



**SÜRTÜNMELİ DELME OPERASYONLARINDA FARKLI TAKIM
GEOMETRİLERİNİN FİZİKSEL ETKİLERİNİN İNCELENMESİ**

Mustafa ER

**YÜKSEK LİSANS
İMALAT MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

NİSAN 2023

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.

Mustafa ER

13/04/2023

SÜRTÜNMELİ DELME OPERASYONLARINDA FARKLI TAKIM GEOMETRİSİNİN FİZİKSEL ETKİLERİNİN İNCELENMESİ

(Yüksek Lisans Tezi)

Mustafa ER

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Nisan 2023

ÖZET

Endüstride birçok mühendislik alanında boru profiller ile ince sac panellerin montajı çok yaygın olarak uygulanmaktadır. Cıvata ile bağlama yöntemi; ön operasyonların kolaylığı, kullanılan elemanların standart ve ucuz olmaları sebebiyle, çözülebilen bağlama tasarımlarında en çok tercih edilen yöntemdir. Ancak ince cidarlı malzemelerde montaj için yeterli somun boyutunun oluşturulamaması bağlama mukavemetini ve montaj işleminin verimini düşürmektedir. Sürtünmeli delme operasyonu ince cidarlı malzemelere etkili bir şekilde vida dişi açılmasına imkân sağlayarak üretim sürecine önemli bir katkı sunmaktadır. Bu durum, sürtünmeli delme işleminin en büyük avantajıdır. Sürtünmeli delme işleminde; takım geometrisi, takım malzemesi, iş parçasının kalınlığı, cinsi, devir sayısı ve ilerleme hızı gibi değişkenler operasyon çıktılarını etkilemektedir. Bu çalışmada; kovan yüksekliği ve biçimi, meydana gelen ilerleme kuvveti, döndürme momenti ve mikro yapıdaki değişimlerin üzerinde durulmuştur. Çalışmalar kapsamında elde edilen deneysel sonuçlar grafik olarak yorumlanmıştır. Bu tez çalışmasında, Al 6061-T6 alüminyum alaşımı üzerinde sürtünmeli delme yöntemiyle ideal kovan boyu oluşturmak için hâlihazırda kullanılan takım geometri ölçüleri değiştirilmiş ve en iyi sonucu veren geometri ölçüleriyle kesici takımın yeniden tasarlanması çalışılmıştır. Çalışmada Al 6061-T6 sac malzemenin üç farklı kalınlığı (1; 3 ve 5 mm) seçilmiş ve her biri üç farklı delik çapında (4; 6 ve 8 mm) delinmiştir. Böylece kullanılan takım, malzeme kalınlığı ve delik çapına göre ideal kovan oluşumu incelenmiştir. Artan takım çapı ile kovan yüksekliği de (h_1) artmıştır. Bu artış; 1 mm kalınlıktaki malzemelerde %106; 3 mm olanlarda %81,4 ve 5 mm olanlarda %63,3 oranında gerçekleşmiştir.

Bilim Kodu : 91438

Anahtar Kelimeler : Sürtünmeli delme, takım tasarımı, kovan geometrisi, Al 6061-T6 alüminyum alaşımı

Sayfa Adedi : 55

Danışman : Prof. Dr. Abdulkadir GÜLLÜ

INVESTIGATION OF THE PHYSICAL EFFECTS OF DIFFERENT TOOL
GEOMETRY IN FRICTION DRILLING OPERATIONS (M. Sc. Thesis)

Mustafa ER

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

April 2023

ABSTRACT

The assembly of tubular profiles and thin sheet panels is widely practiced in many engineering fields in the industry. The Bolt fastening method is the most preferred method in loose fastening designs because of the ease of pre-operations, standard, and cheapness of the elements used. However, the inability to create sufficient nut size for assembly in thin-walled materials reduces the binding strength and the efficiency of the assembly process. The friction drilling operation makes an important contribution to the production process by enabling the effective threading of thin-walled materials. This is the biggest advantage of friction drilling. In the friction drilling process; variables such as tool geometry, tool material, workpiece thickness, type, number of revolutions, and feed rate affect operation outputs. In this study; bushing height and shape, the resulting feed force, torque, and changes in microstructure are emphasized. The experimental results obtained within the scope of the studies were interpreted graphically. In this thesis, the currently used tool geometry dimensions were changed and the cutting tool was redesigned with the best geometry dimensions to create the ideal bushing size on Al 6061-T6 aluminum alloy by friction drilling method. In the research, three different thicknesses (1; 3, and 5 mm) of Al 6061-T6 sheet material were selected and each was drilled at three different hole diameters (4; 6, and 8 mm). Thus, the ideal bushing formation was investigated according to the tool used, material thickness, and hole diameter. The bushing height (h_1) was increased by 106% for 1 mm thick materials; 81.4% for 3 mm, and 63.3% for 5 mm sheets with increasing tool diameter.

Science Code : 91438

Key Words : Friction drilling, tool design, bushing geometry, Al 6061-T6 aluminum alloy

Page : 55

Supervisor : Prof. Dr. Abdulkadir GÜLLÜ

TEŞEKKÜR

Bu zorlu çalışma sürecinde engin tecrübesi ve bilgi birikimi ile her adımda bana rehberlik eden ve beni yönlendiren danışman hocam Prof. Dr. Abdulkadir GÜLLÜ' ye şükranlarımı sunarım.

Çalışmalarım sırasında emeği geçen ve katkı sunan Dr. Bahattin YILMAZ' a ve bir şekilde emeği geçen İmalat Mühendisliği Bölümü Öğretim Üyelerine de teşekkür ederim.

Ayrıca FYL-2021-7061 nolu proje ile araştırmamıza maddi destek sağlayan Gazi Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi Başkanlığına teşekkür ederim.

Son olarak, bu aşamaya kadar üzerimde paha biçilmez emekleri olan değerli annem ve babama; her konuda bana destek ve dayanak olan abim Onur'a sevgi ve şükranlarımı sunarım.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	ix
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	x
RESİMLERİN LİSTESİ	xii
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xiii
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	5
3. SÜRTÜNMELİ DELME	15
3.1. Sürtünmeli Delme.....	15
3.2. Sürtünmeli Delmenin Kullanıldığı Yerler, Avantajları ve Dezavantajları	16
3.3. Sürtünmeli Delme İşlemlerinde Kullanılan Takımlar.....	17
3.4. Sürtünmeli Delme Aşamaları	19
3.4.1. Başlangıç aşaması	19
3.4.2. Akma aşaması	20
3.4.3. Şekillendirme aşaması	21
3.5. Devir Sayısı ve İlerlemenin Önemi	22
4. MALZEME VE METOT.....	23
4.1. Kesici Takım ve Kesme Şartları.....	23
4.2. Takım Tasarımı.....	24
4.3. Malzeme.....	26

	Sayfa
4.4. Deneylerde Kullanılan Cihaz ve Tezgâhlar	28
4.5. Mekanik Testler	28
4.5.1. Kuvvet ölçümleri.....	29
4.5.2. Çekme testleri.....	30
4.5.3. Sertlik ölçüme testleri	31
5. DENEYSEL BULGULAR VE TARTIŞMA.....	33
5.1. İlerleme Kuvvetlerinin Değerlendirilmesi	33
5.2. Döndürme Momentlerinin Değerlendirilmesi	34
5.3. Mikrosertlik Ölçümünün Değerlendirilmesi.....	38
5.4. Çekme Verilerinin Değerlendirilmesi	42
5.5. Kovan Boyutu ve Geometrisinin Değerlendirilmesi	43
5. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	49
KAYNAKLAR	51
ÖZGEÇMİŞ	55

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 4.1. Takım malzemelerinin mekanik özellikleri	23
Çizelge 4.2. Geliştirilen takımın malzeme kalınlığına göre değişen ölçüleri	25
Çizelge 4.3. Al 6061 T6 malzemenin kimyasal analiz sonuçları (%).....	27
Çizelge 4.4. Al 6061-T6 malzemenin mekanik özellikleri	27
Çizelge 4.5. CNC tezgâha ait teknik özellikler	28
Çizelge 4.6. KISTLER 9272 dinamometre teknik özellikleri.....	29
Çizelge 4.7. Vickers sertlik deney bilgileri.....	32

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 3.1. Sürtünmeli delme takımının bölümleri	18
Şekil 3.2. Sürtünmeli delme işlemi başlangıç aşaması ve kuvvet oluşumu.....	20
Şekil 3.3. Sürtünmeli delme işlemi akma aşaması ve kuvvet oluşumu	21
Şekil 3.4. Sürtünmeli delme işlemi şekillendirme aşaması ve kuvvet oluşumu	21
Şekil 3.5. Sürtünmeli delme işleminde devir sayısının delik çapına bağlı olarak değişimi.....	22
Şekil 4.1. Geliştirilen ve sürtünmeli delme yönteminde kullanılan takım geometrisi.....	25
Şekil 4.2. Tasarlanan ve yapılan bağlama kalıbının teknik resmi.....	26
Şekil 4.3. Deliklerin deney numunesi üzerindeki yerleşimi	27
Şekil 4.4. Genel deney düzeneği.....	28
Şekil 4.5. KISTLER 9272 tipi dinamometre	29
Şekil 5.1. İlerleme kuvvetlerinin değişimi	33
Şekil 5.2. Döndürme momentlerinin değişimi	35
Şekil 5.3. İş parçası üzerindeki mikrosertlik ölçümleri	38
Şekil 5.4. Takım çapı 4 mm ile yapılan deneylerdeki mikrosertlik değerleri.....	39
Şekil 5.5. Takım çapı 6 mm ile yapılan deneylerdeki mikrosertlik değerleri.....	39
Şekil 5.6. Takım çapı 8 mm ile yapılan deneylerdeki mikrosertlik değerleri.....	40
Şekil 5.7. a) Delik çevresi SEM görüntüsü b) Delik çevresinden uzaktaki SEM görüntüsü	41
Şekil 5.8. Takım çapı 4, 6 ve 8 mm ile iş parçası kalınlığı 1, 3 ve 5 mm olan çekme değerleri.....	42
Şekil 5.9. Sürtünmeli delme ile oluşan pul, kovan ve çeper kalınlığı.....	44
Şekil 5.10. Kovan yüksekliği (h1) değişimi.....	44
Şekil 5.11. Pul yüksekliği (h2) değişimi.....	45

Şekil**Sayfa**

Şekil 5.12. Kovan çeper kalınlığı (a) değişimi	46
--	----

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 3.1. Kare profile sürtünmeli delme uygulaması	16
Resim 4.1. Üniversal çekme-basma test cihazı	30
Resim 4.2. Mikrosertlik ölçüm cihazı	31
Resim 5.1. T5D8 Takım SEM Görselleri ve EDS Analizleri (A); İşlem Yapılmış (B); İşlem Yapılmamış Takımlar.....	37
Resim 5.2. Kovan, pul ve takım görselleri.....	48

SİMGELER VE KISALTMALAR

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

Simgeler

Açıklamalar

α	Konik Kısım Uç Açısı
Al	Alüminyum
β	Uç Açısı
cm ³	Santimetre Küp
°C	Derece Santigrat
D	Çap
Dak	Dakika
Dev	Devir
g	gram
m	Metre
mm	Milimetre
MPa	Mega Pascal
N	Newton
t	Kalınlık

Kısaltmalar

Açıklamalar

ARGE	Araştırma Geliştirme
BUE	Built Up Edge (Yığıntı Talaş)
CNC	Bilgisayarlı Sayısal Kontrol
FCAR	Sürtünme Temas Alanı Oranı
FEM	Finite Element Method
GRA	Gri ilişkiler Analizi
HSS	High Speed Steel (Yüksek Hız Çeliği)
MQL	Minimum Miktarda Yağlama
SEM	Tarama Elektron Mikroskobu
WC	Tungsten Karbür

1. GİRİŞ

Bir ürünün ortaya konulması süreci, ürünü oluşturan parçaların imalat prosesleri ile bu parçaların montaj işlemleri aşamasından oluşmaktadır [1]. Yüksek verimlilikte bir ürünün ortaya konulması; bu iki aşamanın düşük maliyetlerde ve yüksek kalitede gerçekleştirilmesi ile mümkündür. İmalat süreçlerinin düşük enerji maliyetleri ve takım sarfiyatı ile gerçekleştirilmesi verimlilik açısından büyük önem taşımaktadır. Yine imalat sürecinde ürünlerin uygun tolerans aralıklarında üretilmesi hem ürün kalitesinin yüksek olmasına hem de montaj aşamasının daha kolay gerçekleşmesine yardımcı olur. Başarılı bir imalat prosesi için hızlı ve kolay bir montaj süreci gereklidir.

Montaj işlemi; mekanik birleştirme, kaynaklı birleştirme ve yapıştırma ile birleştirme olmak üzere üç farklı yöntem ile gerçekleştirilmektedir [2]. Bu yöntemlerden en çok tercih edileni mekanik birleştirme işlemidir. Bu işlemde standart makine elemanları kullanılmaktadır. Montaj işlemlerinin en önemli unsuru doğru makine elemanlarının kullanılması ile mümkündür [3]. Montaj hatlarında vida, perçin, pim vb. makine elemanları sıklıkla kullanılmaktadır. Bu parçaların etkili kullanımı ise yüksek doğrulukta deliklerin delinmesi ile mümkündür. Bu durum delik delme işleminin de çok yaygın kullanılmasına neden olmuştur. Tüm talaşlı imalat operasyonları içerisinde matkap ile delik delme işlemi %40 'lık bir bölümü oluşturur [2]. Talaşlı imalat kapsamında helisel matkaplarla delik açma uygulamasının yanı sıra delik büyütme, raybalama, kılavuz çekme vb. ikincil delik operasyonları da sıklıkla kullanılmaktadır [4]. Talaşlı imalat operasyonlarına ek olarak özellikle ince cidarlı parçalarda kesme kalıpları kullanılarak ve lazer kesme yapılarak da delik açma işlemleri gerçekleştirilmektedir. Matkap ile delme işleminde talaşın takım ve iş parçasına temas ederek tahliyesi ve sürtünmeler delik yüzeyini ve delik boyutlarını bozmaktadır. Ayrıca delme sırasında oluşan termal ve mekanik yükler parça üzerinde gerilmelerin oluşmasına neden olmaktadır [3]. Ek olarak klasik delik delme yöntemleri ile ince cidarlı malzemelerde vidalı bağlantılar için yeterli dış uzunlukları elde edilmesi amacıyla ikincil işlemler gereklidir. Bu gibi olumsuz durumlar delik delme işlemine alternatif yöntemler geliştirilmesini gerekli kılmıştır.

Otomotiv endüstrisi, uzay ve havacılık sanayi gibi günümüz teknolojisinin gelişiminde büyük paya sahip endüstrilerin birçoğunda ürünlerin hacim olarak küçültülmesi ve ağırlık

olarak hafifletilmesi önemli AR-GE çalışmalarının başında gelmektedir. Gelişen malzeme teknolojisi düşük et kalınlıklarında yüksek dayanımlara sahip malzeme üretimine imkân sağlamıştır. Bu durum, daha hafif ürünlerin elde edilmesine büyük katkı sunmuştur. İnce cidarlı malzemeler otomotiv, tesisat, çelik konstrüksiyon, medikal, uzay ve havacılık gibi bir çok alanda yaygın olarak kullanılmaktadır [5]. Bu malzemeler parça işlevine göre kaynaklı, vidalı, pimli ya da perçinli olarak montaj edilmektedir. Vidalı bağlantının kullanılması için ince cidarlı malzemeye vida dişi açılması gerekmektedir. Ancak parça kalınlığının az olması vida için gerekli diş boyu yüksekliğinin oluşmamasına neden olmakta ve böylece montaj işlemi gerçekleştirilememektedir. Özellikle vida adımı yüksek olan cıvatalarda parça kalınlığı tek bir vida dişinin oluşmasına dahi izin vermemektedir. Bu sorunun çözümü için delik çıkışına somun kaynatılması işlemi gerçekleştirilmektedir [5]. Bu ek operasyon işlem sürelerini ve maliyetlerini artırmaktadır. Ayrıca delik ve somun arasında eş merkezlilik sorunları oluşabilmektedir. Kaynak işlemi sonucunda iş parçası mekanik yapısında ısınma ve soğumaya bağlı olarak değişimler olabilmektedir. Somun kaynatılması ürün ağırlıkları açısından da dezavantaj oluşturmaktadır [6].

Bahsedilen bu problemler delme operasyonuna farklı bir bakış açısı geliştirilmesine neden olmuştur. Geliştirilen bu yeni delme işleminde geleneksel delme yönteminde talaş olarak atılan malzemenin bir kovan olarak delik çıkışına birikmesi/yığılması hedeflenmiştir. Bu yeni delme stratejisi sürtünmeli delme operasyonu olarak tanımlanmıştır [7, 8]. Bu işlemde; konik bir takım, dönme hareketi yaparak iş parçasına temas eder. Temas sonucunda oluşan sürtünme ve bu sürtünmeye bağlı açığa çıkan yüksek ısı nedeniyle malzeme dayanımı düşer. Bu durum iş parçasının şekillendirilmesini kolaylaştırır. Takımın ilerleme hareketi sayesinde, malzemede plastik deformasyon oluşur ve delme işlemi gerçekleştirilir. Delme işlemi sırasında fazla malzeme delik çıkışına birikerek/yığılarak kovan oluşturur. Bu aşamada talaş oluşumu görülmemektedir. Geleneksel yöntemlerde talaş olarak atılan malzeme bu yöntemde delik çıkışında kovan olarak birikir. Kovan yüksekliği malzeme kalınlığının birkaç katına çıkabilmekte ve vida dişi açılması için gerekli yüksekliği sağlamaktadır [9].

Delik ve kovanın aynı takımla ve eş zamanlı olarak oluşturulması eş merkezliliği sağlar. Bu işlem, delik başlangıç veya çıkışına somun kaynatılması gibi ek işlem maliyetlerinin önüne geçer. Doğru takımlar, doğru operasyon parametreleri ile kullanıldığı takdirde delme ve diş açma işlemleri gerçekleştirilebilir. Sürtünmeli delme yöntemi, geleneksel delme

yöntemlerine göre önemli bir zaman tasarrufu sağlamaktadır. Sürtünmeli delme; termal delme, akış delme ve form delme gibi farklı isimler ile de anılmaktadır [10].

Endüstride birçok mühendislik uygulamalarında boru profiller ile ince et kalınlığına sahip sac panellerin montajı çok yaygın olarak uygulanmaktadır. Sac malzemelerin montaj operasyonları otomotiv, uzay ve havacılık endüstrilerinde sıkça kullanılmaktadır. Yine bu endüstri dallarında alüminyum alaşımları hafiflikleri ve korozyon dayanımları nedeni ile tercih edilen malzemelerin başında gelmektedir. Uçakların kanat ve gövde bölümlerinin üretiminde üstün işlenebilirlik performansı ve korozyon dayanımı nedeni ile alüminyum 6061 alaşımı tercih edilmektedir. Bu alaşım otomotiv endüstrisinde şasi imalatında ve diğer yapısal parçalarda da sıklıkla kullanılmaktadır. Bu alaşımın otomotiv, uzay ve havacılık alanlarında tercih edilmesi söz konusu malzemenin montajına ilişkin çalışmaları anlamlı kılmıştır.

Cıvata ile bağlama yöntemi ön operasyonların kolaylığı (delme, vida açma), kullanılan elemanların (cıvata, somun) standart ve ucuz olmaları sebebiyle, çözülebilen bağlama tasarımlarında en çok tercih edilen bağlama yöntemidir. Ancak ince cidarlı malzemelerde montaj için yeterli somun boyutunun oluşturulamaması bağlama mukavemetini ve montaj işleminin verimini düşürmektedir.

Yukarıda sayılan bazı sebepler göz önüne alındığında sürtünmeli delme yönteminin endüstrideki karşılığı ve gerekliliği daha net olarak ortaya çıkmaktadır. Bu alanda yapılacak iyileştirmeler ve yeni araştırmalar bu yöntemin daha da yaygın kullanılmasına yol açacaktır. Yapılan bu çalışma ile zikredilen bu hususun endüstrideki karşılığına katkı sağlamak düşünülmüştür.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Sürtünmeli delme işlemi çalışmalarında, takım geometrisi, takım malzemesi, iş parçasının kalınlığı, cinsi, devir sayısı ve ilerleme hızı gibi değişkenlerin operasyon çıktılarına etkileri incelenmiştir. Çalışmalar değerlendirildiğinde araştırmacılar, kovan yüksekliği ve biçimi, yüzey pürüzlülüğü, delme sırasında meydana gelen itme kuvveti, dönme momenti, mikroyapıdaki değişimler ve meydana gelen sıcaklık gibi konuların üzerinde durmuştur. Çalışmalar kapsamında elde edilen deneysel sonuçlar, sonlu elemanlar yöntemi ile elde edilen sonuçlar ve geliştirilen matematiksel modellerin yorumlanması ve karşılaştırılması yapılmıştır. Birçok çalışmada verilerin değerlendirilmesinde istatistiki analizler, bulanık mantık vb. yöntemler kullanılmıştır. Konumuzu kapsayan değerli çalışmalardan birkaçı bu bölümde sunulmuştur.

Özek ve Demir çalışmasında A7075-T651 alaşımının sürtünmeli delme işleminde malzeme kalınlığına ve delik çapına bağlı olarak kovan yüksekliğini araştırmıştır. Malzeme kalınlıkları 2, 4, 6, 8, 10 mm olan iş parçası ve takım koniklik açısı 24° , 36° ve 48° olan takımlar kullanılmıştır. Devir sayıları 2400, 3600, 4800 rev/min ve ilerleme hızı 50, 75 ve 100 mm/dak olarak belirlenmiştir. Deneylerde yüksek hız çeliği (HSS) takım kullanılarak malzeme üzerinde 8, 10 mm çaplarında delikler açılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre kovan boyunun, takım koniklik açısı ve dönme hızı ile ters orantılı olduğu bildirilmiştir. Kovan boyunun iş parçası kalınlığının, delik çapının ve ilerleme hızının artması ile yükseldiği görülmüştür [11].

Özek ve Bak çalışmasında, malzeme kalınlığı ve takım çapının, kovan yüksekliği, kovan dış çapı ve kovan biçimleri üzerindeki etkileri araştırılmış ve mikro sertlikte meydana gelen değişiklikler incelenmiştir. Deneysel çalışmalar sırasında, koniklik açısı 36° , çapları 5, 10, 15, 20 mm olan tungsten karbür (WC) takımlar kullanılmıştır. İş parçası malzemesi olarak, kalınlıkları 2, 4, 6, 8 ve 10 mm ile değişen, St37 çeliği seçilmiştir. Deney çalışmaları sabit devir sayısı (1120 dev/dak) ve ilerleme hızı (25 mm/dak) kullanılarak yapılmıştır. Deneyler sonucunda, malzeme kalınlığı ve takım çapı arttıkça kovan çeper kalınlığının ve kovan yüksekliğinin arttığı görülmüştür. Delik merkezinden çevreye doğru uzaklaştıkça mikro sertliğin azaldığı tespit edilmiştir [12].

Özler çalışmasında, AISI 1010 kare kesitli malzemeyi sürtünmeli delme yöntemi ile delmiş, deliklerin yüzey pürüzlülükleri ve kovan yüksekliklerini ölçmüştür. Performans çıktıları arasındaki ilişki, Gri İlişkisel Analiz Yöntemi (GRA) kullanarak incelemiştir. Deneysel değişkenler üçer farklı kesme hızı (50, 75 ve 100 m/min), ilerleme hızı (75, 150 ve 225 mm/min) ve takım koniklik açısı (30°, 45° ve 60°) olarak belirlenmiştir. Deneylerde sinterlenmiş karbür takımlar kullanılmıştır. Çalışmanın sonucuna göre kesme ve ilerleme hızı arttıkça yüzey pürüzlülüğü azalmıştır. Takım koniklik açısındaki artış yüzey pürüzlülüğünü arttırarak kovan yüksekliğini azaltmıştır. Gri ilişkisel analiz yöntemine göre optimum işlem parametreleri; 100 m/dak kesme hızı, 225 mm/dak ilerleme ve 30° koniklik açısı olarak elde edilmiştir [8].

Özler diğer bir çalışmasında, AISI 1010 kare kesitli malzemeyi sürtünmeli delme yöntemi ile sabit ilerleme hızı ve artışı ilerleme hızı ile delme işlemi yapmıştır. Delme işlemi sonucunda sıcaklık, kuvvet, yüzey pürüzlülüğü ve kovan yüksekliği gibi çıktıları incelemiştir. Delme işleminde, 10 mm çapında 30° koniklik açısına sahip karbür takım kullanılmıştır. Delme parametreleri ise; sabit ilerleme hızları 50, 100, 150 mm/min, artışı ilerleme hızları 50-100, 50-150, 50-200 mm/min ve kesme hızları 3000, 4000, 5000 rev/min olarak belirlemişlerdir. Deney sonucunda, artışı ilerleme hızlarıyla sabit ilerleme hızı olan 50 mm/min ilerleme hızındaki sıcaklık yaklaşık aynı gözlenmiştir. İlerleme hızındaki kademeli artış eksenel kuvveti kademeli olarak arttırdığı görülmüştür. Değişken ilerleme hızında anlık sıcaklığın artması sonucunda daha pürüzsüz yüzey elde edilmiştir. Kovan yükseklikleri sabit ilerleme hızına kıyasen artışı gözlenmiştir [13].

Doğru çalışmasında, yüzey pürüzlülüğü, kovan ve pul biçimi etkisini araştırmıştır. Çalışmada 1,5 mm kalınlığındaki AISI 1010 içi boş kare profil saclar, koniklik açısı 30°, 45° ve 60° ve çapı 6, 8, 10 mm, olan tungsten karbür (WC) takımlarla, 75, 150, 225 mm/dak ilerleme ve 50, 75, 100 ve 125 m/dak kesme hızlarında sürtünmeli delme işlemine tabi tutulmuştur. Araştırma sonunda kesme hızının artışı ile yüzey pürüzlülüğü ve kovan yüzeyindeki yırtılmaların azaldığı bildirilmiştir. Artan ilerleme hızı ile yüzey pürüzlülüğünün ve pul kenarlarında meydana gelen yırtıkların arttığı ifade edilmiştir. Koniklik açısının artması ile yüzey pürüzlülüğünün, pul ve kovan yüzeyindeki yırtıkların arttığı tespit edilmiştir [14].

Bilgin, Gök ve Gök yapmış olduğu çalışmada, AISI 1020 (kalınlık 2.7 mm) malzemesini sürtünmeli delinmesini sayısal ve deneysel olarak incelemişlerdir. Deneysel ve sayısal

analizlerden elde edilen sıcaklık, tork ve eksenel kuvvet sonuçlarını karşılaştırmışlardır. Kesici takım olarak çapı 5,4 mm (M6) olan tungsten karbür sürtünmeli delme matkabı kullanılmıştır. Deney parametreleri olarak kesme hızı 2400-4800 rev/min ilerleme hızı 150 mm/min seçilmiştir. Sayısal olarak Sonlu elemanlar metoduna (FEM), dayanan deform-3D yazılımını kullanmışlardır. Kesme hızının artmasıyla, moment ve eksenel kuvvet değerleri azalırken, iş parçasının merkezinde sıcaklık değerlerinin arttığı belirlenmiştir [15].

Pantawane ve Ahuja çalışmalarında, AISI 1015 çelik malzemeyi sürtünmeli delme yöntemi ile delmişlerdir. Bu yöntemde yaygın olarak kullanılan parametreler ile delik kalitesi üzerindeki değişimleri bulmak için bir matematiksel model geliştirilmişlerdir. Devir sayısı 2500 dev/dak' dan 4500 rev/min' ne yükseltilmiş ve yüzey pürüzlüğünün düştüğü, ilerleme hızının 71.36 mm/min' den 198.64 mm/min' e yükseltildiğinde ise yüzey pürüzlüğünün arttığı görülmüştür [16].

Oezkaya, Hannich ve Biermann çalışmasında, sürtünmeli delme takımının performansını deneysel çalışmalar ve sonlu elemanlar yöntemi (FEM) ile incelemişlerdir. Deneylerde ön ısıtma ve ısıtılmamış takım arasında da bir kıyaslama yapılmıştır. Araştırma kapsamında sıcaklık, kuvvet ve tork değerleri ölçülmüştür. Materyal olarak AlSi10Mg alaşımı (kalınlık 2.5 mm) ve karbür takım (çap 5.4mm) kullanılmıştır. Yapılan çalışmalar sonucunda sonlu elemanlar metodu ve deneysel çalışma çıktılarının birbirine yakın olduğu görülmüştür. Sonlu elemanlar analizi ile işlem süresini azaltarak sonuca daha hızlı ve kabul edilebilir olduğunu göstermişlerdir. Isıtılmış takım ile yapılmış deneylerde yüksek iç çap kalitesi elde edilmiştir [17].

Dehghan, İsmail ve diğerleri çalışmasında, işlenmesi zor olan titanyum alaşımı Ti-6Al-4V (3 mm) malzemeyi sürtünmeli delme yöntemiyle incelemişlerdir. Deney parametreleri kesme hızı 1500, 3500, 5500 dev/dak ve ilerleme hızı 65, 105, 145 mm/dak olarak belirlenmiştir. Kesici takım, 8 mm çapında tungsten karbür kullanılmıştır. Deney sonucunda Ti-6Al-4V malzemesinin, sürtünmeli delme işlemini gerçekleştirmede zor olduğu görülmüştür. Ti-6Al-4V'nin düşük termal özellikleri sonucunda uygun olmayan kovan biçimi meydana geldiği görülmüştür. Düşük kesme hızı ve ilerleme hızı altında daha iyi bir kovan şekli ve yüksekliği elde edileceği gözlemlenmiştir. Yüksek kesme hızı ve ilerleme hızında takım konik bölgesinde aşınmalar meydana geldiği belirlenmiştir [18].

Dehghan, İsmail ve diğerleri çalışmasında, AISI304, Ti-6Al-4V ve Inconel718'in (3 mm) Tungsten karbür takım (8 mm) ile sürtünmeli delme için iş parçalarının mikro yapısal değişiklikleri ve takım aşınması karakterize edilmiştir. Deneysel sonuçlar, Inconel718 ve AISI304'ün kovan şekli, delik duvarının yüzey kalitesi ve kovan yırtıklarının oluşumunun Ti-6Al-4V'den önemli ölçüde daha iyi olduğunu göstermektedir. Ti-6Al-4V'nin düşük ısı iletkenliği ve Inconel718'in yüksek kesme mukavemeti, ürün kalitesi ve takım aşınması üzerindeki ana etkilere sahiptir. Aşınmanın en çok takım konik bölgesinde gözlenmiştir [19].

Krishna, Kishore ve Satyanarayana çalışmasında, sürtünmeli delme işlemi yaparak kuvvet ve tork ölçmüş ve yapılan deneyler sonucunda bir regresyon denklemi türetilmiştir. Malzeme olarak 1 mm kalınlığında alüminyum alaşımı AA6351 ve takım olarak ise yüksek hız çeliği (HSS) kullanılmıştır. Deney parametreleri kesme devri 2000, 3000 rev/min, ilerleme oranı 0,1 ve 0,3 mm/rev ve takım koniklik açısı ise 45°, 90° olarak belirlenmiştir. Deneysel sonuçlara göre takım koniklik açısının kritik bir parametre olduğu ve hem tork hem de kuvveti etkilediği sonucuna varılmıştır. AA6351 alüminyum alaşımı için düşük ve orta hızda sürtünmeli delme işleminde, oldukça yüksek bir yüzey kalitesi elde edilmiş, yüksek hızlarda sıcaklığa bağlı renk değişimleri gözlenmiştir [20].

Gemalmayan ve Tunalıoğlu tarafından yapılan çalışmada, St37-2, CM22NBK ve S460MC malzemelerin sürtünmeli delme ile delinmesinde ortaya çıkan sonuçlar değerlendirilmiştir. Araştırmacılar, delme işleminden sonra test numunelerine diş açmışlar ve numunelere çatlak testi yapmışlardır. Ardından numunelerin sertlikleri incelenmiş ve tüm test numuneleri çekme testi yapılarak mukavemet değerleri açısından değerlendirilmiştir. Yapılan deneylerde, sürtünmeli delik delme işlemi sonrası malzemelerin hiçbir şekilde çatlamaya uğramadığı tespit edilmiştir. Delme sonucu ortaya çıkan sürtünme ve oluşan ısı etkisiyle malzemelerin sertlik değerlerinin, arttığı anlaşılmıştır. Bu durum; sürtünmeli delme ve soğuk şekillendirme yoluyla diş açma operasyonlarının sonucunda, malzemelerde mukavemet artışının olduğunu göstermiştir. Ayrıca ortaya çıkan kopma kuvvetlerinin, malzemelerin kullanım yerine göre kabul edilebilir değerlerde olduğu tespit edilmiştir [21].

Bilgin çalışmasında, sabit devir ve ilerleme hızında minimum miktarda yağlama (MQL) kullanılarak AZ31B magnezyum alaşımı üzerine sürtünmeli delme yöntemi ile delik delme işlemi yapmıştır. Deneylerde MQL uygulama sürelerinin aksenal kuvvet, sıcaklık, yüzey pürüzlülüğü, kovan yapısı ve vida sıyırma dayanımı üzerindeki etkileri araştırılmıştır.

Deneylerde 5 mm kalınlığında AZ31B magnezyum alaşımı ve 10 mm kalınlığında yüksek hız çeliğinden imal edilmiş takım kullanılmıştır. Sürtünmeli delme işlemleri 1850 dev/dak sabit devir ve 20 mm/dak sabit ilerleme hızında; kuru, sürekli MQL ve değişik zaman aralıkları ile MQL yağlama uygulanarak gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışmaların sonucunda sürtünmeli delme işleminin gerçekleşmesi esnasında eksenel kuvvet oluşumunun 7 farklı bölgede, sıcaklık oluşumunun 2 farklı bölgede olduğu görülmüştür. MQL işleminin soğutma ve yağlama ile sürtünmeyi azaltma etkisinden dolayı işlem sıcaklığı düşerken eksenel kuvvet değerlerinde artış meydana gelmektedir. Delik yüzey kalitesinin vida sıyırma dayanımı üzerinde bir etkisinin olmadığı, kovan profilinin ve kovan uzunluğunun kombinasyonu belirleyici olduğu görülmüştür. En düşük vida sıyırma dayanımı kuru işleme şartları altında gerçekleşirken en yüksek vida sıyırma dayanımı 10 saniye MQL uygulamasının yapıldığı deneylerde elde edilmiştir [22].

Demir, Adıyaman ve Yakut çalışmalarında, A7075-T651 alüminyum alaşımını ön delik delerek sürtünmeli delme yöntemini uygulamışlardır. Çalışmalarında yüzey pürüzlülüğü kovan boyu ve çeper kalınlığını araştırmışlardır. Deneyler çapları 8 ve 10 mm olan yüksek hız çeliği (HSS) takımlar kullanılmıştır. Takım koniklik açısı 36° kesme hızı 3000 rev/min ve ilerleme hızı 60 mm/min olarak belirlemişlerdir. Çalışmanın sonucunda ön delik delinerek delme işlem yapılan numunelerde yüzey pürüzlülüğünün azaldığı, kovan çeper kalınlığı ve boyunun arttığı gözlenmiştir [23].

El-Bohloul yaptığı çalışmasından, A380 (5 mm) alüminyum alaşımının alt ve üst yüzüne üç farklı malzeme ile sandviç gibi hazırlayıp sürtünmeli delme işlemi gerçekleştirilmiştir. Bu malzemeler 1 mm kalınlığındaki 316 paslanmaz çeliği, Al6060 alüminyum alaşımı ve kırmızı bakır alaşımıdır. Deneysel çalışmada eksenel kuvvet ve daha iyi kovan kalitesi ve boyu elde edilmesi amaçlanmıştır. Araştırma sonucunda eksenel kuvvetin azaldığı ve düşük güç tüketimi sayesinde daha az işleme maliyeti ortaya çıktığı görülmüştür. Üç malzeme arasında en iyi sonucu kırmızı bakır alaşımı verdiği görülmüştür [24].

Demir çalışmasında, A7075-T651 ve St 37 alaşımlarının sürtünmeli delinmesinde kovani oluşturan malzeme hacmini araştırmışlardır. Malzeme kalınlığı 4 mm olarak belirlenmiştir. Alüminyum alaşımını 8 mm çapındaki HSS takım ile St 37 alaşımını 10 mm çapındaki karbür takım kullanarak delme işlemi yapmışlardır. Takım koniklik açısı 36° derece olarak belirlenmiştir. Deney parametreleri olarak dönme devirleri 800, 1200, 1600, 2000, 2400,

2800, 3200, 3600, 4000 ve 4400 d/d, ilerleme, 20, 40, 60, 80 ve 100 mm/dak olarak seçmişlerdir. Deney sonuçlarına göre A7075-T651 alaşımına göre daha sünek olan st37 alaşımının kovan biçimi amaca uygun olduğu görülmüştür. St37 alaşımının delinmesinde yüksek sıcaklıklara ihtiyaç duyulduğundan artan dönme devirlerinde kovan biçiminde bozulmalar meydana gelmemiştir. A7075-T651 alaşımının ergime sıcaklığı düşün olduğundan yüksek dönme devri kovan biçiminde bozulmalara neden olduğu görünmüştür [25].

Özler ve Doğru çalışmasında, AISI 1010 çelik malzemeyi sürtünmeli delme yaparak delik geometrisini deneysel olarak incelemişlerdir. Araştırmasında; sıcaklık, kuvvet, kovan yüksekliğini araştırmışlardır. Deneylerde 2 mm kalınlığında AISI 1010 iş parçası ve çapı 6,8,10 mm olan karbür takım kullanmışlardır. Takım koniklik açıları 30° , 45° , 60° takım kesme hızları 50,75,100,125 m/dak ve ilerleme hız 50,150,225 mm/dak olarak belirlenmiştir. Deneyler delme hızının artışıyla sıcaklığın arttığı ve kuvvetin azaldığı görünmüştür. Yüksek ilerleme hızında takım ile iş parçasını arasında temas süresi azaldığından düşük delme sıcaklıkları elde edildiği gözlenmiştir. Ancak kovan geometrisinde çatlakların oluştuğu görünmüştür. Koniklik açısının artışı sıcaklık üzerinde etkisi az iken ilerleme ve eksenel kuvveti etkilemiştir. Delme hızı arttıkça kovan yüksekliğinin arttığı görünmüştür. İlerleme hızı düşük olduğunda kovan üzerinde yırtılmalar meydana geleceğini söylemişlerdir [26].

Özek ve Demir de çalışmalarında, St37 sac malzemeyi tungsten karbür takım ile sürtünmeli delme yöntemiyle delerek; yüzey pürüzlülüğü, kovan yüksekliği, kovan biçimi ve kovan çeper kalınlığı gibi kriterlere göre en uygun dönme hızı ve ilerleme oranı parametrelerini araştırmışlardır. Malzeme kalınlığının delik çapına (t/d) oranının artmasıyla, kovan oluşumunu sağlayan malzeme miktarı arttığından bu oranın proses sonucu oluşan kovan biçimi ve kovan yüksekliği açısından önemli bir parametre olduğu belirtilmiştir. Ayrıca, ilerleme miktarı ve dönme hızının artırılmasının kovan oluşumunda deformasyonu artırdığı ve akan malzemenin radyal doğrultuda deliğin çevresine yayılmasından dolayı kovan yüksekliğinin azaldığı, kovan çeper kalınlığının arttığı gözlemlenmiştir [27].

Miller ve diğerleri, ince cidarlı malzemelerde sürtünmeli delme işleminin avantajlarını incelemişlerdir. Çalışmalarında 1,5 mm et kalınlığında AISI 1015 karbon çeliği kullanarak sürtünmeli delme prosesini ve takım aşınmasını araştırmışlardır. Çalışmada her deliğin açılması ortalama 2 ila 3 saniye sürmüş ve delme işlemleri arasında takımın soğuması

amacıyla 10 saniye bekleme yapılmıştır. Çalışma boyunca, itme kuvveti, tork, takım ağırlığı incelenmiş ve toplamda 11.000 delik açılmış ve takımın hala problemsiz görevini yaptığı görülmüştür [28].

Kaya ve diğerleri, St12 sac malzemenin sürtünmeli delme işleminde; takım sürtünme açısı, sürtünme temas alanı oranı (FCAR), ilerleme hızı ve devir sayısı gibi işlem parametrelerinin; malzemenin yüzey sıcaklığına, itme kuvvetine ve tork değerine etkilerini araştırmıştır. Çalışma sonuçlarına göre; sürtünme açısı, ilerleme oranı ve FCAR değerlerinin artmasıyla, itme kuvveti ve tork değerlerinin dereceli olarak arttığı, diğer yandan da artan delme hızı değeri ile itme kuvveti ve moment değerlerinin azaldığı görülmüştür. İş parçasının yüzey sıcaklığının, delme hızının artmasıyla doğru orantıda arttığı görülmüştür. Sürtünme açısının ve FCAR'ın iş parçası yüzey sıcaklığı üzerinde etkisinin olmadığı tespit edilmiştir [29].

Lee ve arkadaşları, 2 mm kalınlığındaki AISI 304 sac malzemesini kaplamasız, TiAlN ve AlCrN kaplamalı olarak üç farklı sürtünmeli delme takımı ile farklı devirlerde delmişlerdir. Yapılan bu çalışmada; eksenel kuvvetler, takım yüzey sıcaklığı ve takım aşınması incelenmiştir. Deneyler sonucunda takım yüzey sıcaklıklarının, devir sayısının artması ile doğru orantılı olarak arttığı gözlemlenmiştir. AlCrN kaplamalı matkapta en yüksek yüzey sıcaklığı ölçülmüştür. AISI 304 paslanmaz çelik malzemenin delinme sırasında takıma yapışmasıyla, takım yüzey pürüzlülüğünü arttırdığı belirlenmiş, bunun da sonraki delmelerde takım sürtünme katsayısını arttırdığı görülmüştür. Sabit devirde ve aynı sayıda delme yapmış takımlar ile, kaplanmış takımların, kaplanmamış takıma göre, daha az aşındığı ve AlCrN kaplamalı takımda en az takım aşınmasının olduğu gözlemlenmiştir. TiAlN ve AlCrN kaplamalı takımlar, eksenel itme kuvvetinde ve takım yüzey sıcaklığında daha az değişime neden olurken, AlCrN kaplamalı takımın en az değişiklik gösterdiği gözlemlenmiştir [30].

Lee ve diğerleri, savunma sanayi, otomotiv, nükleer ve diğer mühendislik alanlarında sıklıkla kullanılan nikel bazlı süper alaşım olan IN-713LC malzemesini sürtünmeli delme yöntemi ile delerek incelemişlerdir. Farklı devir ve ilerleme hızı altında deneyleri gerçekleştirmişlerdir. Çalışmalarında, sertlik, yuvarlaklık toleransı ve yüzey pürüzlülüğünü incelemişlerdir. Sertlik değeri delik duvarının yakınında fazla olduğu, delik kenarından uzaklaştıkça azaldığı gözlemlenmiştir. Yüzey pürüzlülüğü ve yuvarlaklık toleransı yüksek devir ve ilerlemede daha iyi olduğu tespit edilmiştir [31].

Miller ve arkadaşları, otomotiv sanayinde sıklıkla kullanılan dökme metaller üzerinde sürtünmeli delme işlemi yapmışlardır. Dökme metallerde kovan bozukluğuna sebep olan çatlakları incelemişlerdir. Çalışmalarında, 4 mm kalınlığında alüminyum-silisyum-bakır alaşımı Al380 ve magnezyum-alüminyum-çinko alaşımı MgAZ91D iş malzemesi kullanmışlardır. Delme işleminden önce hem ön ısıtma uygulayarak hem de uygulamadan sürtünmeli delme işlemi gerçekleştirmiş ve karşılaştırmışlardır. Yapılan çalışma sonucunda, iş parçasına ön ısıtma ve yüksek iş mili gevrek döküm metaller üzerinde itme kuvveti, tork, enerji ve güç değerlerini azaltmaya yaradığını ispatlamışlardır. 100°C, 200°C ve 300°C ön ısıtma uygulanan Al380 iş parçasının kovan geometrisinin daha düzgün olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca kovanlar üzerinde daha az çatlak ve taç yaprağı olduğu tespit edilmiştir [10].

Sobotava ve diğerleri, AlMgSi, alüminyum alaşımı, bakır ve S2356JR iş parçalarını sürtünmeli delme yöntemi ile delik açmışlar ve açılan deliklere kılavuz çekmişlerdir. Çalışmalarında kovan geometrisini ve çekilen dişlerinin mukavemet açısından incelemişlerdir. Bakır malzemenin kovan geometrisi çok düzgün olmadığı ancak dişlerin mukavemet değerlerinin kabul edilebilir olduğu görülmüştür [32].

Boopathi ve diğerlerinin çalışmalarında, imalatatta kullanılan pirinç, alüminyum ve paslanmaz çeliğe sürtünmeli delme yöntemi uygulamışlardır. Deneylerde tungsten takım tercih etmişlerdir. İşlem sonrasında takıma ait mikro görüntüler incelemişlerdir. Araştırmanın sonucunda, pirinç malzemenin alüminyum malzemeye göre takıma daha az yapıştığı görülmüştür. Paslanmaz çeliğin delinmesinde, alüminyum ve pirinç malzemelere göre daha akıcı bir süreç gözlemlenmiştir. Ölçülen itme kuvvetleri karşılaştırıldığında, alüminyum için 1512 N 'luk düşük bir itme kuvveti yeterli olurken, pirinç malzeme için 1798 N 'luk bir itme kuvveti gerektirmiştir. Paslanmaz çeliğin sürtünmeli olarak delinebilmesi için 2745 N 'luk bir itme kuvveti gerektiği görülmüştür [33].

Karabulut ve Bilgin bir çalışmada, AA7075-T6 alüminyum ve AZ31B magnezyum alaşımını kuru ve minimum miktarda B4C, SiC ve Al₂O₃ seramik tozlar içeren MQL yağlama şartlarında sürtünmeli delmişler ve sonuçları değerlendirmişlerdir. Araştırmacılar; kesme yağına ilave ettikleri seramik tozların delme esnasında delik yüzeyine yapışmasını sağlayarak, yüzeylerde kompozit bir yapı oluşmasını sağlamışlardır. Deneyler; 1500 dev/dak sabit devir sayısı ve 21 m/dak sabit ilerleme hızı altından gerçekleştirilmiştir. Yapılan bu

deneylerde; kuvvet, sıcaklık, delik yüzeyi kalitesi, kovan profili ve diş sıyırma mukavemetinin işleme üzerindeki etkileri incelenmiştir. Sonuç olarak seramik parçaların delik yüzeyinden geçerken kompozit bir yapı oluşturduğu görülmüştür. AA7075-T6 alüminyum alaşımı ve AZ31B magnezyum alaşımına uygulanan kuru sürtünmeli delme işlemi sonrasında, delik yüzeylerinde kabul edilebilir sonuçlar elde edilmiştir. Ancak, seramik toz içeren (MQL) yağlama ile yapılan sürtünmeli delme işlemi sonrasında AA7075-T6 alüminyum alaşımının yüzey kalitesi kötüleşirken, AZ31B magnezyum alaşımı bu durumdan etkilenmemiştir. Seramik partikül katkılı yağ karışımı ile sürtünmeli delme işlemi gerçekleştirilen deneylerde, işlem sıcaklığının AA7075-T6 alüminyum alaşımında %9, AZ31B magnezyum alaşımında ise %6 oranında düştüğü gözlemlenmiştir. Kesme kuvveti, AA7075-T6 alüminyum alaşımında ortalama %10, AZ31B magnezyum alaşımından ise %4 artmıştır. Deneyler sonucunda diş sıyırma mukavemeti, seramik tozlar içeren yağlama (MQL) katkısıyla, AA7075-T6 alüminyum alaşımını %19,2, AZ31B magnezyum alaşımını ise %7,7 oranında iyileştirmiştir [34].

Literatür çalışmasından yapılan çıkarımla, sürtünmeli delme takımları konusunda hala tatmin edici sonuçlara ulaşamadığı görülmektedir. Araştırmalar incelendiğinde otomotiv, uzay ve havacılık endüstrilerinde tercih edilen alüminyum 6061 gibi malzemeler üzerinde sürtünmeli delme konusunda derinlemesine araştırmaların eksikliği görülmüştür. Bu bağlamda alüminyum 6061 alaşımının iş parçası olarak seçildiği araştırmada, takım için farklı geometrik ilişkiler kullanılarak yeni sürtünmeli delme takımları tasarlanması ve bunlarla elde edilen kovan kalınlığının ve kovan boylarının iyileştirilmesi konusunda bir çalışma yapılması kararlaştırılmıştır.

3. SÜRTÜNMELİ DELME

3.1. Sürtünmeli Delme

Sürtünmeli delme uygulaması ilk olarak 1923 yılında Fransız Jean Claude de Valiere tarafından geleneksel delme operasyonuna alternatif olarak ortaya konulmuştur. Ancak ilk yıllarda uygun takım malzemesinin olmaması ve gerekli takım geometrisinin geliştirilememesi sürtünmeli delmenin gelişimini sekteye uğratmıştır. 20. yüzyıl sonlarına gelindiğinde gelişen malzeme teknolojisi ve takım geometrilerinde yapılan düzenlemeler sürtünmeli delme operasyonunun kullanımını artırmıştır [35].

Sürtünmeli delme işlemi, form verilmiş özel kesici takımın iş parçasına teması ile başlamaktadır. Bu temas ve kesme hareketinin (dönme hareketi) bir sonucu olarak takım ve iş parçası arasında sürtünme ve buna bağlı olarak yüksek ısı oluşur. Bu ısı, iş parçasının dayanımını düşürür ve bununla birlikte takımın da şekillendirme kabiliyetini artırır. Takım, iş parçasının içine doğru ilerler böylece delik açma ve kovan oluşturma süreci gerçekleşir. Bu işlem ile et kalınlığının 2-3 katı bir kovan yüksekliği oluşturulur böylece vida için gerekli dış yüksekliği sağlanmış olur [28, 36]. Sürtünmeli delme işlemi talaş kaldırılmadan gerçekleştirilen ve geleneksel olmayan bir delme yöntemidir [37].

Sürtünmeli delme prosesi farklı işlem basamakları kullanılarak gerçekleştirilir. Kovan şeklinin oluşması operasyon şartlarına, matkap çapına, matkap geometrisine (koniklik uzunluğu, uç açısı vb.) bağlıdır [37]. Delme işlemi üç aşamada gerçekleşmektedir (Resim 3.1).



Resim 3.1 Kare profile sürtünmeli delme uygulaması [14]

3.2. Sürtünmeli Delmenin Kullanıldığı Yerler, Avantajları ve Dezavantajları

Sürtünmeli delme işlemi ince cidarlı malzemelerin kullanıldığı hemen hemen tüm uygulamalarda tercih edilir. Bu yöntem, doğru operasyon parametrelerinin kullanılması ile birçok malzemede kullanımı mümkün olan bir işleme yöntemidir. Başta yapı çeliği, paslanmaz elik, pirinç, bakır, alüminyum ve özel alaşımlar olmak üzere birçok malzemeye uygulanabilir. Sürtünmeli delme işlemleri birçok endüstriyel alanda tercih edilmektedir [38]. Bunlar;

- Uzay ve havacılık endüstrisinde,
- Otomotiv endüstrisinde,
- elik konstrüksiyon mobilyaların bağlantı yerlerinde,
- Sızdırmazlık istenilen basınçlı gaz-hava tanklarında ve sıvı tanklarında,
- Tesisat sistemlerinin kurulmasında boru ve profillerin montajında,
- Rulman ve kaymalı yatakların ince cidarlı sistemlere bağlanması,
- Düşük et kalınlığına sahip mekanizmaların retiminde,
- Medikal uygulamalarda,
- Et kalınlığı düşük malzemelerin yüksek sıyrılma dayanımına sahip vidalı bağlantılarında,

şeklinde ifade edilebilir.

Sürtünmeli delme operasyonu ince cidarlı malzemelere etkili bir şekilde vida dişi açılmasına imkân sağlayarak üretim sürecine önemli bir katkı sunmuştur. Bu durum, sürtünmeli delme işleminin en büyük avantajıdır. Sürtünmeli delme işlemi; bu ve bunun gibi birçok avantajı sebebiyle endüstride yaygın olarak tercih edilmektedir [14]. Sürtünmeli delmenin avantajları şu şekilde sıralanabilir;

- Kovan oluşumu sayesinde delik çıkışına somun kaynatılması, puntalama vb. ek işlemlere gerek kalmaz böylece üretim maliyetleri düşer,
- Mevcut işlem tesisat uygulamalarında güvenlik ve sızdırmazlık sağlamaktadır, ayrıca seri üretime imkân verir [2, 3],
- Otomasyona imkân sağlar ve takım performansı geleneksel delme yöntemlerine göre daha yüksektir [1],
- Geleneksel delme yöntemleri ile gerçekleştirilmesi zor olan işlemlerde sürtünmeli delme uygulaması önemli bir alternatif sunmaktadır. Yüksek ısı etkisi ile iş parçasının dayanımının düşürülmesi bunda etkilidir.
- Bu delme yönteminde soğutma sıvılarının kullanılmaması hem soğutma maliyetlerini ortadan kaldırır hem de daha çevreci ve sağlıklı bir imalat prosesinin oluşmasına neden olur.

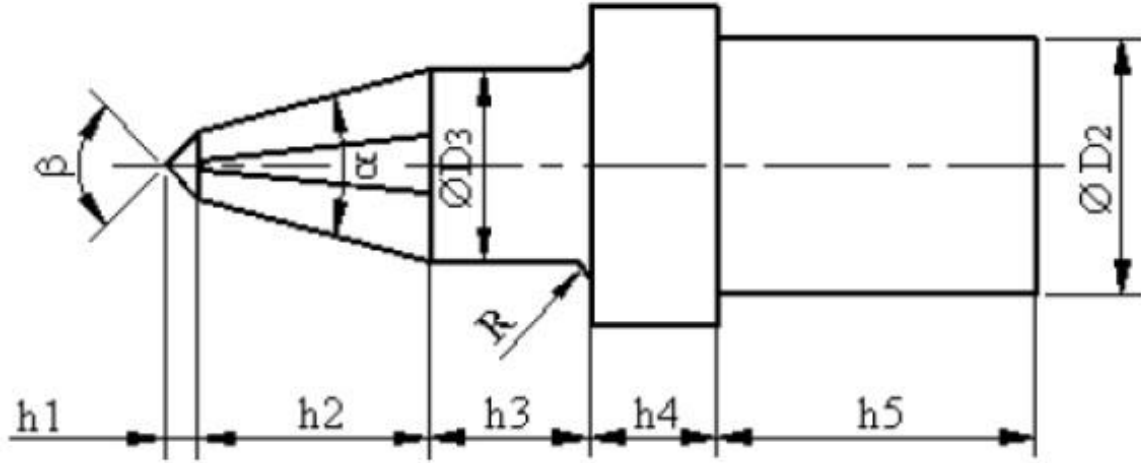
Sürtünmeli delme operasyonlarının birçok avantajı yanında az da olsa bazı dezavantajları da vardır. Bunlar;

- Ahşap, kompozit ve polimer türü malzemelerde sürtünmeli delme; malzemenin yanmasına/ergimesine, fiziksel ve doku bozulmasına sebep olacağından ve çıkan atık malzemenin akışkan olmaması sebebiyle mümkün değildir.
- Hedef malzeme oluşan ısıya dayanabilmelidir. Boyanmış, plastik kaplanmış veya galvanizli malzemeler genellikle bu işlem için uygun değildir.
- Geleneksel matkaba göre daha yüksek motor gücü ve dönüş hızı gerekir.
-

3.3. Sürtünmeli Delme İşlemlerinde Kullanılan Takımlar

Sürtünmeli delme operasyonlarında kullanılan takımların ısıya karşı dayanıklı olması istenir. Bu takımların, iş parçasının ergime sıcaklığından en az 1,7 kat (%70 daha fazla) yüksek sıcaklıklarda rahatlıkla çalışabilmesi gerekmektedir. Takımın iş parçası ile temas eden ilk

bölgesi olan konik kısmın gerekli mekanik ve termal dayanıma sahip olması gerekir. Bu yüzden sürtünmeli delme uygulamalarında tungsten karbür (WC) ve yüksek hız çeliği (HSS) takım malzemesi olarak kullanılmaktadır. Yapışma ve termal dayanımın artırılması amacıyla bu takımlarda TiAlN ve AlCrN kaplamalar sıklıkla kullanılmaktadır. Sürtünmeli delme işleminde kullanılan takımlar; konik uç, konik kısım, silindirik kısım, boyun ve bağlama sapı olmak üzere beş bölümden oluşur (Şekil 3.1) [14, 39, 40].



Şekil 3.1. Sürtünmeli delme takımının bölümleri [14]

Konik uç (h1): Sürtünmeli delme operasyonunda iş parçası ile ilk temasa geçen takım bölgesidir. Bu bölge, tüm delme işlemi sürecinde delme işlemine ek olarak takıma kılavuzluk yapar. Dahası termal ve mekanik yüklere en çok maruz kalan bölgedir. Uç açısı (β) iş parçasına batmayı sağlar ve işlem boyunca oluşan ilerleme kuvvetlerinin büyüklüğünü belirler [38, 41].

Konik kısım (h2): Takımın ikinci bölgesi konik bölgedir. Bu bölge kademeli olarak deliği büyütür. Konik kısım açısı (α), uç açısından (β) daha küçüktür ($\alpha < \beta$). Konik kısım açısı değiştikçe takım ve iş parçası temas yüzeyi değişmektedir. Bu temas sürtünme ve sürtünmeye bağlı ısı oluşumunu sağlamaktadır. Bu bölge yapılan baskı ile iş parçasının iç bölgesine ilerleyerek kovan oluşumunu sağlar [38, 41].

Silindirik kısım (h3): Takımın bu bölgesi iş parçasında istenilen deliğin oluşmasını sağlayan bölgedir, nihai delik ölçüsü bu bölge ile oluşturulur. Silindirik bölgenin çapı, delik çapı ile aynı olmalıdır. Bu bölgenin boyunun, iş parçası kalınlığı ve kovan yüksekliği toplamından daha uzun olması gerekmektedir. Bu nedenle silindirik bölge uzunluğu malzeme kalınlığının

3-4 katı olarak seçilmelidir. Aksi halde, açılan delik konik olacaktır ve böyle olması durumunda, delme işleminden sonra yapılacak vida dişi açma işlemi de olumsuz etkilenecektir [38, 41].

Boyun (h4): Sürtünmeli delme işlemi sırasında malzemenin bir miktarı delik girişine yığılmaktadır. Delik girişinde biriken bu ergiyik malzeme, takımın baskısı sebebiyle boyun bölümünde (h4) ve delik girişinde bir pul oluşturur. Boyun bölgesi çapı, takımda en büyük çapa sahip bölgedir. Bu bölgenin kalınlığı ise, delik girişinde pul oluşumu sırasındaki yükleri karşılayabilecek dayanıma göre seçilir [38, 41].

Bağlama sapı (h5): Bu bölge takımın tezgâha bağlanması için gerekli olan bölgedir. Bu bölgenin çapı bağlama yöntemine göre belirlenir. Bu bölgenin uzunluğu ise gerekli bağlama kuvvetini oluşturacak şekilde tasarlanmalıdır [38, 41].

Sürtünmeli delme operasyonlarında kullanılan takımlar arzu edilen delik özelliklerine ve iş parçası kalınlıklarına bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Delik girişinde pul oluşumunun istenmemesi durumunda, delme işlemi bittikten sonra, oluşan pulu kesecek şekilde, takımın boyun kısmına kesici eklenen farklı takım tipleri de oluşturulmuştur. Ayrıca tek seferde tüm operasyonları gerçekleştirmek için kılavuz ve sürtünmeli delme takımları birleştirilmiştir. Arzu edilen özelliklere göre sürtünmeli delme takımları dört farklı tipte değerlendirilmektedir [42]. Bunlar;

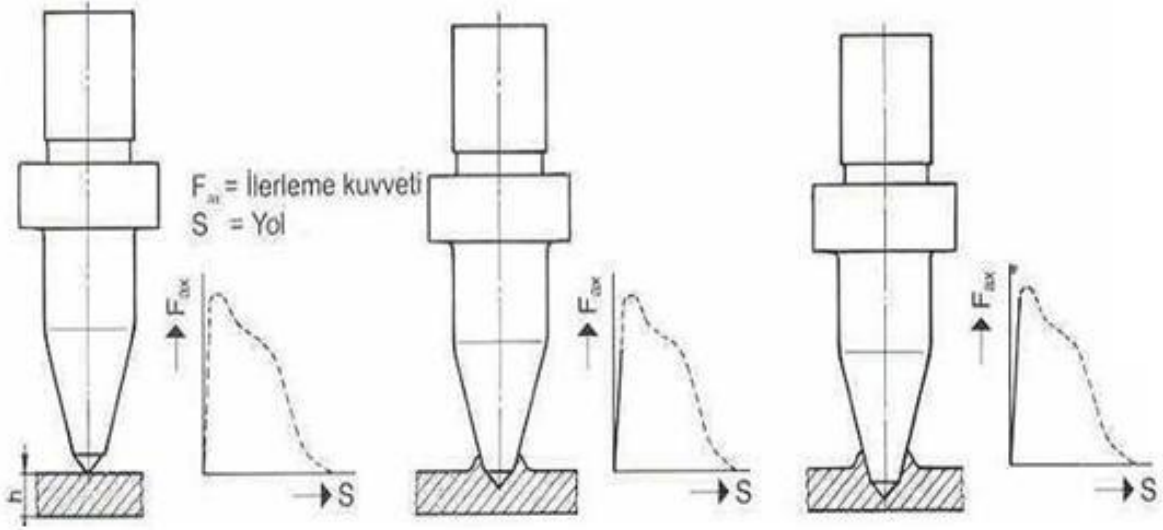
- Uzun tip sürtünmeli delme takımları
- Kısa tip sürtünmeli delme takımları
- Kesici boyunlu sürtünmeli delme takımları
- Kesici ağızlı sürtünmeli delme takımlarıdır.

3.4. Sürtünmeli Delme Aşamaları

3.4.1. Başlangıç aşaması

Sürtünmeli delme işlemi yüksek deformasyon ile gerçekleşir. Yüksek ısının oluşabilmesi için yüksek sürtünme enerjilerine ihtiyaç vardır. Bu sebeple takımın yüksek kesme ve ilerleme hızlarına gereksinim duyulur. Yüksek ilerleme hızı ve takım-iş parçası teması ile

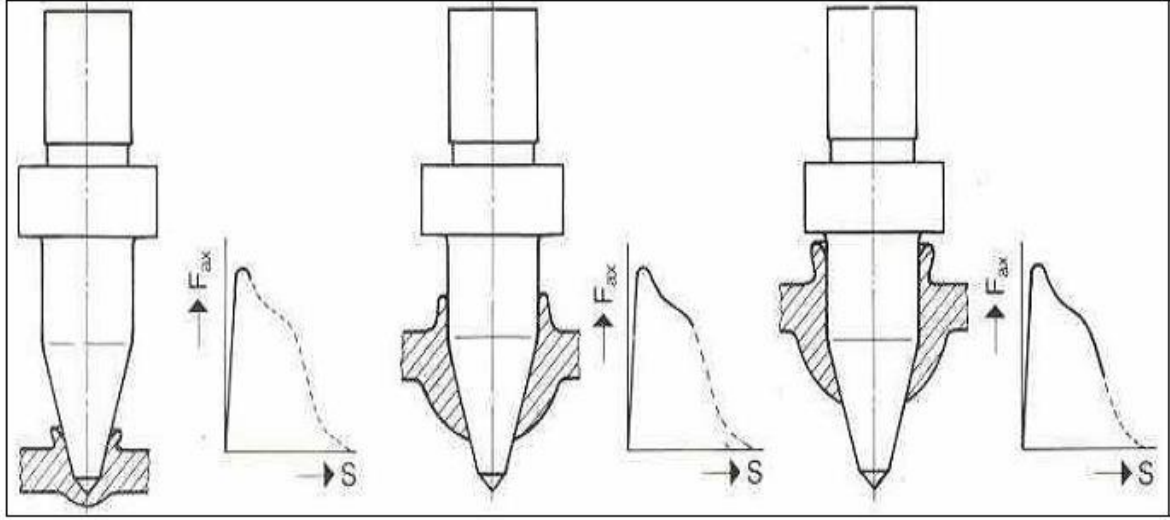
yüksek ilerleme kuvvetleri açığa çıkmaktadır (Şekil 3.2.). Başlangıç aşamasında ilerleme kuvvetleri en yüksek seviyededir. Sürtünmeye bağlı oluşan yüksek ısıyla malzeme dayanımı düşmekte ve bununla birlikte ilerleme kuvvetleri de düşüşe geçmektedir. Bu aşamada düşen dayanım sebebiyle de malzemenin şekillendirilmesi kolaylaşmaktadır [14].



Şekil 3.2. Sürtünmeli delme işlemi başlangıç aşaması ve kuvvet oluşumu [42]

3.4.2. Akma aşaması

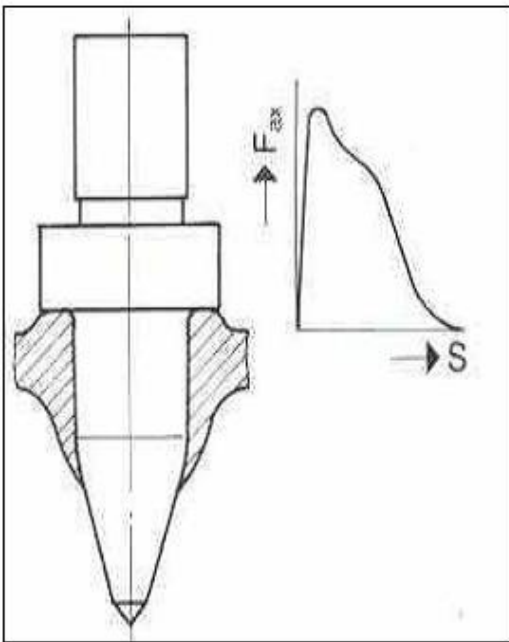
Oluşan yüksek sıcaklık etkisi ile akma dayanımı düşen iş parçası şekillenmeye başlar. Takımın iş parçasına batmaya başlaması ile malzeme delik girişine doğru yığılır. Takımın parça içine ilerlemesi ile yığılma delik çıkışına doğru ilerler ve koniklik oluşur (Şekil 3.3) Sıcaklığın artması ve deformasyonun başlaması ile ilerleme kuvvetleri azalma eğilimine geçer [43].



Şekil 3.3. Sürtünmeli delme işlemi akma aşaması ve kuvvet oluşumu [42]

3.4.3. Şekillendirme aşaması

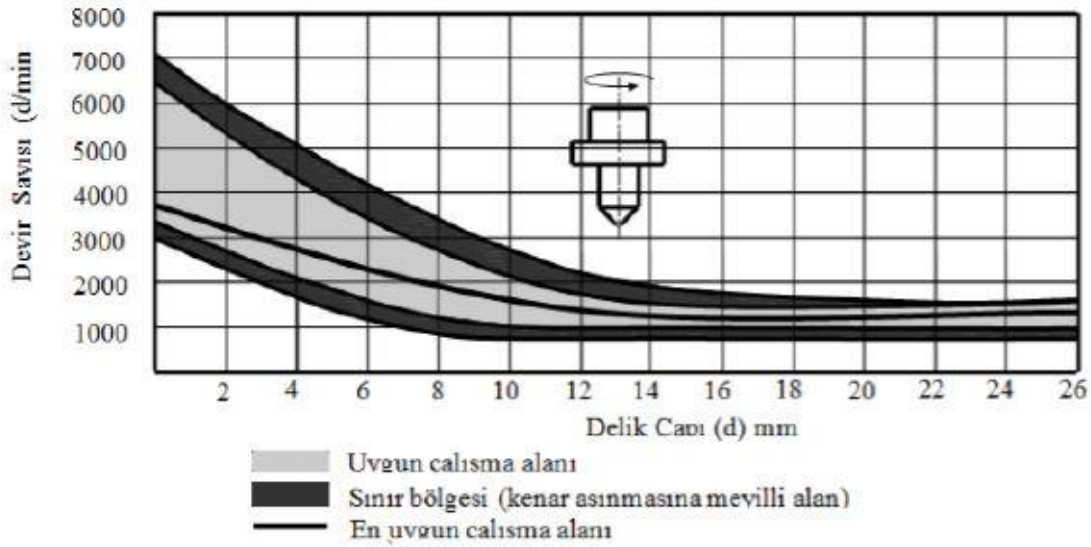
Son aşamada, takımın konik ve silindirik bölgesi sayesinde iş parçası tamamen delinir ve delik çıkışında koniklik oluşturulmuş olur. Takımın geniş silindirik kısmı delik girişine yığılan malzemeye baskı uygulayarak pulu şekillendirir ve delik girişinde bir sızdırmazlık pulu oluşturur. Delme işleminin tamamlanması ve delik çıkışındaki kovanın oluşması ile ilerleme kuvvetleri sıfıra düşer (Şekil 3.4). Delme işleminin sonlanmasının ardından takım geri çekilir ve operasyon tamamlanır [14, 43].



Şekil 3.4. Sürtünmeli delme işlemi şekillendirme aşaması ve kuvvet oluşumu [42]

3.5. Devir Sayısı ve İlerlemenin Önemi

Sürtünmeli delme işleminde devir sayısı önemli bir yere sahiptir. Devir sayısının artmasına bağlı olarak itme kuvveti, yüzey pürüzlüğü ve dönme momenti azalırken oluşan kovanda değişiklik olmaz. Devir sayısının artması; delme işleminde sıcaklığın artmasını doğrudan etkilediği için kovan oluşumunda, istenmeyen bir durum olan, taç yaprağının da oluşumunu sağlar. Sürtünmeli delme işleminde takım ömrünü arttırmak için malzeme kalınlığı ve delik çapına uygun olan devir sayısı seçilmesi önemli bir parametredir. Takım çapına bağlı olarak aşağıdaki grafikten uygun devir sayısı değerleri seçilebilir (Şekil 3.5) [38].



Şekil 3.5. Sürtünmeli delme işleminde devir sayısının delik çapına bağlı olarak değişimi

İlerleme hızının; itme kuvveti, sıcaklık ve işleme süresi üzerinde etkisi fazladır. İlerleme hızının artması itme kuvvetini de doğrudan etkileyip arttıracaktır. Yüksek ilerlemede, malzeme ile takım arasında ısı oluşumu azalır ve buna bağlı olarak malzeme delik yüzeyine sıvanır sonrasında da yüzey kalitesinde bozulma meydana gelir. Düşük ilerleme hızında işlem sırasında ısı artışı oluşur, işlem süresi uzar ve deliğin giriş bölümü deliğin çıkış bölümüne göre daha hızlı soğuduğundan takım malzemeye yapışır ve yüzey kalitesi de bozulur [38].

4. MALZEME VE METOT

Bu tez çalışmasında, Al 6061-T6 alüminyum alaşımı üzerinde sürtünmeli delme yöntemiyle ideal kovan boyu oluşturmak için hâlihazırda kullanılan takım geometri ölçüleri değiştirilerek en iyi sonucu veren geometri ölçülerinin belirlenmesi ve kesici takımın yeniden tasarlanması amaçlanmıştır. Bu amacı gerçekleştirmek için karbür takımlar ile deneysel çalışmalar yapılmıştır.

Bu çalışmada, sabit kesme hızı ve sabit ilerleme hızı kullanılarak deneyler yapılmış ilerleme kuvveti, çekme kuvveti, mikro sertlik ve kovan geometrisi incelenmiştir. Yapılan incelemeler sonucunda, çıktılar analitik olarak değerlendirilmiş ve ideal takım geometrisi oluşturulmuş test edilmiştir.

Bu bölümde; yapılan deneylerde kullanılan kesici takımlar, malzeme, takım tezgâhı, ölçme cihazları ve bu cihazların işleyişi hakkında bilgi verilmiştir.

4.1. Kesici Takım ve Kesme Şartları

Sürtünmeli delme işlemlerinin gerçekleştirilmesinde karbür takımlar kullanılmıştır. Takımlar, Gazi Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri biriminin desteği ile satın alınarak temin edilmiştir. Her bir deney için bir adet takım kullanılmıştır. Çalışmada; literatür araştırması ve yapılan ön pilot deneyler sonucunda, kesme parametreleri olarak; 70 m/dak sabit kesme hızı ve 50 m/dak sabit ilerleme hızı değerleri kullanılmıştır. Karbür takım malzemesinin mekanik özellikleri çizelge 4.1. 'de verilmiştir [38].

Çizelge 4.1. Takım malzemelerinin mekanik özellikleri

Malzeme cinsi ve Kesit kalınlığı (mm)	Tungsten Karbür (WC)
Maksimum Çalışma Sıcaklığı	1000 (°C)
Sertlik Değeri	92 (HRA)
Elastiki modülü	600 (kN/mm ²)
Poission oranı	0,24
Isıl İletkenlik Katsayısı	84 (W/m-K)

Çizelge 4.1. (devam) Takım malzemelerinin mekanik özellikleri

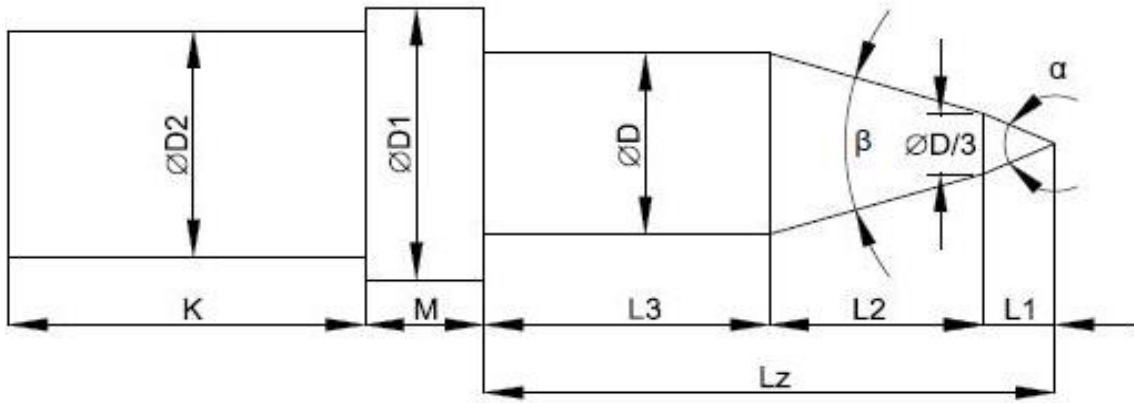
Ergime Sıcaklığı	2850 (°C)
Yoğunluğu	14,5 (g/cm ³)

4.2. Takım Tasarımı

Sürtünmeli delme takımı; ağızlama bölgesi, delme bölgesi ve kalıcı çapa getirme bölgesi şeklinde üç bölge olarak tasarlanmış ve bu üç bölge uzunluğunun toplamı zımba boyu olarak ($L_z = L_1 + L_2 + L_3$) adlandırılmıştır. Sürtünmeli delme takımlarının seçiminde etkili olan en önemli parametrelerden biri malzeme kalınlığı “t” dir. Deneylerde kullanılacak olan malzeme kalınlıkları 1; 3 ve 5 mm olarak belirlenmiştir. Buna göre takım ağızlama bölgesi boyu (L_1) malzeme kalınlıkları ile eşit boyutta seçilmiştir. Delme bölgesi boyu (L_2), malzeme kalınlığına bağlı olarak 3t değerinde alınmıştır. Kalıcı çapa getirme bölgesi boyu (L_3), delik formunun nihai çap değerinde oluşmasına izin vermesi için 4t olarak öngörülmüştür.

Sürtünmeli delme çalışmalarında etkili olan bir diğer parametre ise delik çapı “D” dir. Deneysel çalışmalar kapsamında takımların çapı 4; 6 ve 8 mm olarak seçilmiştir. Sürtünmeli delme takımı beş bölümden oluşacak şekilde tasarlanmıştır. Takımın ucundan başlayarak D/3 çapına kadar olan kısım (L_1) ağızlama bölgesi; D/3’den başlayarak D’ye kadar olan kısım (L_2) delme bölgesi; sabit D çapının olduğu kısım (L_3) kalıcı çapa getirme bölgesi; sabit çapın bitiminden başlayarak takım bağlama bölgesine kadar olan kısım (M) çapak ezme ve kesme bölgesi ve takım tutucuya bağlamak için kullanılan son kısım ($K=20+t$) da takım bağlama bölgesi olarak isimlendirilmiştir (Şekil 4.2).

Takım ağızlama bölgesi uç açısı (α) ve delme bölgesi koniklik açısı (β) yukarıda açıklanan değişkenlere bağlı olarak oluşmaktadır. Takım geometrisi ağızlama bölgesi uzunluğunun malzeme kalınlığına eşit seçilmesi, malzemenin hızlı delinmesini, böylece ergiyen malzemenin aşağıya doğru yönlenmesini ve yukarı yönde minimum seviyede sıvanmasını sağlayacaktır. Deneylerde kullanılan Takım ölçüsü çizelge 4.1. ’ de verilmiştir.



Şekil 4.1. Geliştirilen ve sürtülmeli delme yönteminde kullanılan takım geometrisi

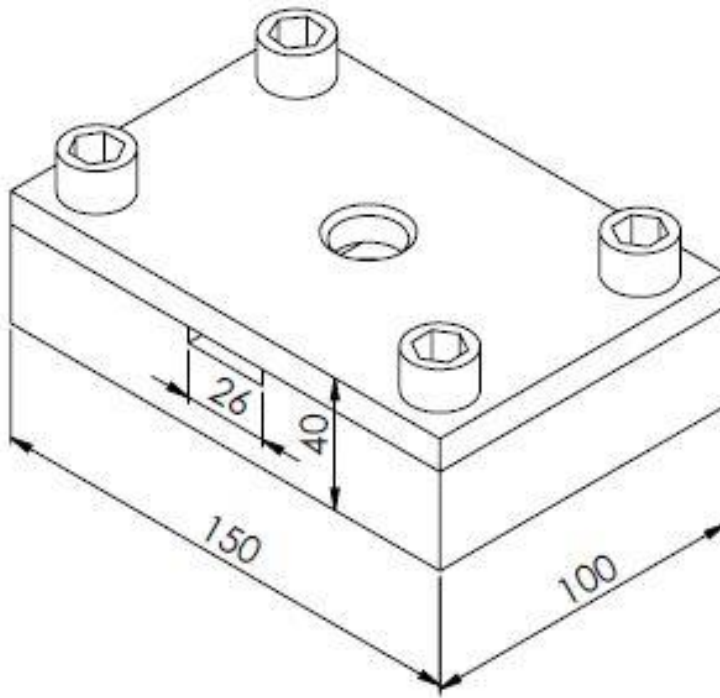
Çizelge 4.2. Geliştirilen takımın malzeme kalınlığına göre değişen ölçüleri

Malzeme Takım Kombinas yonu	t (mm)	ØD* (mm)	ØD1 (mm)	ØD2 (mm)	L1 (mm)	L2 (mm)	L3 (mm)	M (mm)	K (mm)	α (°)	β (°)
T1-D4	1	4	6	5	1	3	4	5	21	66,85	48,14
T3-D4	3	4	6	5	3	9	12	5	23	24,81	16,94
T5-D4	5	4	6	5	5	15	20	5	25	15,04	10,21
T1-D6	1	6	8	7	1	3	4	5	21	90	67,38
T3-D6	3	6	8	7	3	9	12	5	23	36,87	25,06
T5-D6	5	6	8	7	5	15	20	5	25	22,62	15,19
T1-D8	1	8	10	9	1	3	4	5	21	106,12	83,34
T3-D8	3	8	10	9	3	9	12	5	23	47,82	33,05
T5-D8	5	8	10	9	5	15	20	5	25	29,79	20,19

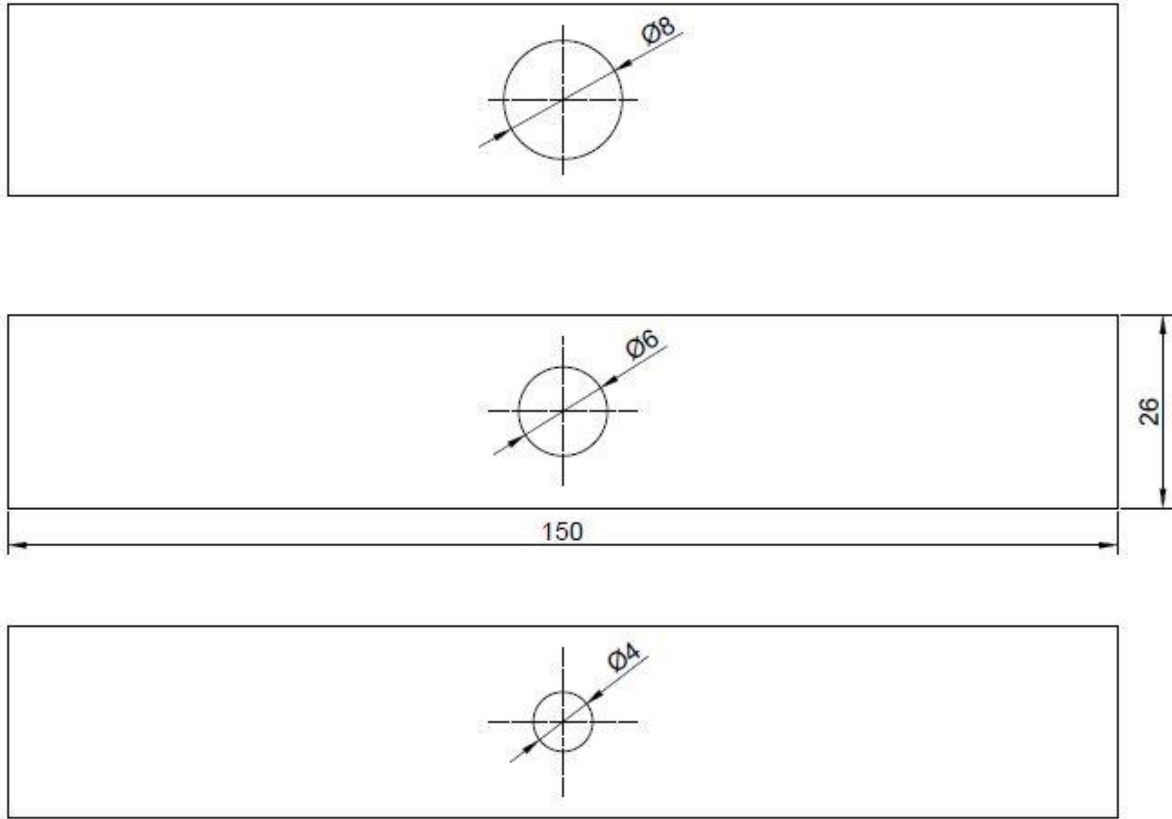
* Bu çap vidalı bağlantılar için matkap çapı olarak seçilir.

4.3. Malzeme

Bu çalışmada; özellikle havacılık, uzay ve otomotiv endüstrisinde sık kullanılan malzemelerden Al 6061-T6 alüminyum alaşımı seçilmiştir. Deney numunelerinin uzunlukları 150 mm, genişlikleri 26 mm, kalınlıkları ise 1, 3 ve 5 mm olarak belirlenmiştir. Dinamometre ile kuvvet ölçümlerinin sağlıklı bir şekilde gerçekleştirilebilmesi için, dinamometreye entegre edilecek şekilde bir kalıp tasarlanmış ve yapılmış, numune boyutlarının belirlenmesinde de bu kalıp ölçüleri dikkate alınmıştır (Şekil 4.2). Deneylerde kullanılan malzemeler proje dışı satın alınarak temin edilmiştir. Deneyler sırasında oluşturulan deliklerin numune üzerindeki yerleşimi Şekil 4.3.'de sunulmuştur. Al 6061-T6 malzemesinin kimyasal ve mekanik özellikleri sırasıyla çizelge 4.3. ve çizelge 4.4.'de verilmiştir.



Şekil 4.2. Tasarlanan ve yapılan bağlama kalıbının teknik resmi



Şekil 4.3. Deliklerin deney numunesi üzerindeki yerleşimi

Çizelge 4.3. Al 6061 T6 malzemenin kimyasal analiz sonuçları (%)

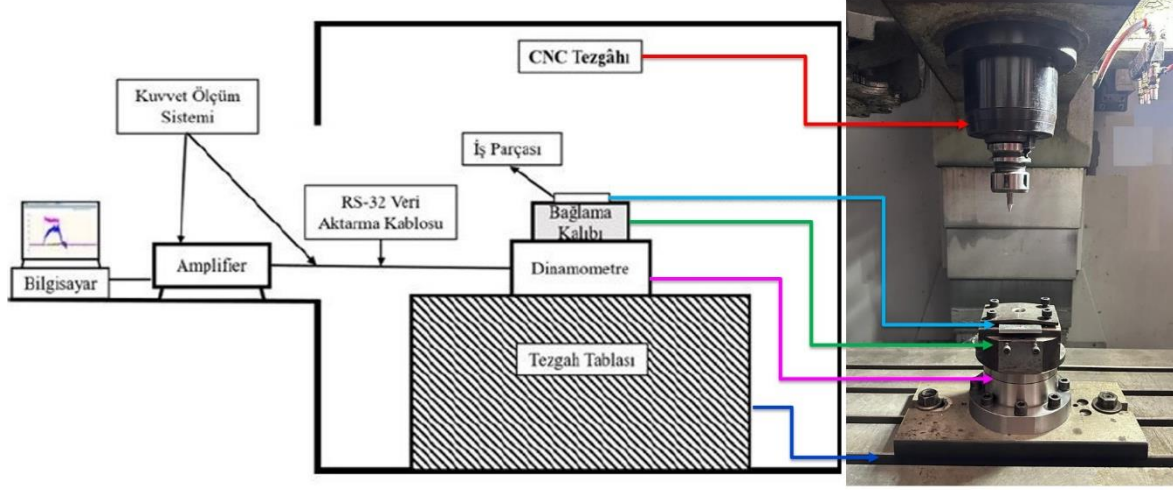
AA	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti	Cr	Al
6061	0,4-0,8	0,7	0,15-0,40	0,15	0,8-1,2	0,25	0,15	0,04-0,35	Kalan

Çizelge 4.4. Al 6061-T6 malzemenin mekanik özellikleri

Mekanik Özellikler	
Sertlik Değeri	110 HV
Çekme Dayanımı	260-310 Mpa
Akma Dayanımı	240-270 Mpa
Kopma Uzaması	%20
İşlenebilirlik	%70

4.4. Deneylerde Kullanılan Cihaz ve Tezgâhlar

Genel deney düzeneğinin işleyişi Şekil 4.4.'de görüldüğü gibi tasarlanmış ve uygulanmıştır.



Şekil 4.4. Genel deney düzeneği

Delme işlemleri Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi İmalat Mühendisliği Bölümü'nde bulunan Johnford VMC-550 marka CNC dik işleme merkezinde yapılmıştır. CNC tezgâhına ait teknik özellikler çizelge 4.5'de verilmiştir.

Çizelge 4.5. CNC tezgâha ait teknik özellikler

Tezgâhın Gücü	5 kW
En Yüksek Devir Sayısı	8000 dev/dak
Sırasıyla X, Y ve Z eksen limitleri	600, 500, 600 mm
Tezgâh Hassasiyeti	0,001 mm
İşletim Sistemi	FANUC

4.5. Mekanik Testler

Test aşamasında ve sonrasında delme işlemi gerçekleştirilen malzemelerin sonuçlarının incelenmesi için bir takım mekanik testler yapılması gerekmektedir. Bu kapsamda yapılacak testler, kuvvet ölçümü, mikrosertlik ölçümü ve çekme testi olarak sınıflandırılabilir.

4.5.1. Kuvvet ölçümleri

Kesme kuvvetleri ve moment değerlerinin deneyler sırasında ölçülebilmesi için üç kesme kuvveti bileşenini (F_x , F_y ve F_z) ve momenti (M_z) aynı anda ölçme kapasitesine sahip kuartz kristal esasıyla çalışan KISTLER 9272 (Şekil 4.5) tipi dinamometre ve Kistler Type 5070 amplifier kullanılmıştır. Ölçme işlemlerini gerçekleştirmek için dinamometre tezgâh tablasına, iş parçasının bağlandığı bağlama kalıbı da dinamometreye bağlanmıştır [44] . Kuvvet ölçümleri Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi İmalat Mühendisliği Bölümünde bulunan dinamometre ile yapılmıştır. Ölçülen değerler DynoWare programı yardımıyla sayısal değerlere dönüştürülmüştür. Bu dinamometre ve teknik özellikleri çizelge 4.6’da verilmiştir. Çalışmada operasyon kuvvetlerinin yorumlanması ilerleme kuvvetlerinin (F_z) ortalama değerleri üzerinden yapılmıştır.



Şekil 4.5. KISTLER 9272 tipi dinamometre

Çizelge 4.6. KISTLER 9272 dinamometre 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

Çizelge 4.6. (devam) KISTLER 9272 dinamometre teknik özellikleri

Doğrusallık		$\% \leq \pm 1$ FSO
Histezisx		$\% \leq 1$ FSO
Kapasitans	F, Fy; Fz	185 pF
Kapasitans	Mz	420 pF

4.5.2. Çekme testleri

Malzemeleri sınıflandırmak ve darbesiz yük altında mukavemet özelliklerini belirlemek amacıyla yapılan deneye çekme deneyi denir. Çekme deneyi, mühendislik hesaplamalarında kullanılan en önemli deneylerden birisidir. Deney sonucunda, malzeme ile ilgili elastisite modülü, akma gerilmesi, çekme dayanımı, tokluk, uzama gibi mekanik özellikler hakkında kesin bilgilere ulaşılır.

Deneyler Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümünde bulunan Instron 3369 marka universal çekme-basma test cihazında yapılmış, numuneler 5 kN kuvvet altında ve 5 mm/dak çekme hızında koparılmıştır (Resim 4.1).



Resim 4.1. Üniversal çekme-basma test cihazı

4.5.3. Sertlik ölçme testleri

Sürtünmeli delme yöntemiyle delme işlemi tamamlandıktan sonra deliğin yüzeyi hızlı bir şekilde hava akımına maruz kalır ve soğur. Delik yüzeyi, iç bölgelere göre daha hızlı soğur. Bu nedenle en küçük tane boyutu ve en büyük mikro sertlik değerleri delik yüzeyinde meydana gelir. Delik yüzeyinden uzak bölgeler, hava akımına doğrudan maruz kalmadığından, iş parçasının ısıl iletkenlik katsayısına da bağlı olarak daha yavaş soğur. Ara yüzeyde meydana gelen ısıнын, iç bölgelerden uzaklaşma süresi uzar ve böylece iç kısımlarda daha iri taneli ve yumuşak bir mikro yapı oluşur. Delme işlemi sonunda mikro yapının nasıl değiştiği, Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Metalürji ve Malzeme Mühendisliği bölümü laboratuvarında bulunan Emcotest Duravision 200 marka cihazı kullanılarak ve 5 farklı bölgeden (HV5) sertlik ölçümleri yapılarak belirlenmiştir (Resim 4.2).

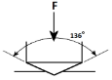
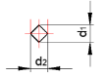


Resim 4.2. Mikrosertlik ölçüm cihazı

Vickers sertlik ölçme yöntemi

Vickers sertlik değeri, parçanın yüzeyinde belirli bir yük altında bastırılan ucun geri çekilmesinden sonra, parça yüzeyinde oluşan iz köşegenlerinin ölçülmesiyle bulunur. Vickers testinde kullanılan elmas uç, kare tabanlı piramit şeklindedir ve batan karşılıklı kenarları merkezde açı oluştururlar. Vickers sertlik değeri $HV = 1,8544 \frac{F}{d^2}$ formülü ile hesaplanır. Burada F, parçaya etki eden kuvvet; d^2 parçada oluşan izin milimetrekare cinsinden alanıdır. Alanı hesaplamak için ölçülen köşegenlerin uzunluklarının ortalaması alınır. Bu metotla ilgili teknik bilgiler çizelge 4.7’de verilmiştir.

Çizelge 4.7. Vickers sertlik deney bilgileri

Sertlik	Simge	Batıcı Uç	İz Şekli		Yük	Sertlik Değeri	Uygulama Metodu	Kullanımı
Vickers	HV, DPH	Elmas piramit	Ön Görünüş	Üst Görünüş	10-30 kg	$VSD = 1,8544 \frac{F}{d^2}$	Uygulanan yükün malzeme yüzeyinde oluşan iz yüzey alanına oranı, kg/mm^2	Sert malzemeler
								

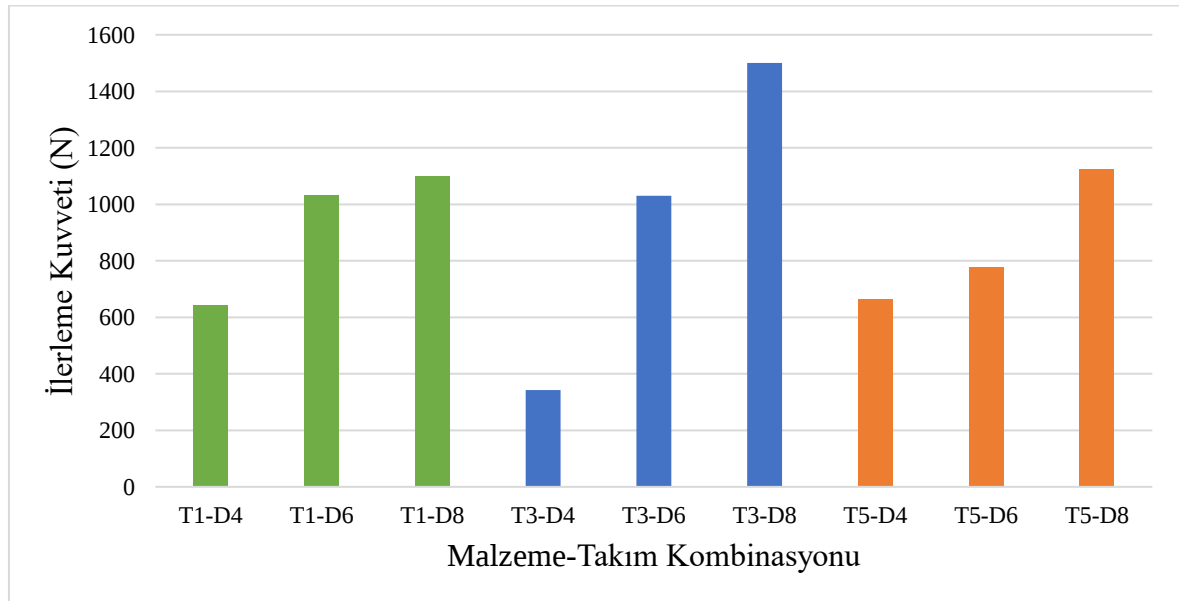
5. DENEYSEL BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu araştırmada sürtünmeli delme işleminde kullanılan takımın tasarlanması, imalatı, test edilmesi ve sonuçların yorumlanması üzerinde çalışılmıştır. Çalışmada Al 6061-T6 sac malzemenin üç farklı kalınlığı (1; 3 ve 5 mm) seçilmiş ve her biri üç farklı delik çapında (4; 6 ve 8 mm) delinmiştir. Böylece kullanılan takım, malzeme kalınlığı ve delik çapına göre ideal kovan oluşumu incelenmiştir. Delme esnasında sabit kesme hızı (70 mm/dak) ve sabit ilerleme hızı (50 mm/dak) kullanılmıştır.

Deneyselde ilerleme kuvvetleri, döndürme momentleri, mikrosertlikler, çekme değerleri ile kovan yükseklikleri ölçülmüş ve elde edilen değerler yorumlanmıştır. Bu bölümde söz konusu bu çıktı değerleri için elde edilen veriler sütun grafikleriyle de sunulmuştur.

5.1. İlerleme Kuvvetlerinin Değerlendirilmesi

Kesme işlemi sırasında harcanan enerji önemli maliyet kalemlerinden biridir. Kesme kuvvetlerinin büyüklüğü harcanan enerjinin göstergesi olduğu için bu kuvvetlerin analizi büyük önem taşımaktadır. Deneysel çalışmalar sonucunda belirlenen ilerleme kuvvetlerindeki değişimler Şekil 5.1’de sunulmuştur.



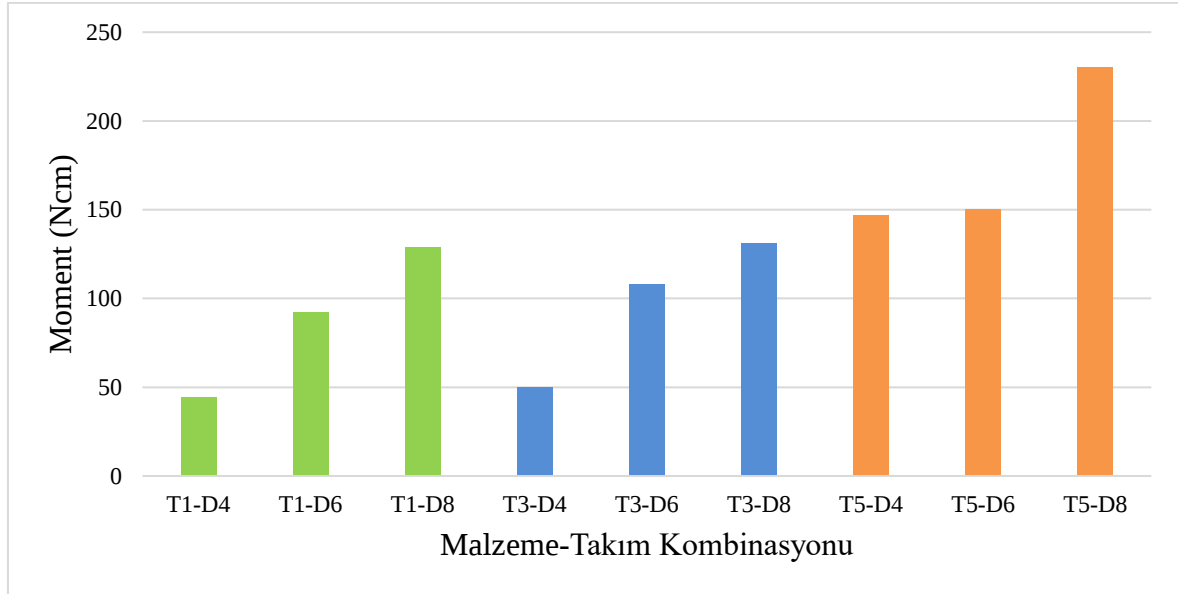
Şekil 5.1. İlerleme kuvvetlerinin değişimi

İlerleme kuvvetlerinin değerlendirildiği şekil 5.1.'de artan çap boyutu ile ilerleme kuvvetlerinin de tüm iş parçası kalınlıklarında arttığı görülmüştür. İş parçası kalınlığının 1 mm olduğu deneylerde bu artış oranı %71, parça kalınlığının 3 mm ye çıkması ile yapılan deneylerde artış oranının %337 ve son olarak 5 mm ile yapılan deneylerde de artış oranının %70 olduğu hesaplanmıştır. Takım çapı ile ilerleme kuvvetleri arasındaki bu doğru orantı; takım çapının artması sayesinde artan deformasyon bölgesi alanı ile ilişkilendirilmiştir. Takım çapının artması ile deformasyona uğrayan malzeme hacmi de artmıştır. Bu durum ilerleme kuvvetlerinin artmasına neden olmuştur. Bu sonucu incelenen literatür çalışmaları da desteklemektedir [22, 45]. T3-D4 malzeme-takım kombinasyonu ile yapılan deneylerde en düşük ilerleme kuvvetleri ölçülmüştür. Bu takım ile yapılan deneylerde düşük koniklik ve uç açısı nedeni ile takım malzemeye etkili bir batma performansı ortaya koymuştur. Bu durum, ilerleme kuvvetlerinin düşmesinde etkili olduğu düşünülmektedir.

Çalışma kapsamında en yüksek ilerleme kuvveti T3D8 nolu takım ile yapılan deneyde 1500 N olarak ölçülmüştür. En düşük ilerleme kuvveti ise T3D4 nolu takım ile yapılan deneyde 343 N olarak tespit edilmiştir.

5.2. Döndürme Momentlerinin Değerlendirilmesi

Kesme işlemi sırasında oluşan döndürme momentleri, ilerleme kuvvetlerinde olduğu gibi kesme sırasında harcanan gücün ve kesme operasyonunun zorluğunu belirten bir göstergedir. Döndürme momentlerinin oluşumunda da ilerleme oranı ve kesme hızı kombinasyonu büyük öneme sahiptir. Moment değerlerinin büyüklüğü önemli oranda ilerleme kuvvetleri ile ilişkili olsa da diğer kuvvet bileşenleri (takım – iş parçası arasındaki sürtünmeler) de bu sonuçları etkilemektedir. Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda tespit edilen döndürme momentleri Şekil 5.2'de sunulmuştur.

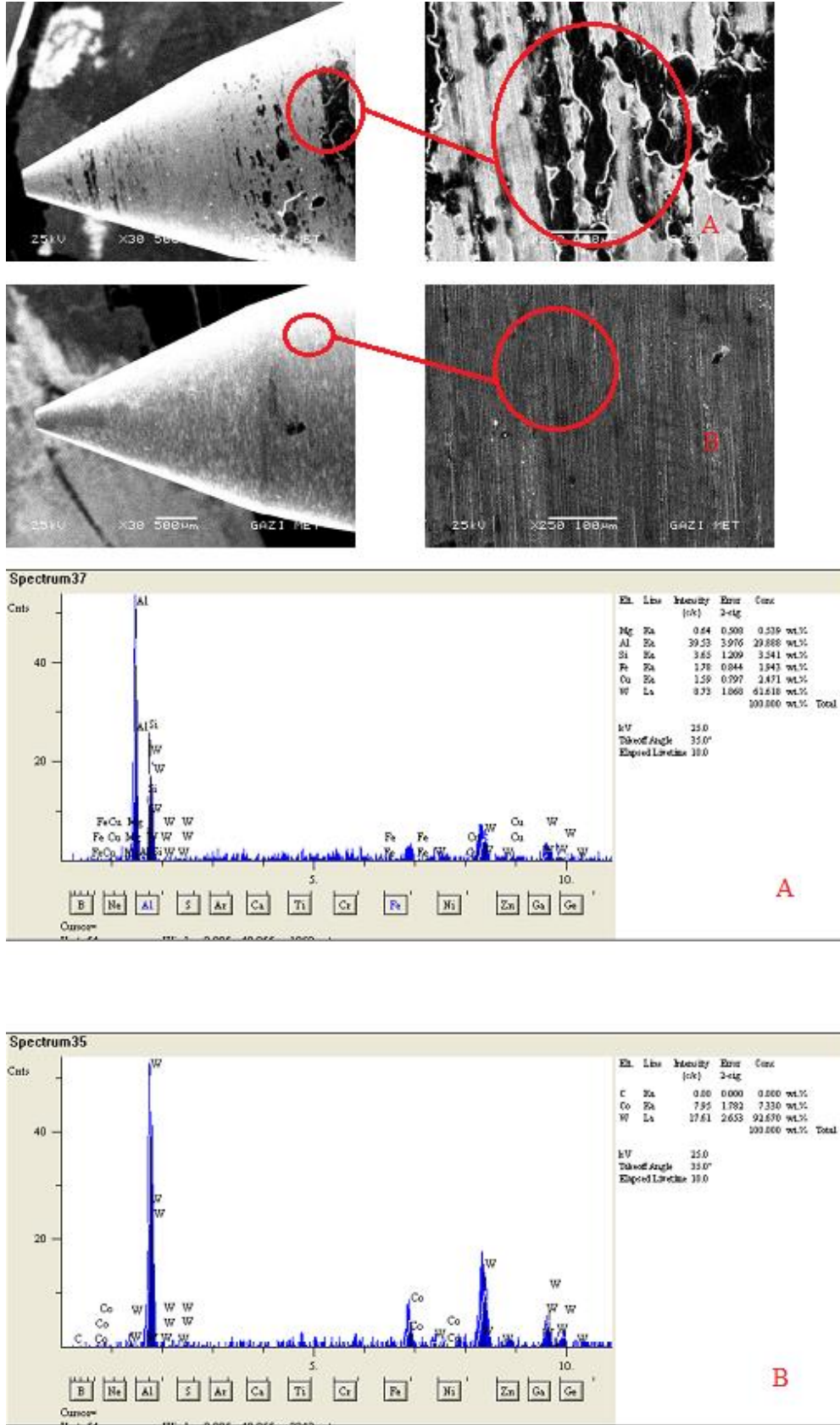


Şekil 5.2. Döndürme momentlerinin değişimi

Çalışma sonunda ölçülen ve şekil 5.2.'de sunulan momentler değerlendirildiğinde artan takım çapına bağlı olarak moment değerlerinin arttığı görülmüştür. İş parçası kalınlığının 1 mm olduğu deneylerde takım çapındaki artış ile momentlerdeki artış oranı %193, parça kalınlığının 3 mm ye çıkması ile yapılan deneylerde artış oranının %162 ve son olarak 5 mm ile yapılan deneylerde de artış oranının %56 olduğu hesaplanmıştır. İlerleme kuvvetlerinde olduğu gibi takım çapının artmasıyla oluşan deformasyon artışının, momentlerin de artmasını etkilediği; bununla birlikte artan ilerleme kuvvetlerinin de momentlerin artmasına katkı sağladığı düşünülmektedir. Momentlerdeki bu değişime ilişkin yapılan yorumlara yapılan literatür çalışmasında da yer verilmiştir [46].

Çalışma sonucunda hem takım çapındaki artış hem de iş parçası kalınlıklarındaki artışla moment değerlerinin de arttığı görülmüştür. Yapılan deneylerde artan iş parçası kalınlığı sebebiyle momentlerin %78 ila %234 arasındaki oranlarda arttığı görülmüştür. En yüksek momentler tüm takım çapları için 5 mm kalınlığındaki iş parçası ile yapılan deneylerde ölçülmüştür. İş parçası kalınlıklarının artması ile operasyon sürelerinin uzadığı ve böylece bu süreçte takıma geçen ısı miktarının da arttığı düşünülmektedir. Delme bölgesinde oluşan ve takıma transfer olan bu yüksek ısı; iş parçası malzemesinin takıma yapışma (BUE) eğilimini artırmıştır (Resim 5.1.). İş parçası ve takım arasındaki bu malzeme yapışmasının da momentlerin artmasında önemli rol oynadığı düşünülmektedir. Operasyon sırasında oluşan buna benzer yapışmaların momentleri artırdığına ilişkin değerlendirmeler diğer

Çalışmalarda da mevcuttur [22]. Takımlarda meydana gelen bu yapışma takım görselleri, takımdan çekilen SEM fotoğrafları ve EDS analizleri ile desteklenmiştir. Söz konusu görseller T5D8 nolu deney için Resim 5.1.'de sunulmuştur. Resim 5.1'de takım üzerinde belirgin büyüklüklerde yapışma alanlarının oluştuğu ve bu alanlardan yapılan EDS analizlerinde Al elementi varlığı tespit edilmiştir. Takımın bir bileşeni olmayan bu Al'nin iş parçasından takıma yapıştığı görülmüştür.

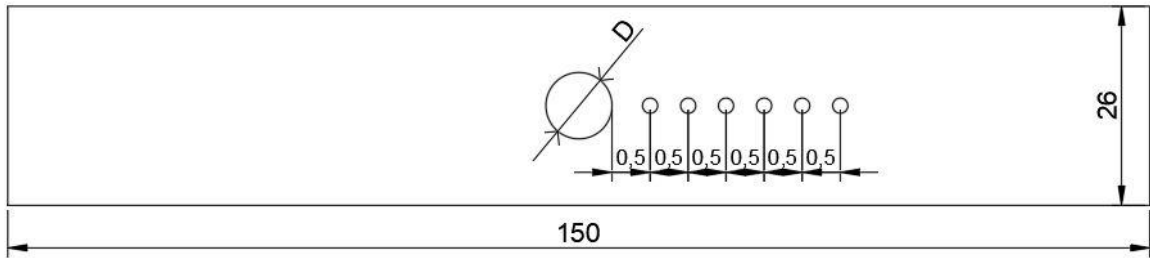


Resim 5.1. T5D8 takım SEM görselleri ve EDS analizleri (A); İşlem yapılmış (B); İşlem yapılmamış takımlar

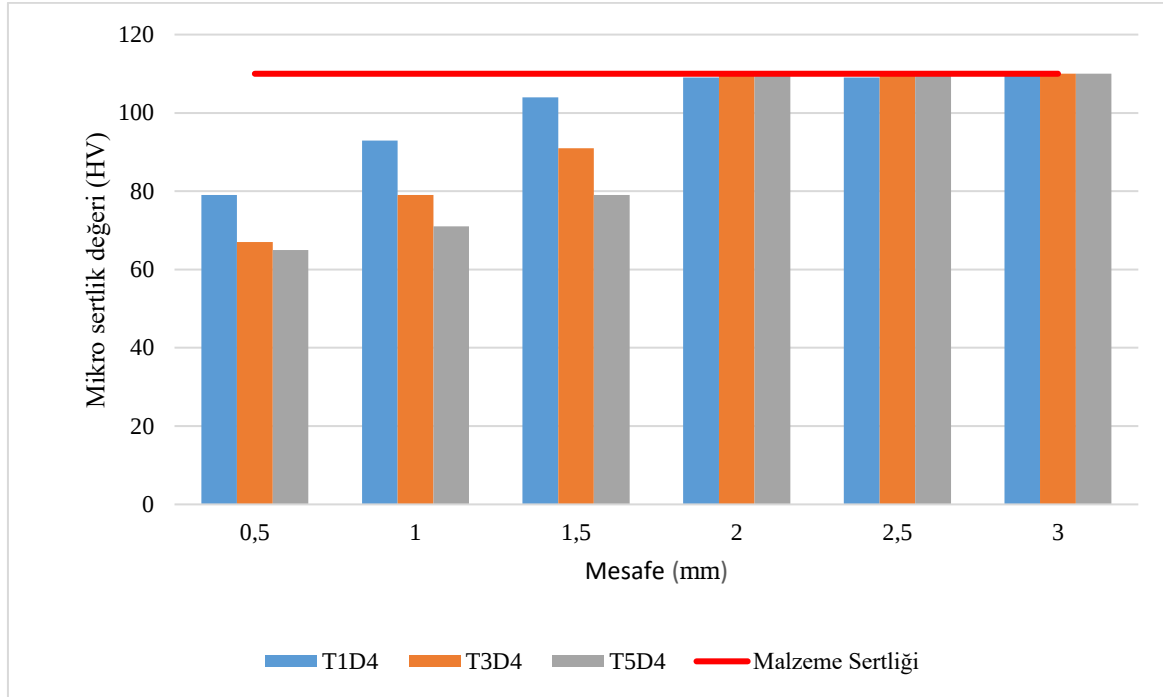
En yüksek moment değeri 230 Ncm büyüklüğünde olup bu değer 5 mm kalınlığındaki iş parçası ve 8 mm çaplı takım kullanılarak yapılan deneylerde ölçülmüştür. En küçük moment değeri ise T1D4 kodlu deneyde 44 Ncm olarak belirlenmiştir.

5.3. Mikrosertlik Ölçümünün Değerlendirilmesi

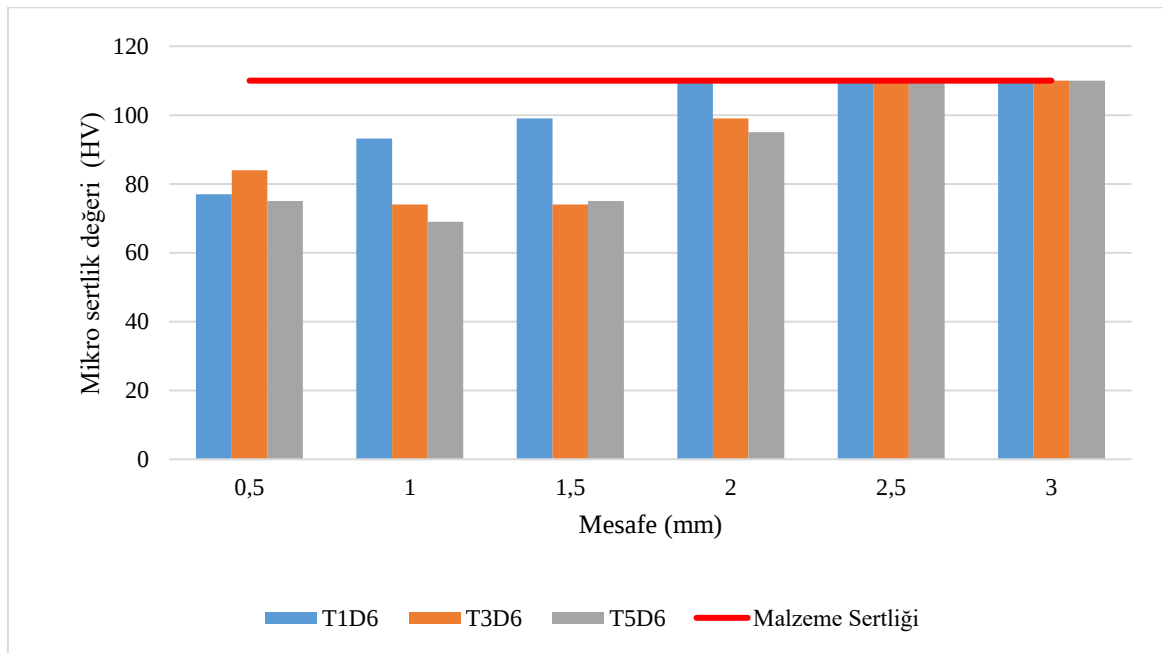
Malzemenin aşınma direncinin belirlenmesinde sertlik önemli rol oynamaktadır. Sertlik malzemelerin mekanik özellikleri hakkında da önemli bilgiler vermektedir. Malzemenin plastik deformasyona karşı gösterdiği direnç ile sertlik değerleri arasında da bir ilişkide mevcuttur. Malzemenin tüm bu özellikleri sertlik değerlerinin incelenmesini gerekli kılmaktadır. Sertlik değerleri; malzemenin kimyasal bileşiminden, sıcaklığa bağlı değişen malzeme mikro yapısından, mikro çatlaklardan ve malzeme içinde bulunan boşluklu yapılardan etkilenmektedir. Deneysel çalışmaların ardından iş parçasında ölçülen sertlik değerleri ve sertlik değişimleri Şekil 5.4, Şekil 5.5 ve Şekil 5.6 de sunulmuştur. Mikro sertlik ölçümleri; delik kenarının 0,5 mm uzağından başlayarak dışa doğru 0,5 mm eşit aralıklarla 6 ölçüm yapılarak gerçekleştirilmiştir (Şekil 5.3).



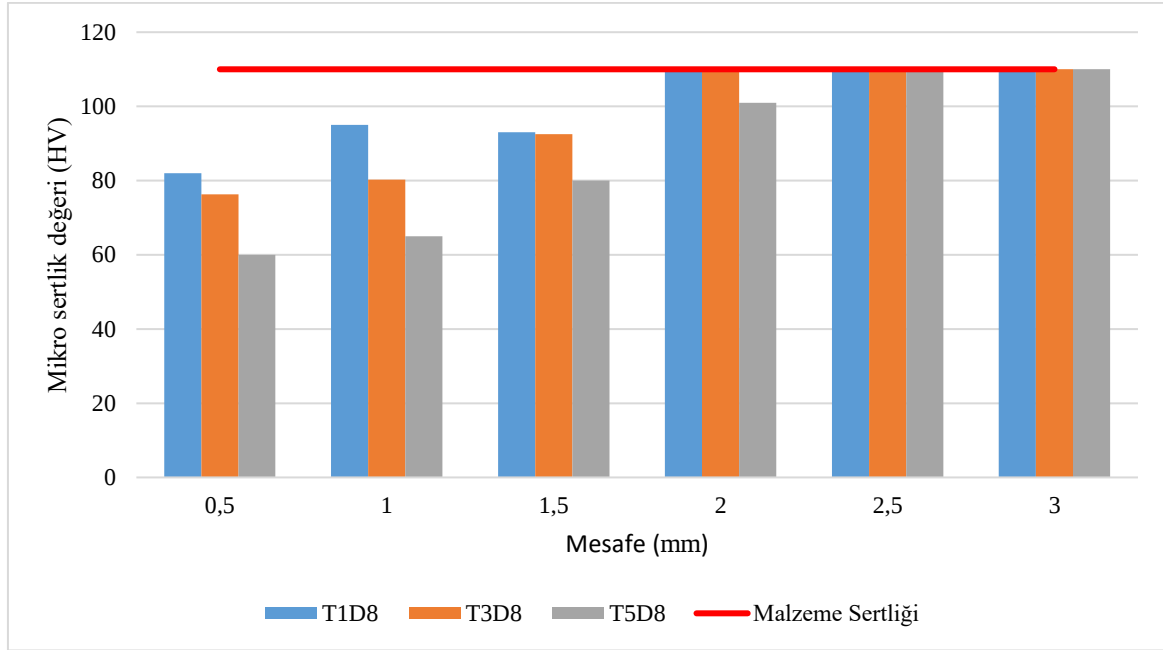
Şekil 5.3. İş parçası üzerindeki mikrosertlik ölçümleri



Şekil 5.4. Takım çapı 4 mm ile yapılan deneydeki mikrosertlik değerleri



Şekil 5.5. Takım çapı 6 mm ile yapılan deneydeki mikrosertlik değerleri

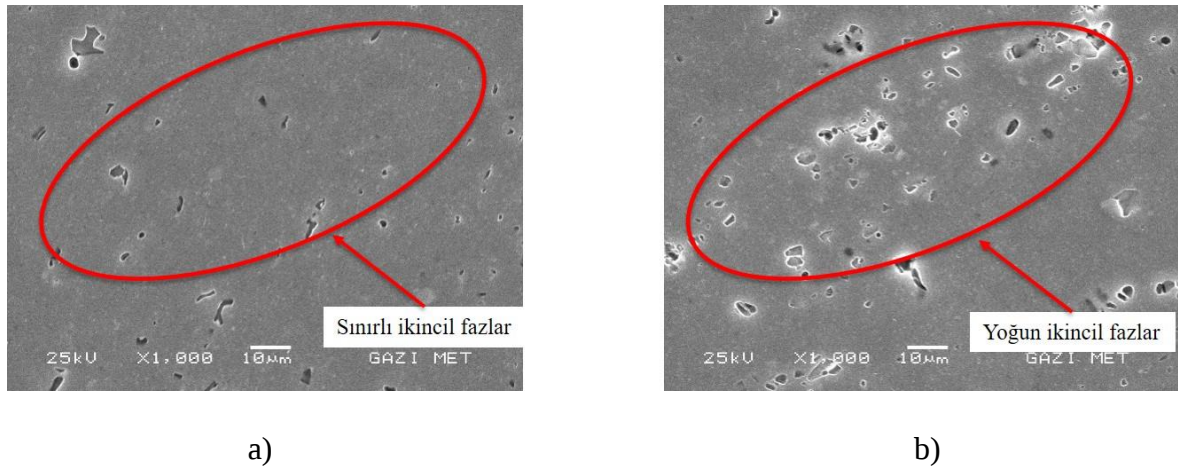


Şekil 5.6. Takım çapı 8 mm ile yapılan deneydeki mikrosertlik değerleri

Grafikler değerlendirildiğinde delik kenarından uzaklaştıkça sertlik değerlerinin tüm deneylerde arttığı görülmüştür. Takım çapının 4 mm olarak belirlendiği deneylerde (Şekil 5.4) artan mesafe ile sertlik değerleri %39 ila %70 arasındaki oranlarda artmıştır. Bu çapta en düşük sertlik değeri T5D4 nolu deneyde 65 HV değerinde ölçülmüştür. Takım çapının 6 mm olduğu deneylerde (Şekil 5.5) ise artış oranı, %30 ila %47 arasında olduğu belirlenmiştir. Bu çapta ise en düşük sertlik değeri T5D6 nolu deneyde 69 HV olarak ölçülmüştür. Takım çapı 8 mm ye çıktığında ise (Şekil 5.6) mesafeye bağlı sertlik artış oranı en yüksek %55 olmuştur. En düşük sertlik değeri bu çapta T5D8 nolu deneyde 65 HV olarak ölçülmüştür. En yüksek sertlik değeri, deformasyon sürecinden etkilenmeyen bölgede malzeme sertliği olarak 110 HV ölçülmüştür.

Plastik deformasyon yöntemleri ile üretilen iş parçalarında deformasyon sertleşmesinin (pekleşmenin) etkili olduğu düşünülmektedir. Pekleşme kaynaklı sertlik artışı yeniden kristalleşme tavı ile giderilmekte ve böylece malzeme sünekliği artırılmaktadır. Sürtünmeli delme işleminde sürtünmeler ve deformasyon miktarına bağlı olarak yüksek ısı oluşumu görülmektedir. Bu yüksek ısı delik kenarından iş parçasının iç bölgelerine doğru transfer olmaktadır [47]. Oluşan bu yüksek ısı iş parçası sıcaklıklarının da artmasında etkilidir. Bu yüksek ısının delik çevresinde lokal bir bölgede yeniden kristalleşme tavı etkisi oluşturduğu ve bu etkiye bağlı olarak sertliklerin düştüğü tahmin edilmektedir. Deneylerde kullanılan Al

6061-T6 alüminyum alaşımına önceden T6 ısıt işlemleri (yaşlandırma) uygulanmış olmasına rağmen, sürtünmeli delme işlemleri sırasında delik çevresinde oluşan yüksek ısı ile etkisiyle bu T6 ısıt işlemleri özelliğini kaybetmiştir. Operasyon süresince oluşan yüksek ısı ile etkisiyle yaşlandırma etkisi ve ikincil faz yoğunluğunun delik kenarında azaldığı görülmüştür [48]. T6 ısıt işlemleri ile ilgili olarak ikincil fazların yoğunluğu delik çevresinden uzaklaştıkça daha çok görülmüştür (Şekil 5.7). Delik kenarından uzaklaştıkça sertlik değerlerinin yükselmesi ve nihai malzeme sertliğine gelmesi bu durum ile ilişkilendirilmiştir. Literatürde de delik çevresinde sıcaklıklarla değişen mikro yapının ve oluşan mikro çatlakların da sertliklerin düşmesinde etkili olduğu bildirilmiştir [22].



Şekil 5.7. a) Delik kenarından 0,5 mm uzaktan SEM görüntüsü b) Delik kenarından 5 mm uzaktan SEM görüntüsü

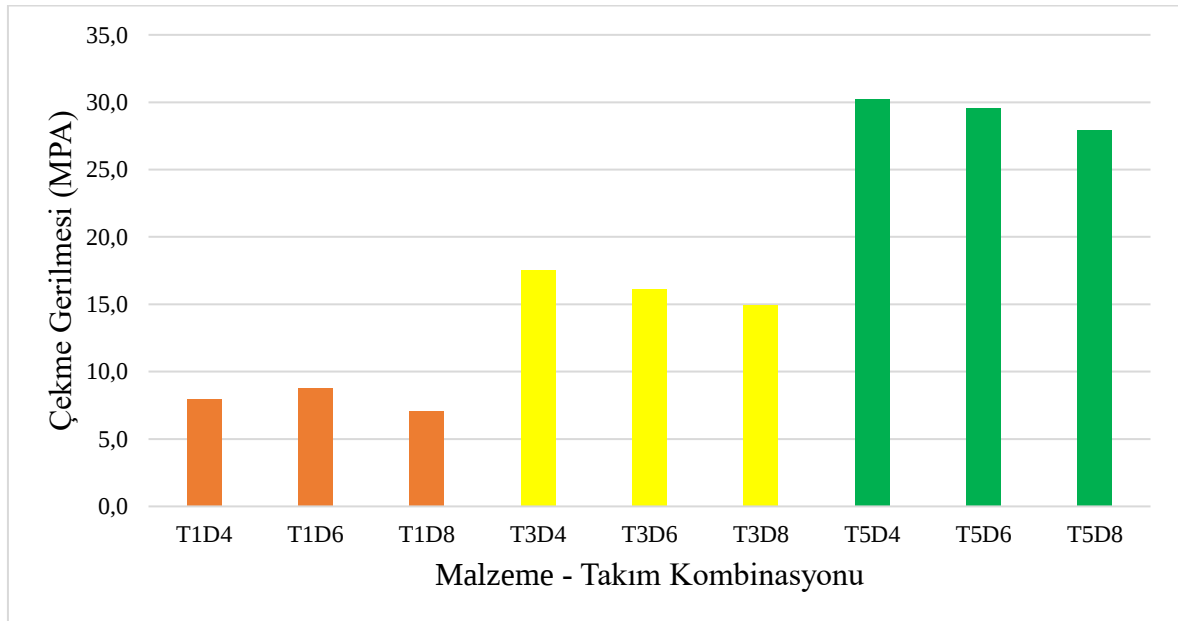
Yapılan bu çalışmada; artan iş parçası kalınlıkları ile delik çevresinde ölçülen sertliklerin azalma eğiliminde olduğu görülmüştür. Yapılan deneylerde artan iş parçası kalınlığı ile sertliklerin benzer şekilde tüm çaplar için yaklaşık %25 oranlarında azaldığı tespit edilmiştir. Artan iş parçası kalınlıkları ile operasyon süreleri de artmıştır. Operasyon sürelerinin artması iş parçasına transfer olan ısı miktarını ve bu ısıya bağlı olarak yeniden kristalleşme tavının etkisini artırmıştır.

Takım çaplarının artması ile de aynı bölgelerde benzer sertlik değerleri ölçülmüştür. En düşük çap olan 4 mm ile yapılan deneylerde sertlik değişiminin delik kenarından 1,5 mm uzaklıkla sınırlı olduğu görülmüştür. Kullanılan çapın 6 ve 8 mm ye artması ile sertlik değişimi delik kenarında 2 mm uzaklıkta dahi etkili olmuştur. Artan çap değerine bağlı olarak artan deformasyonun sıcaklıkların da artmasına ve yeniden kristalleşme tavının daha

geniş alanlarda etkili olmasına sebep olduğu düşünülmektedir. Bu durum sertlik değişiminin daha geniş bölgelerde etkili olması ile ilişkilendirilmiştir.

5.4. Çekme Verilerinin Değerlendirilmesi

Çekme deneyi sonucunda elde edilen veriler malzemenin mekanik özellikleri hakkında önemli bilgiler vermektedir. İş parçasının plastik deformasyona başlama sınırı, taşıyabildiği en yüksek yük ve kopma sınırı, çekme deneyi verileriyle elde edilir. Bu mekanik özellikler, iş parçasının çalışma sınırlarını ve taşıyabilecekleri yükleri ortaya koymaktadır. Gerçekleştirilen imalat operasyonları sonrasında, iş parçasının mekanik özelliklerindeki değişikliklerin tespit edilerek malzemenin yük taşıma kabiliyetinin incelenmesi de deformasyon sınırlarının belirlenmesi adına büyük önem taşımaktadır. Çalışma sonucunda sürtünmeli delme işlemi uygulanmış numunelerdeki mekanik özellik değişimleri Şekil 5.8’de sergilenmiştir.



Şekil 5.8. Takım çapı 4, 6 ve 8 mm ile iş parçası kalınlığı 1, 3 ve 5 mm olan çekme değerleri

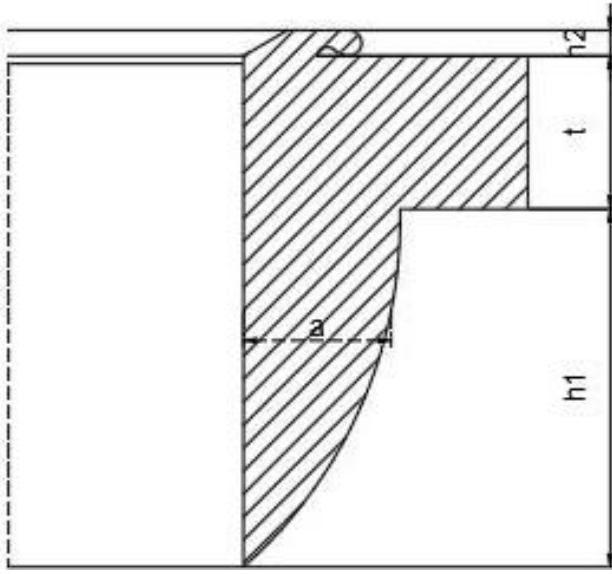
Şekil 5.8.’deki grafik incelendiğinde artan takım çapı ile çekme gerilmelerinin azaldığı görülmüştür. İş parçasının kalınlığının 1 mm olduğu deneylerde artan takım çapı (4, 6 ve 8 mm) ile çekme dayanımının %11, parça kalınlığının 3 mm olduğu deneylerde çekme dayanımının %15 ve numune kalınlığının 5 mm olduğu deneylerde ise çekme gerilmesi %7,5 oranında azaldığı belirlenmiştir. Çalışmalar sırasında en küçük çekme gerilmesi 7,099

MPa (T1D8), en yüksek çekme gerilmesi ise 30,242 MPa (T5D4) olarak ölçülmüştür. Artan takım çapı ve deformasyon miktarları ile sertlik değişim bölgesinin arttığı bir önceki bölümde ifade edilmişti. Çapın artması ile delik çevresindeki düşük sertlik bölgesi de daha geniş gerçekleşmektedir. Bu durum malzeme kesitinde homojen olmayan bir mikro yapıya neden olmaktadır. Böylece malzemenin yük taşıma kapasitesi ve çekme gerilmeleri artan çap ile azalmaktadır.

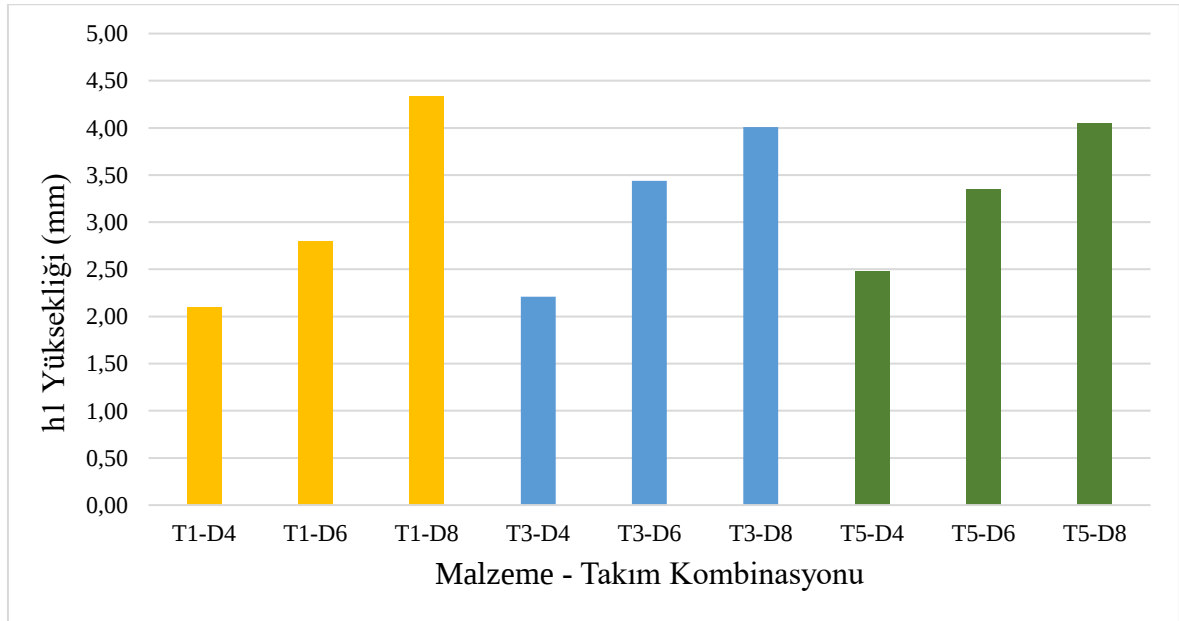
Artan iş parçası kalınlıkları ile numunelerin çekme gerilmelerinin ve yük taşıma kapasitelerinin arttığı görülmüştür. Aynı takım çapları ile yapılan deneylerde artan iş parçası kalınlıkları ile çekme dayanımları %294'lere varan oranlarda artmıştır. Artan iş parçası kalınlıklarının malzemenin de yük taşıma kapasitesini artırdığı düşünülmektedir. Benzer ilişkinin yapılan araştırmada literatürde de kurulduğu görülmüştür [45].

5.5. Kovan Boyutu ve Geometrisinin Değerlendirilmesi

Sürtünmeli delme işlemi, oluşan kovanın iş parçasının bir devamı olarak elde edildiği bir işlem olmasıyla öne çıkmaktadır. Bu yüzden kovan boyutunu; elde edilen delik çapı ve malzeme kalınlığı önemli derecede etkilemektedir. Kovan çeper kalınlığı ve kovan uzunluğu ne kadar büyük olursa montaj için açılan dış mukavemeti de o derece iyi olmaktadır. Bu çalışmada yukarıda sayılan tüm etmenler dikkate alınarak kovan boyutları değerlendirilmiştir. Sürtünmeli delme ile oluşan pul (h2), kovan (h1) ve kovan orta nokta çeper kalınlığı (a) boyutları Şekil 5.9.'de şematik olarak gösterilmiştir. Kovan boyutlarının değişimi aşağıdaki sütun grafiklerinde verilmiştir.



Şekil 5.9. Sürtünmeli delme ile oluşan pul, kovan ve çeper boyutları

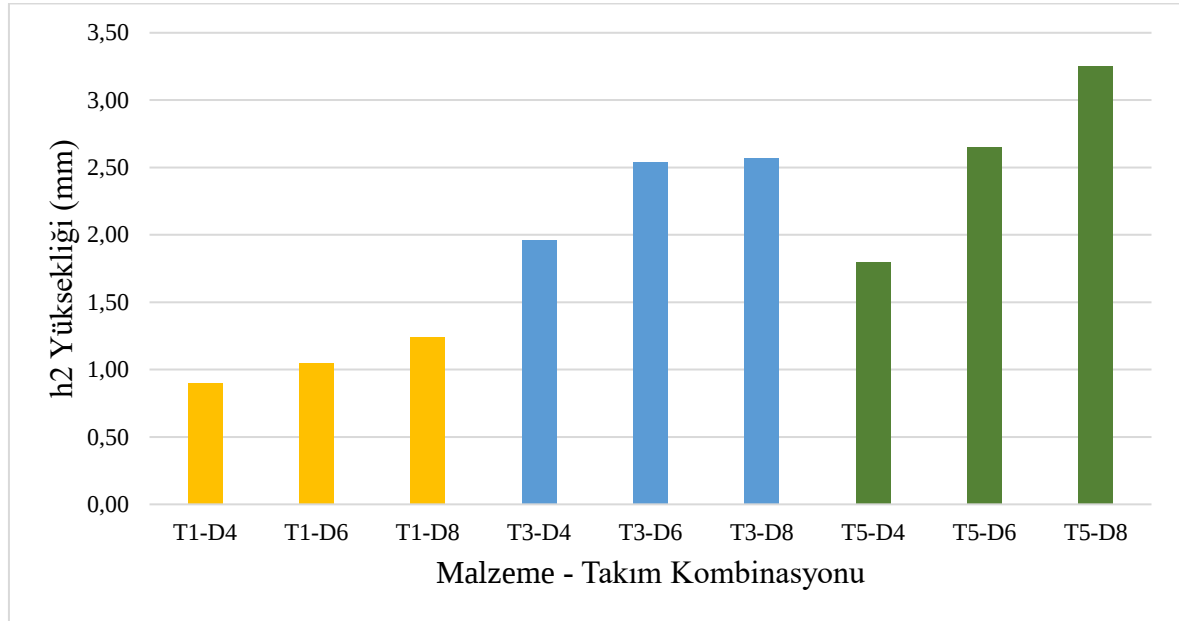


Şekil 5.10. Kovan yüksekliği (h1) değişimi

Şekil 5.10.'daki grafikten de anlaşılacağı üzere; artan takım çapı ile birlikte kovan boyu (h1) da artmıştır. Kovan boyundaki artışın iş parçası kalınlığının 1 mm olduğu çalışmalarda %106; 3 mm olduğu deneylerde %81,4 ve 5 mm olduğu deneylerde ise %63,3 olduğu hesaplanmıştır. Takım çapının artması plastik deformasyona uğrayan parça hacminin artmasına da neden olmuştur. Bu hacim elde edilen kovan hacmine karşılık gelmektedir.

Böylece takım çapının artmasıyla kovan boyunun (h_1) artması doğrusal olarak ilişkilendirilmiştir.

Aynı çaplardaki takımlarla yapılan deneylerde iş parçası kalınlıklarındaki değişim ile kovan yüksekliğinin belirgin bir değişime uğramadığı görülmüştür. Artan iş parçası kalınlıkları ile kovan boyutundaki değişim 0,3 mm ile sınırlı kalmıştır.

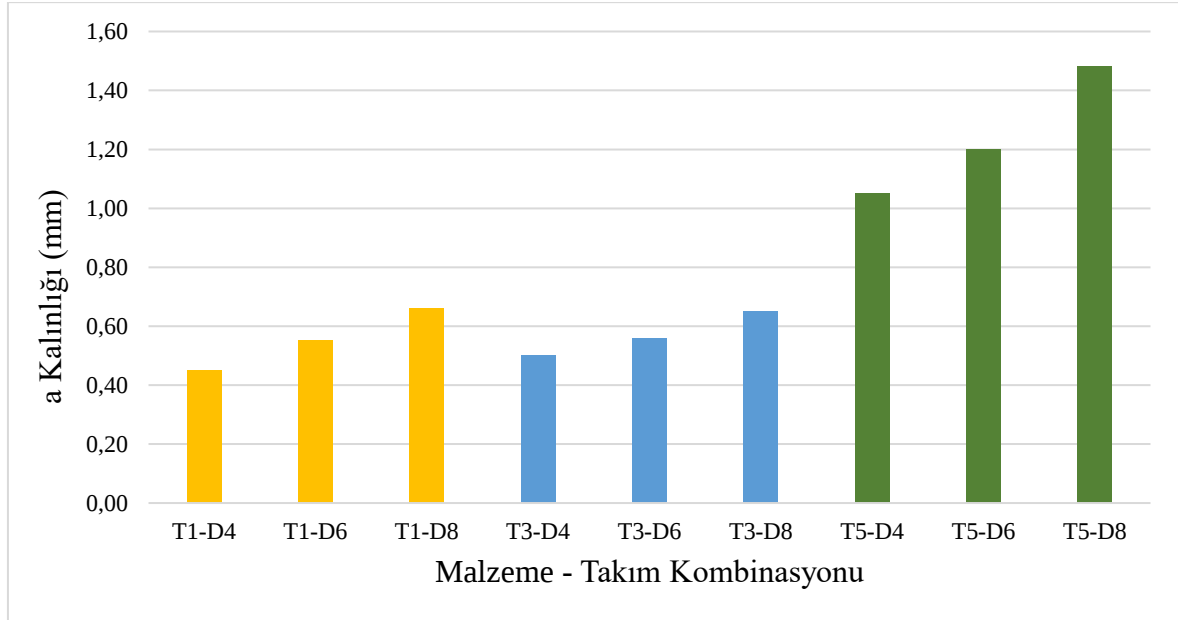


Şekil 5.11. Pul yüksekliği (h_2) değişimi

Şekil 5.11.'deki grafikte görüldüğü gibi; artan takım çapı ile pul yüksekliği de (h_2) artmıştır. Pul yüksekliğindeki artış, 1 mm kalınlığındaki iş parçası ile yapılan deneylerde %37,7; kalınlığın 3 mm olduğu deneylerde %31,1 ve kalınlığın 5 mm olduğu deneylerde ise %80,5 olarak hesaplanmıştır. Pul yüksekliğindeki artış ile kovan yüksekliğindeki artışın paralellik gösterdiği görülmüştür.

Aynı takım çaplarıyla yapılan deneylerde iş parçası kalınlıklarındaki değişim ile pul yüksekliğinin de arttığı görülmüştür. İş parçası kalınlığının 1 mm'den 5 mm'ye artması ile 4 mm çaplı takımlar ile yapılan deneylerde pul yüksekliği %100 oranında, 6 mm çapındaki takım ile yapılan deneylerde bu oran %152 oranında ve 8 mm çaplı takımlarla yapılan deneylerde ise %162 oranında artmıştır. Delmenin başlangıcına kadar sürtünmeyle kaldırılan eriyik malzeme delinen malzemenin kalınlığının artmasına bağlı olarak ve soğumanın da etkisi ile pullaşma kalınlığı şeklinde delik ağzında konumlanmaktadır. Bu

durum doğal olarak artan iş parçası kalınlıkları ile beraber pul yüksekliğinin artması şeklinde sonuçlanmaktadır.

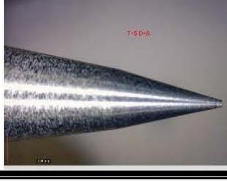


Şekil 5.12. Kovan çeper kalınlığı (a) değişimi

Şekil 5.12.'deki grafikte görüldüğü gibi; artan takım çapı ile kovan çeper kalınlığı (a) artmıştır. Kovan çeper kalınlığındaki artış, 1 mm kalınlığındaki iş parçası ile yapılan deneylerde %46,6; kalınlığın 3 mm olduğu deneylerde %30 ve kalınlığın 5 mm olduğu deneylerde ise %40,9 olarak hesaplanmıştır. Kovan genişliğindeki artışın kovan yüksekliği ve pul yüksekliğindeki artışlar ile paralellik gösterdiği görülmüştür.

Takım çaplarının aynı olduğu deneylerde iş parçası kalınlıklarındaki değişim ile kovan çeper kalınlığının arttığı görülmüştür. İş parçası kalınlığının artması ile 4 mm çaplı takımlarda kovan çeper kalınlığında %133,3 oranında, 6 mm çapındaki takımlarda bu oran %118,2 oranında ve 8 mm çaplı takımlarda ise %124,2 oranında artmıştır. İş parçası kalınlığı; sürtünmeli delme işleminde gerçekleşen plastik deformasyonun bir sonucu olarak kovan çeper kalınlığını oluşturmaktadır. Deformasyon sırasında kovanın aşağı doğru uzaması ile kovan çeper kalınlığı da incelmektedir. Bu durum iş parçası kalınlıkları ile kovan çeper kalınlıkları arasındaki ilişkinin doğru orantılı olduğunu göstermektedir.

Deneyler sonucunda elde edilen pul ve kovan yüksekliklerine dair görseller Resim 5.2. de sunulmuştur. Aynı şekil içerisine deneylerde kullanılan takımlara ilişkin görseller de eklenmiştir.

Deney No	Pul (h2)	Kovan (h1)	Takım
T1-D4			
T3-D4			
T5-D4			
T1-D6			
T3-D6			
T5-D6			
T1-D8			
T3-D8			
T5-D8			

Resim 5.2. Kovan, pul ve takım görselleri

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında, üç farklı (1; 3; 5 mm) kalınlıktaki Al 6061-T6 alüminyum alaşımı üzerinde yine üç değişik çap (4; 6; 8 mm) karbür takım kullanılarak sürtünmeli delme yöntemiyle kovan oluşturulmuştur. Bu çalışmada elde edilen deneysel sonuçlar ve öneriler aşağıda verilmiştir. Bunlar:

İlerleme kuvvetleri çaptaki artış ile artmıştır. Bu artışlar; 1 mm kalınlığındaki malzemelerin delinmesinde %71; 3 mm kalınlığındaki malzemelerin delinmesinde %337 ve 5 mm kalınlığındaki malzemelerin delinmesinde %70 olarak gerçekleşmiştir.

Döndürme momentleri takım çapındaki artışla birlikte artmıştır. Bu artışlar; kalınlığı 1 mm olan malzemelerde %193; 3 mm olanlarda %162; 5 mm olanlarda ise %56 artış olarak gerçekleşmiştir.

Sürtünmeli delme sırasında malzemenin takım üzerine sıvandığı (BUE) SEM fotoğrafları ile belirlemiştir.

Sürtünmeli delme ile açılan deliklerin çevresinde mikro sertlik değerleri azalmıştır. Bu azalmalar; 4 mm çapında açılan deliklerde %39 - %70 arasında; 6 mm çapında açılan deliklerde %30 - %47 arasında ve 8 mm çapında açılan deliklerde %34 - %55 arasında gerçekleşmiştir.

Al 6061-T6 malzemesine sürtünmeli delme işlemi uygulandıktan sonra T6 ısıtma işlemi özelliğini kaybetmiş ve delik çevresindeki sertlik değerleri düşmüştür.

Malzemenin delme işlemi sonrasındaki çekme dayanımları artan takım çapı ile azalmıştır. Bu azalma; malzeme kalınlığı 1 mm olan deneylerde %11; 3 mm olan deneylerde %15; 5 mm olan deneylerde ise %7,5 olarak gerçekleşmiştir.

En büyük kovan yüksekliği 4,33 mm olarak ölçülmüştür. Bu sonuç; 1 mm kalınlıktaki malzemenin, 8 mm çaplı takımla (T1D8) delinmesiyle elde edilmiştir. En düşük kovan

yüksekliği ise 2,10 mm olarak ölçülmüştür. Bu sonuç; 1 mm kalınlıktaki malzemenin, 4 mm çaplı takım ile delinmesiyle (T1D4) elde edilmiştir.

Artan takım çapı ile kovan yüksekliği de (h_1) artmıştır. Bu artış; 1 mm kalınlıktaki malzemelerde %106; 3 mm olanlarda %81,4 ve 5 mm olanlarda %63,3 oranında gerçekleşmiştir.

En büyük pul yüksekliği 3,25 mm olarak ölçülmüştür. Bu sonuç; 5 mm kalınlıktaki malzemenin, 8 mm çaplı takım ile (T5D8) delinmesiyle elde edilmiştir. En küçük pul yüksekliği ise 0,90 mm olarak ölçülmüştür. Bu sonuç; 1 mm kalınlıktaki malzemenin, 4 mm çaplı takım ile (T1D4) delinmesiyle elde edilmiştir.

Artan takım çapı ile pul yüksekliği (h_2) artmıştır. Bu artış; 1 mm kalınlıktaki malzemelerde %37,7; 3 mm olanlarda %31,1; 5 mm olanlarda ise %80,5 oranında gerçekleşmiştir.

Kovan çeper kalınlığı (a) artan takım çapına bağlı olarak artmıştır. En yüksek kovan çeper kalınlığı 1,48 mm olarak ölçülmüştür. Bu sonuç; T5D8 takım malzeme kombinasyonundan elde edilmiştir. En düşük kovan çeper kalınlığı ise 0,45 mm olarak ölçülmüş olup bu sonuç da T1D4 takım malzeme kombinasyonundan elde edilmiştir.

Kovan çeper kalınlığı (a) takım çapının artması ile artmıştır. Bu artış; 1 mm kalınlıktaki malzemede %46,6; 3 mm malzemede %30; 5 mm kalınlıktaki malzemede ise %40,9 olarak hesaplanmıştır.

Elde edilen kovan kalınlığı sonuçlarından görülmektedir ki; bazen kovan çeper kalınlığı ile vida diş derinliği birbirine yakın olmakta ve bu yüzden açılan bu kovanlara normal diş vida açmak mukavemet açısından her zaman uygun gözükmemektedir. Ancak ince diş vida açmak bu sorunu ortadan kaldırabilir.

Yeni yapılacak deneylerde ISO Normal Diş Standardındaki matkap çapları (somun delik çapı) dikkate alınarak takım tasarımları yapılmalıdır.

KAYNAKLAR

1. Sözügüzel, D. (2007). *İnce cidarlı CM22NBK malzemesi için sıvayarak delik delme (flowdrill) prosesi ile dış açma ve alternatif malzeme analizi*, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
2. Brinksmeier, E. (1990). Prediction of Tool Fracture in Drilling. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 39(1), 97–100.
3. Cantero, J. L., Tardío, M. M., Canteli, J. A., Marcos, M., Miguélez, M. H. (2005). Dry drilling of alloy Ti-6Al-4V. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 45(11), 1246–1255.
4. Yılmaz, B., Uzun, G., Güllü, A. (2020). The Effects of Cutting Parameters on the Thrust Force, Cutting Moment and Cutting Temperature in Drilling Process Applied to Ti6Al4V Material. *Manufacturing Technologies and Applications*, 1(3), 1–8.
5. Chow, H. M., Lee, S. M., Yang, L. D. (2008). Machining characteristic study of friction drilling on AISI 304 stainless steel. *Journal of Materials Processing Technology*, 207(1–3), 180–186.
6. Kumar, R., Jesudoss Hynes, N. R. (2019). Thermal drilling processing on sheet metals: A review. *International Journal of Lightweight Materials and Manufacture*, 2(3), 193–205.
7. Shalamov, P. V., Kulygina, I. A., Yaroslavova, E. N. (2016). ANSYS Software-based Study of Thermal Drilling Process. *Procedia Engineering*, 150, 746–752.
8. Özler, L. (2019). AISI 1010 Malzemesinin Sürtünmeli Delinmesinde Optimum Parametrelerin Gri İlişkisel Analiz Yöntemiyle Belirlenmesi. *Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 31(2), 535–544.
9. Raju, B. P., Swamy, M. K. (2012). Finite Element Simulation of a Friction Drilling process using Deform-3D. *International Journal of Engineering Research and Applications*, 2(6), 716–721.
10. Miller, S. F., Tao, J., Shih, A. J. (2006). Friction drilling of cast metals. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 46(12–13), 1526–1535.
11. Özek, C., Demir, Z. (2013). A7075-T651 alaşımın sürtünmeli delinmesinde kovan yüksekliğinin malzeme kalınlığına göre araştırılması. *Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 4(2), 61–68.
12. Özek, C., Bak, M. (2020). Investigation of parameters affecting the formation of the bushing and bushing wall obtained in the friction drilling process. *Pamukkale University Journal of Engineering Sciences*, 26(4), 620–627.

13. Özler, L. (2019). The influence of variable feed rate on bushing and surface roughness in friction drilling. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 41(8), 1–9.
14. Doğru, N. (2010). *AISI 1010 Çelik Malzemenin Sürtünmeli Delme Yöntemiyle Delinmesinde Delme Karakteristiklerinin Araştırılması*, Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
15. Bilgin, M. B., Gök, K., Gök, A. (2017). Three-dimensional finite element model of friction drilling process in hot forming processes. *Journal of Process Mechanical Engineering*, 231(3), 548–554.
16. Pantawane, P. D., Ahuja, B. B. (2011). Experimental investigations and multi-objective optimization of friction drilling process on AISI 1015. *International Journal of Applied Engineering Research*, 2(2), 448–461.
17. Oezkaya, E., Hannich, S., Biermann, D. (2019). Development of a three-dimensional finite element method simulation model to predict modified flow drilling tool performance. *International Journal of Material Forming*, 12(3), 477–490.
18. Dehghan, S., Ismail, M. I. S., Ariffin, M. K. A., Baharudin, B. T. H. T. (2018). Experimental investigation on friction drilling of titanium alloy. *Engineering Solid Mechanics*, 6(2), 135–142.
19. Dehghan, S., Ismail, M. I. S. B., Mohd Ariffin, M. K. A. B., & Baharudin, B. T. H. T. B. (2019). Friction drilling of difficult-to-machine materials: Workpiece microstructural alterations and tool wear. *Metals*, 9(9), 70-87.
20. Krishna, P. V. G., Kishore, K., Satyanarayana, V. V. (2010). Some investigations in friction drilling AA6351 using high speed steel tools. *Journal of Engineering and Applied Sciences*, 5(3), 11–15.
21. Gemalmayan, N., Tunahioğlu, M. (2009 8-9 Mayıs). *Farkli tip ince cidarli malzemeler için sivayarak delik delme prosesi ile dış açma yöntemi*. In TMMOB Makina Mühendisleri Odası 11. Otomotiv Sempozyumu, Bursa, 15–21.
22. Bilgin, M. (2020). AZ31B Magnezyum Alaşımının Sürtünmeli Delme İşlemi Üzerine Deneysel Çalışma. *Journal of Polytechnic*, 0900(4), 1655–1666.
23. Demir, Z., Adiyaman, O., Yakut, R. (2017). A7075- T651 Alaşımının Sürtünmeli Delinmesinde Ön - delik Çap ve Derinliğinin Yüzey Pürüzlülüğü ne ve Kovanın Geometrik Boyutlarına Etkisinin Araştırılması. *Batman Üniversitesi Yaşam Bilimleri Dergisi*, 7(2), 228–240.
24. El-Bahloul, S. A. (2019). Friction Drilling of Cast Aluminum Alloy A380 Without Significant Petal Formation and Radial Fracture. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 20(1), 45–52.

25. Demir, Z. (2015). A7075-T651 ve St 37 Alaşımlarının Sürtünmeli Delinmesinde Kovanı Oluşturan Malzeme Hacminin Araştırılması. *Batman Üniversitesi Yaşam Bilim Dergisi*, 5(1), 85–101.
26. Ozler, L., Dogru, N. (2013). An experimental investigation of hole geometry in friction drilling. *Materials and Manufacturing Processes*, 28(4), 470–475.
27. Özek, C., Demir, Z. (2012 4-5 Ekim). St 37 Çeliğinin Sürtünmeli ve Geleneksel Delme. 3. Ulusal Talaşlı İmalat Sempozyumu, Ankara, 385–398.
28. Miller, S. F., Blau, P. J., Shih, A. J. (2007). Tool wear in friction drilling. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 47(10), 1636–1645.
29. Kaya, M. T., Aktas, A., Beylergil, B., Akyildiz, H. K. (2014). An experimental study on friction drilling of ST12 steel. *Transactions of the Canadian Society for Mechanical Engineering*, 38(3), 319–329.
30. Lee, S. M., Chow, H. M., & Yan, B. H. (2007). Friction drilling of IN-713LC cast superalloy. *Materials and Manufacturing Processes*, 22(7), 893–897.
31. Lee, S. M., Chow, H. M., Huang, F. Y., & 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.
32. Sobotová, L., Kmec, J., Bičejová, L. (2011). Thermal drilling, new progressive technology. *International journal of engineering*, 9(3), 371–373.
33. Boopathi, M., Shankar, S., Manikandakumar, S., Ramesh, R. (2013). Experimental investigation of friction drilling on brass, aluminium and stainless steel. *Procedia Engineering*, 64, 1219–1226.
34. Karabulut, Ş., Bilgin, M. (2021). Friction drilling of AA7075-T6 and AZ31B alloys under dry and oil containing ceramic particulates. *Journal of Manufacturing Processes*, 65, 70–79.
35. Davison, J. B., France, J. E., Kirby, P. A. (1999). Strength and rotational response of moment connections to tubular columns using flowdrill connectors. *Journal of Constructional Steel Research*, 50(1), 1–14.
36. Rao, K. H., Gopichand, A., Kumar, N. P., Jitendra, K. (2017). Optimization of machining parameters in friction drilling process. *International Journal of Mechanical Engineering and Technology*, 8(4), 242–254.
37. Demir, Z. (2012). A7075- T651 Alüminyum Alaşımının ve St37 Çelik Malzemesinin Sürtünmeli Delme Yöntemi ile Delinmesinin Deneysel İncelenmesi, Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.

38. Bal, M. (2020). *Termal Sürtünmeli Delme İşleminde Kovanın Geometrik ve Fiziksel Özelliklerinin Araştırılması*, Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
39. El-Bahloul, S. A., El-Shourbagy, H. E., El-Bahloul, A. M., El-Midany, T. T. (2018). Experimental and Thermo-Mechanical Modeling Optimization of Thermal Friction Drilling for AISI 304 Stainless steel. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 20, 84–92.
40. Demir, Z. (2016). An Experimental Investigation of the Effect of Depth and Diameter of Pre-drilling on Friction Drilling of A7075-T651 Alloy. *Journal of Sustainable Construction Materials and Technologies*, 1(2), 46–56.
41. Keser, M. (2019). *İnce Et Kalınlığına Sahip Kare Profil Borularda Sivama İle Delik Delme ve Kılavuz Çekmenin Deneysel İncelenmesi* Yüksek Lisans Tezi, Hitit Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Çorum.
42. Wu, J., Wen, J., & Wang, Z. (2016). Study on the predicted model and experiment of drilling forces in drilling Ti6Al4V. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 38(2), 465–472.
43. Dekkers, G. (1993). *Flow Drill Process Firma Katalogları* (Copyright.). Holland.
44. Uzun, G., Korkut, İ. (2011 16-18 Mayıs). *Delme ve Frezelemedeki Kesme Kuvvetlerinin Ölçülmesi İçin Deney Seti Tasarımı ve İmalatı*. In 6th International Advanced Technologies Symposium, Elazığ, 1-5.
45. Demir, Z., Özek, C. (2013 07-09 Kasım). *Sürtünmeli Delme İşleminde Vida Sıyırma Kuvvetinin Araştırılması*, 4. Ulusal Talaşlı İmalat Sempozyumu, Aydın, 417–428.
46. Demir, Z. (2016 5-7 Kasım). *A7075-t651 alaşımının sürtünmeli delinmesinde ön delik derinliğinin etkisinin araştırılması*, 6. Ulusal Talaşlı İmalat Sempozyumu, İstanbul, 282–290.
47. William D. Callister, Rethwisch, D. D. (2013). *Malzeme Bilimi ve Mühendisliği* Ankara: Nobel Yayın Dağıtım, 50-85.
48. Özek, C., Bal, M. (2020). Investigation of bushing dimensions and micro hardness changes in thermal friction drilling process. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 36(1), 511–525.



Gazili olmak ayrıcalıktır