 Paslanmaz Çeliğini Matkapla Delme İşleminde Kesme Parametrelerinin İncelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ, 84- 85.
33. Lin, T.R., (2002). Cutting behaviour using variable feed and variable speed when drilling stainless steel with TiN-coated carbide drills. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 19: 629-636.
34. Lin, T.R. and Shyu, R., (2000). Improvement of tool life and exit burr using variable feeds when drilling stainless steel with coated drills. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 16: 308-313.
35. Som, S., Aggarwal, S. K., El-Hannouny, E. M., and Longman, D. E., (2010, January 15). Investigation of nozzle flow and cavitation characteristics in a diesel injector. *ASME. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 132(4): 042802.
36. Schmidt, D. and Corradini, M., (2001). The internal flow of diesel fuel injector nozzles: A review. *International Journal of Engine Research*,. 2: 1-22.
37. Jung, D., Wang, W. and Hu, S., (2008). Microscopic geometry changes of a direct-injection diesel injector nozzle due to abrasive flow machining and a numerical investigation of its effects on engine performance and emissions. *Proceedings of The Institution of Mechanical Engineers Part A-journal of Power and Energy*, 222: 241-252.
38. Sun, Z.Y., Li, G. X., Chen, C., Yu, Y. S. and Gao, G. X., (2015). Numerical investigation on effects of nozzle's geometric parameters on the flow and the cavitation characteristics within injector's nozzle for a high-pressure common-rail DI diesel engine. *Energy Conversion and Management*, 89: 843-861.

39. Salvador, F. J., Jaramillo, D., Romero, J.-V. and Roselló, M.-D., (2017). Using a homogeneous equilibrium model for the study of the inner nozzle flow and cavitation pattern in convergent–divergent nozzles of diesel injectors. *Journal of Computational and Applied Mathematics*, 309: 630-641.
40. Payri, R., Viera, J. P., Gopalakrishnan, V. and Szymkowicz, P. G., (2016). The effect of nozzle geometry over internal flow and spray formation for three different fuels. *Fuel*, 183: 20-33.
41. Cui, J., Lai, H., Feng, K. and Ma, Y., (2018). Quantitative analysis of the minor deviations in nozzle internal geometry effect on the cavitating flow. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 94.
42. Jung, D., Wang, W.L., Knafl, A., Jacobs, T. J., Hu, S. J. and Assanis D. N., (2008). Experimental investigation of abrasive flow machining effects on injector nozzle geometries, engine performance, and emissions in a DI diesel engine. *International Journal of Automotive Technology*, 9: 9-15.
43. Iqbal, A., Suhaimi, H. and He N., (2019). A sustainability comparison between drilling and milling for hole-enlargement in machining of hardened steels. *Machining Science and Technology*, 23, 712-733.
44. Tönshoff, H.K., Spintig, W., König W., and A. Neises, (1994). Machining of holes developments in drilling technology. *CIRP Annals*, 43(2): 551-561.
45. Zhou, L., An, G., Li, W. and Dong H., (2019). Study of undeformed chip and cap geometries at three machining stages in the orbital drilling process. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 104, 2429–2445
46. Lazar, M.-B., (2012). *Cutting force modelling for drilling of fiber-reinforced composites*. Doktora Tezi, École Polytechnique Fédérale de Lausanne, Lausanne, İsviçre.
47. Kuruyer, M. Y., (2017). *Takım geometrisinin delme işlemlerindeki etkisinin deneysel olarak araştırılması ve deform yazılımı ile analizi*. Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makina Eğitimi Anabilim Dalı, Ankara, 116.
48. Kaynak, Y., (2006). *Matkap ile delik delme esnasında kesme parametrelerinin kesme kuvveti ve sıcaklığın değişimine etkisinin deneysel olarak incelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Marmara Üniversitesi Makine Eğitimi Anabilim Dalı, İstanbul.
49. Palmer, W.B. and P.L.B. Oxley, (1959). Mechanics of orthogonal machining. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*, 173(1), 623-654.
50. Çakır, A., (2015). *AA 7075 ve AA 2024 Alüminyum malzemelerine delik delinmesinde soğutma yöntemlerinin işleme performansına etkilerinin incelenmesi*. Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makina Eğitimi Anabilim Dalı, Ankara.

51. Regulation (EC) No 443/2009 of the European Parliament and of the Council of 23 April 2009 setting emission performance standards for new passenger cars as part of the Community's integrated approach to reduce CO₂ emissions from light-duty vehicles: Strasbourg. URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/ALL/?uri=celex%3A32009R0443>. Son Erişim Tarihi: 17.12.2021.
52. Meyer, I., Leimbach, M. and Jaeger, C.C., (2007). International passenger transport and climate change: A sector analysis in car demand and associated CO₂ emissions from 2000 to 2050. *Energy Policy*, 35(12), 6332-6345.
53. EU: Light - Duty: Emission. URL: <https://www.transportpolicy.net/standard/eu-light-duty-emissions/>. Son Erişim Tarihi: 19.12.2021.
54. Regulation and Competitiveness of the EU Automotive Industry. June 2015. URL: https://www.acea.auto/files/FTI_regulation-and-competitiveness_of_EU_automotive_industry.pdf. Son Erişim Tarihi: 19.12.2021.
55. Ragon, P.-L. and Rodriguez, F., (2021). *Estimated cost of diesel emissions control technology to meet future Euro VII standards*. URL: <https://theicct.org/sites/default/files/publications/tech-cost-euro-vii-210428.pdf>. Son Erişim Tarihi: 25.12.2021.
56. Viera, J. P., et al., (2016). Linking instantaneous rate of injection to X-ray needle lift measurements for a direct-acting piezoelectric injector. *Energy Conversion and Management*, 112: 350-358.
57. Pratama, R.H., Huang, W. and Moon, S., (2021). Unveiling needle lift dependence on near-nozzle spray dynamics of diesel injector. *Fuel*, 285: 119088.
58. Payri, F., et al., (2004). The influence of cavitation on the internal flow and the spray characteristics in diesel injection nozzles. *Fuel*, 83(4): 419-431.
59. Asi, O., (2006). Failure of a diesel engine injector nozzle by cavitation damage. *Engineering Failure Analysis*, 13: 1126-1133.
60. Payri, R., García, J. M., Salvador, F. J. and Gimeno, J., (2005) Using spray momentum flux measurements to understand the influence of diesel nozzle geometry on spray characteristics. *Fuel*, 84(5): 551-561.
61. Payri, F., Payri, R., Salvador, F.J. and Martínez-López, J. (2012). A contribution to the understanding of cavitation effects in diesel injector nozzles through a combined experimental and computational investigation. *Computers & Fluids*, 58: 88-101.
62. Salvador, F.J., Romero, J.-V., Roselló, M.-D. and Martínez-López, J., (2010). Validation of a code for modeling cavitation phenomena in diesel injector nozzles. *Mathematical and Computer Modelling*, 52(7): 1123-1132.
63. Küçüktürk, H., Yudar, H. H., Meral, G. ve Şeker, U., (2019) *Euro 7 nozul üretimi için takımlandırma tasarımı ve performans değerlendirmesi*, Uluslararası Talaşlı İmalat Sempozyumu. 2019: Antalya, Türkiye, 4.

64. Karthi, P., Prabukarthi, A., Krishnaraj, V., Santhosh, M., Senthilkumar, M. and Zitoune, R., (2013). Optimisation and tool life study in drilling of titanium (Ti-6Al-4V) alloy. *Int. J. of Machining and Machinability of Materials*,. 13: 138-157.
65. Pervaiz, S. and Samad, W. A., (2021). Drilling force characterization during Inconel 718 drilling: A comparative study between numerical and analytical approaches. *Materials*, 14.
66. Palanikumar, K. and Ambikapathy, M., (2014). Experimental investigation and analysis of thrust force in drilling cast hybrid metal matrix (Al-15%SiC-4%graphite) composites. *Measurement*, 53.
67. Reis, A., Silva, R. B., Silva, L. G., Machado, Á. R., Arencibia, R. V., Ruzzi, R. S., Jackson, M.J. and Zeilmann, R. P., (2020). Analyses of two manufacturing systems in drilling of CGI: drilling and reaming×drilling. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 106(7): 2861-2874.



GAZİ GELECEKTİR..