



T.C.

KIRIKKALE ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**SÜRTÜNME Lİ DELME YÖNTEMİNİN İŞLEME
PARAMETRELERİNİN DENEYSEL OLARAK ARAŞTIRILMASI**

ÖMER FARUK AKSU

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

DANIŞMAN

Dr. Öğr. Üyesi Oğuz ERDEM

KIRIKKALE - 2024



T.C.

KIRIKKALE ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**SÜRTÜNME Lİ DELME YÖNTEMİNİN İŞLEME
PARAMETRELERİNİN DENEYSEL OLARAK ARAŞTIRILMASI**

ÖMER FARUK AKSU

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

DANIŞMAN

Dr. Öğr. Üyesi Oğuz ERDEM

KIRIKKALE - 2024

Ömer Faruk AKSU tarafından hazırlanan “SÜRTÜNME Lİ DELME YÖNTEMİNİN İŞLEME PARAMETRELERİNİN DENEYSEL OLARAK ARAŞTIRILMASI” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ ile Kırıkkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Oğuz ERDEM

Makine Mühendisliği A.B.D., Kırıkkale Üniversitesi

İmza.....

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.

Başkan: Doç. Dr. Süleyman KILIÇ

Makine Mühendisliği A.B.D., Ahi Evran Üniversitesi

İmza.....

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.

Üye: Dr. Öğr. Üyesi Ali Osman ER

Makine Mühendisliği A.B.D., Kırıkkale Üniversitesi

İmza.....

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.

Tez Savunma Tarihi: 13.08.2024

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

.....

Prof. Dr. Recep ÇALIN

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

ETİK BEYANI

Kırıkkale 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.

Ömer Faruk AKSU

13.08.2024

ÖZET

SÜRTÜNMELİ DELME YÖNTEMİNİN İŞLEME PARAMETRELERİNİN DENEYSEL OLARAK ARAŞTIRILMASI

Kırıkkale Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Oğuz ERDEM

Ağustos 2024, 58 sayfa

Bu çalışmada, geleneksel olmayan bir imalat yöntemi olan sürtünmeli delme yöntemi (SDY) ile 50x50 mm ölçülerinde ve 4 mm kalınlığında Al7075 malzemesine farklı takımlarla (30°, 45°, 60° konik bölgeli takımlar), farklı ilerleme hızlarında (20, 40, 60, ve 80 mm/min) ve farklı dönme hızlarında (1800, 2400, 3000, 3600 rpm) dönme hızlarında delikler delinmiş ve ardından ovalama kılavuzu ile M8 diş açılmıştır. Bu numuneler çekme ve mikro sertlik testlerine tabii tutulmuştur. Yapılan deneyler sonucunda, dönme hızı arttıkça mikro sertlik değeri, çekme kuvveti ve kopma mukavemeti değerlerinin azaldığı görülmüştür. 60 ve 80 mm/min ilerleme hızlarında benzer mikro sertlik değeri, çekme kuvveti ve kopma mukavemeti değerleri elde edilmiştir. En yüksek mikro sertlik değeri, çekme kuvveti ve kopma mukavemeti değerleri 40 mm/min ilerleme hızında elde edilirken en düşük mikro sertlik değeri, çekme kuvveti ve kopma mukavemeti değerleri 20 mm/min ilerleme hızında elde edilmiştir. Tüm deneyler göz önüne alındığında en yüksek mikro sertlik değeri, çekme kuvveti ve kopma mukavemeti 45° konik bölgeli takımda 40 mm/min ilerleme hızında ve 1800 rpm dönme hızında elde edilmiştir. En düşük mikro sertlik değeri, çekme kuvveti ve kopma mukavemeti ise 60° konik bölgeli takımda 20 mm/min ilerleme hızında ve 3600 rpm dönme hızında elde edilmiştir.

Anahtar kelimeler: Sürtünmeli delme yöntemi, akışlı delme, vida dişi sıyırma testi, mikro sertlik.

ABSTRACT

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF THE MACHINING PARAMETERS OF THE FRICTION DRILLING METHOD

Kırıkkale University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Mechanical Engineering, Master's Thesis

Supervisor: Asst. Prof. Oğuz ERDEM

August 2024, 58 pages

In this study, M8 holes were drilled into Al7075 material with dimensions of 50x50 mm and a thickness of 4 mm using the friction drilling method (FDM), an unconventional manufacturing method. Different tools with conical zones of 30°, 45°, and 60° were used. Various feed rates (20, 40, 60, and 80 mm/min) and rotation speeds (1800, 2400, 3000, 3600 rpm) were applied. Subsequently, thread tapping was performed using a tapping guide. The samples were subjected to tensile and microhardness tests. The experimental results showed that as the rotation speed increased, the microhardness value, tensile strength, and breaking strength decreased. Similar microhardness values, tensile strength, and breaking strength were obtained at feed rates of 60 and 80 mm/min. The highest microhardness value, tensile strength, and breaking strength were achieved at a feed rate of 40 mm/min. The lowest values were obtained at a feed rate of 20 mm/min. Considering all the experiments, the highest microhardness value, tensile strength, and breaking strength were obtained with the 45° conical zone tool at a feed rate of 40 mm/min and a rotation speed of 1800 rpm. The lowest values were observed with the 60° conical zone tool at a feed rate of 20 mm/min and a rotation speed of 3600 rpm.

Key words: Friction drilling method, flow drilling, screw thread stripping test, micro hardness.

TEŞEKKÜR

Tez çalışmalarım boyunca değerli desteklerini esirgemeyen saygıdeğer danışman hocam sayın Dr. Öğr. Üyesi Oğuz ERDEM'e, çekme ve mikro sertlik testlerinde desteklerini ve tecrübelerini benimle paylaşan sayın Prof. Dr. İbrahim UZUN ve sayın Prof. Dr. Recep ÇALIN'a, deneyler boyunca her konuda desteklerini esirgemeyen sayın Sedat EMİN'e ve Yavuz AĞAÇ'a, bugüne kadar hayatımın her alanında her türlü fedakarlığı gösteren kıymetli aileme teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	XI
ABSTRACT	XII
TEŞEKKÜR.....	XIII
İÇİNDEKİLER DİZİNİ	XI
ÇİZELGELER DİZİNİ	XI
ŞEKİLLER DİZİNİ	XIV
SİMGELER DİZİNİ	XVII
KISALTMALAR DİZİNİ.....	XVIII
1.GİRİŞ.....	1
1.1 Literatür Araştırması	1
2. SÜRTÜNMELİ DELME YÖNTEMİ.....	14
2.1 Sürtünmeli Takım.....	16
2.2. SDY’de Kullanılan Tezgahlar	17
2.3 İşleme Parametreleri ve Çıktı Performansları	19
2.4 Uygulama Alanları	20
2.5 SDY’nin Avantajları	22
2.6 SDY’nin Modelleme Çalışmaları.....	22
3. MATERYAL VE METOD	25
3.1 Deneylerde Kullanılan Takımlar	25
3.2 Deneylerde Kullanılan İşparçası Al7075	27

3.3 SDY'nin Uygulandığı CNC Dik İşleme Merkezi	29
3.4 Deney Tasarımı	30
3.5 Vida Sıyırma Testleri	33
3.6 Mikro Sertlik Ölçümleri	35
3.7 Kovan Yapılarının Görsel Muayenesi	37
4. DENEY SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ	38
4.1 Sıyırma Testi Sonuçları	38
4.1.1 Dönme Hızının Çekme Kuvveti ve Kopma Mukavemetine Etkisi	40
4.1.2 İlerleme Hızının Çekme Kuvveti ve Kopma Mukavemetine Etkisi	41
4.1.3 Konik Bölge Açısının Çekme Kuvveti ve Kopma Mukavemetine Etkisi.....	42
4.2 Mikrosertlik Testi Sonuçları.....	43
4.2.1 Dönme Hızının Sertlik Ölçüm Sonuçlarına Etkisi	45
4.2.2 İlerleme Hızının Sertlik Ölçüm Sonuçlarına Etkisi.....	45
4.2.3 Konik Bölge Açısının Sertlik Ölçüm Sonuçlarına Etkisi	45
4.3. Kovan Yapılarının Görsel Muayene Sonuçları	46
4.3.1. 30 Derece Takımla Oluşturulan Kovan Yapıları.....	46
4.3.2. 45 Derece Takımla Oluşturulan Kovan Yapıları.....	47
4.3.3. 60 Derece Takımla Oluşturulan Kovan Yapıları.....	48
5. SONUÇLAR	49
KAYNAKLAR.....	51
ÖZGEÇMİŞ.....	58

ÇİZELGELER DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
Çizelge 3.1 Tungsten karbür malzemesinin mekanik özellikleri.....	25
Çizelge 3.2 Al7075 malzemesinin mekanik özellikleri	28
Çizelge 3.3 Al7075 malzemesinin fiziksel özellikleri	29
Çizelge 3.4 İşleme parametreleriyle oluşturulan deney tipleri	31

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 2.1. SDY'nin işleme adımlarının şematik gösterimi	14
Şekil 2.2 SDY ile oluşturulan kovan yapısı	15
Şekil 2.3 SDY uygulanmasında istenmeyen taç yaprak oluşumu	15
Şekil 2.4 Tungsten karbür matkap ucu örneği	16
Şekil 2.5 SDY matkap ucunun temel bölümleri: a) shaft bölgesi, b) omuz bölgesi, c) silindirik bölge, d) konik bölge ve e) merkez bölge	17
Şekil 2.6. SDY uygulanabildiği tezgah (WIESSER marka MV1000 3 eksenli CNC dik işleme merkezi) örneği	18
Şekil 2.7 SDY için özel üretilmiş tezgah: a) Weber marka Robot destekli vidalama sistemi RSF25 görseli ve b) SDY uygulaması	18
Şekil 2.8 Oluşturulan pul yapısı sayesinde sızdırmazlık elde edilen borularda SDY'nin uygulaması	20
Şekil 2.9 Otomotiv endüstrisinde iki farklı ince cidarlı malzemenin birleştirilmesi	21
Şekil 2.10 İki farklı boru ve profilin birleştirilmesi	21
Şekil 2.11 Boru veya profillerin montajı	21
Şekil 2.12 SDY için geliştirilen SEA modelinde işparçası sıcaklık dağılımı	23
Şekil 2.13 Deneysel ve sayısal sonuçlarının grafikleri: a) İtme kuvveti-işleme süresi, b) Tork-işleme süresi	23
Şekil 3.1 Deneylerde kullanılan takımların işlendiği tezgah ANCA MX7 LINEAR	25
Şekil 3.2 Takımların işlenmesi sırasındaki görsel	26

Şekil 3.3 Konik bölgeli takımların boyutları: a) 30°, b) 45° ve c) 60°	27
Şekil 3.4 Üretilmiş olan konik bölgeli takımlar	27
Şekil 3.5 İşparçası boyutları	28
Şekil 3.6 İşparçalarının dilimlendiği giyotin pres	28
Şekil 3.7 Deneylerde kullanılan tezgah MAZAK VARIAXIS 200 görseli	29
Şekil 3.8 M8 ovalama kılavuzu	30
Şekil 3.9 Deneylerin uygulama sırasındaki görseli	32
Şekil 3.10 SDY ile delinmiş M8 vida dişi çekilmiş deney numuneleri	33
Şekil 3.11 Çekme testinde kullanılan INSTRON 8516 cihazı	33
Şekil 3.12 Sıyırma testleri için kullanılan 165mm uzunluğundaki M8 gijonlar	34
Şekil 3.13 INSTRON cihazının çenesi (soldaki) ve imal edilen çene (sağdaki)	34
Şekil 3.14 Galileo Durometria marka, Vickers HV1 OD mikro sertlik ölçüm cihazı	35
Şekil 3.15 Köşegen uzunluklarının optik mikroskopla belirlenme	36
Şekil 3.16 Mikro sertlik ölçümleri için tam ortadan ikiye kesilmiş dişsiz numune	36
Şekil 4.1 30 derece konik bölgeli takım için a) çekme kuvveti (kN) ve b) kopma mukavemeti (MPa) değerleri	38
Şekil 4.2 45 derece konik bölgeli takım için a) çekme kuvveti (kN) ve b) kopma mukavemeti (MPa) değerleri	39
Şekil 4.3 60 derece konik bölgeli takım için a) çekme kuvveti (kN) ve b) kopma mukavemeti (MPa) değerleri	40
Şekil 4.4 30 derece konik bölgeli takım için 1800 rpm dönme hızında ve farklı ilerleme hızlarındaki a) çekme kuvveti (kN), b) kopma mukavemeti (MPa) değerleri	41
Şekil 4.5 45 derece konik bölgeli takım için 1800 rpm dönme hızında ve farklı ilerleme hızlarındaki a) çekme kuvveti (kN), b) kopma mukavemeti (MPa) değerleri	41

Şekil 4.6 60 derece konik bölgeli takım için 1800 rpm dönme hızında ve farklı ilerleme hızlarındaki a) çekme kuvveti (kN), b) kopma mukavemeti (MPa) değerleri	42
Şekil 4.7 Farklı konik bölgeli takımların farklı deney koşullarındaki a) çekme kuvveti değerleri, b) kopma mukavemeti değerleri	43
Şekil 4.8 Sertlik ölçüm sonuçları a) 30 derece konik bölgeli takım, b) 45 derece konik bölgeli takım ve c) 60 derece konik bölgeli takım	44
Şekil 4.9 Farklı konik bölgeli takımların farklı deney koşullarındaki sertlik ölçüm sonuçları	45
Şekil 4.10 30 derece takımla farklı deney koşullarında oluşturulmuş kovan yapıları: a) D1, b) D2, c) D3, d) D4, e) D5, f) D6, g) D7, h) D8, i) D9, j) D10, k) D11, l) D12, m) D13, n) D14, o) D15 ve p) D16.....	46
Şekil 4.11 45 derece takımla farklı deney koşullarında oluşturulmuş kovan yapıları: a) D1, b) D2, c) D3, d) D4, e) D5, f) D6, g) D7, h) D8, i) D9, j) D10, k) D11, l) D12, m) D13, n) D14, o) D15 ve p) D16.....	47
Şekil 4.12 45 derece takımla farklı deney koşullarında oluşturulmuş kovan yapıları: a) D1, b) D2, c) D3, d) D4, e) D5, f) D6, g) D7, h) D8, i) D9, j) D10, k) D11, l) D12, m) D13, n) D14, o) D15 ve p) D16.....	48

SİMGELER DİZİNİ

C : Celsius

° : Derece

% : Yüzde

kN : Kilonewton

MPa : Megapaskal

Fm : Çekme Kuvveti

Rm : Kopma Mukavemeti

Al : Alüminyum

C : Karbon

Cr : Krom

Cu : Bakır

Mg : Magnezyum

Mn : Mangan

Ni : Nikel

S : Kükürt

Si : Silisyum

T : Titanyum

V : Vanadyum

KISALTMALAR DİZİNİ

CNC : Bilgisayarlı Nümerik Kontrol

CFRP : Karbon Fiber Takviyeli Plastik

FCAR : Sürtünme Temas Alanı Oranı

HSS : Yüksek Hız Çeliği

HRV : Vickers Sertlik Değeri

KBT : Konik Bölgesi Takım

MMC : Metal Matrisli Kompozit

PVD : Fiziksel Buhar Biriktirme

RPM : Dönme Hızı (devir / dakika)

SDY : Sürtünmeli Delme Yöntemi

SEY : Sonlu Elemanlar Yöntemi

TEM : Taramalı Elektron Mikroskobu

VSD : Vickers Sertlik Değeri

WC : Tungsten Karbür

1.GİRİŞ

Talaşlı imalat, bir işparçası yüzeyinden malzeme kaldırılarak istenilen ölçü ve boyutlarda parça üretme yöntemidir. Yüzeyden kaldırılan bu malzemeye talaş adı verilir. Bu yöntemde, belirli bir kesici takım ile işparçası üzerine bir güç uygulanır ve işparçası talaş koparılarak istenilen ölçü ve geometriye getirilir. İşlenecek malzemenin özelliklerine ve şekline göre farklı talaşlı imalat yöntemi mevcuttur. Bu yöntemler: tornalama, frezeleme, delme ve taşlama olmak üzere 4 başlık altında toplanmaktadır. Düşük maliyeti, yüksek hassasiyeti ve birçok malzeme tipinin işlenebilirliği açısından oldukça avantajlıdır. Otomotiv, savunma sanayi, enerji ve medikal sektöründe yaygın olarak kullanılmaktadır.

Sürtünmeli delme yöntemi (SDY), talaşlı imalattan farklı olarak talaş kaldırmadan uygulanmaktadır. Bu yöntemde konik bir takım ile işparçasının temas bölgesinde, sürtünme sonucu meydana gelen ısının etkisiyle yumuşamış işparçasına takımın dalması ve deliğin delinmesi şeklinde meydana gelen talaşsız, temiz ve geleneksel olmayan bir imalat yöntemidir. Yöntem, termal delme ve akışlı delme olarak da bilinmektedir [1, 2].

SDY’de kullanılan takımın dönmesi ve oluşan ısının etkisiyle yumuşayan işparçası, malzemenin alt tarafına akarak bir kovan yapısı oluşturur. Bu kovan yapısına ovalama kılavuz ile dış açılarak sökülebilir bağlantılar uygulamak mümkün olmaktadır. Bu bağlantıların yüksek mukavemetli olması takımın dönme ve ilerleme hızı, takımın geometrisi, malzeme tipi ve kalınlığı gibi birçok parametreye bağlıdır [2].

1.1 Literatür Araştırması

Eliseev ve arkadaşları, SDY ile üretilen AA2024 alüminyum alaşımının mikro yapısını incelemiştir. Araştırmada taramalı elektron mikroskobu (TEM) ve mikro sertlik ölçüm cihazı kullanılmıştır. SDY’deki deformasyon, yüksek sıcaklık ve sürtünmenin gerinim kaynaklı çözünme etkisi nedeniyle tane yapısının yeniden

kristalleşmesine ve tutarsız ikinci gaz parçacıklarının çözünmesine neden olduğu bulunmuştur. Yeniden kristalize edilmiş malzemenin mikro sertliğinin arttığı gözlemlenmiştir [3].

Özek ve arkadaşları, SDY’de malzeme kalınlığının ve takım çapının, elde edilen kovan yüksekliğine (ha), kovan çeper kalınlığına (hç) ve mikro sertlik değişimine etkilerinin üzerine bir araştırma gerçekleştirmişlerdir. Deneysel çalışmalarında, koniklik açısı $\phi=36^\circ$, çapları 5, 10, 15 ve 20 mm olan tungsten karbür (WC) takımlar kullanmışlardır. Kalınlığı 2, 4, 6, 8 ve 10 mm olan St37 çeliğine SDY uygulanmıştır. Takımın devir hızı 1120 rpm ve ilerleme hızı 25 mm/min olarak ayarlanmıştır. Malzeme kalınlığı, takım çapı, kovan yüksekliği ve kovan dış çapının kovan biçimleri üzerine etkilerini araştırmışlar ve ayrıca mikro sertlikte meydana gelen değişiklikleri incelemişlerdir. En ideal kovan yüksekliğini $ha=15,30$ mm, en ideal kovan çeper kalınlığını $hç=4,25$ mm ve en yüksek mikro sertlik değerini ise 183 HV olarak elde etmişlerdir. Malzeme kalınlığı ve takım çapının kovan çeper kalınlığı ve kovan yüksekliği üzerine etkilerinin önemli olduğu, fakat mikro sertlik değerleri üzerine etkilerinin göz ardı edilebileceği kanaatine varmışlardır [4].

Nama ve arkadaşlarının çalışmasında, A6063-T6 alüminyum alaşımı işparçasının sıcaklık, delme kuvveti, kovan yüksekliği ve kovan kalınlığı üzerine işleme koşullarının ve ön delme işlemi yapıldığında delik çapının etkisi incelenmiştir. İlk olarak ön delik açılmadan delme işlemi yapmışlar ve ardından iş parçalarına farklı çaplarda ön delikler açarak sonuçları kıyaslamışlardır. İşparçasına bir ön delik açılmasının, üniform kovan kalınlığının elde edilmesine yardımcı olduğu ve işlemi gerçekleştirmek için gereken ısı ve kuvveti azalttığını belirtmişlerdir [5].

Dehghan ve arkadaşlarının çalışmasında, AISI304, Ti-6Al-4V ve Inconel718 gibi işlenmesi zor malzemelere SDY uygulanmıştır. Deneysel çalışmalarında işparçası sıcaklık değerini, takım itme kuvvetini ve tork değerlerini ölçmüşlerdir. İşparçası ve takım aşınmasının mikro yapısal değişikliklerini de analiz ederek bunların işparçası sıcaklığı, takım itme kuvveti ve tork değerleri arasındaki ilişkiyi araştırmışlardır. Ayrıca, SDY için işparçası ile takım ara yüzündeki sürtünmenin işparçası sıcaklığını ne şekilde etkilediği ve kovan oluşumunun anlaşılması üzerine tespitler yapmışlardır. Açılan delik sayısının artmasıyla kovan şeklini

kalitesinin düştüğünü tespit etmişlerdir. İşparçası malzemesinin ısı iletkenliğinin kovan oluşum kalitesi üzerinde önemli etkilerinin olduğunu tespit etmişlerdir. Deneysel çalışmaların sonunda, Inconel718'in SDY'de daha iyi kovan oluşumu gösterdiği ve takım aşınmasını azalttığını belirlemişlerdir. Maksimum takım aşınmasının, sıcaklığın en üst noktaya ulaştığı konik bölgede oluştuğunu tespit etmişlerdir [6].

Miller ve arkadaşlarının çalışmasında, alüminyum ve magnezyum alaşımları kullanılarak SDY'de radyal yırtılmalar ve taç yaprağı oluşumları incelenmiştir. Düzgün bir kovan yapısı oluşturmak için çalışmalarında yüksek devir hızı ve ön ısıtma kullanmışlardır. İşparçası sıcaklığının, iş mili hızının ve besleme hızının deneysel olarak ölçülen itme kuvveti, tork ve kovan şekli üzerindeki etkilerini analiz etmişlerdir Artan işparçası sıcaklığı ile itme kuvveti ve tork değerinin azaldığını ve kovan şeklinin iyileştiğini gözlemlemişlerdir [7].

Nardi ve arkadaşları, 600 MPa akma dayanımına sahip çinko kaplı çift fazlı çelikler kullanarak SDY'i deneysel olarak araştırmışlardır. İlk olarak çift fazlı çinko kaplı malzemelerin sürtünmeli delinmesiyle ilgili sorunları ve mevcut yöntemlerin sınırlamalarına açıklık getirmişlerdir. Yan koruyucu bir soy gazın tanıtılmasına dayanan yeni bir yöntemle bu sorun ve sınırlamaların aşılmasını amaçlamışlardır. Bu yeni koşul altında, SDY uygulamışlardır. Sonuç olarak, farklı dönüş hızları ve ilerleme hızlarında kontrollü şartlar altında tamamen hatasız kovan yapıları elde etmişlerdir [8].

Lee ve arkadaşları, yüksek süneklik, düşük ısı iletkenlik ve yüksek sertliğe sahip olduğu bilinen AISI304 paslanmaz çelikte SDY ile delik açmak için kaplamalı ve kaplamasız tungsten karbür takımlar kullanmışlardır. TiAlN ve AlCrN malzemeleri fiziksel buhar biriktirme (PVD) yöntemiyle takım yüzeyine kaplanmış takımları kullanarak, farklı mil hızlarında yapılan delme işlemleriyle takım performanslarını incelemişlerdir. Takım ile yüzey sıcaklığı arasındaki ilişki, işleme sırasındaki takım aşınması ve eksenel itme kuvvetini de araştırmışlardır. Deneysel sonuçlardan, kaplamanın yağlama etkisinin ve AlCrN'nin düşük termal iletkenliğinin, AlCrN kaplı takımın en yüksek yüzey sıcaklığını ürettiğini fakat, en düşük eksenel itme kuvvetini oluşturduğunu tespit etmişlerdir. Fakat, açılan delik

sayısı arttıkça kaplamalı ve kaplamasız takımlar arasındaki performans farkının azaldığını belirtmişlerdir [9].

Demir ve arkadaşları, 4 ve 6 mm kalınlığındaki Al7075-T651 alüminyum alaşımı plakalar kullanarak SDY çalışması gerçekleştirmişlerdir. Koniklik açıları: 24°, 36° ve 48°, silindirik bölge uzunlukları (h): 8, 16 ve 24 mm, çapı 8 mm olan HSS takımlar ile 1200, 1800, 2400, 3000 ve 3600 rpm devirlerinde, 20, 40, 60, 80 ve 100 mm/min ilerleme değerlerinde delikler delmişlerdir. Çalışmalarında takımın geometrisini oluşturan uç, konik, silindirik ve omuz bölgelerinin işlem üzerindeki etkileri ve meydana gelen sıcaklık değerleri ve kovan biçimi araştırılmışlardır. İşlemden başlangıç deformasyonuna takım ucunun sebep olduğu, sürtünme ısısının konik bölgenin devire ve ilerlemeye bağlı olarak arttığını tespit etmişlerdir. Ayrıca, kovadaki çatlakların konik ve silindirik bölgenin geometrisi tarafından etkilendiği, omuz çapının yetersiz olması veya takımın silindirik bölgesine ergimiş malzemenin yapışarak yığılması, pul biçiminin bozulmasına neden olduğunu belirtmişlerdir [10].

Boopathi ve arkadaşları, konik bir tungsten karbür takım kullanarak pirinç, alüminyum ve paslanmaz çelik plakalar üzerinde SDY çalışması yapmışlardır. Farklı takım dönme ve ilerleme hızları için SDY işleminde yer alan itme kuvvetlerini, takım dinamometresi yardımıyla ölçmüşlerdir. İşparçasının ısıdan etkilenen bölgelerindeki sertlik değişimlerini ve farklı hızlar için işleme esnasındaki sıcaklık dağılımlarını da ölçmüşlerdir. Açılan deliklerin mikroskopik gözlemlerini TEM kullanarak incelemişlerdir. İtme kuvvetlerinin, sabit dönme hızında ve ilerleme hızlarındaki artışlarla kademeli olarak arttığını belirtmişlerdir [11].

Demir ve arkadaşları, 4 mm kalınlığındaki AA7075-T651 alüminyum alaşımını çapı 8 mm olan yüksek hız çeliği (HSS) takımla ve St37 çeliğini ise çapı 10 mm olan tungsten karbür takımla SDY ile delmişlerdir. Takımların silindirik bölge uzunlukları 24 mm ve koniklik açıları ise 36°'dir. Takım dönme devirlerini 800, 1200, 1600, 2400, 2800, 3200, 4000 ve 4400 rpm olarak, ilerleme hızlarını ise 20, 40, 60, 80 ve 100 mm/min olarak seçmişlerdir. Pul ve kovan oluşumu sağlayan malzemenin hacimlerini ayrı ayrı tespit etmişlerdir. Değişen parametreler ile

sünek olan St37 çeliğinin kovan hacmi gevrek olan AA7075-T651 alaşımına göre daha az değişiklik gösterdiğini belirtmişlerdir [12].

Baraheni ve arkadaşları, tasarladıkları özel bir aparatla SDY’de, takıma ultrasonik titreşim uygulayarak çıktı performanslarına etkilerini incelemişler ve geleneksel SDY ile kıyaslamışlardır. Çalışmalarında, sürtünmeli delme ve ultrasonik destekli sürtünmeli delme işlemlerindeki eksenel kuvvet ve yüzey sertliği değerlerini ölçmüşlerdir. Daha yüksek dönüş hızı ve daha düşük ilerleme hızında daha düşük eksenel kuvvet ve daha yüksek yüzey sertliği gözlemlenmiştir. Ayrıca, ultrasonik titreşim, yüzeyin daha düşük eksenel kuvvetle daha sert olmasına neden olduğunu keşfetmişlerdir. Torna tezgahında dönme hızının artırılması ve ilerleme hızının düşürülmesinin, ısıl etki bölgesinde eksenel kuvvet azalmasına ve yüzey sertliğinin artmasına neden olduğunu tespit etmişlerdir. Sonlu elemanlar yöntemi (SEY) kullanılarak yapılan hesaplamalarda, ultrasonik destekli sürtünmeli delmede geleneksel duruma göre daha düşük eksenel kuvvetin oluştuğunu gözlemlenmiştir. Elde edilen sayısal ve deneysel sonuçların uyum içinde olduğunu belirtmişlerdir [13].

Hamzawy ve arkadaşları, Al6082 ve Al7075 alüminyum alaşımlarını SDY’de farklı işleme parametreleri kullanarak delme işlemleri esnasında takım-işparçası arayüzündeki sıcaklık değişimlerini bir kızılötesi kamera ve dört termokupl aracılığıyla kaydetmişlerdir. Kamera ve sensörleri sürtünmeli delme bölgesinin yakınında farklı konumlarda kullanmışlardır. Delinen alüminyum saclarda kovan ve pul oluşumu sırasında ölçülen minimum sıcaklığın 220 °C ve maksimum sıcaklığın ise 380 °C olduğunu belirtmişlerdir. Hem dönüş hızlarının hem de takım koni açılarının artmasıyla takım ile iş-parçası ara yüzeyindeki sıcaklığın arttığını tespit etmişlerdir. Ayrıca, dönme hızlarının artmasıyla açılan deliklerin yüzey pürüzlülük değerlerinin de arttığını bildirmişlerdir [14].

Somasundaram ve arkadaşları, Al/SiCp-MMC kompozitlerine sürtünmeli delme ile oluşturulan kovanların çekme mukavemetini ve mikro sertlik gibi mekanik özelliklerinin yanı sıra dairesellik toleransını (delik çapı doğruluğu) da incelemişlerdir. Deneysel çalışmalarında, işparçasının bileşimi, işparçası kalınlığı, dönüş hızı ve ilerleme hızı parametrelerini değiştirmişlerdir. SiCp partiküllerinin ağırlıkça (%) kompozisyonundaki artışın çekme mukavemetini ve

sertliği arttırdığını tespit etmişlerdir. Daha yüksek dönüş hızları ve daha yüksek ilerleme hızları, dairesellik hatasını arttırdığını ve özellikle dairesellik hatasını etkileyen en etkili parametrenin ilerleme hızı olduğunu belirtmişlerdir. Levha kalınlığındaki artışın da MMC kompozitlerin delinmesindeki dairesellik hatasını arttırdığını tespit etmişlerdir [15].

Pangjundee ve arkadaşları, Ti-6Al-4V levhalar üzerinde tungsten karbür takımla farklı dönme ve ilerleme hızlarında SDY deneyleri yapmışlardır. İtme kuvvetinin ve torkun, artan dönme hızıyla ve ilerleme hızının azalmasıyla azaldığını keşfetmişlerdir. Delik yüzeyindeki deforme olmuş tanelerin işparçasının enine kesitindeki sertlik ile ilgili olduğunu belirtmişlerdir. En yüksek mikro sertlik değerini 813,2 HV olarak elde etmişlerdir [16].

Wu ve arkadaşları, SDY ile delinmiş ve ovalama ile diş açılmış Al6082-T6 alüminyum alaşımındaki vida sıyırma kuvvetini araştırılmışlardır. Sürtünmeli delme işlemlerini 2000, 3000, 3500 ve 4000 rpm olmak üzere dört farklı dönme hızı seviyesiyle gerçekleştirerek dişli deliklerin mekanik özelliklerini karşılaştırmışlardır. 3000–3500 rpm dönme hızlarıyla oluşturulmuş kovan yapısındaki dişlerin, 5,0–55 kN'luk daha yüksek yük taşıma kapasitelerine (vida sıyırma kuvveti) olanak sağlayan optimum devir hızı aralığı olduğunu tespit etmişlerdir [17].

Felinks ve arkadaşları çalışmalarında, sürtünmeli delme yönteminde AZ91 ve AlSi10Mg alaşımı plakalarda farklı parametreler kullanarak çıktı performanslarına olan etkileri incelemişlerdir. Özellikle deliklerin yuvarlaklığını iyileştirmek için azalan ilerleme hızlarının sürtünmeli delme ile delinmiş deliklerin şekli üzerindeki etkilere odaklanmışlardır. Ayrıca, işleme sıcaklığını ve iç vida dişlerinin yorulma mukavemetini de incelemişlerdir. Yüksek mukavemetli dişler için ovalama yöntemini kullanmışlardır. Son olarak, çeşitli stratejiler kullanılarak oluşturulan iç dişlerin yorulma özelliklerini değerlendirmek için sürekli yük artış testleri yapmışlardır. Üretilen deliklerde parametre değişiminin hem AZ91 malzemesinde hem de AlSi10Mg malzemesinde %2 gibi önemsiz bir farkın oluştuğunu belirtmişlerdir [18].

Hynes ve arkadaşları, ince bakır sacda (Cu_2C) kovan oluşumunun kalitesini sayısal olarak analiz etmek ve iş parçasındaki sıcaklık dağılımını, itme kuvvetini

ve torku tahmin etmek için SDY deneyleri gerçekleştirmişlerdir. Yapılan hesaplamalar ve deneysel sonuçları kıyaslandıklarında, sayısal sonuçlar ile deneysel sonuçlar arasında yüksek derecede yakınlık olduğunu tespit etmişlerdir. İtme kuvveti ve tork tahmininde minimum %1 ve maksimum %6 sapma değerleri elde etmişlerdir [19].

Alphonse ve arkadaşları, SDY'de AZ31B magnezyum alaşımı için maksimum kovan yüksekliğini üretebilecek optimum ölçülerdeki takım tasarlamayı amaçlamışlardır. Deneylerde plazma nitrüleme, sıvı nitrüleme ve fiziksel buhar biriktirme (PVD) kaplama yöntemiyle Titanyum Nitrür (TiN) kaplama olmak üzere farklı işlemler uygulamışlardır. Deney sonuçlarından 3,3 mm maksimum kovan yüksekliği ve 6,25 mm kovan çapı için 0,05° koniklik açısına sahip olan ve ayrıca endüstri için en uygun olan takımın, PVD yöntemiyle kaplanmış TiN kaplı takımın olduğunu tespit etmişlerdir [20].

Dhanapal ve arkadaşları, SDY'de içi boş yapı çelikleri için kesit geometrisi, vida deliği delme tekniği, kılavuz çekme tekniği ve birim uzunluk başına düşen vida dişi sayısı olmak üzere 4 farklı parametrenin etkisini incelemişlerdir. Ele alınan tüm bağlantıların vida deliği çapını 19,05 mm olarak ayarlamışlardır. 75°i kesme ve 75°i çekme olmak üzere toplam 150 deney yapmışlardır. Çalışmalarının sonuçlarından, yükleme kapasitesinin %95'e kadar arttırılabileceği ve SDY ile yapılmış bağlantıların kesme davranışı üzerine önemli bir etkisi olmadığına ulaşmışlardır [21].

Mutalib ve arkadaşları, düşük karbonlu çelik üzerinde tungsten karbür takım kullanarak SDY'de takım aşınma özelliklerini deneysel olarak incelemişlerdir. Takım yüzeyinde bulunan elementi analiz etmek için enerji dağılımlı spektrometri kullanmışlardır. Aşınma gözlemini ise optik mikroskop ve TEM kullanarak gerçekleştirmişlerdir. Sonuç olarak konik tungsten karbür takımının dayanıklı olduğunu ve 1000 deliğe kadar kullanılabileceğini tespit etmişlerdir. Takım şeklindeki ve ağırlığındaki değişikliklerin takımın merkezinde ve konik bölgelerde daha yoğun olduğunu belirtmişlerdir. Dairesel kanallar ile aynı bölgelerde abrazif aşınmanın ortaya çıktığını gözlemlemişlerdir. Oksidasyon aşınmasının takımın yüzeyinde koyu yanık bir görünüm ile ortaya çıktığını bildirmişlerdir [22].

Kumar ve arkadaşı, SDY ile ilgili derleme bir makale hazırlamışlardır. Çalışmalarında, SDY'nin işleme fiziğini ve uygulama alanlarını tanıtarak ve çeşitli birleştirme metotlarıyla kıyaslamışlardır. Ayrıca, SDY'de kullanılan takımları tanıtarak farklı malzemelerdeki (paslanmaz çelik, alüminyum alaşımları, magnezyum alaşımları, titanyum alaşımları ve süper alaşımlar) uygulamalarını anlatmışlardır. Sürtünme ısısının etkisiyle delinmiş bölgedeki sertlik değerinin arttığını, bu durumda da mukavemetin arttırdığını belirtmişlerdir. Yine, işparçasının ön ısıtılmasının ve yüksek dönme hızı sayesinde, itme kuvveti ve tork gereksinimi azaltabileceğini bildirmişlerdir [23].

Raju ve arkadaşları, SDY'de oluşan yüksek sıcaklıkların, tork, gerilim ve geriniminin ölçümlerinin zor olması sebebiyle SEY (DEFORM-3D) kullanarak simülasyonunu gerçekleştirmişlerdir. Farklı işleme parametreleriyle yapılan deney ve simülasyon sonuçlarını karşılaştırmışlardır. İlerleme ve dönme hızı arttığında gerilimin azaldığını, gerinimin ise arttığını tespit etmişlerdir. Ayrıca, SEY ile tahminlerin başarılı bir şekilde gerçekleştiğini belirtmişlerdir [24].

Kerkhofs ve arkadaşları, SDY'de AISI304 paslanmaz çelik borulara, PVD yöntemiyle kaplanmış (TiAlN) karbür takımlar kullanarak takım performansları üzerine deneysel bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Kaplamasız karbür takım 5.000-15.000 arası delik delebilenken, PVD yöntemiyle kaplanmış (TiAlN) karbür takım 100.000-160.000 arası delik delebildiğini tespit etmişlerdir. Ayrıca, işparçasının işleme esnasında takıma yapışmasının, en önemli deformasyon nedeni olduğunu belirtmişlerdir [25].

Altwater ve arkadaşları, iki farklı malzemeden üretilmiş sacların (AlMg4.5Mn0.7 ve ZStE340) birleştirilmesi için farklı bir takımla SDY uygulamasıdır. Çalışmada kullanılan takımın alt kısmı ısı üretmek için düz bir yapıdayken üst kısmı dış açması ve birleştirme işlemi için dişli bir yapıdadır. Tasarlanan bu takım sayesinde tek bir operasyon ile işparçasına delik delinip, dış açılıp iki sac birleştirilmiştir. Ayrıca, SDY için üretilmiş Weber RSF 25 robot destekli sürtünmeli delme-vidalama sistemini tasarlayıp kullanmış ve yüksek mukavemet değerleri için optimum parametreleri araştırmışlardır. Tek seferde delme ve montaj işlemi uyguladıkları için, daha düşük dönme ve ilerleme hızlarında daha

düşük sıcaklıklara ulaşıldığından daha uyumlu dış yapısı ve birleştirme işleminin gerçekleştiği belirtilmiştir [26].

Krasauskas, sıcak haddelenmiş S235 çeliği, AISI4301 paslanmaz çelik ve Al5652 alüminyum alaşımı malzemelerine SDY ile delik delmiş ve malzemelerin mekanik özelliklerinin, delme parametrelerinin ve işparçası kalınlığının maksimum delme kuvveti ve tork değeri üzerindeki etkisini değerlendirmiştir. Bu değerlendirme için istatistiksel beş değişkenli doğrusal regresyon analizi yapmıştır. Düşük dönme hızında, yüksek delme kuvveti gerektiğini tespit etse de delme kuvvetinin önemli ölçüde işparçası kalınlığına bağlı olduğunu gözlemlemiştir. Ayrıca, ilerleme hızı arttıkça daha büyük aksel kuvvete neden olduğunu belirtmiştir [27].

Kanagaraju ve arkadaşları, Alüminyum 6061-T6 alaşımına yüksek hız çeliğinden (HSS) yapılma takım ile SDY’de delikler delmiştir. Farklı parametrelerle yaptıkları deneylerde CNC dik işleme merkezi kullanmış ve tezgah üzerine binen itme kuvveti ve torku araştırmışlardır. Yapılan deneylerin sonuçlarını karşılaştırarak ve kesme parametrelerinin optimizasyonu için Taguchi yöntemini kullanılmışlardır. İtme kuvveti ile kesme parametreleri arasındaki ilişki çok değişkenli doğrusal regresyonla hesaplanmış ve deneysel sonuçlarla kıyaslanmışlardır [28].

Fernandez ve arkadaşları, farklı kalınlıktaki östenitik paslanmaz çeliklerin farklı dönme ve ilerleme hızları kullanarak SDY deneyleri yapmışlardır. Oluşan itme kuvveti ve tork değerlerinin yanı sıra delik toleransları, delik çapının doğruluğu ve farklı derinlikteki kovan kalınlığını da araştırmışlardır. Kovan yapısının üst tarafında kalınlığın önemli ölçüde değişmediğini, alt tarafında ise kovan kalınlığı ilerleme hızından büyük ölçüde etkilendiğini tespit etmişlerdir. Kovan kalınlığının ilerleme hızıyla doğru orantılı olarak arttığını gözlemlemiştir. Kovan yüksekliğinin ise doğrudan işparçası kalınlığına bağlı olduğunu tespit etmişlerdir. Ayrıca, yüksek dönme hızı ve düşük ilerleme hızında dolaylı olarak daha yüksek ısı açığa çıktığından ve işparçası-takım arasındaki temas süresi artmasından ötürü daha fazla malzeme akışı olduğunu gözlemlemiştir [29].

Xing Ge ve arkadaşları, farklı iki malzemeyi birleştirmek için SDY kullanmıştır. Karbon fiber takviyeli plastik (CFRP) ve 6061-T6 alüminyum alaşımı (AA6061-

T6) SDY'de delikler delerek birleştirmişlerdir. Deneylerde farklı kesme parametreleri kullanmış ve maksimum kesme mukavemeti değerini araştırmışlardır. Yapılan deneylerden, yüksek dönme hızı ve düşük ilerleme hızında maksimum kesme mukavemetine değerini (5,98 kN) elde etmişlerdir [30].

Aslan ve arkadaşları, 2,5 mm kalınlığındaki AA5182-O ve 1,4 mm kalınlığındaki DP600 malzemesinin SDY birleştirilmesinde delme parametrelerinin birleştirme kalitesi üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Farklı delme parametreleri kullanarak kopma mukavemeti, itme ve tork kuvvetleri arasındaki ilişkileri belirlemişlerdir. 600 N ve daha yüksek itme kuvvetlerinde başarılı bir şekilde kovan yapısı oluşturulduğunu gözlemlemişlerdir [31].

Wang ve arkadaşları, farklı kalınlıktaki AA6061 malzemelerinin 2 mm kalınlığındaki karbon fiber takviyeli polimer CFRP malzemesine SDY ile bağlanmasını araştırmışlardır. Yaptıkları deneylerde 1, 1,5 ve 2 mm kalınlığındaki alüminyum alaşımı (AA6061) malzemesi kullanmışlardır. Deney sonuçlarından, AA6061 malzemesinin kalınlığı çekme dayanımını önemli ölçüde etki ettiğini keşfetmişlerdir. Malzeme kalınlığı artmasıyla akan malzeme miktarının arttığını ve kovan yapısı uzayarak çekme mukavemetinin arttığını gözlemlemişlerdir [32].

Skovron ve arkadaşları, SDY kullanılarak delik açılacak malzemelere bir ön ısıtma uygulayarak kovan yapısı üzerine etkisi ve işleme süresine etkisini araştırmışlardır. Çalışmalarında Al6063 malzemesi kullanarak farklı sıcaklıklarla deneyler yapmışlardır. Uygulama için optimum parametreleri belirlemişlerdir. Deney sonuçlarından, ön ısıtma uygulanarak yapılan işlemlerde işleme süresinin %52'ye kadar düşürülebileceğini tespit etmişlerdir. Bu sayede daha düşük maliyetle daha kaliteli birleştirmelerin yapılabileceğini keşfetmişlerdir [33].

Guzanova ve arkadaşları, 0,8 mm kalınlığındaki DC04 çeliği, 0,8 mm kalınlığındaki düşük alaşımlı TL1550-220+Z çeliği ve 1 mm kalınlığındaki EN AW-6082-T6-(AlSi1MgMn) alaşımı malzemelerini kullanarak SDY ile birleştirilmesini araştırmışlardır. Çelik-alüminyum kombinasyonlarından en iyi bağlantılar oluşturulduğunu keşfetmişlerdir. Bu sonuçla, alüminyum alaşımının her zaman alt konuma yerleştirilmesi gerektiğini tespit etmişlerdir. Oluşturulan en iyi kovan yapılarının 2400 rpm ve üzeri dönme hızlarında elde edildiğini belirtmişlerdir [34].

Özkaya ve arkadaşları, AlSi10Mg malzemesine önceden ısıtılmış ($T_1=200^\circ\text{C}$) ve önceden ısıtılmamış ($T_2=20^\circ\text{C}$) takımlarla SDY uygulamışlardır. Ayrıca, yapılan deneyleri sonlu elemanlar yöntemiyle (SEY) modelleyerek analiz yapmışlar ve sonuçları karşılaştırmışlardır. Ölçülen ve simüle edilen sıcaklık, kuvvet ve tork değerlerinin uyum içerisinde olduğunu tespit etmişlerdir. Önceden ısıtılmamış takımlarda daha düşük delik kalitesinin olduğunu keşfetmişlerdir [35].

Kumar ve arkadaşı, galvaniz çelik malzemesine SDY uygulamışlar ve bu deneyi SEY ile DEFORM-3D yazılımı kullanarak simülasyonunu yapmışlardır. Simülasyonda ulaşılan maksimum sıcaklığı $T_s=709,71^\circ\text{C}$ olarak elde ederlerken deneysel çalışmada $T_d=742,12^\circ\text{C}$ olarak ölçmüşlerdir. 2400 rpm dönme hızında ve 200 mm/dak ilerleme hızında kovan yüksekliğini 5,94 mm olarak ölçerken simülasyonda 5,98 mm olarak hesaplamışlardır [36].

Ozler ve arkadaşları, AISI1010 çelik kare boru malzemesine farklı takım ve işleme parametreleriyle SDY uygulamışlardır. Çalışmalarında pul geometrisini, kovan yüksekliğini ve takım konik bölge açısını, ilerleme ve delme hızı parametrelerini değerlendirmişlerdir. Delik bölge sıcaklığının artan delme hızı ve azalan ilerleme hızıyla birlikte arttığını keşfetmişlerdir. İlerleme hızının artmasıyla kovan yüksekliğinin arttığını ve belirli bir hızdan sonra kovan geometrisinin bozulduğunu tespit etmişlerdir [37].

Somasundaram ve arkadaşları, farklı dönme ve ilerleme hızlarında alüminyum silisyum karbür metal matrisli kompozit (AlSiC-MMC) malzemelere SDY uygulayarak işparçası üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Dönme ve ilerleme hızları sabit iken SiC ağırlık yüzdesinin artmasıyla dairesel toleransı açısından delik kalitesini artırdığını keşfetmişlerdir. Plaka kalınlığı azaldıkça dairesellik toleransı açısından delik kalitesini azaldığını belirtmişlerdir [38].

Ku ve arkadaşları, SUS304 paslanmaz çelik üzerinde SDY uygulamışlardır. Deneylerini, Taguchi deneysel tasarım yöntemine dayanan L9 ortogonal dizisine göre gerçekleştirmişler ve yüzey pürüzlülüğü ile kovan uzunluğu değerlerini belirlemişlerdir. En yüksek kovan yapısı ve en düşük yüzey pürüzlülüğü göz önüne alındığında en optimum işleme parametrelerini; 30° konik bölge takımı, 100 mm/min ilerleme hızı ve 2400 rpm dönme hızında olduğunu tespit etmişlerdir [39].

Urbikain ve arkadaşları, farklı çeliklerden yapılmış kutu profillere farklı alüminyum alaşımı sacları birleştirmek için farklı delme parametreleriyle SDY uygulamışlardır. Dönme hızı arttığında takım ile işparçası arasında daha yüksek sürtünme meydana geldiği için sıcaklığın arttığını görmüşlerdir. Takım çıkışındaki sıcaklıklar tüm dönme hızlarında benzerlik gösterdiğini belirtmişlerdir. Fakat, ilerleme hızının artmasıyla takım ile işparçası arası temas süresinin azalmasından dolayı maksimum sıcaklığın azalmasına neden olduğunu keşfetmişlerdir [40].

Kaya ve arkadaşlar, ST12 malzemenin sürtünmeli delmesinde sürtünme açısı, sürtünme temas alanı oranı (FCAR), ilerleme hızı ve dönme hızı gibi delme parametrelerinin işparçası yüzey sıcaklığı, itme kuvveti ve tork değeri üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Takım olarak fiziksel buhar biriktirme (PVD) işlemiyle TiN kaplanmış tungsten karbür kullanmışlardır. Deneysel sonuçlarında, artan sürtünme açısı, ilerleme hızı ve FCAR ile itme kuvveti ve torkun kademeli olarak arttığını keşfetmişlerdir. Öte yandan delme hızı arttıkça itme kuvveti ve tork değerinin azaldığını belirtmişlerdir. Dönme hızının işparçası yüzey sıcaklığı üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu bulmuşlardır. Dönme hızı arttıkça işparçası yüzey sıcaklığının arttığını keşfetmişlerdir. Sürtünme açısının ve FCAR'ın artırılması veya azaltılmasının işparçası yüzey sıcaklığı üzerinde önemli bir etkisi olmadığı sonucuna varmışlardır [41].

Skovron ve arkadaşları, 1,5 mm ve 3 mm kalınlığındaki A15052-O saclarda farklı delme parametreleri kullanarak SDY'de yüksek mukavemet değerleri elde etmek için optimum delme parametrelerini araştırmışlardır. Deneysel SDY için DEPRAG FFS dik işleme merkezini kullanmışlardır. Yüksek dönme hızlarında yüksek sıcaklık ve düşük itme kuvveti tespit etmişlerdir. Ayrıca, işleme esnasında uygulanan itme kuvvetinin zamana göre grafiklerini oluşturup ve maksimum itme kuvvetinin takımın malzemeyle ilk temas ettiği “şekillendirme” bölümünde gerçekleştiğini belirtmişlerdir [42].

Shuqiang ve arkadaşları, SDY oluşturulan kovan yapılarının deneysel ve SEY kullanarak simülasyonunu gerçekleştirmişlerdir. Deneysel çalışmalarında 3 mm kalınlığında A365 ve A6N01 alüminyum alaşımlarını birleştirmişlerdir. SEY model çalışmasında DEFORM-3D yazılımını kullanmışlardır. Simülasyonda

sıcaklığın dönme hızıyla birlikte arttığını ve maksimum kovan uzunluğunun 2000 rpm’de oluştuğunu gözlemlemişlerdir. 2000 rpm’de oluşan kovan yüksekliğini 3,68 mm olarak ölçerlerken ve simülasyonda 0,08 mm (%2,2) hata payıyla hesaplamışlardır [43].

Su ve arkadaşları, delme parametrelerinin SDY’de etkisini görmek için AA6061-T651 alüminyum alaşımına 5,3 mm çapında tungsten karbür takımlarla delikler delmişlerdir. Dönme hızı arttıkça sürtünmeden dolayı işparçası sıcaklığının arttığını ve buna bağlı olarak da malzemenin daha çok yumuşayarak itme kuvvetini azalttığını keşfetmişlerdir. Sabit devirde ise ilerleme hızı ile itme kuvvetinin doğru orantılı olduğunu tespit etmişlerdir. Ayrıca, işparçası kalınlığının artmasıyla itme kuvvetinin de arttığını belirtmişlerdir [44].

Tunalıoğlu ve arkadaşı, 1,5 mm et kalınlığındaki AISI305L ve EN AW-6060 kutu ve boru profillere SDY ve geleneksel delik delme yöntemiyle delikler delerek sonuçları karşılaştırmışlardır. Deneylerde farklı çaplarda takımlar kullanmışlardır. SDY ile açılan deliklerde 2,5-3 kat daha fazla diş sayısı ve %50-55 oranında daha yüksek mukavemet değerleri elde edildiğini belirtmişlerdir. Geleneksel delik delme yönteminde büyük delik çaplarında gördükleri kılcal çatlakları, SDY ile açılan deliklerde görmemişlerdir [45].

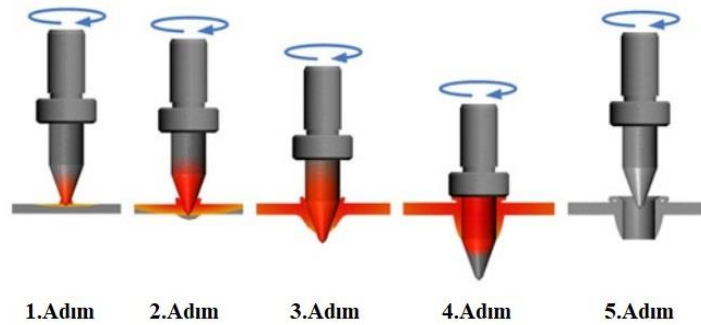
Bu çalışmada, farklı geometrilere sahip karbür takımlarla 50x50 mm ölçülerinde ve 4 mm et kalınlığındaki Al7075 alüminyum alaşımına farklı işleme parametreleriyle SDY uygulanmıştır. CNC dik işleme merkezinde farklı parametrelerle (takım ilerleme hızı ve devir hızı) delikler delinerek kovan yapısı oluşturulmuştur. Oluşturulan bu kovanların incelemeleri (kovan yüksekliği, pul oluşumu ve taç yaprak oluşumu vb.) gerçekleştirilmiştir. Oluşturulan kovanlara kılavuz yardımıyla metrik standartlarda diş çekilip vida sıyırma testleri gerçekleştirilerek mukavemet değerleri belirlenmiştir. Ayrıca, kovan yüzey yapısı incelenmiş ve delik yüzey sertliği ölçülmüştür.

2. SÜRTÜNMELİ DELME YÖNTEMİ

SDY; konik bir takım ile işparçasının temas bölgesinde, sürtünme sonucu meydana gelen ısının etkisiyle yumuşamış işparçasına takımın dalması ve deliğin delinmesi şeklinde meydana gelen talaşsız, temiz ve geleneksel olmayan bir imalat yöntemidir. Bu yöntem pratikte, termal delme ve akışlı delme olarak da bilinmektedir [1, 2].

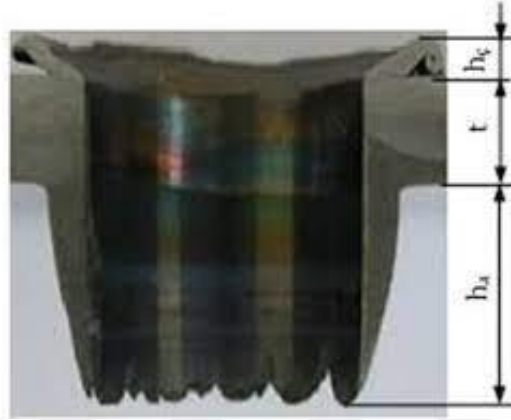
Sac metal parçaları birleştirmek için çeşitli yöntemler (cıvata-somun, perçin, kaynak veya yapıştırma) kullanılabilir. Cıvata-somun bağlama yöntemi bağlanacak parçalarda sadece bir delik delme ve vida açma işlemini gerektirmesi, ayrıca standart ve ucuz olmaları sebebiyle sökülebilir konstrüksiyonlarda en sık kullanılan bağlama yöntemidir. İnce saclarda yeterli vidalama uzunluğu sağlanamadığından ek operasyonlara (somun kaynatmak vb.) ihtiyaç duyulmaktadır. SDY kullanılarak açılan deliklerde sadece ovalama ile diş açılarak başka bir operasyona ihtiyaç duyulmadan bu sorun çözülebilmektedir [2, 46]

SDY’de işleme adımları Şekil 2.1’de sırasıyla gösterilmiştir. 1.adımda; yüksek dönme hızı ve itme kuvvetiyle matkap ucu işparçasına nüfuz eder ve sürtünme nedeniyle ısı oluşmaya başlar. 2. adımda; malzeme ısının etkisiyle yumuşar, yana ve yukarı doğru hareket etmeye başlar. 3.adımda; matkap ucunun konik bölgesi yumuşamış malzemeyi itererek aşağıya doğru ekstrüde eder. 4. adımda; matkap ucunun silindirik bölgesi kullanılarak kovan yapısı oluşturulur. 5.adımda; takım işparçasından uzaklaşır [2, 47].



Şekil 2.1. SDY'nin işleme adımlarının şematik gösterimi [2, 48]

Yumuşamış parçaya takımın dalmasıyla deliğin giriş kısmına doğru akan malzeme pul oluşumunu, aşağıya doğru akan malzeme ise kovan oluşumunu sağlar. Takımın omuzu, deliğin giriş kısmına akan malzemeyi iş parçasının yüzeyine bastırır ve pul (çeper) olarak adlandırılan sızdırmazlık halkasını oluşturur. Meydana gelen kovan yüksekliği iş parçası kalınlığının yaklaşık 2 – 3 katı kadardır [60].



Şekil 2.2 SDY ile oluşturulan kovan yapısı [60]

h_a : Kovan yüksekliği

$h_ç$: Çeper yüksekliği

t : Numune kalınlığı

SDY, gevrek malzemelere uygulandığında kovanda radyal yırtılmalar meydana gelmekte ve taç yaprak oluşumu gerçekleşmektedir. Bu nedenle düzgün bir kovan yapısı oluşmaz ve iş parçasına diş açılmaz. SDY işleme parametreleri de taç yaprak oluşumuna doğrudan etki etmektedir.



Şekil 2.3 SDY uygulanmasında istenmeyen taç yaprak oluşumu [61]

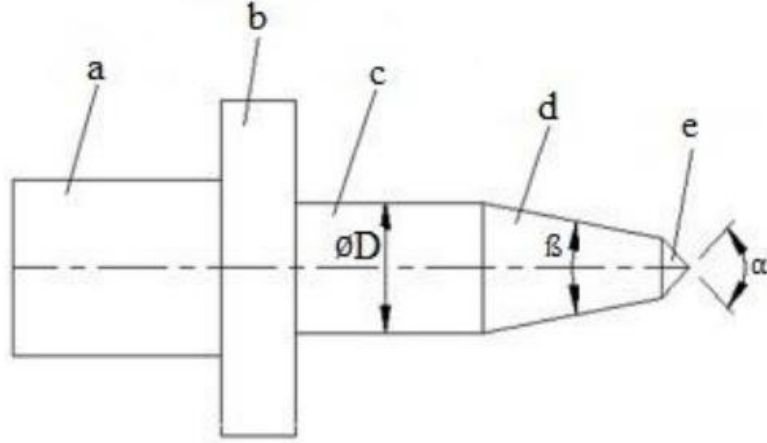
2.1 Sürtünmeli Takım

SDY'nin delme takımları kısa tip, uzun tip, kısa düz tip, uzun düz tip ve özel tip olmak üzere beş gruptan oluşmaktadır. Kısa veya uzun tip takım kullanımına, işparçasının et kalınlığına bakılarak karar verilir. Kısa tip ve uzun tip takımların kullanıldığı delme işlemlerinde, ilerleme yönünün tersinde ve delinen deliğin üzerinde bir göbek (pul) oluşur. Düz tip takımlarda bulunan kesici bir ağız sayesinde işlem sonunda oluşan pul ortadan kaldırır ve böylece düz bir yüzey elde edilmiş olunur [49, 50].

SDY, 1923 yılında Jan Claude de Valliere tarafından geleneksel delme sürecine alternatif olarak geliştirilmiş olmasına rağmen pratik olarak uygulamaları ancak altmış yıl sonra tungsten karbür (WC) matkap ucu (Şekil 2.4) imalatındaki gelişmeler ile yaygınlaşmıştır [51]. SDY'de operasyon sıcaklığı geleneksel delme operasyonlarına nazaran oldukça yüksek değerlere ulaştığından (600-700°C), kullanılan takımın bu sıcaklıklarda fiziksel yapısını korunması beklenmektedir [1]. Pratikte genellikle düşük karbonlu çeliklere Tungsten karbür takımla çok sayıda SDY ile delik delme uygulamaları görülmektedir [52]. SDY'deki matkap uçlarının uzun ömürlü olmaları ve seri üretime olanak sağlamaları özellikle otomotiv ve inşaat sektörlerinde kullanımını avantajlı hale getirmiştir [53]. Şekil 2.5'te bir SDY takımının temel bölümleri ele alınmıştır.



Şekil 2.4 Tungsten karbür matkap ucu örneği [54]



Şekil 2.5 SDY matkap ucunun temel bölümleri: a) şaft bölgesi, b) omuz bölgesi, c) silindirik bölge, d) konik bölge ve e) merkez bölge [50]

Şekil 2.5 incelendiğinde, bir SDY takımı için;

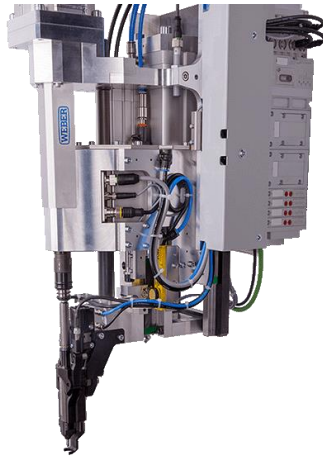
- a) Şaft bölgesi, matkap ucunun tutucu tarafından kavranan bölgesidir [52].
- b) Omuz bölgesi, takımın sürtünmeli delme işlemi sırasında yukarı doğru akan yumuşamış metali işparçası yüzeyine bastırmakta ve pul şeklinde sızdırmazlık halkası oluşturmaktadır. Bu sebepten omuz çapı silindirik bölgenin çapından büyük olmalıdır [52].
- c) Silindirik bölge, istenilen boyutlarda kovan yapısını oluşturmayı sağlamaktadır [52].
- d) Konik bölge, ısı üretmek için işparçasına sürtünmekte ve ısınan malzemenin yan tarafa itilmesini sağlamaktadır [52, 55].
- e) Merkez bölge, delme başlangıcında ısı ve kuvvet üretmesini sağlamaktadır. Ayrıca, proses başlangıcında merkezleme sağlamaktadır [52].

2.2. SDY’de Kullanılan Tezgahlar

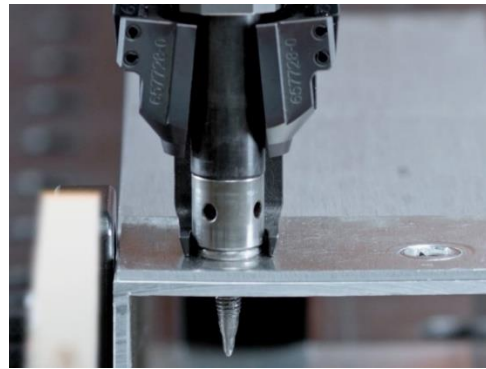
SDY, dönme ve ilerleme hızının kontrol edilebildiği tüm dik işleme merkezlerinde uygulanabilmektedir. SDY ile 2 farklı sac malzemeyi birleştirmek için özel olarak üretilmiş tezgahlar da bulunmaktadır (Şekil 2.6 ve Şekil 2.7).



Şekil 2.6. SDY uygulanabildiği tezgah (WIESSER marka MV1000 3 eksenli CNC dik işleme merkezi) örneği



a)



b)

Şekil 2.7 SDY için özel üretilmiş tezgah: a) Weber marka Robot destekli vidalama sistemi RSF25 görseli ve b) SDY uygulaması

2.3 İşleme Parametreleri ve Çıktı Performansları

İşparçasının malzemesi, işparçasının kalınlığı, takım konik bölge açısı, dönme hızı ve ilerleme hızı SDY'de çıktı performanslarını doğrudan etkilemektedir. Gevrek malzemelerde taç yaprağı oluşumu gözlenirken sünek malzemelerde düzgün bir kovan yapısı oluşmaktadır. Normal bir sürtünmeli delme işleminde işparçası sıcaklığı 600 °C iken, delme takımının sıcaklığı 650 ila 700 °C arasında değişmektedir [49]. Malzeme kalınlığının delik çapına oranı (t/d), oluşan kovanın biçimi ve yüksekliği için önemli bir parametredir. Bu oranın artmasıyla kovan oluşumunu sağlayan malzeme miktarı artar ve düzgün kovan oluşumu gerçekleşir. Fakat, t/d oranının azalmasıyla oluşan kovanlarda radyal yırtılmalar meydana gelerek taç yaprağı oluşumları gerçekleşmektedir. Gevrek malzemelerde de taç yaprağı oluşumu gerçekleşir [50].

Dönme hızının artışı ile kovanın biçimi bozulur, işparçasının yüzey sıcaklığı ve delik çevresinin sertliği artar, yüksek dönme hızlarında taç yaprağı oluşumu gözlenebilir. İlerleme hızının artışı ile işlem süresi azalır, eksensel itme kuvveti, dönme momenti, harcanan güç miktarı artar. İlerleme oranının çok yüksek veya çok düşük olması durumunda malzemenin akması için gerekli olan ısı oluşmaz [56].

Eksenel kuvvet; işparçası kalınlığı, matkap çapı, dönme ve ilerleme hızı ile ilişkilidir. Malzeme kalınlığı ve matkap çapı arttıkça itme kuvveti artmaktadır. Düşük dönme hızında yüksek sıcaklıklara ulaşamadığından eksensel kuvvet artmakta, ilerleme hızının azalmasıyla işparçası daha yüksek sıcaklığa ulaştığından eksensel kuvvet azalmaktadır. Yüksek eksensel kuvvetin oluşması takım ömrünü azaltmaktadır. SDY'nin uygulanması esnasında gerekli olan güç, dönme hızıyla doğrudan ilişkilidir. Dönme hızı arttıkça işparçası sıcaklığı arttığı için malzeme daha çok yumuşar ve gerekli olan güç azalır [50, 56].

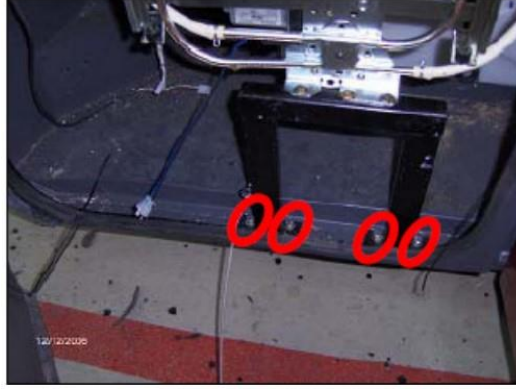
2.4 Uygulama Alanları

SDY metal matrisli kompozit plakalar, çift fazlı çelikler, galvaniz kaplı çelikler, paslanmaz çelikler, alüminyum alaşımlar, magnezyum alaşımları, titanyum, pirinç ve bakır gibi birçok malzeme gruplarına uygulanabilmektedir. Ayrıca bu yöntem:

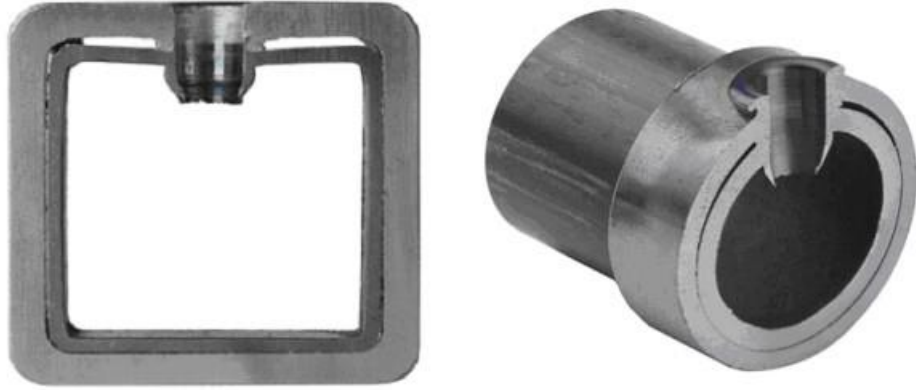
- Yüksek vida sıyırma kuvvetine ihtiyaç duyulan ve sızdırmazlık istenen ince sacların birleştirilmesinde (Şekil 2.8) [59],
- Otomotiv endüstrisinde (Şekil 2.9) [59],
- Farklı iki sac, profil veya boruların birleştirilmesinde (Şekil 2.10) [59],
- Askeri araçların, gemilerin ve kamyonların yapısal bölümlerinde,
- Havacılık ve uzay sanayinde,
- Hafif yapı elemanlarının montajında (Şekil 11) [59],
- Metal matrisli kompozit plakaların birleştirilmesinde, kullanılmakta ve giderek daha yaygın hale gelmektedir [49].



Şekil 2.8 Oluşturulan pul yapısı sayesinde sızdırmazlık elde edilen borularda SDY'nin uygulaması [59]



Şekil 2.9 Otomotiv endüstrisinde iki farklı ince cidarlı malzemenin birleştirilmesi [59]



Şekil 2 .10 İki farklı boru ve profilin birleştirilmesi [59]



Şekil 2.11 Boru veya profillerin montajı [59]

2.5 SDY'nin Avantajları

SDY, düşük et kalınlığına sahip malzemelerin birleştirilmesinde hiçbir ek operasyon ve malzemeye ihtiyaç duyulmadan uygulanabilmektedir. Geleneksel delme yöntemleri kadar yaygın olmasa da geleneksel delme yöntemlerine kıyasla birçok avantajı bulunmaktadır. Bu avantajlar aşağıda sıralanmıştır:

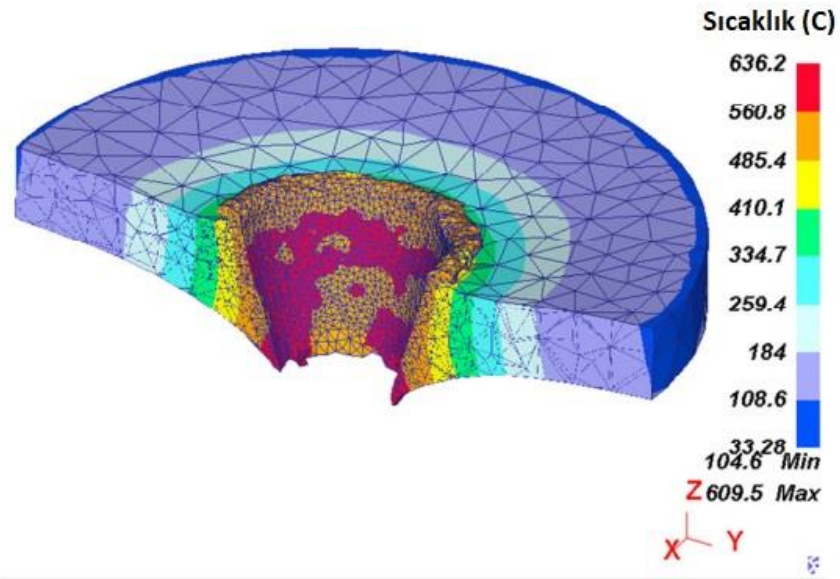
- Sac metal parçaları birleştirmek için kullanılan diğer yöntemlerle kıyaslandığında (perçinleme, somun kaynatma vb.) hiçbir ek operasyona veya malzemeye ihtiyaç duyulmadığından üretim süresi ve maliyeti düşüktür.
- SDY esnasında soğutma suyuna ihtiyaç duyulmamaktadır.
- Kullanılan takımlar daha uzun süre kullanılabilirlerdir.
- Oluşan kovan yapısı ile bağlantı uzunluğu arttığından daha yüksek mukavemete sahiptir [2].

2.6 SDY'nin Modelleme Çalışmaları

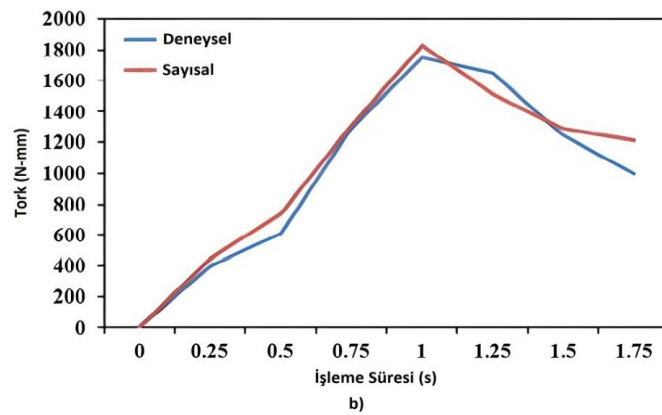
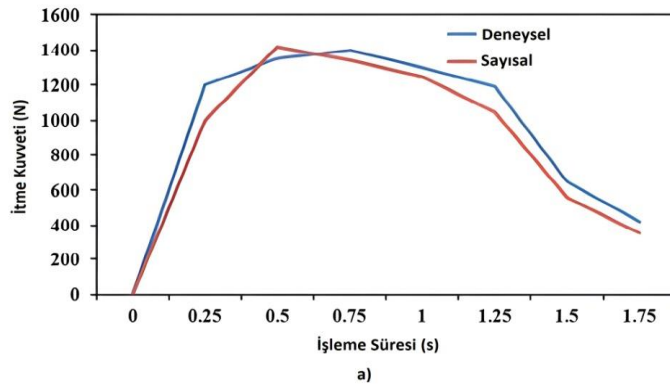
SDY'nin modellenerek simülasyonu için doğrusal olmayan ve yüksek oranda birbirine bağlı termo-mekanik denklemlerin, eş zaman adımlı algoritma ile çözülmesi gerekir. SDY gibi geleneksel olmayan delme işleminde büyük deformasyonları ve malzeme dislokasyonuna bağlı difüzyon problemlerini simüle etmek için sonlu elemanlar analizi (SEA) kullanılır (Şekil 2.12). Örneğin; eleman erozyon tekniği kullanılarak kütle ve doğrusal momentum kaybı nedeniyle hafifletilmiş kuvvet ve tork tepkileri SEA'da sıklıkla tercih edilir [2, 49].

Hynes ve Kumar çalışmalarında, ince bakır bir sacda (Cu_2C) kovan oluşumu için gerekli olan itme kuvveti (Şekil 2.13.a) ve torku (Şekil 2.13.b) analiz etmek ve ayrıca sıcaklık dağılımını tahmin etmeyi amaçlamışlardır. Bu doğrultuda, 10 mm kalınlığında bakır bir saca 5,6 mm çapında tungsten karbür takım kullanarak 2000 rpm dönme hızında ve 300 mm/min ilerleme hızında SDY ile delikler delerek, elde ettikleri veriler ile SEA modeli gerçekleştirmişlerdir. Model simülasyonu sonuçlarında işparçasının ulaştığı maksimum sıcaklık $636,2^{\circ}C$ (Şekil 2.12) olarak hesaplamışlardır. Model analiz sonuçlarıyla deneysel sonuçlar kıyaslandığında, itme

kuvveti ve tork değerleri açısından yüksek derecede tutarlılık sağlandığını belirtmişlerdir [2, 36].



şekil 2.12 SDY için geliştirilen SEA modelinde işparçası sıcaklık dağılımını [2, 36]



şekil 2.13 Deneysel ve sayısal sonuçlarının grafikleri: a) İtme kuvveti-işleme süresi, b) Tork-işleme süresi [2, 36]

Yine, Behrens ve arkadaşlarının çalışmasında, HSLA çeliğine SDY kullanarak delikler açılmıştır. Bu deliklerin 3 boyutlu olarak sonlu hacimler metoduyla SEA modeli gerçekleştirilmiştir. Deneysel sonuçlarla simülasyon sonuçları karşılaştırıldığında, sonlu hacimler yönteminin yakın sonuçlar verdiği tespit edilmiştir [2, 57]. Gopichand ve arkadaşlarının çalışmasında ise, işparçasının deformasyonunu deneysel olarak ölçmek zor olduğu için ANSYS programı kullanılarak modellenmesi amaçlanmıştır. Modelde malzeme olarak A7075-T6 işparçası, HSS ve Tungsten karbür matkap uçları kullanılarak farklı dönme ve ilerleme hızlarında, işparçalarının gerilme ve şekil değiştirme değerleri hesaplanmıştır. İşparçasının ulaştığı maksimum şekil değiştirme ve gerilme değerleri dönme hızı ve ilerleme hızına bağlı olarak karşılaştırılmıştır. İşparçasında, düşük dönme ve ilerleme hızlarında maksimum gerilmenin oluştuğu belirtilmiştir. İlerleme ve dönme hızı arttığında takım ucu deformasyonunun arttığı da bildirilmiştir [2, 58].

3. MATERYAL VE METOD

3.1 Deneylerde Kullanılan Takımlar

Deneylerde genellikle çelik malzemelerin işlenmesinde kullanılan 6-8 µm toz boyutuna ve %10 kobalt içeriğine sahip tungsten karbür takımlar kullanılmıştır. Çubuk şeklinde temin edilen bu malzemeler ANCA MX7 LINEAR kesici takım taşlama tezgahında teknik resimlere uygun ölçülerde (Şekil 3.1 ve Şekil 3.2) işlenmiştir. Takımlar, M8 ovalama kılavuzunun uygulanabilmesi için metrik tablosuna bakılarak silindirik bölge çapı 7,45mm olarak tasarlanmıştır (Şekil 3.3). Tungsten karbür malzemesinin mekanik özellikleri Çizelge 3.1 de bulunmaktadır.



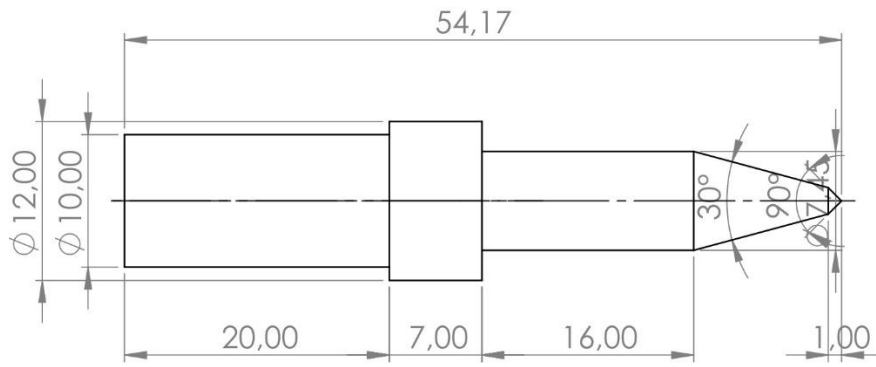
Şekil 3.1 Deneylerde kullanılan takımların işlendiği tezgah ANCA MX7 LINEAR

Çizelge 3.1 Tungsten karbür malzemesinin mekanik özellikleri

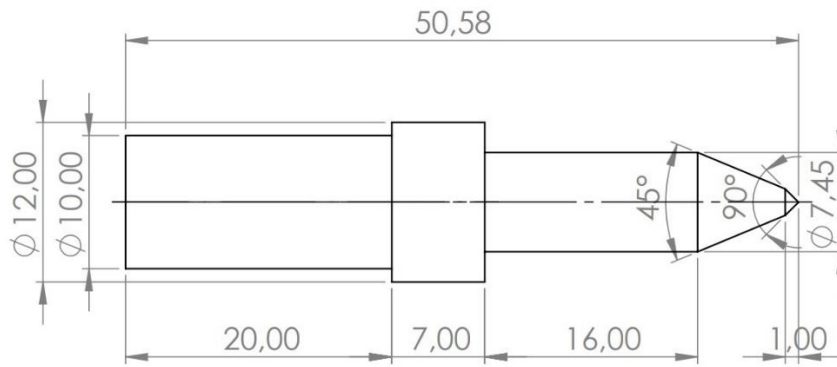
Tungsten Karbür (WC) Mekanik Özellikleri		
Sertlik (Rockwell A)	Çekme Mukavemeti	Elastisite Modülü
90	344 MPa	669-696 GPa



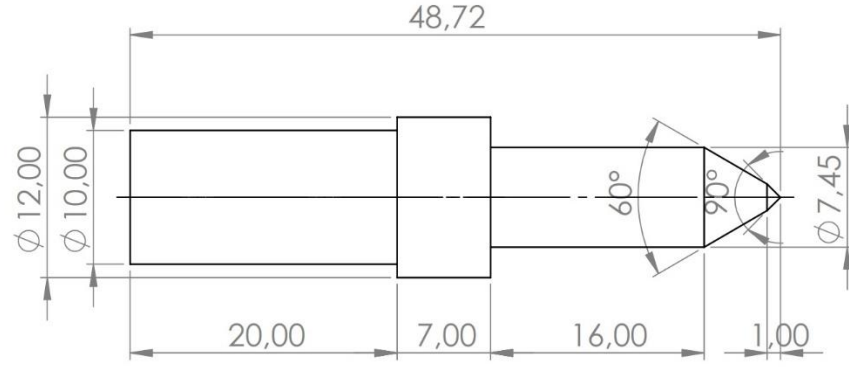
Şekil 3.2 Takımların işlenmesi sırasındaki görsel



a)



b)



c)

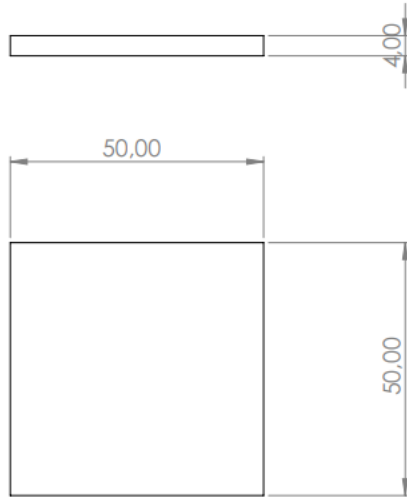
Şekil 3.3 Konik bölgeci takımların boyutları: a) 30°, b) 45° ve c) 60°



Şekil 3.4 Üretilmiş olan konik bölgeci takımlar

3.2 Deneylerde Kullanılan İşparçası Al7075

Deneylerde 50x50mm ölçülerinde ve 4 mm kalınlığında Al7075 kullanılmıştır (Şekil 3.5). Malzeme 2000x1000 mm alınmış olup DURMA VS 3006 CNC giyotin makas ile bölünmüştür (Şekil 3.6).



Şekil 3.5 İşparçası boyutları



Şekil 3.6 İşparçalarının dilimlendiği giyotin pres

Al7075 malzemesinin mekanik ve fiziksel özellikleri Çizelge 3.2. ve Çizelge 3.3'te verilmiştir.

Çizelge 3.2 Al7075 malzemesinin mekanik özellikleri

Al7075 Mekanik Özellikleri			
Akma Dayanımı $R_{p0,2}$	Çekme Dayanımı R_m	Uzama A_{50}	Brinell Sertlik
460-490 MPa	530-570 MPa	5-6%	140-160 HB

Çizelge 3.3 Al7075 malzemesinin fiziksel özellikleri

Al7075 Fiziksel Özellikleri			
Yoğunluk	Elastisite Modülü	Isı İletkenliği	Isıl Genleşme Katsayısı
2,81 g/cm ³	72000 N/mm ²	130-160 W/m.K	23,4 K ⁻¹ .10 ⁻⁶

3.3 SDY'nin Uygulandığı CNC Dik İşleme Merkezi

Deneyle, maksimum 12000 rpm dönme hızına çıkabilen, x, y ve z eksenlerinde sırasıyla 510, 510 ve 460 mm hareket kabiliyetine sahip MAZAK VARIAXIS 200 5 eksenli CNC tezgahında gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.7).



Şekil 3.7 Deneylede kullanılan tezgah MAZAK VARIAXIS 200 görseli

3.4 Denev Tasarımı

Yapılan deneylerde sabit ve değişken parametreler bulunmaktadır. Tüm deneylerde 50x50x4 mm ölçülerinde Al7075 işparçası kullanılmıştır. Her deneyde silindirik bölge çapı 7,45 mm olan matkaplar kullanılarak delikler delinmiş ve M8 ovalama kılavuzu ile diş açılmıştır (Şekil 3.8).



Şekil 3.8 M8 ovalama kılavuzu

Değişken işleme parametreleri ise matkap konik bölge açısı, dönme hızı ve ilerleme hızıdır. Bu çalışmada, 30, 45 ve 60 derece konik bölgeli takım kullanılmıştır.

Demir'in çalışmasında bulunan işleme parametreleri kullanılarak, 4 mm kalınlığındaki Al7075 malzemesi kullanılarak, 5 farklı dönme hızı (1200, 2400, 3000, 3600 rpm) ve 5 farklı ilerleme hızı (20, 40, 60, 80 mm/min) parametreler referans alınarak bu çalışma yapılmıştır (Çizelge 3.4)

Çizelge 3.4 İşleme parametreleriyle oluşturulan deney tipleri [10]

Deney Numarası	Takım İlerleme Hızı (mm/min)	Takım Dönme Hızı (rpm)
D1	20	1800
D2	20	2400
D3	20	3000
D4	20	3600
D5	40	1800
D6	40	2400
D7	40	3000
D8	40	3600
D9	60	1800
D10	60	2400
D11	60	3000
D12	60	3600
D13	80	1800
D14	80	2400
D15	80	3000
D16	80	3600

Farklı işleme parametreleriyle oluşturulmuş 16 farklı deney koşulu (D1-D16) 3 farklı açığa sahip (30° , 45° ve 60°) karbür takımlarla 48 farklı delme işlemi ($16 \times 3 = 48$) 4 kez tekrarlanarak toplamda 192 adet sürtünmeli delik delme işlemi gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışmada ilk notasyon karbür takım açısını, ikinci notasyon deney tipini ve üçüncü notasyon deney tekrar sayısını ifade etmektedir. Örneğin;

30-D1-I, 30-D1-II, 30-D1-III, 30-D1-IV, 30-D2-I, 30-D2-II, 30-D2-III, ..., 30-D16-I, 30-D16-II, 30-D16-III, 30-D16-IV

45-D1-I, 45-D1-II, 45-D1-III, 45-D1-IV, 45-D2-I, 45-D2-II, 45-D2-III, ..., 45-D16-I, 45-D16-II, 45-D16-III, 45-D16-IV

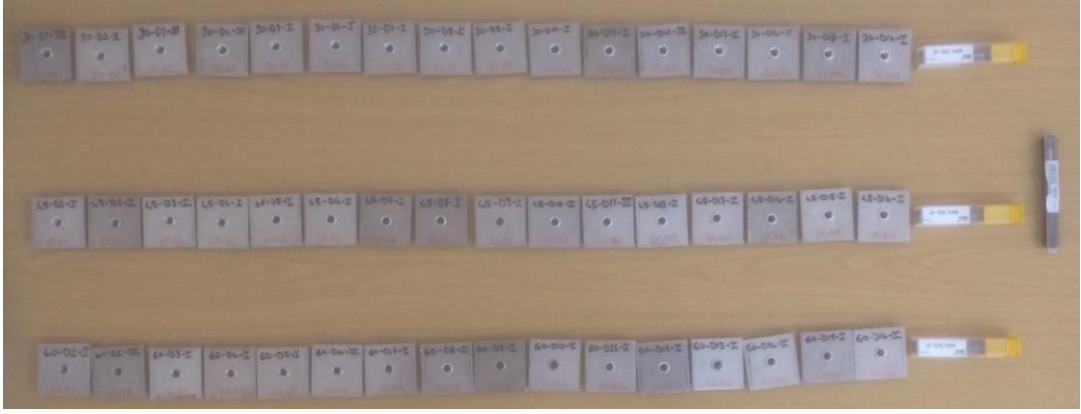
60-D1-I, 60-D1-II, 60-D1-III, 60-D1-IV, 60-D2-I, 60-D2-II, 60-D2-III, ..., 60-D16-I, 60-D16-II, 60-D16-III ,60-D16-IV

Deney parametrelerinden oluşan 48 adetlik delik açma deneyi 3 kez tekrarlanarak aritmetik ortalama alınması için toplam 144 adet vida dişi sıyırma testi gerçekleştirilmiştir. Roma rakamıyla IV numaralı numunelere diş çekilmemiştir (Şekil 3.9).

Deneyler yapılırken işparçasının takıma yapışmasını engellemek için her deney koşulu gerçekleştirilmeden önce WD-40 ile takımlar yağlanmıştır. Deneyler tekrarlanırken takımda malzeme yapışması gözlemlenmiş ve her deney koşulundan önce takımlar zımpara yardımıyla göz kararı olarak temizlenmiştir. Yalnızca ovalama kılavuzu ile diş açılırken soğutma suyu kullanılmıştır. Üretilen deney numuneleri Şekil 3.10'da görülmektedir.



Şekil 3.9 Deneylerin uygulama sırasındaki görseli



Şekil 3.10 SDY ile delinmiş M8 vida dişi çekilmiş deney numuneleri

3.5 Vida Sıyırma Testleri

Çekme testi için 100 kN kapasiteli INSTRON 8516 cihazı kullanılmıştır (Şekil 3.11). Vida dişi sıyırma testleri TS EN ISO 6892-1 ortam sıcaklığında çekme mukavemeti tayini standardına göre yapılmıştır. M8 vida dişi çekilmiş kovan yapılarına 165mm uzunluğunda M8 gijonlar (Şekil 3.12) vidalanmıştır. Her sıyırma testi için; kesit alan yuvarlak ve $50,256 \text{ mm}^2$, çap (d): 8 mm, ilk boy (L0): 110 mm, ön yükleme hızı: 10 mm/min, ön yükleme değeri: 0,5 kN ve test hızı: 7 mm/min olarak ayarlanmıştır.

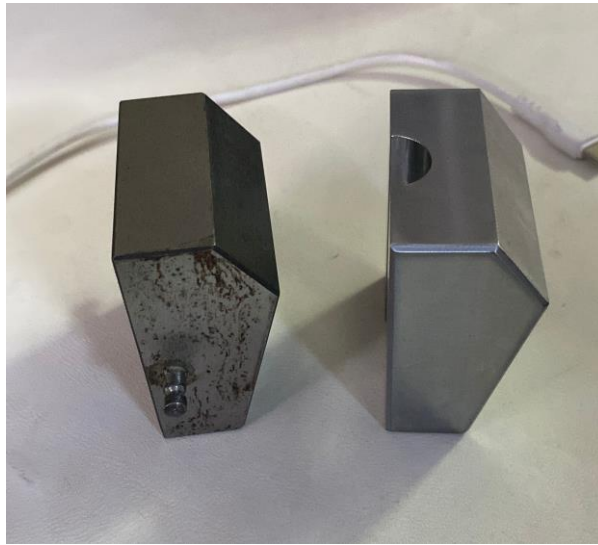


Şekil 3.11 Çekme testinde kullanılan INSTRON 8516 cihazı



Şekil 3.12 Sıyırma testleri için kullanılan 165mm uzunluğundaki M8 gijonlar

Vida dişi açılan numunelere sıyırma testi uygulamak için çekme cihazına uygun olarak numuneleri kavrayacak ölçülerde AISI4140 çeliğinden çeneler (Şekil 3.13) tasarlanıp imal edilmiştir. İmalatında, deneylerde kullanılan tezgah olan MAZAK VARIAXIS 200 kullanılmıştır.



Şekil 3.13 INSTRON cihazının çenesi (soldaki) ve imal edilen çene (sağdaki)

3.6 Mikro Sertlik Ölçümleri

Mikro sertlik deneyleri 0,5-35 kgf aralığında yük uygulayabilen Galileo Durometria marka, Vickers HV1 OD mikro sertlik ölçüm cihazında gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.14).



Şekil 3.14 Galileo Durometria marka, Vickers HV1 OD mikro sertlik ölçüm cihazı

Ölçümler EN ISO 65068 standardına göre kare kesitli ve tepe açısı 136° olan elmas piramit bir uç ile 1000 gf yük 10 s batma süresinde oluşturulan iz sertliği (indentation hardness) ile gerçekleştirilmiştir. Meydana gelen iz, taban köşegeni (d) olan kare piramittir ve tepe açısı 136° dir. Vickers sertlik değeri, kg olarak ifade edilen deney yükünün, mm^2 olarak ifade edilen iz alanına bölümüyle cihaz tarafından hesaplanmıştır (Eşitlik 1).

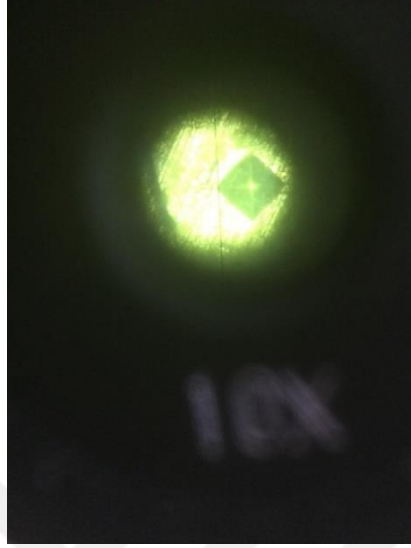
$$VSD = \frac{2P \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right)}{d^2} \quad (\text{Eşitlik 1})$$

P: kgf değerinden yük,

α : Tepe açısı = 136° ,

d: taban köşegeni

Piramidin bıraktığı izin köşegeni (d), her iki köşegen uzunluğunun milimetrenin 1/1000'i duyarlılıkta cihazın mikroskobu yardımıyla ölçülerek tespit edilmiş ve cihazdan sertlik değeri alınmıştır (Şekil 3.15).



Şekil 3.15 Köşegen uzunluklarının optik mikroskopla belirlenme

Mikro sertlik ölçümleri için diş çekilmemiş numuneler tam ortadan ikiye bölünerek kovan yapılarını iç yüzeyi kullanılmıştır (Şekil 3.16) Her deney koşulunda oluşturulmuş kovan yapılarının giriş, orta ve çıkış kısımlarından toplam üç sertlik ölçümü alınarak ortalama değerler hesaplanmıştır.



Şekil 3.16 Mikro sertlik ölçümleri için tam ortadan ikiye kesilmiş dişsiz numune

3.7 Kovan Yapılarının Görsel Muayenesi

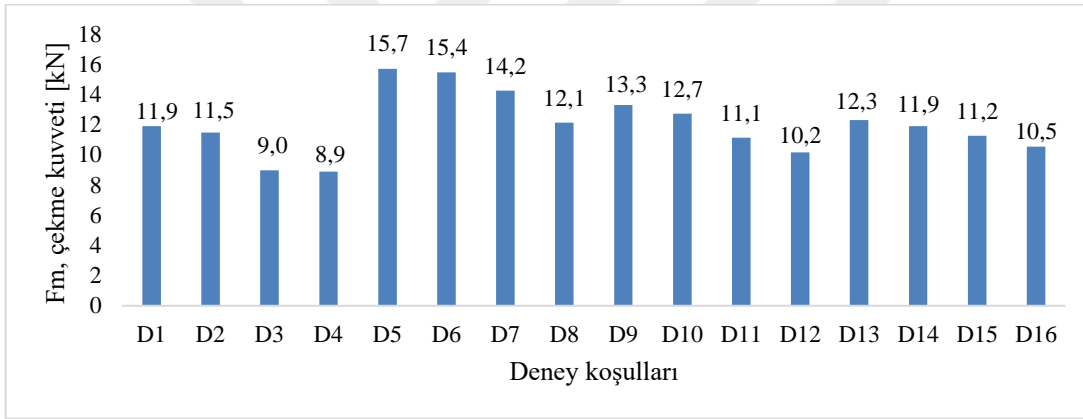
50x50 mm işparçalarına on altı (D1-D16) farklı deney koşuluyla oluşturulan kovan yapılarının fotoğrafları 12 MP geniş açılı fotoğraf makinesi ile çekilerek yorumlanmıştır.



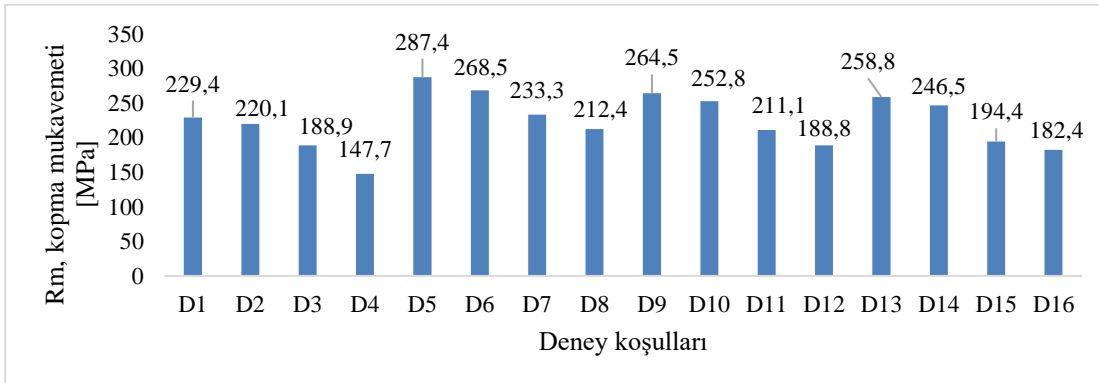
4. DENEY SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ

4.1 Sıyırma Testi Sonuçları

50x50mm boyutlarında ve 4mm kalınlığındaki A7075 işparçaları SDY ile farklı işleme parametreleriyle 16 farklı deney koşulu (Çizelge 3.4) belirlenmiş ve delikler delinip ovalama kılavuzu ile M8 diş açılmıştır. Bu numunelere INSTRON 8516 marka çekme cihazında sıyırma testi uygulanmış ve numunelerin çekme kuvveti ve kopma mukavemetleri ölçülmüştür. Deney sonuçları aşağıdaki grafiklerde verilmiştir (Şekil 4.1-4.3).

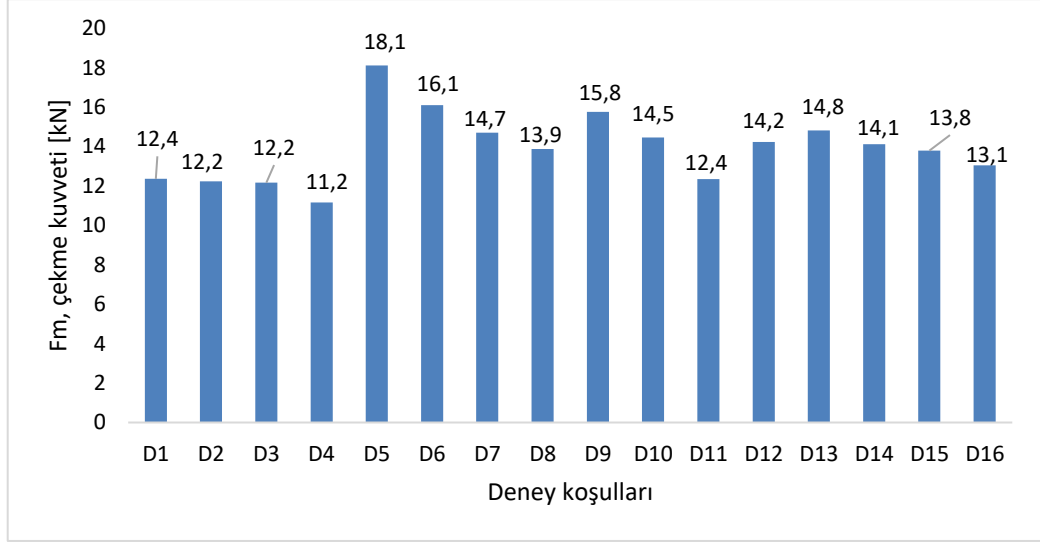


a)

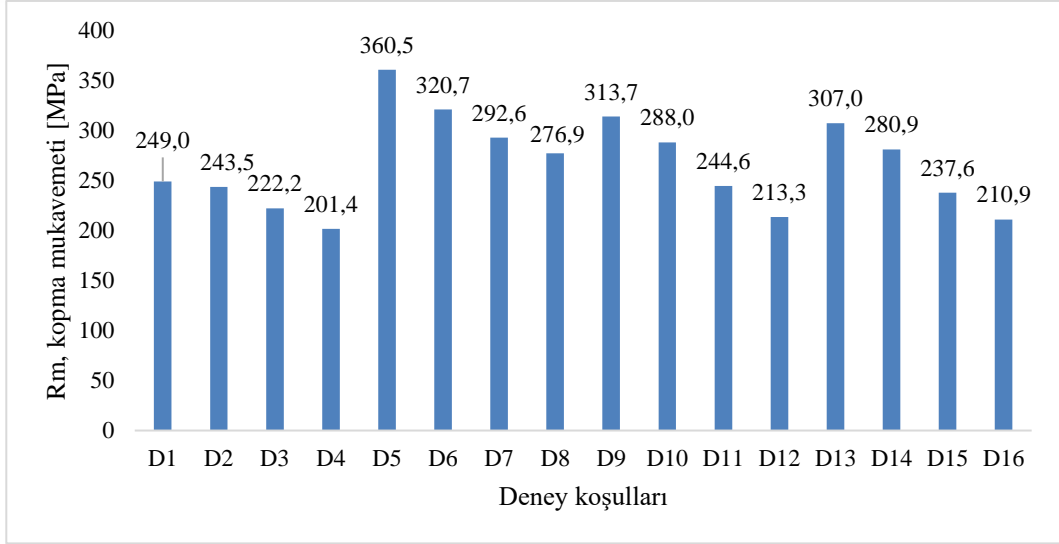


b)

Şekil 4.1 30 derece konik bölge için a) çekme kuvveti (kN) ve b) kopma mukavemeti (MPa) değerleri

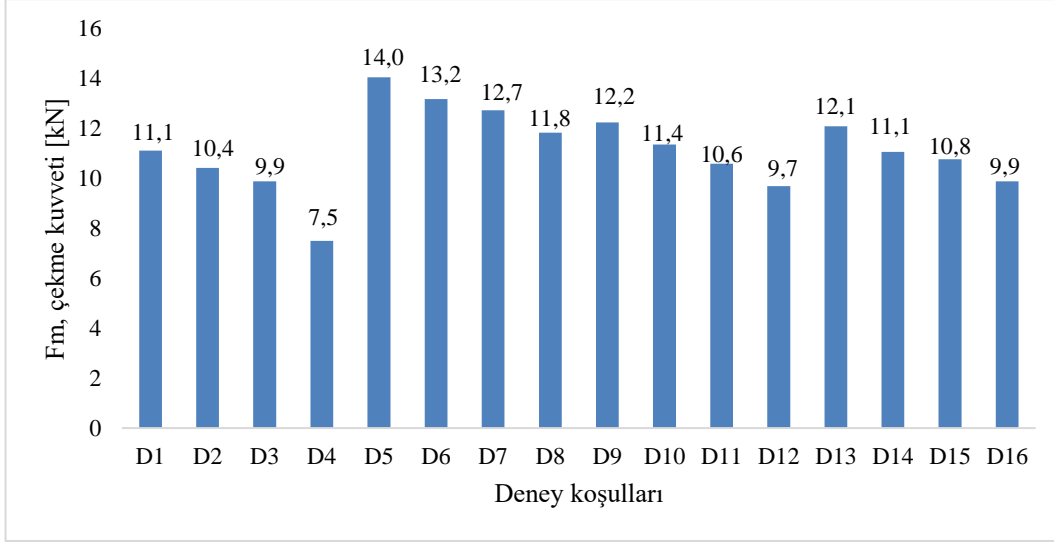


a

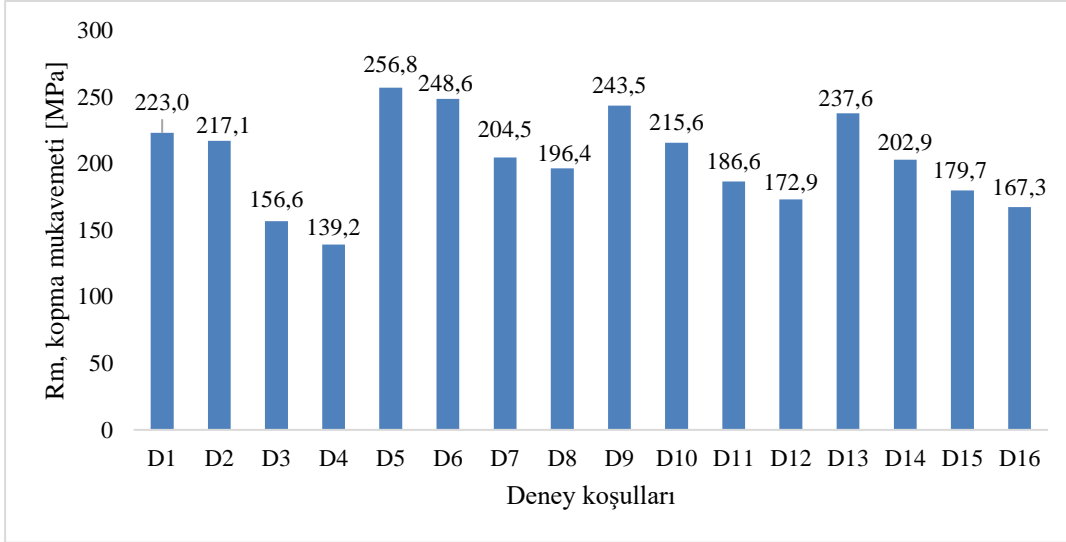


b)

Şekil 4.2 45 derece konik bölge için a) çekme kuvveti (kN) ve b) kopma mukavemeti (MPa) değerleri



a)



b)

Şekil 4.3 60 derece konik bölge için a) çekme kuvveti (kN) ve b) kopma mukavemeti (MPa) değerleri

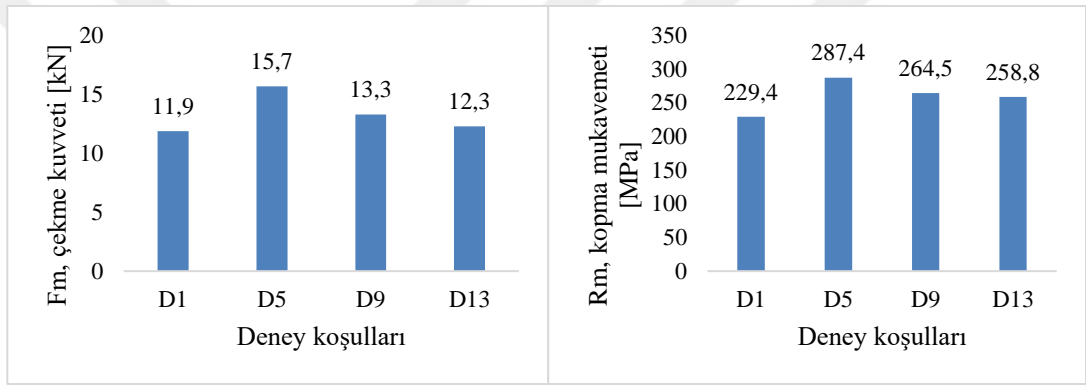
4.1.1 Dönme Hızının Çekme Kuvveti ve Kopma Mukavemetine Etkisi

Şekil 4.1, Şekil 4.2 ve Şekil 4.3'te görüldüğü üzere en yüksek çekme kuvveti ve kopma mukavemeti ilerleme hızına ve takım konik bölge açısına da bağlı olarak 1800 rpm dönme hızlarında ulaşılmıştır. Konik bölge açısı, dönme hızına bağlı olarak değişen çekme kuvveti ve kopma mukavemeti değerlerine etki etmektedir. 30 ve 60 derece konik bölge için devir arttıkça çekme kuvveti ve kopma mukavemeti yaklaşık %21 oranında azalırken bu oran, 45 derece konik bölge için

takımda yaklaşık %13'tür. Ayrıca, dönme hızı arttıkça taç yaprak oluşumu ve kovan yapısında yırtılmalar artmış, oluşan kovan yapısında diş açmak için gerekli alan ve diş sayısı azalmış, buna bağlı olarak da çekme kuvveti ve kopma mukavemeti azalmıştır.

4.1.2 İlerleme Hızının Çekme Kuvveti ve Kopma Mukavemetine Etkisi

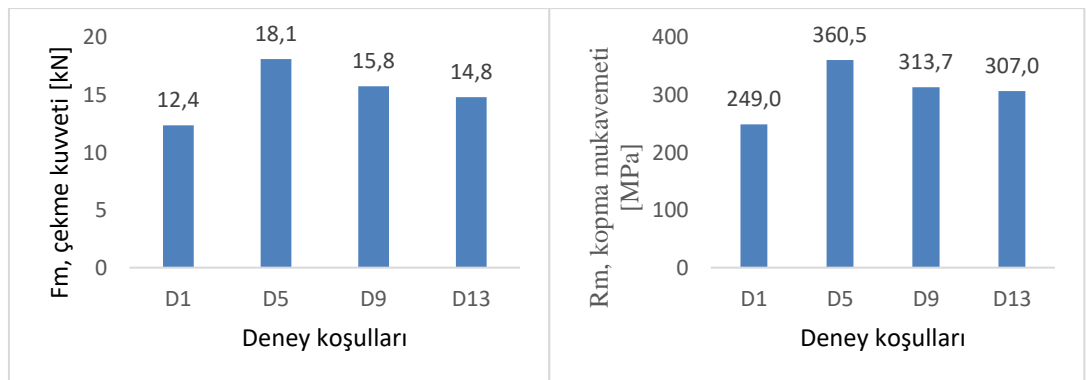
Şekil 4.4, Şekil 4.5 ve Şekil 4.6 incelendiğinde, 60 ve 80 mm/min ilerleme hızlarında çekme kuvveti ve kopma mukavemeti birbirine çok yakın değerler olduğu görülmektedir. 20 mm/min ilerleme hızında en düşük çekme kuvveti ve kopma mukavemeti elde edilmiştir. En yüksek çekme kuvveti ve kopma mukavemeti 40 mm/min ilerleme hızında görülmüştür.



a)

b)

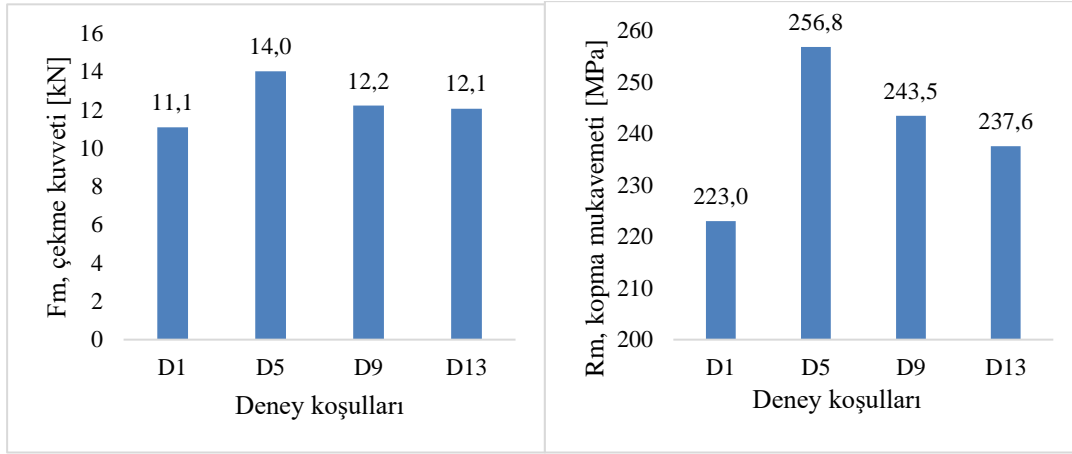
Şekil 4.4 30 derece konik bölge için 1800 rpm dönme hızında ve farklı ilerleme hızlarındaki a) çekme kuvveti (kN), b) kopma mukavemeti (MPa) değerleri



a)

b)

Şekil 4.5 45 derece konik bölge için 1800 rpm dönme hızında ve farklı ilerleme hızlarındaki a) çekme kuvveti (kN), b) kopma mukavemeti (MPa) değerleri



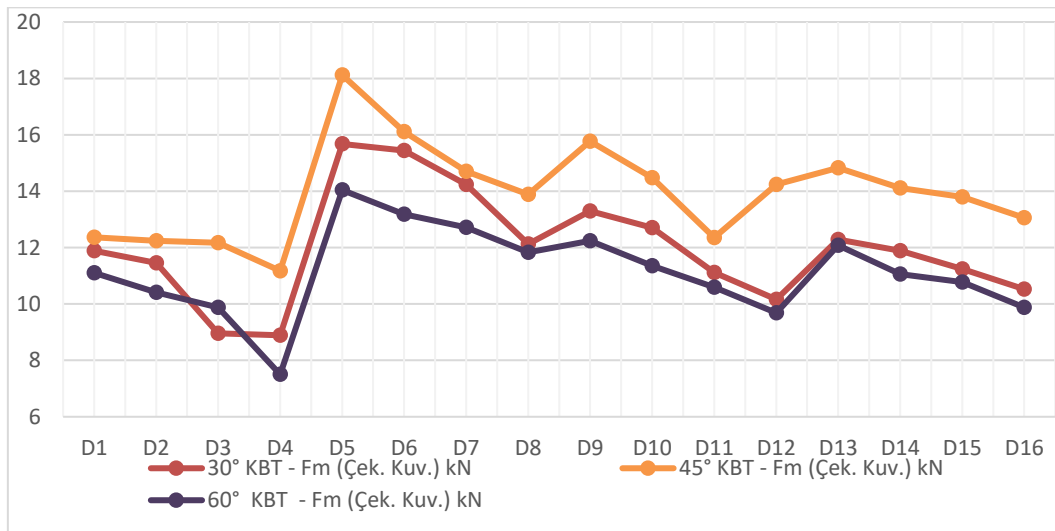
a)

b)

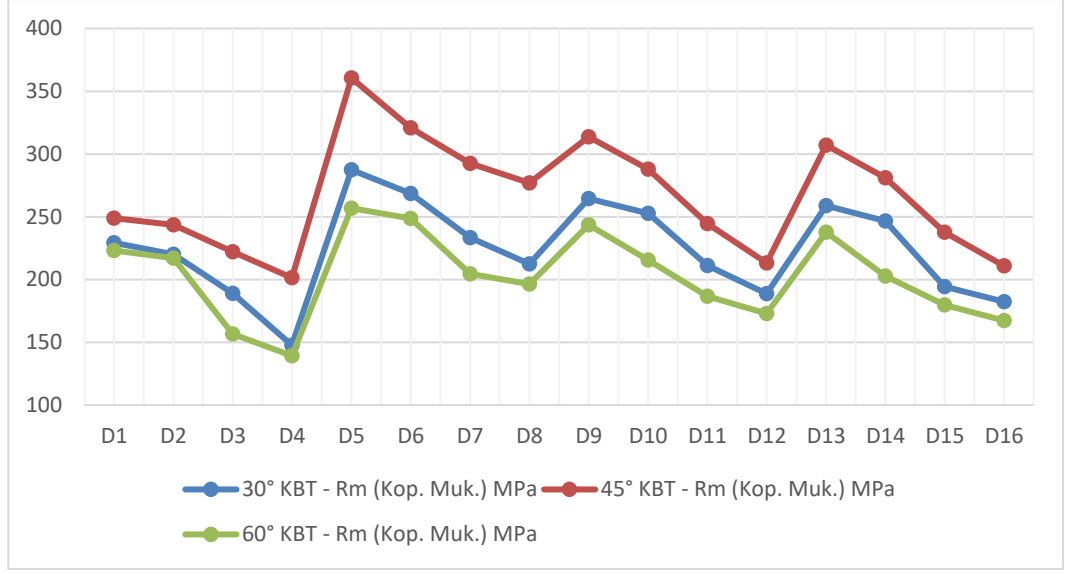
Şekil 4.6 60 derece konik bölge için 1800 rpm dönme hızında ve farklı ilerleme hızlarındaki a) çekme kuvveti (kN), b) kopma mukavemeti (MPa) değerleri

4.1.3 Konik Bölge Açısının Çekme Kuvveti ve Kopma Mukavemetine Etkisi

Şekil 4.7’de görüldüğü üzere tüm deneyler göz önüne alındığında 45 derece konik bölge için en yüksek çekme kuvveti ve kopma mukavemeti elde edilmiştir. En yüksek çekme kuvveti ve kopma mukavemeti 18,118 kN ve 360,510 MPa olarak 40 mm/min ilerleme hızında ve 1800 rpm dönme hızında elde edilmiştir. En düşük çekme kuvveti ve kopma mukavemeti ise 7,5 kN ve 139,24 MPa olarak 60° konik bölge için 20 mm/min ilerleme hızında ve 3600 rpm dönme hızında olduğu tespit edilmiştir.



a)

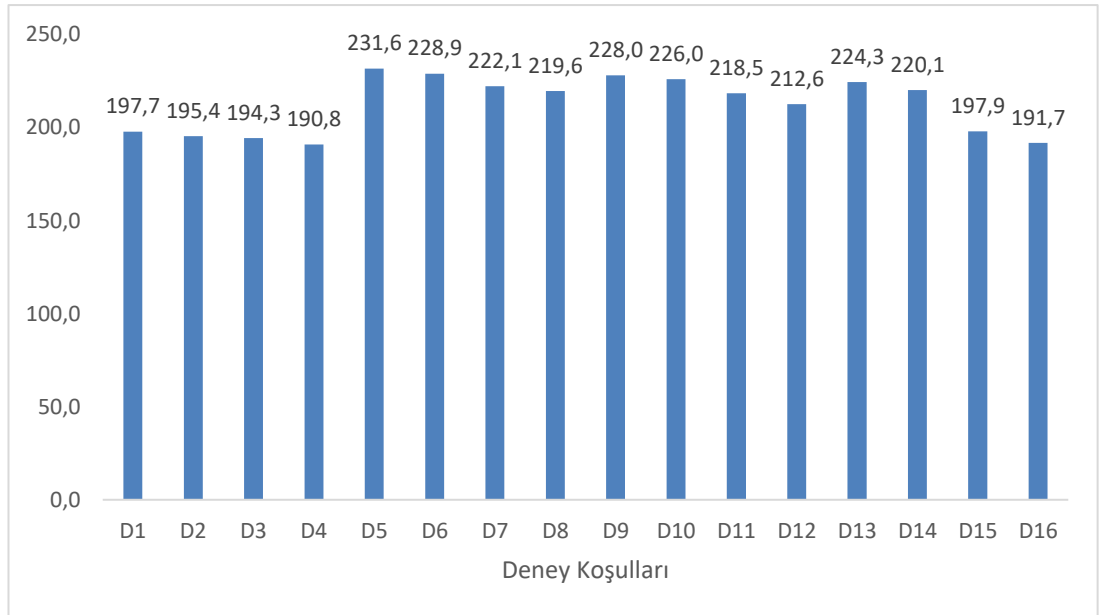


b)

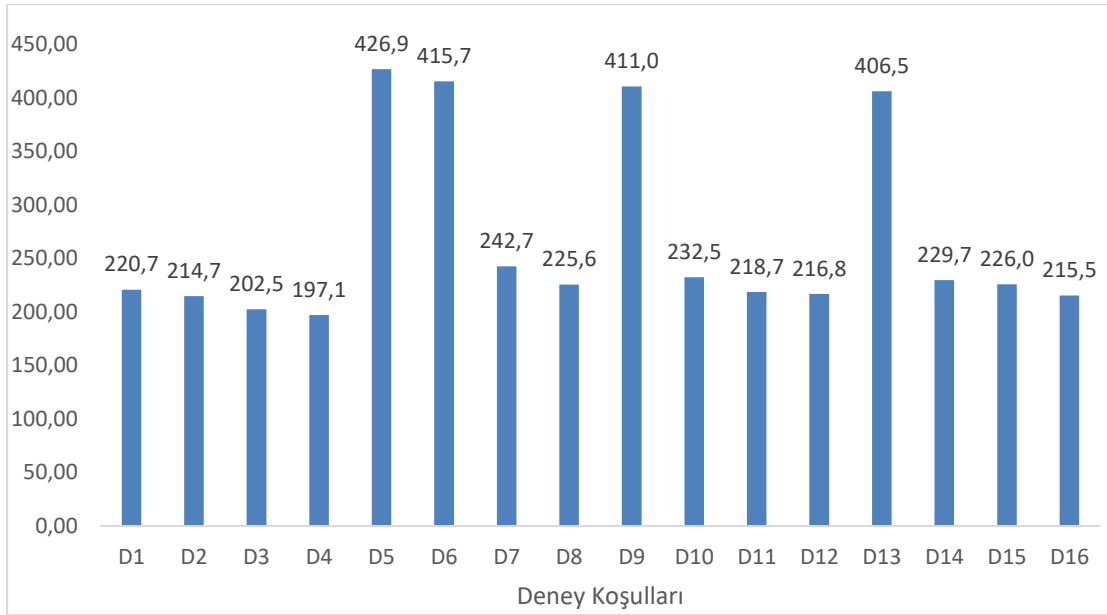
Şekil 4.7 Farklı konik bölgeli takımların farklı deney koşullarındaki a) çekme kuvveti değerleri, b) kopma mukavemeti değerleri

4.2 Mikrosertlik Testi Sonuçları

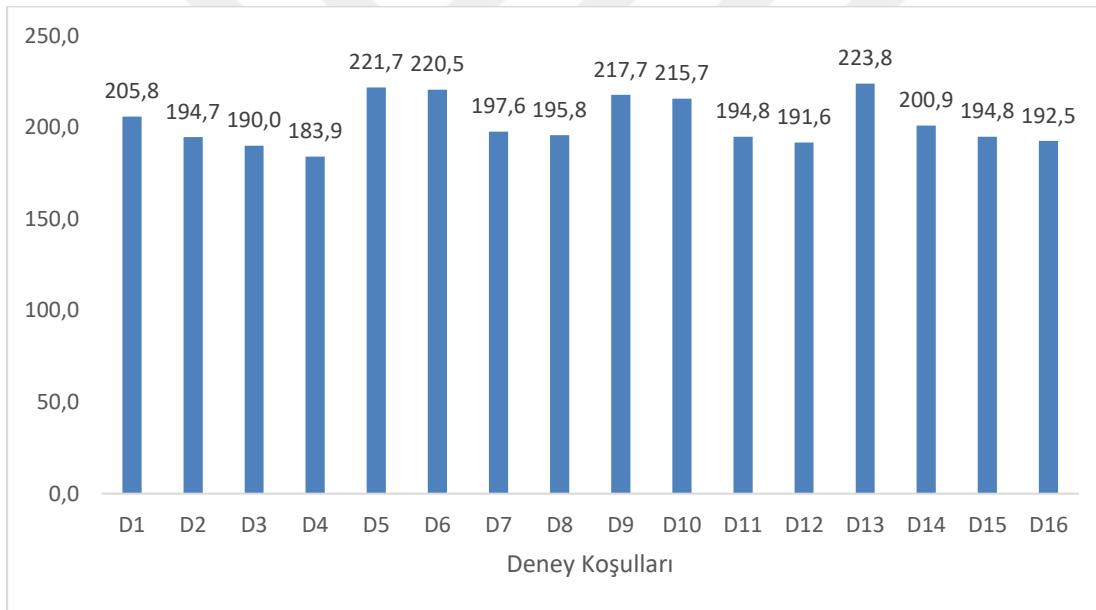
Diş açılmamış deney numunelerinin sertlik değerleri, Galileo Durometria marka, Vickers HV1 OD mikro sertlik ölçüm cihazında ölçülmüştür. Ölçüm sonuçları Şekil 4.8'de verilmiştir.



a)



b)



c)

Şekil 4.8 Sertlik ölçüm sonuçları a) 30 derece konik bölge takım, b) 45 derece konik bölge takım ve c) 60 derece konik bölge takım

4.2.1 Dönme Hızının Sertlik Ölçüm Sonuçlarına Etkisi

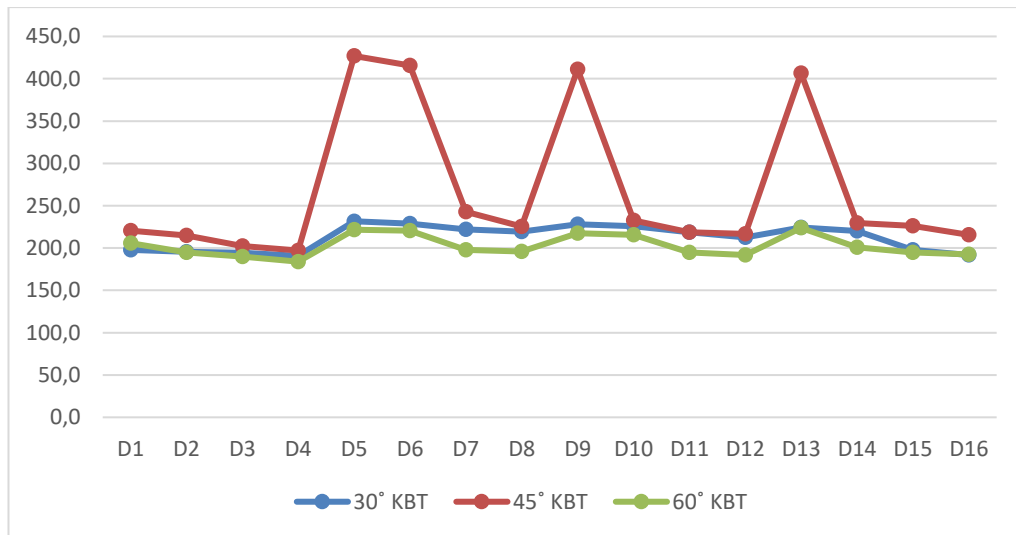
Şekil 4.8’de görüldüğü üzere 30 ve 60 derece konik bölge takımlarla yapılan deneylerde artan dönme hızında sertlik değerlerinde yaklaşık %10’a varan düşüş yaşanmıştır. 45 derece konik bölge takımında özellikle 1800 rpm dönme hızında diğer deneylere kıyasla çok yüksek sertlik değerlerine ulaşmış ve dönme hızı arttıkça diğer konik bölge takımlarda benzer bir görüntü ortaya çıkmıştır.

4.2.2 İlerleme Hızının Sertlik Ölçüm Sonuçlarına Etkisi

Şekil 4.8’de görüldüğü gibi 60 ve 80 mm/min ilerleme hızlarında sertlik değerleri birbirine çok yakın değerlerde çıkmıştır. 20 mm/min ilerleme hızında en düşük sertlik değerleri elde edilmiştir. En yüksek sertlik değeri ise 40 mm/min ilerleme hızında elde edildiği görülmüştür.

4.2.3 Konik Bölge Açısının Sertlik Ölçüm Sonuçlarına Etkisi

Şekil 4.9’da görüldüğü gibi tüm deneyler göz önüne alındığında 45 derece konik bölge takımında en yüksek sertlik değerleri elde edilmiştir. En yüksek sertlik değeri 426,9 HRV olarak 40 mm/min ilerleme hızında ve 1800 rpm dönme hızında elde edilmiştir. En düşük sertlik değeri ise 183,9 HRV a olarak 60° konik bölge takımında 20 mm/min ilerleme hızında ve 3600 rpm dönme hızında olduğu tespit edilmiştir. Bu sonuçlar çekme testi sonuçlarıyla benzerlik göstermektedir.

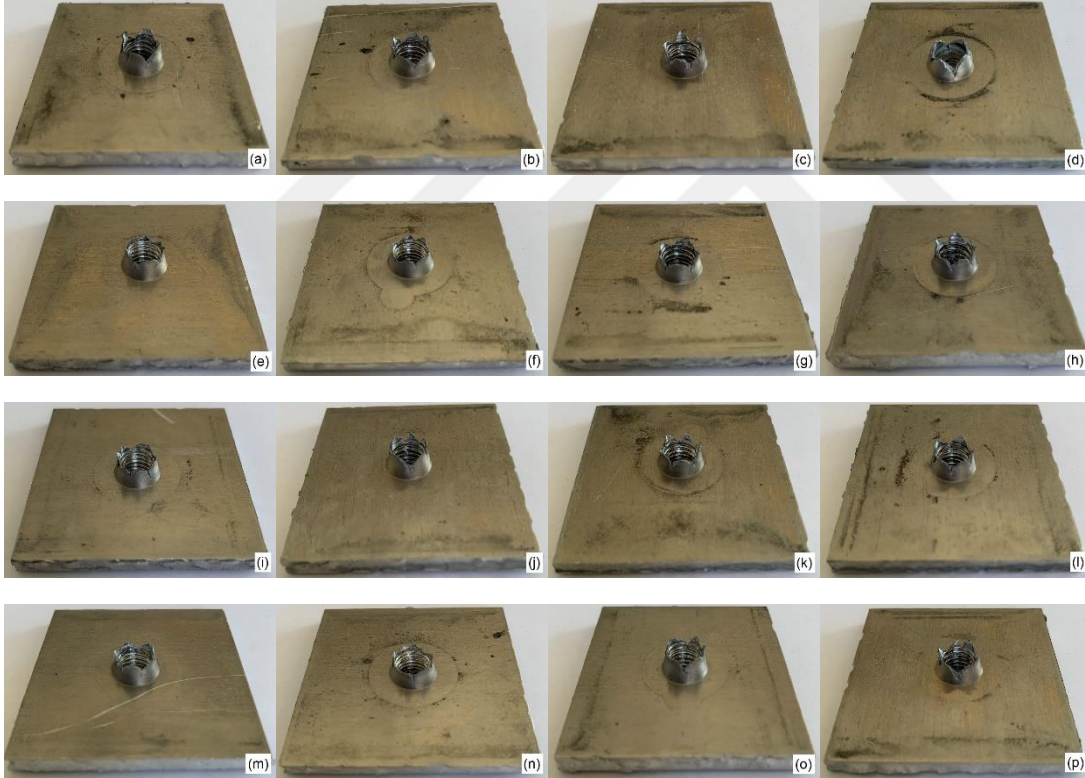


Şekil 4.9 Farklı konik bölge takımların farklı deney koşullarındaki sertlik ölçüm sonuçları

4.3. Kovan Yapılarının Görsel Muayene Sonuçları

4.3.1. 30 Derece Takımla Oluşturulan Kovan Yapıları

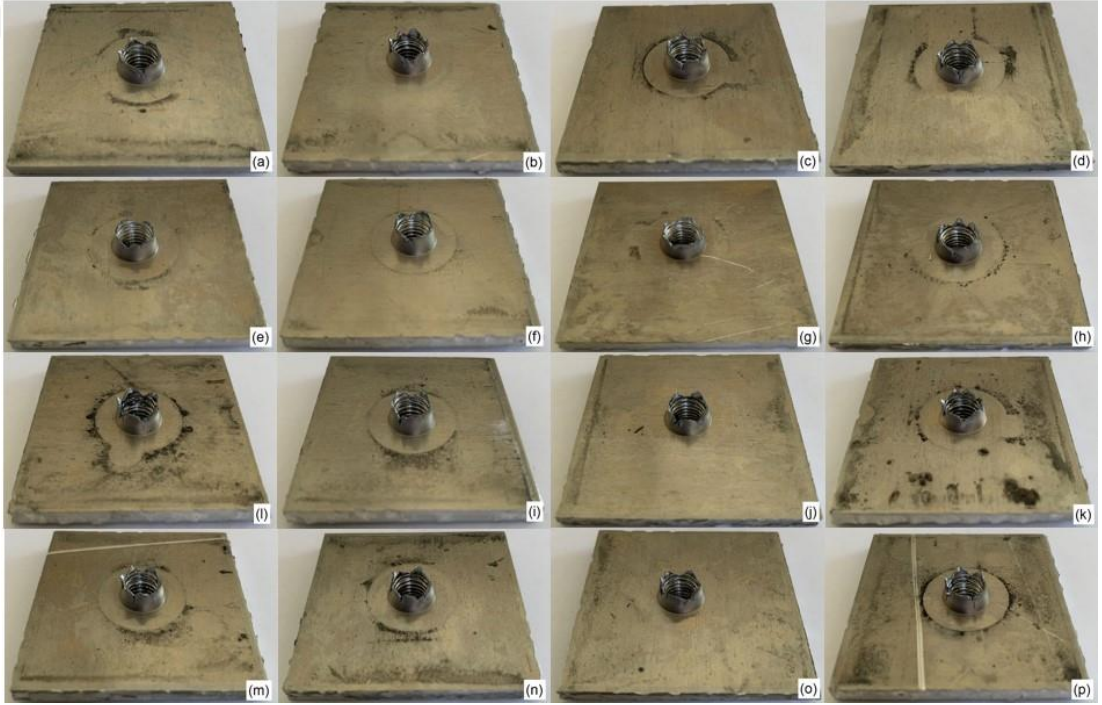
30 dereceli takım ile elde edilen kovan yapıları incelendiğinde, artan dönme hızının etkisiyle radyal yırtılmaların arttığı görülmüştür. Bu nedenle, Bölüm 4.1.1’de açıklandığı gibi kovan yapısında dış açılması için yeterli alan oluşturulamamıştır ve bu sebepten çekme kuvveti dönme hızı arttıkça azalmıştır. İlerleme hızı ile kovan yapısı arasında doğrudan bir ilişki tespit edilememiştir. En yüksek çekme kuvveti ve kopma mukavemeti, en yüksek sertlik değerine ve en düzgün kovan yapısına sahip numunede (Şekil 4.10.) elde edilmiştir. En düşük çekme kuvveti ve kopma mukavemeti, en düşük sertlik değerine ve en yüksek radyal yırtılmaya uğramış kovan yapısına sahip numunede (Şekil 4.10, d) görülmüştür.



Şekil 4.10 30 derece takımla farklı deney koşullarında oluşturulmuş kovan yapıları:
a) D1, b) D2, c) D3, d) D4, e) D5, f) D6, g) D7, h) D8, i) D9, j) D10, k) D11, l) D12,
m) D13, n) D14, o) D15 ve p) D16

4.3.2. 45 Derece Takımla Oluşturulan Kovan Yapıları

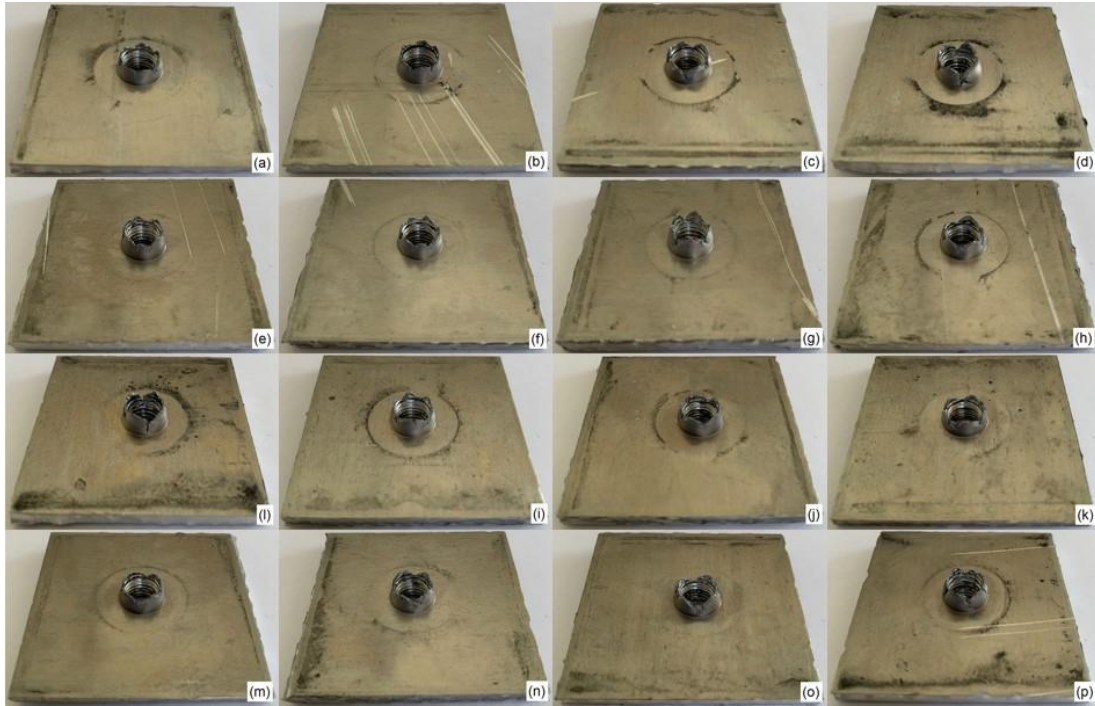
Deneyle 45 dereceli takım ile tekrar edildiğinde, takım açısının artmasıyla takım ile işparçası arasındaki temas yüzey alanı azalmış ve bu nedenle radyal yırtılmalar azalmıştır. Tüm takımlarla yapılan deneyler göz önüne alındığında, en yüksek çekme kuvveti ve kopma mukavemeti, en yüksek sertlik değerine ve en düzgün kovan yapısına sahip numunede (Şekil 4.11. e) elde edilmiştir. En düşük çekme kuvveti ve kopma mukavemeti, en düşük sertlik değerine ve en yüksek radyal yırtılmaya uğramış kovan yapısına sahip numunede (Şekil 4.11. d) görülmüştür.



Şekil 4.11 45 derece takımla farklı deney koşullarında oluşturulmuş kovan yapıları:
a) D1, b) D2, c) D3, d) D4, e) D5, f) D6, g) D7, h) D8, i) D9, j) D10, k) D11, l) D12,
m) D13, n) D14, o) D15 ve p) D16

4.3.3. 60 Derece Takımla Oluşturulan Kovan Yapıları

Takım açısının daha da artmasıyla teorik olarak daha düşük sıcaklıklar elde edildiğinden kovan yapısı oluşturmak için gerekli olan sıcaklıklara ulaşamadığından düzgün bir kovan yapısı oluşturulamamıştır. Diğer takımlarla yapılan deneylerde ulaşılan sertlik değerine ulaşamadığından, düşük çekme kuvveti ve kopma mukavemeti elde edilmiştir. En yüksek çekme kuvveti ve kopma mukavemeti, en yüksek sertlik değerine ve en düzgün kovan yapısına sahip numunede (Şekil 4.12. e) elde edilmiştir. En düşük çekme kuvveti ve kopma mukavemeti, en düşük sertlik değerine ve en yüksek radyal yırtılmaya uğramış kovan yapısına sahip numunede (Şekil 4.12. d) görülmüştür.



Şekil 4.12 45 derece takımla farklı deney koşullarında oluşturulmuş kovan yapıları:
a) D1, b) D2, c) D3, d) D4, e) D5, f) D6, g) D7, h) D8, i) D9, j) D10, k) D11, l) D12,
m) D13, n) D14, o) D15 ve p) D16

5. SONUÇLAR

Sürtünmeli delme yöntemi, belli bir açığa sahip konik bir takımın işparçasına belirli bir dönme ve ilerleme hızıyla temas etmesi, sürtünme ile oluşan ısı sayesinde işparçasında bir kovan yapısı oluşturma işlemidir. Bu sayede oluşan bu kovan yapısına dış açılabilen ve sökülebilir bağlantılar uygulanabilmektedir. Bu sebeple, 50x50 mm ölçülerinde ve 4 mm kalınlığında Al7075 malzemesine, M8 ölçülerinde, farklı takımlarla (30°, 45° ve 60° konik bölge takımı), farklı ilerleme hızlarında (20, 40, 60, 80 mm/min) ve farklı dönme hızlarında (1800, 2400, 3000, 3600 rpm) delikler delinmiş ve dış açılmıştır. Bu numunelere çekme ve mikro sertlik testleri yapılarak aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir:

- Tüm deney koşullarında başarılı bir şekilde SDY uygulanmış, kovan yapısı oluşturulmuş ve dış açılmıştır.
- Dönme hızı arttıkça taç yaprak oluşumu artmıştır. Buna bağlı olarak açılan dış sayısı azalmış, çekme kuvveti ve kopma mukavemeti azalmıştır.
- 60 ve 80 mm/min ilerleme hızlarında çekme kuvveti ve kopma mukavemeti değerleri birbirine yakın çıkarken, 40 mm/min ilerleme hızında en yüksek çekme kuvveti ve kopma mukavemeti elde edilmiştir. En düşük çekme kuvveti ve kopma mukavemeti 20 mm/min ilerleme hızında elde edilmiştir.
- Tüm deneyler göz önüne alındığında en yüksek çekme kuvveti ve kopma mukavemeti 18,118 kN ve 360,510 MPa olarak 40 mm/min ilerleme hızında ve 1800 rpm dönme hızında elde edilmiştir. En düşük çekme kuvveti ve kopma mukavemeti ise 7,5 kN ve 139,24 MPa olarak 60° konik bölge takımında 20 mm/min ilerleme hızında ve 3600 rpm dönme hızında olduğu tespit edilmiştir.
- Mikro sertlik ve çekme testi sonuçları birbiriyle ilişkili olduğu görülmüştür. Yüksek mikro sertlik değerlerinde yüksek çekme kuvveti ve kopma mukavemeti elde edilirken, düşük çekme kuvveti ve kopma mukavemeti elde edilmiştir.

- Tüm takımlarla yapılan deneylerde dönme hızı arttıkça mikro sertlik değerleri azalmıştır.
- 60 ve 80 mm/min ilerleme hızlarında benzer mikro sertlik değerleri görülmüştür. 40 mm/min ilerleme hızında en yüksek, 20 mm/min ilerleme hızında en düşük mikro sertlik değerleri elde edilmiştir.
- Tüm deneyler göz önüne alındığında en yüksek mikro sertlik değeri 426,9 HRV olarak 45° konik bölgeli takımında 40 mm/min ilerleme hızında ve 1800 rpm dönme hızında elde edilmiştir. En düşük mikro sertlik değeri ise, En düşük sertlik değeri ise 183,9 HRV olarak 60° konik bölgeli takımında 20 mm/min ilerleme hızında ve 3600 rpm dönme hızında olduğu tespit edilmiştir.
- Kovan yapılarına bakıldığında, dönme hızının artmasıyla radyal yırtılmalar artmıştır.
- En düzgün kovan yapısı 45 derece konik bölgeli takım ile elde edilmiştir.
- En yüksek çekme kuvveti, kopma mukavemeti ve sertlik değeri elde edilen numunelerde, en düzgün kovan yapısı elde edilmiştir.
- En düşük çekme kuvveti, kopma mukavemeti ve sertlik değeri elde edilen numunelerde, yüksek radyal yırtılmalar gerçekleştiği görülmüştür.

KAYNAKLAR

- [1] Miller, S. F., Blau, P., Shih, A. J., Microstructural alterations associated with friction drilling of steel, aluminum and titanium, *Journal of Materials Engineering and Performance*, Volume 14, 2005, Pages 647–653
- [2] Aksu Ö. F., Erdem O., Yeni bir birleştirme metodu: Sürtünmeli delme, 4th International Eurasian Conference On Science, Engineering and Technology, Ankara, 2022, 14-16 Aralık
- [3] A.A. Eliseeva, S.V. Fortunaa, E.A. Kolubaeva, T.A. Kalashnikovaa, Microstructure modification of 2024 aluminum alloy produced by friction drilling, *Materials Science & Engineering A.*, Volume 691,2017, Pages 121–125
- [4] Özek, C. & Bal, M. (2020). Sürtünmeli delme işleminde elde edilen kovanın ve pulun oluşmasına etki eden parametrelerin araştırılması. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 26 (4), 620-627
- [5] Nama, Sami & Namer, Nasri & Abdullah, Isam., Effect of Pre-hole Diameter on Bushing Dimensions for Friction Effect of Pre-hole Diameter on Bushing Dimensions for Friction Drilling Process of A6063-T6 Aluminum Alloy, Volume 39, 2016, Pages 373- 387
- [6] Dehghan, S., Ismail, MIS, Ariffin, MKA., Measurement and analysis of thrust force and torque in frictiondrilling of difficult-to-machine materials. *Int J Adv Manuf Technol*, Volume 105, 2019, Pages 2749–2769
- [7] Scott F. Miller, Peter J. Blaub , Albert J. Shih, Tool wear in friction drilling, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2007, Pages 1636–1645
- [8] D. Nardi, L.Norberto López de Lacalle, A.Lamikiz, J.L Arana, Friction Drilling of Galvanized Dual Phase Steels, *Revista de Metalurgia*, Volume 48, 2012, Pages 13-23
- [9] Shin Min Lee, Han Ming Chow, Fuang Yuan Huang, Biing Hwa Yan,Friction drilling of austenitic stainless steel by uncoated and PVD AlCrN- and TiAlN-coated tungsten carbide tools, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Volume 49, 2009, Pages 81–88

- [10] Demir, Z., A7075-T651 Alaşımının Sürtünmeli Delinmesinde Takım Geometrisinin Etkisinin Araştırılması. Batman Üniversitesi Yaşam Bilimleri Dergisi, Volume 5, 2015, Sayfa 13-25
- [11] M. Boopathi, S. Shankara, S. Manikandakumara, R. Rameshb, Experimental Investigation of Friction Drilling on Brass, Aluminium and Stainless Steel, Procedia Engineering, Volume 64 ,2013, Pages 1219 – 1226
- [12] Demir, Z., A7075-T651 ve St 37 Alaşımlarının Sürtünmeli Delinmesinde Kovanı Oluşturan Malzeme Hacminin Araştırılması. Batman Üniversitesi Yaşam Bilimleri Dergisi, Volume 5, 2015, Sayfa 85-101
- [13] M. Baraheni, A. B. Bami, A. Alaei, S. Amini, Ultrasonic-assisted friction drilling process of aerospace aluminum alloy (AA7075): FEA and experimental study, International Journal of lightweight Materials and Manufacture, Volume 4, 2021, Pages 315- 322
- [14] Hamzawy, Nadia & Khedr, Mahmoud & Mahmoud, T. & El Mahallawi, Iman & Khalifa, prof.tarek., Investigation of Temperature Variation During Friction Drilling of 6082 and 7075 Al-Alloys, 2020
- [15] G. Somasundaram, S. Rajendra Boopathy, K. Palanikumar, Experimental investigation on roundness error in friction drilling and mechanical properties of Al/SiCp-MMC composites, M'ecanique & Industries, Volume 12, 2011, Pages 445–457
- [16] T. Pangjundee, A. Muttamara, Influence of Process Parameters in Friction Drilling of Titanium Ti-6AL-4V Alloy,MM Science Journal, 2021, October
- [17] H. Wu, M. Porter, R. Ward, J. Quinn, C.c McGarrigle, S. McFadden, Investigation of the Mechanical Properties of Friction Drilling with 6082-T6 Aluminium Alloy, Materials, Volume 15, 2022
- [18] N. Felinks, T. Overberga, Y. Sarafrazb, F. Waltherb, D. Biermann, Adapted Proves Strategies in Front Face Flow Drilling and Thread Forming of Lightweight Casting Materials, Procedia CIRP, Volume 103, 2021 Pages 213–218
- [19] N.R. J. Hynes, R.Kumarb, Simulation on friction drilling process of Cu2C, Materials Today: Proceedings, Volume 5, 2018, Pages 27161–27165

- [20] M. Alphonse a, V.K. Bupesh Raja b, L. Vinay Rama Chandra c, B. Venkata Subbaiah c , R. Sai Uday Kiran c , V. Gopala Krishna, Experimental investigation and optimization of surface treated and coated friction drilling tool for AZ31B magnesium alloy, *Materials Today: Proceedings*, Volume 44, 2021, Pages 3760–3766
- [21] J. Dhanapal, S. Das, H. Ghaednia, M. Bell, Experimental study on structural performance of flow drilled connections in HSS members, *Journal of Constructional Steel Research*, Volume 164, 2020, 105786
- [22] M. Z. Abdul Mutalib, M. I. S. Ismail, N. A. Abdul Jalil, A. As'arry, Characterization of tool wear in friction drilling, *Jurnal Tribologi*, Volume 17, 2018, Pages 93-103
- [23] R. Kumar, N. Rajesh Jesudoss Hynes, Thermal drilling processing on sheet metals: A review, *International Journal of Lightweight Materials and Manufacture*, Volume 2, Issue 3, 2019, Pages 193-205,
- [24] Raju, B. P., & Swamy, M. K., Finite element simulation of a friction drilling process using deform-3D, *International Journal of Engineering Research and Applications*, Volume 2 Issue 6, 2012, Pages 716-721.
- [25] M. Kerkhofs, M. Van Stappen, M. D'Olieslaeger, C. Quaeyhaegens, L.M. Stals, The performance of (TiAl) N-coated flowdrills, *Surface and Coatings Technology*, Volumes 68–69, 1994, Pages 741-746,
- [26] Stephan Altvater, Sebastian P. Sikora, Tjark Siefkes,, Transition between flow-drill screwing systems considering joining process and joint characteristics, *Advances in Industrial and Manufacturing Engineering*, Volume 5. 2022
- [27] Krasauskas, P., Experimental and statistical investigation of thermo-mechanical friction drilling process. *Mechanics*, Volume 17 Issue 6, 2011 Pages, 681-68
- [28] Kanagaraju, T., Peter, J. S. J., Samuel, D. R., & Prakash, J. P., Optimization of drilling parameters for thrust force and torque in friction drilling process. *Middle-East Journal of Scientific Research*, Volume 24 Issue 4, 2016, Pages 1577-1582.
- [29] Fernández, A., Lopez de Lacalle, L. N., & Lamikiz, A., Friction drilling of stainless steels pipes. In *AIP Conference Proceedings American Institute of Physics*. Volume 1315, 2011 January, Pages 1187-1192

- [30] Ge X, Liu H, Yu Z, Zhu L. The effect of staged process parameters for flow drill screws on the strength of the connection between carbon fiber-reinforced plastic and aluminum alloy. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering*, 2024
- [31] Aslan, F., Langlois, L., & Balan, T., Experimental analysis of the flow drill screw driving process. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Volume 104, 2019, Pages 2377-2388
- [32] Wang, S., Min, J., Lin, J., Wan, H., & Wang, Y., Flow drill riveting of carbon fiber-reinforced polymer and aluminum alloy sheets. *Welding in the World*, Volume 63, 2019, Pages 1013-1024
- [33] Skovron, J. D., Ulutan, D., Mears, L., Detwiler, D., Paolini, D., Baeumler, B., & Claus, L., Effect of Thermal Assistance on the Joining of Al6063 During Flow Drill Screwdriving. In *International Manufacturing Science and Engineering Conference American Society of Mechanical Engineers*, Volume 56826, 2015 June
- [34] Guzanová, A., Janoško, E., & Veligotskyi, N., Optimization of joining parameters of thin-walled materials by flowdrill technology. *Machines. Technologies. Materials.*, Volume 16, 2022, Pages 176-178
- [35] Özkaya, E., Hannich, S., & Biermann, D., Development of a three-dimensional finite element method simulation model to predict modified flow drilling tool performance. *International Journal of Material Forming*, Volume 12, 2019, Pages 477-490
- [36] Kumar, R., & Hynes, N. R. J., Finite-element simulation and validation of material flow in thermal drilling process. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, Volume 40, 2018, Pages 1-10
- [37] Ozler, L., & Dogru, N., An experimental investigation of hole geometry in friction drilling. *Materials and Manufacturing Processes*, Volume 28, 2013, Pages 470-475
- [38] Somasundaram, G., & Boopathy, S. R., Fabrication and friction drilling of aluminum silicon carbide metal matrix composite. In *Frontiers in Automobile and Mechanical Engineering*, 2010 November, Pages 21-26

- [39] Ku, W. L., Chow, H. M., Lin, Y. J., Wang, D. A., & Yang, L. D., Optimization of thermal friction drilling using grey relational analysis. *Advanced Materials Research*, Volume 154, 2011, Pages 1726-1738
- [40] Urbikain, G., Perez, J. M., López de Lacalle, L. N., & Andueza, A., Combination of friction drilling and form tapping processes on dissimilar materials for making nutless joints. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, Volume 232, 2018, Pages 1007-1020
- [41] Kaya, M. T., Aktas, A., Beylergil, B., & Akyildiz, H. K., An experimental study on friction drilling of ST12 steel. *Transactions of the Canadian Society for Mechanical Engineering*, Volume 38(3), 2014, Pages 319-329
- [42] Skovron, Jamie & Mears, Laine & Uluhan, Durul & Detwiler, Duane & Paolini, Daniel & Baeumler, Boris & Claus, Laurence, Characterization of Flow Drill Screwdriving Process Parameters on Joint Quality. *SAE International Journal of Materials and Manufacturing*, Volume 8, 2014, Pages 35-44
- [43] Shuqiang Lyu, Jing Ding, Jie Cui et al. Numerical modeling and simulation of the flow drill screw process for joining A365 and A6N01 multi-material joints, 13 November 2023, PREPRINT (Version 1) available at Research Square
- [44] Kuan-Yu Su, Torgeir Welo, Jyhwen Wang, Improving Friction Drilling and Joining through Controlled Material Flow, *Procedia Manufacturing*, Volume 26, 2018, Pages 663-670,
- [45] Tunalioglu, M. Ş., & Keser, M., Experimental Investigation of Flow Drilling and Flow Tapping of Thin-Walled Square and Circular Hollow Sections. *International Journal of Automotive Science And Technology*, Volume 8, 2024, Pages 188-200.
- [46] Özek C. ve Z. Demir, A7075-T651 alaşımının sürtünmeli delinmesinde kovan yüksekliğinin malzeme kalınlığına göre araştırılması, *Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi*, Volume 2013, Pages 61-67
- [47] Ku, WL., Hung, CL., Lee, SM., Optimization in thermal friction drilling for SUS 304 stainless steel, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technolgy*, Volume 53, 2011, Pages 935–944

- [48] Eliseev A., Kolubaev E., Friction Drilling: a review, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Volume 116, 2020, Pages 1391-1409
- [49] Aka M., Erdem, O. (2021), Sürtünmeli Delme Yöntemi ve Uygulamaları, International Conference on Materials Science, Mechanical and Automotive Engineerings and Tecnology (IMSMATEC'21)
- [50] Demirel, M. Y. & Karağaç, İ., Sürtünmeli Delik Delme Prosesi ve Prosesin Başlıca Uygulamaları. El-Cezeri, Volume 4 (2), 2017, Pages 234-248
- [51] France J.E., Davison J.B., Kirby P.A., “Strength and rotational stiffness of simple connections totubular columns using flowdrill connectors”, Journal of Constructional Steel Research, Volume 50, 1990, Pages 15-34
- [52] Miller S.F., Peter J. Blaub, Albert J. Shih, Toolwear in friction drilling, International Journal of Machine Tools & Manufacture, Volume 47, 2007, Pages 1636–1645
- [53] El-Bahlouls., A., Friction drilling of cast aluminum alloy A380 without significant petal formation and radal fracture, İnternational Journal of Precision Engineering and Manufacturing, Volume 20, 2019, Pages 45-52
- [54] https://www.flowdrill.com/eu_en/, Erişim Tarihi: 17.10.2022
- [55] Zurrayen M, Mutalib A, Idris M, Ismail S, Aswan N, Jalil A., Characterization of toolwear in friction drilling. J Tribol, Volume 17, 2018, Pages 93–103
- [56] Demir Z., Özek C. “Sürtünmeli Delme İşleminde Vida Sıyırma Kuvvetinin Araştırılması” 4. Ulusal Talaşlı İmalat Sempozyumu, 07-09 Kasım 2013, Kuşadası
- [57] Behrens, B.-A.; Dröder, K.; Hürkamp, A.; Droß, M.; Wester, H.; Stockburger, E. Finite Element and Finite Volume Modelling of Friction Drilling HSLA Steel under Experimental Comparison. Materials, 14, 2021, 5997.
- [58] Gopichand A.; Veera Brahmam M.; Bhanuprakash, International Journal of Engineering Research and Technology, Volume 3, 2014, Pages 602-607
- [59] Dekkers, G., Flowdrill prosesi firma katalogları, Copyright by Flowdrill, B. V. Holland, 1-30 .

[60] Özek, C., & Bal, M., Sürtünmeli delme işleminde elde edilen kovann ve pulun oluşmasına etki eden parametrelerin araştırılması. Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, Volume 26, 2020, Pages 620-627.

[61] Scott F. Miller, Jia Tao, Albert J. Shih, Friction drilling of cast metals, International Journal of Machine Tools and Manufacture, Volume 46, Issues 12–13, 2006, Pages 1526-1535



ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad: Ömer Faruk AKSU

Eğitim

- Lise Mezuniyet: 2015, Serhat Lisesi
- Lisans Mezuniyet: 2021, Kırıkkale Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü

Deneyimler

- (02.2023 – Halen), Üretim Mühendisi, Kalyon PV- Ingot Fabrikası
- (12.2022 – 02.2023), Arge Mühendisi, Set Solar
- 2018, Staj, Beyer Makine
- 2018, Staj, Gökçek Makine
- 2017, Staj, Ayyıldızmak Savunma Medikal Makine