



## Investigation of bushing dimensions and micro hardness changes in thermal friction drilling process

Cebeli Özek\*<sup>ID</sup>, Muhammet Bal<sup>ID</sup>

Mechanical Engineering Department, Faculty of Technology, Firat University, Elazığ, 23119, Turkey

### Highlights:

- Tool diameter and material thickness has an important effect on friction drilling of brittle and ductile material
- The parameters affecting the bushing wall thickness and bushing height have been determined
- The microstructure and the change of micro-hardness in the bushing structure were investigated

### Keywords:

- Friction drilling
- Bushing height
- Bushing wall thickness
- Micro hardness

### Article Info:

Research Article  
Received: 22.04.2019  
Accepted: 19.09.2020

### DOI:

10.17341/gazimmfd.556943

### Correspondence:

Author: Cebeli Özek  
e-mail: cozek@firat.edu.tr  
cebeli23@gmail.com  
phone: +90 237 0000-40/4378

### Graphical/Tabular Abstract

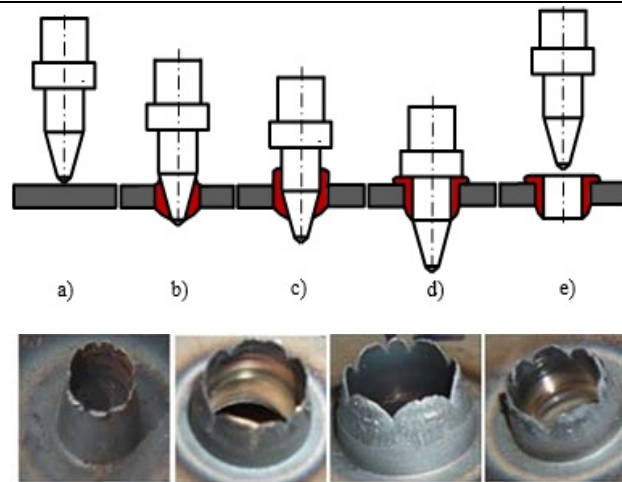


Figure A. Stages of conventional friction drilling process and the resulting bushing pictures

**Purpose:** The purpose of friction drilling method (FDM) is to increase the length of the connection for the bushing formed on the wall and the lower part of the hole in the thin-walled sheet.

### Theory and Methods:

In the study, A7075-T651 Aluminum alloy and St37 steel plates supplied in 2 mm, 4 mm, 6 mm, 8 mm and 10 mm thicknesses and 70x500 mm dimensions were used. A total of 20 HSS and 8 WC friction drilling tools were used. The tests were carried out using HSS tool for A7075-T651 alloy with  $n=1120$  (rpm) rotation speed,  $f=25$  mm/min feed rate and tool taper angle  $\theta=36^\circ$ , 60 pieces using WC tool for St37 steel material. A total of 132 experiments were conducted by drilling holes. The experiments were carried out on a TYT400 type universal milling machine. The test specimens were rigidly fixed to the milling machine table with bolts and lugs using a clamping mold. In order to prevent the loss of time required for the workpiece temperature to cool down to room temperature, the holes were successively drilled at constant distances with equal spacing of 100 mm from each other.

### Results:

Material thickness, tool diameter, shaft length of the drilling tool ( $l_1$ ) and the heat generated by the friction effect are the main factors affecting the bushing height in FDM. As the material thickness increases, the contact area between the rotating tool and the drilled material increases, so the flow of material in the direction of the tool increases along the shaft length ( $l_1$ ) of the tool. In ductile materials, a bushing can be obtained that has a cylindrical length suitable for its purpose and increases the length of the connection. But it has been determined that a bushing in the desired shape cannot be obtained in brittle materials.

### Conclusion:

It has been determined that tool diameter, material thickness, brittle material and ductile material have an important effect on bushing wall thickness and bushing height.



## Termal sürtünmeli delme işleminde oluşan kovan boyutları ve mikro sertlik değişimlerinin araştırılması

Cebeli Özek\*<sup>ID</sup>, Muhammet Bal<sup>ID</sup>

Fırat Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 23119, Elazığ, Türkiye

### Ö N E Ç İ K A N L A R

- Gevrek ve Sünek malzemelerin sürtünmeli delinmesinde takım çapının ve malzeme kalınlığının önemli bir etkisi vardır
- Kovan çeper kalınlığı ve kovan boyu üzerinde etkili olan parametreler belirlenmiştir
- Kovan yapısında mikro yapı ve mikro sertliğin değişimi incelenmiştir

### Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi

Geliş: 22.04.2019

Kabul: 19.09.2020

### DOI:

10.17341/gazimmfd.556943

### Anahtar Kelimeler:

Sürtünmeli delme,  
kovan yüksekliği,  
kovan çeper kalınlığı,  
mikro sertlik

### ÖZET

Sürtünmeli delme, dönen bir takım ile iş parçası-takım ara yüzeyinde sürtünme sonucu oluşan ısının etkisiyle delik delme yöntemidir. Bu yöntemin amacı, ince cidarlı saclarda, deliğin üst kısmında oluşan çeper ve alt kısmında meydana gelen kovan için bağlantı uzunluğunun artırılmasıdır. Çalışma için, otomotiv ve havacılık endüstrisinde yaygın olarak kullanılan, t=2-10 mm kalınlıklarında A7075-T651 alaşımı ve St37 çelik saclar seçilmiştir. Deneysel çalışmalar TYT400 freze tezgâhında devir sayısı n=1120 d/d, f=25 mm/dak ilerleme hızında yapılmıştır. Takım koniklik açısı  $\theta=36^\circ$ ,  $\text{Ød}=5$ ,  $\text{Ød}=10$ ,  $\text{Ød}=15$ ,  $\text{Ød}=20$  mm çaplarında özel imal edilmiş yüksek hız çeliği (HSS) ve tungsten karbür (WC) takımlar kullanılmıştır. St37 çeliği sünek olduğundan devir sayısı ve ilerleme oranının değişmesiyle kovan biçiminde fazla bir değişme meydana gelmemiştir. A7075-T651 alüminyum alaşımında ise bağlantı uzunluğunun fazla artmadığı ve çatlağın yoğun olduğu taç yaprağı biçiminde kovan yapısı oluşmuştur. Sünek malzemelerde amacına uygun silindirik boyu fazla ve bağlantı uzunluğunu artıran biçimde bir kovan elde edilmiştir. Gevrek malzemelerde istenilen şekilde bir kovan elde edilemediği belirlenmiştir. Takım çapı ve malzeme kalınlığının kovan çeper kalınlığı, kovan yüksekliği ve mikro sertliği üzerinde önemli bir etkisinin olduğu gözlenmiştir.

## Investigation of bushing dimensions and micro hardness changes in thermal friction drilling process

### H I G H L I G H T S

- Tool diameter and material thickness has an important effect on friction drilling of brittle and ductile material
- The parameters affecting the bushing wall thickness and bushing height have been determined
- The microstructure and the change of micro-hardness in the bushing structure were investigated

### Article Info

Research Article

Received: 22.04.2019

Accepted: 19.09.2020

### DOI:

10.17341/gazimmfd.556943

### Keywords:

Friction drilling,  
bushing height,  
bushing wall thickness,  
micro hardness

### ABSTRACT

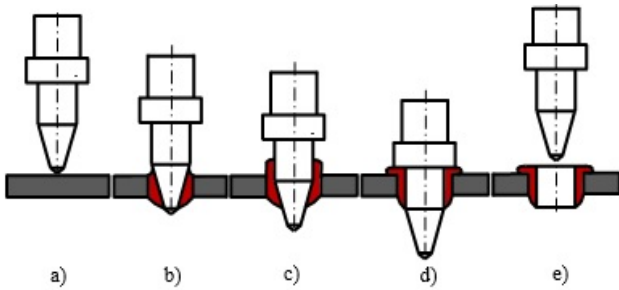
Friction drilling is a hole drilling method with the effect of heat caused by friction on a work piece-tool interface with a rotating tool. The purpose of this method is to increase the length of the connection for the bushing formed on the wall and the lower part of the hole in the thin-walled sheet. For the study, A7075-T651 alloy and St37 steel sheets have been selected with thickness for t=2-10 mm, which are commonly used in the automotive and aerospace industries. Experimental studies were carried out on the TYT400 milling machine at a speed of n=1120 rpm and f=25 mm/min. Specially manufactured high speed steel (HSS) and tungsten carbide (WC) tools were used, the tool profile with conical angle of  $\theta=36^\circ$  and the tool profile with diameters for  $\text{Ød}=5$ ,  $\text{Ød}=10$ ,  $\text{Ød}=15$ ,  $\text{Ød}=20$  mm. Since St37 steel is ductile, there is not much change in the shape of the bushing with the change of rotational speed and feed rate. On the other hand, A7075-T651 aluminium alloy has a crown-shaped sleeve structure, in which the connection length has increased too much and the crack is dense. In ductile materials, a bushing with a cylindrical length that is suitable for its purpose and increasing the connection length is formed. In the ductile materials, a bushing in the form of excessive cylindrical length and increasing the connection length was obtained. It was determined that a bushing cannot be obtained as desired in brittle materials. It has been observed that the tool diameter and material thickness have a significant effect on the bushing wall thickness, the bushing height and micro hardness.

\*Sorumlu Yazar/Corresponding Author: cebeli23@gmail.com, mbal023@gmail.com / Tel: +90 237 0000-40/4378

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Sürtünmeli delme yöntemi (SDY), ince kesitli malzemelerde bağlantı uzunluğunu artırmak amacıyla inşaat, otomotiv, tesisat vb. birçok alanda yaygın olarak kullanılan önemli bir imalat yöntemidir. Bu yöntemde, devir sayısı, ilerleme hızı, takım geometrisi, takım malzemesi, işlenecek malzemenin kalınlığı ve cinsi gibi parametrelerin işlem üzerinde önemli etkisi vardır. SDY’de takımın dönme ve ilerleme olmak üzere iki farklı hareketi söz konusudur.

Şekil 1’de, sürtünmeli delme yönteminin (SDY) adımları şematik olarak gösterilmiştir. Konik takımın ucu, Şekil 1(a)’da gösterildiği gibi iş parçasına yaklaşır ve nüfuz eder. Takım ile iş parçası arasındaki açılma hız ile oluşturulan aksel kuvvet temas yüzeyinde sürtünme ısısı üretir ve iş parçası malzemesini yumuşatır. Takım, iş parçasına ekstrüzyon yapıldığı için, Şekil 1b’de gösterildiği gibi, başlangıçta yumuşatılmış iş malzemesini yana ve yukarı doğru iter. İş parçası malzemesi viskoz ve yumuşatılmış halde, iş parçasını delebilir. Takım iş parçasına girdiğinde, Şekil 1c’de gösterildiği gibi daha fazla iş parçası malzemesini bir kenara itmek ve takımın silindirik bölümünü kullanarak kovan oluşturmak için aşağı doğru hareket eder. İşlem tamamlandığında, takımın omuzu, Şekil 1d’de gösterildiği gibi, malzeme üzerinde üste ekstrüzyon edilmiş çapakları iş parçasına bastırarak çeper oluşumunu sağlar. Ardından Şekil 1e’de gösterildiği gibi takım geri çekilir ve iş parçası üzerinde çeper ve malzemede kovan oluşturur.



**Şekil 1.** Geleneksel sürtünmeli delme işleminin aşamaları  
(Stages of the traditional frictional drilling process)

Takım, dönme ve ilerleme hareketi ile iş parçasına temas ettikten sonra malzemeye nüfuz etmeye başlar ve iş parçası-takım arasındaki sürtünme sonucu oluşan ısı ile iş parçası yumuşar. Takım ilerleme hareketi doğrultusunda ilerleyerek çevreye belirli miktarda malzeme yığarak, yumuşamış malzemenin dönme etkisi ile çevrede dairesel bir şekil almasını sağlamaktadır. Delinen malzemenin altında ilerleme yönünde oluşan kovan, takım ucunun delinen iş parçasının kalınlığından daha çok iş parçasına dalması ile malzemenin serbest akmasını kolaylaştırarak kovan boyunu artırmaktadır. Akma sırasında takımın ilerleme hareketinin etkisi ile yumuşamış malzeme aşağı doğru akarken çevreye yayılarak malzemenin üst kısmında çeper, alt kısmında ise kovan oluşturur. Oluşan kovan yumuşamış ve aşağı doğru serbest kaldığından malzemenin yapısında çeşitli boşluklar

ve çatlamlar meydana geldiğinden mikro yapı değişir ve yapıdaki boşluklar artmış olur. Çatlak ve boşluklar malzemenin sertliğinin azalmasına sebep olur. Takımın dönme hareketi ve yumuşamış malzemenin iş parçasının yüzeyine bastırması ile mikro yapının tane yapısı değişmektedir. Delik yüzeylerine yakın bölgelerde mikro sertlik değeri yüksek, delik yüzeyinden uzaklaştıkça mikro sertlik değeri azalmaktadır.

SDY ile ilgili yapılmış çalışmalarda, bağlantı uzunluğunu artırmak amacıyla kovan yüksekliği, kovanın kesit kalınlığı, oluşan çeper yüksekliği, kovanın ve pulun dış çapı gibi parametreler hakkında yeterli çalışmalar yapılmadığı görülmektedir. Yapılan çalışmalarda genelde malzeme kalınlıkları 1-2 mm ve takım çapları 8 mm’den daha küçük delik çaplarında elde edilen kovanın şekli, çeperin dış çapı ve kovan yüksekliği araştırılmıştır. Değişen malzeme kalınlığı ve delik çapları ile sonuçların nasıl değişeceği hakkında fazla bilgi bilinmemektedir. SDY, otomotiv endüstrisi, havacılık ve uzay mühendisliği, aydınlatma endüstrisi, metal konstrüksiyon, galvaniz kaplama, medikal ve fitness alet ve ekipmanları gibi birçok alanlarda, boru veya sac tipi ince cidarlı iş parçalarının delme işleminde yaygın olarak kullanılan geleneksel olmayan bir delme yöntemidir [1]. Termal sürtünmeli delme ile paslanmaz çelik sacların delinmesinde, sürtünme açıları, sürtünme temas alanı oranı, ilerleme hızı ve iş mili hızının yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkileri incelenmiştir. Çalışmada işleme sürecini optimize etmek için Taguchi yöntemi kullanılmışlardır. SDY’de üç boyutlu bir sonlu elemanlar modeli geliştirmişlerdir. Ayrıca, farklı malzemelerin, özellikle de işlenmesi zor malzemelerin sürtünmeli delme işlemi için farklı tasarımlarda takımlar kullanılarak yapılmıştır [2].

Sürtünmeli delme işleminin amacı ince cidarlı malzemelerde bağlantı uzunluğunu artıracak kovan oluşumunu sağlamaktır. Bağlantı uzunluğunu artıran kovan biçimi olmasına rağmen, bu konuda fazla çalışma yapılmamıştır. Yapılan çalışmada, aynı şartlarda A7075-T651 alüminyum alaşımı ve St37 çeliğinin sürtünmeli delme işleminde takım çapının ve malzeme kalınlığının kovan yüksekliği, kovan çeper kalınlığı, kovan mikro sertliği ve kovan mikro yapısı üzerinde önemli, ancak malzeme kalınlığının takım çapına göre daha az bir etkisinin olduğu tespit edilmiştir. Takım çapı ve malzeme kalınlığının artmasına bağlı olarak malzeme yumuşayarak viskoz hale gelmektedir. Takımın ilerleme doğrultusunda akan malzeme miktarı arttığından kovan yüksekliği de artmaktadır. Kovanın taç yaprağı biçiminde meydana gelmesi ve kovanın üzerindeki çatlakların oluşması artan malzeme kalınlığı ve takım çapının artması ile azalmaktadır. Böylece, amacına uygun çatlakların az olduğu ve silindirik biçimde kovanlar elde edilmektedir. St37 çeliği sünek olduğundan dönme hızı ve ilerleme oranının değişmesiyle kovan biçiminde fazla bir değişme meydana gelmemiş, amacına uygun silindirik ve bağlantı uzunluğu artmış şekilde kovan elde edilmiştir. A7075-T651 alüminyum alaşımında ise bağlantı uzunluğunun fazla artmadığı ve çatlakların yoğun olduğu taç

yaprağı biçiminde kovan yapısı oluşmuştur. Sünek malzemelerde amacına uygun silindirik boyu fazla ve bağlantı uzunluğunu artıracak biçimde bir kovan meydana gelmektedir. Gevrek malzemelerde istenilen biçimde bir kovan elde edilemediği belirlenmiştir. SDY'de takım, yumuşamış olan iş parçasından çıkan malzemeyi aşağı doğru iterken kovanın mikro yapısında önemli değişiklikler ve özellikle kovan yapısında boşluklar meydana gelmektedir. Bu boşluklar kovan yapısında tane boyutlarının küçülmesine, sürtünmeden ve dönen takımın yapmış olduğu baskıdan dolayı tane sınırlarının uzamasına ve taneler arası boşlukların artması ile mikro sertliği etkilemektedir. Delik merkezine yakın, ısının tesiri altındaki bölgede deformasyon sertleşmesi sonucu ince taneli bir yapı oluşmaktadır. Buna bağlı olarak mikro sertlik delik çevresine yakın, ısının tesiri altındaki bölgede artarken, delik merkezinden uzaklaştıkça esas malzeme sertliğine yakın ve giderek esas malzeme sertliğine ulaşmaktadır.

## 2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI (LITERTURE REVIEW)

Miller vd. [3] dik işleme merkezli bir tezgâhta, 2800 d/d dönme hızı ve 254 mm/dak ilerleme oranı şartlarında 1.5 mm cidar kalınlığına sahip içi boş kare profil parçalara sürtünmeli delme yöntemi ile tungsten karbid malzemeden imal edilmiş ve çapı 5.3 mm, uç koniklik açısı 90°, konik yüzey koniklik açısı 36° olan takımları kullanarak delikler işlemişlerdir. İşlem sırasında 9272A Kistler Model Piezoelektrik delme dinamometresi ile işleme anında meydana gelen eksenel ve radyal kuvvetleri ölçmüşlerdir. Yaptıkları çalışmada takım aşınma miktarının minimum olduğunu, meydana gelen aşınmanın özellikle takımın silindirik ve konik yüzeylerin geçiş bölgesinde yoğunlaştığını, işlem boyunca takımın uç kısmının giderek aşınarak sivrileştiğini bu sivrilğin aşındığını ve itme kuvvetini azalttığını ifade etmişlerdir. Radyal kuvvetin takım aşınması üzerinde herhangi bir etkisinin olmadığını, her bir deliğin işleme süresinin yaklaşık olarak 2, 3 saniye olduğunu, takımın aşınmasında adhezyon, oksidasyon ve abrasyon aşınma mekanizmalarının etkili olduğunu tespit etmişlerdir. Miller ve Shih [4] sürtünmeli delme işlemi sırasında meydana gelen plastik deformasyon sonucu oluşan ısı miktarını, itme ve radyal kuvvetler ile iş parçasının sıcaklığını 3D-FEM modelleme yöntemiyle ölçmüşlerdir. Sürtünme katsayısının 0,7 olduğu, işlem sırasında iş parçasının sıcaklığının arttığını, parçanın yumuşadığını ve istenilen şekilde bir kovan profilinin oluştuğunu, iş parçası malzemesinden ısı etkisi ile akan malzemenin takımın dönme doğrultusunda aktığını ve kovan boyunun artmış olduğunu tespit etmişlerdir. Miller vd. [5] CNC dik işleme merkezli tezgâhta 9272A Kistler Model Piezoelektrik delme dinamometresini kullanarak, kobalt matrisli tungsten karpit takım ile 1.19 mm kalınlığındaki AISI1020 çelik plakaya sürtünmeli delme yöntemiyle delikler delmişlerdir. Takım ucunun kör olması durumunda delme işlemi için gerekli olan ısı girişinin arttığını, takımın konik bölgesinin işlem boyunca iş parçası ile sürtünmesi sonucunda ısı oluştuğunu gözlemlemişlerdir. Takımda silindirik bölgenin delik ve kovanın oluşumunu sağladığını, omuz bölgesinin ise iş

parçasının yüzeyine temas ederek delme sonucu çıkan malzemeyi yüzeye bastırarak çeperin oluşmasında etkili olduğunu ifade etmişlerdir. Chow vd. [6] tungsten karbür malzemeden, konik yüzeyin etrafına 4 adet yaprak yüzey oluşturularak koniklik açıları 30°, 45° ve 60° olan farklı sürtünmeli delme takımları imal etmişlerdir. 2 mm kalınlığındaki AISI304 östenitik paslanmaz çelik malzemeye, 75, 100, 125 mm/dak ilerleme oranları ve 30, 60, 90 m/dak kesme hızı şartlarında sürtünmeli delme yöntemi ile delikler delmişlerdir. Bu şekilde takım ömrünün düştüğünü, ancak oluşan kovanın yüksekliğinin ve yüzey kalitesinin daha iyi olduğunu tespit etmişlerdir. Ku vd. [7] paslanmaz çelik plakalara termal sürtünmeli delme işleminde işlemin optimizasyonu için Taguchi yöntemini kullanarak bir çalışma yapmışlardır. Sürtünme açısının, sürtünme temas alanı oranının ve ilerleme hızının yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Sürtünme temas alanı oranının en önemli faktör olduğunu belirlemişlerdir. Lee vd. [8] 30x30x2 mm boyutlarında AISI304 östenitik paslanmaz çeliğine kaplanmış TiAlN ve AlCrN ve kaplanmamış tungsten karbür takımlar kullanarak sürtünmeli delme yöntemi ile delikler delmişlerdir. Kaplanmış takımların yüzeyine ısı giriş miktarının kaplanmamış takıma göre daha az olduğunu, çok yüksek dönme hızlarında kaplanmış takımlarda büyük oranlarda aşınmanın meydana geldiğini, kaplanmış takımlardaki kaplama tabakasının aşınmadan çok yağlama etkisi yaptığı sonucuna varmışlardır. Gopal vd. [9] HSS takımlar kullanarak, AA6351 Alüminyum alaşımının sürtünmeli delik delme yöntemi ile delinmesinde, eksenel kuvvet ve momentin tespiti için matematiksel bir model geliştirmişlerdir. Takım koniklik açısının önemli bir parametre olduğunu, bunun hem takımın dönme momentini hem de itme kuvvetini etkilediğini ifade etmişlerdir. Bu işlemin iki kademeli delme ve havşa açma işlemlerinde kolaylıkla kullanılabileceğini, düşük ve orta devir sayılarında AA63351 alaşımının sürtünmeli delinmesinde iyi bir yüzey elde edildiğini tespit etmişlerdir. Pantawane ve Ahuja [10] AISI1015 çelik malzemeye sürtünmeli delik delme yöntemi ile delikler delinerek delme işleminde deliğin kalitesi üzerinde etkili parametreleri belirlemek için matematiksel bir model geliştirmişlerdir. Modelde hızın yüzey pürüzlülüğü üzerinde önemli bir etkisinin olduğunu göstermişlerdir. Wei-Liang vd. [11] SUS304 paslanmaz çeliğin termal sürtünmeli delme yöntemi kullanılarak delinmesi için sinterlenmiş karbür takımlar kullanılarak Taguchi yönteminde işlem parametrelerini optimize etmişlerdir. 30x30x2 boyutlarında paslanmaz çelik levhaların sürtünmeli delinmesinde Takımın sürtünme açısı, sürtünme temas alanı oranı, ilerleme hızı ve takım dönme hızının yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Çalışmada, ANOVA programı ile yüzey pürüzlülüğü ve kovan yüksekliği için uygun parametreleri tespit etmişlerdir. Sürtünme açısının ve takımın dönme hızının yüzey pürüzlülüğü, kovan yüksekliği ve sürtünme temas alanı oranı üzerinde önemli parametreler olduğunu tespit etmişlerdir. Padma ve Swamy [12] DEFORM (3D) yazılımını kullanarak AISI4340 malzemesinin tungsten karbür takımlar kullanılarak sürtünmeli delinmesinde takım

şeklinin oluşan kovan biçimi üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Oluşan kovanın şeklinin taç yaprağı şeklinde meydana geldiği ve yüzeyde daha az çatlaklar oluştuğunu gözlemlemişlerdir. Yüksek ilerleme hızlarında ve düşük dönme hızlarında itme kuvvetinin ve momentin gözle görülür şekilde azaldığını tespit etmişlerdir. Yang vd. [13] farklı iş mili hızları ve ilerleme hızları için üç tip Ni bazlı süper alaşımını (Mar-M247, Haynes-230 ve Inconel-718) termal sürtünmeli delme yöntemi ile çeşitli deneyler yapmışlardır. Inconel-718, yüksek akma dayanımına sahip olduğu için en yüksek aşınma, sürtünmeli delme sırasında iş parçasından geçen ısının en az olmasından dolayı kısa kovan yüksekliği ve en kötü yüzey pürüzlülüğünün elde edildiği, ancak yüksek eksenel kuvvetlerin meydana geldiğini malzemenin mukavemet ve mekanik özelliklerinin en önemli faktör olduğunu ifade etmişlerdir. Haynes-230, en düşük aşınma ve akma dayanımına sahip olduğundan, iş parçasından geçen ısının fazla olmasından dolayı en küçük eksenel kuvvet meydana gelmekte ve en uzun burç boyu ve en iyi yüzey pürüzlülüğünün oluştuğunu göstermişlerdir. Raju ve Swamy [14] DEFORM-3D yazılımı kullanarak, AA6061 malzemesinin sonlu elemanlar modeli ile tungsten karbür takımlar kullanılarak sürtünmeli delme yöntemi ile delinmesinde oluşan gerilmeleri araştırmışlardır. İlerleme hızı ve takım dönme hızları arttığında gerilmelerin azaldığını, ancak dönme hızı 3000 dev/dak'dan 3500 dev/dak'ya artması ile gerilmelerde artmaktadır. 4000 dev/dak'dan daha yüksek devir sayılarında kovanın biçiminde bozulmaların meydana geldiği, çeşitli dönme ve ilerleme hızlarında en etkili gerilmeleri ve uzamaları tespit etmişlerdir. İlerleme oranı ve dönme hızı arttıkça gerilmelerin azaldığı, uzamaların ise arttığı, ancak belli bir dönme hızından sonra uzamanın ilerleme oranına bağlı olarak azaldığını göstermişlerdir. Krasauskas vd. [15] ABAQUS/EXPLICIT sonlu elemanlar analizinde Tungsten karbür takım kullanılarak AISI304 paslanmaz çeliğinin termal sürtünmeli delinmesinde eksenel kuvvet değişiminin etkisini araştırmışlardır. Deneysel ve analiz sonuçlarının birbirleri ile uyumlu olduğunu ifade etmişlerdir. Boopathi vd. [16] alüminyum, pirinç ve paslanmaz çelik malzemelerin sürtünmeli delme işleminde sabit dönme hızı, sabit ilerleme hızında itme kuvvetleri ölçülmüş ve analizleri yapılmıştır. İtme kuvveti, sabit dönme ve ilerleme hızında kademeli bir artış göstermiştir. Yüksek hızlarda daha yüksek ısının oluştuğunu ve deliğin delinmesi için gereken itme kuvvetinin takım hızı arttıkça azaldığını, en düşük itme kuvveti, Alüminyum için 1512 N, pirinç için 1798 N ve en yüksek itme kuvveti ise paslanmaz çelik için 2745 N olarak elde edilmiştir. Sertliğinin deliğin yüzeyine yakın bölgelerde arttığı görülmüştür. Mikro yapıda, alüminyum iş parçasında malzeme transferinin fazla olduğu, pirinç de malzeme transferi daha az miktarda gerçekleşirken, paslanmaz çelikte ise herhangi bir malzeme transferinin gerçekleşmediği görülmüştür. Özek ve Demir [17, 18] yapmış oldukları çalışmalarda 2 mm, 4 mm ve 6 mm kalınlıklardaki A7075-T651 alaşımının sürtünmeli delme işlemini gerçekleştirmişlerdir. Delme işleminde 24°, 36° ve 48° koniklik açısına sahip HSS takımlar kullanılarak farklı dönme ve ilerleme hızlarında 8 ve 10 mm çaplarında delikler

delerek malzeme kalınlığına ve delik çapına bağlı olarak oluşan kovan yüksekliğini araştırmışlardır. Malzeme kalınlığının artması ile kovan yüksekliğinin düzenli artmadığını ifade etmişlerdir. En yüksek kovan boyunun, 2400 d/d, 50 mm/min ilerleme hızında, 6 mm kalınlıktaki malzemede 12 mm delik çapındaki takımda elde edildiğini, artan malzeme kalınlığı ile kovan yüksekliğinin azaldığı ve dolayısıyla malzeme kalınlığının Alüminyum malzemede oluşan kovan yüksekliği üzerinde fazla bir etkisinin olmadığını tespit etmişlerdir. Kaya vd. [19] St12 çeliğinin sürtünmeli delinmesinde yüzey sıcaklığının, itme kuvvetinin ve momentin değişimini araştırmışlardır. Deneysel çalışmalardan itme kuvveti ve momente bağlı olarak sürtünme açısı, ilerleme hızı ve sürtünme temas alanı oranının arttığını, dönme hızının artması ile itme kuvvetinin ve momentin azaldığını tespit etmişlerdir. Dönme hızının artması ile iş parçası yüzey sıcaklığının arttığı, ilerleme oranı artarken yüzey pürüzlülüğünün iyileştiği ve ilerleme oranı artarken kovan yüksekliğinde arttığını ifade etmişlerdir. Hynes vd. [20] AA6061-T6 alaşımının sürtünmeli delme yönteminde delinmesinde, termal davranışları sayısal analizler yaparak incelemişler ve ısı akışını sayısal modele uygulayarak sıcaklık dağılımını gözlemlemişlerdir. Sayısal analizlerde AA6061-T6 malzemesinin merkezinde maksimum sıcaklığın oluştuğu ve 332,85°C olduğu gösterilmiştir. Bu sıcaklıkta sac malzemenin viskoplastik hale geldiğini ve kovan yüksekliği üzerinde etkili olduğunu tespit etmişlerdir. Bahloul vd. [21] AISI304 paslanmaz çeliğinin Tungsten Karbür takımlar ile sürtünmeli delme yönteminde deneysel ve analitik olarak bulanık mantık tekniğini kullanarak araştırmışlardır. En iyi sonuçların takım çapı 9.2 mm, 30°sürtünme açısında, %50 sürtünme temas alanı oranında, 60 mm/min ilerleme hızında elde edildiğini ifade etmişlerdir. Deneysel ve bulanık mantık ile elde edilen sonuçların kalite özellikleri bakımından birbirleri ile aynı olduğunu vurgulamışlardır. Wu vd. [22] Takımın baskı kuvvetini ve momentini tahmin etmek için sayısal olarak bir sürtünmeli delme modeli geliştirilerek bu modelden elde ettikleri sürtünme katsayısını deneysel çalışmalardan elde edilen sürtünme katsayısı ile karşılaştırmışlardır. Sıcaklık, basınç ve sürtünme katsayısındaki değişimleri dikkate alarak sürtünmeli delme için yeni bir kuvvet modeli geliştirilmiştir. Deneysel çalışmalar ile geliştirilen modelden elde edilen değerlerin uyumlu olduğunu ifade etmişlerdir. Demir Z. [23] yaptığı çalışmada, 4 mm kalınlığında A7075-T651 alüminyum alaşımını çapı 8 mm olan HSS ve St37 çeliğini ise çapı 10 mm olan WC takımlar kullanılarak sürtünmeli delme yöntemiyle delerek farklı devir sayısı ve ilerleme hızlarında oluşan kovan hacminin yapısını incelemiştir. Takımların silindirik bölge uzunluğunun, koniklik açısının, dönme hızının ve ilerleme hızının oluşan kovanın hacmi üzerindeki etkisini araştırmış, kovan üst pulunun ve kovayı oluşturan malzemenin hacimlerindeki değişimi incelemiştir. Değişen parametreler ile sünek olan St37 çeliğinin kovan hacmi gevrek olan A7075-T651 alaşımının kovan hacmine göre daha az değişiklik gösterdiğini tespit etmiştir. Eliseev vd. [24] AA204 alüminyum malzemenin sürtünmeli delme işleminde mikroyapı değişimlerini incelemişlerdir. Delik kenarlarının hemen yakınında ince taneli ve kararlı ikinci faz

parçacıklarının düşük hacimli parçacıklara sahip olduğunu ve yeniden kristalleşmiş bir malzeme tabakasının meydana geldiğini, yüksek sıcaklık, ısıl dönüşüm ve normal deformasyonun etkisiyle delme işlemi sırasında ikinci faz parçacıklarının çözüldüğünü ifade etmişlerdir. Isıdan etkilenmiş bölgedeki büyük ve uzun tane yapıları arasında bölgesel bir plastik akıştan kaynaklanan yeniden kristalleşmiş çeşitli malzeme tabakalarının oluştuğunu tespit etmişlerdir. Bilgin vd. [25] Farklı özellikteki malzemelerin sürtünmeli delinmesini sayısal ve deneysel olarak incelemişlerdir. Sonlu elemanlar metoduna (FEM) dayanan deform-3D yazılımını kullanmışlardır. Delme sırasında işlem parametrelerine bağlı olarak oluşan moment, eksenel kuvvet ve ısı transfer katsayısını hesaplayan analitik bir model geliştirmişlerdir. Deneysel ve sayısal analizlerden elde edilen sıcaklık, moment ve eksenel kuvvet sonuçlarını karşılaştırmışlardır. Moment ve eksenel kuvvet değerleri, iş mili hızının artmasıyla azalırken, iş mili hızının artmasıyla birlikte iş parçasının merkezinde sıcaklık değerlerinin arttığını tespit etmişlerdir. Rajesh vd. [26] yaptıkları çalışmada, galvanizli çeliğin termal olarak delinmesinde, burç uzunluğunun mekanizmasını ve oluşumunu deneysel ve Taguchi L27 ortogonal dizisine dayanarak sayısal olarak araştırmışlardır. Deneylerde dönme hızı, takım açısı ve iş parçası kalınlığı gibi önemli işlem parametrelerinin oluşan kovan yüksekliği üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Kovan yüksekliğini deneysel verilere dayanan ileri beslemeli yapay sinir ağı kullanılarak karşılaştırmışlardır. Genetik algoritma (GA) tarafından öngörülen kovan yüksekliği ile deneysel sonuçlardan elde edilen değerler arasında optimum bir benzerlik olduğunu vurgulamışlardır. Bu durumda, GA ile birleştirilen ANN modelinin, galvanizli çeliğin sürtünmeli delme işleminde maksimum kovan yüksekliğinin elde edilmesi için optimum şartları tespit etmede başarıyla uygulanabileceğini göstermişlerdir. Bahloul vd. [27] AISI304 paslanmaz çeliğinin sürtünmeli delme işleminde işlem parametrelerinin optimizasyonu için Taguchi metodunu ve bulanık mantık kullanmışlardır. Elde edilen deneysel sonuçların istatistiksel sonuçlarla uyumlu olduğunu tespit etmişlerdir. Önerilen deney seviyeleri için koniklik açısı  $\beta=45^\circ$ , sürtünme yüzey alanı %50, parça kalınlığı  $t=1$  mm, ilerleme hızı, 100 mm/min ve dönme hızı, 3500 d/min olduğunu tespit etmişlerdir. İş parçası kalınlığı ve dönme hızının termal sürtünmeli delme işleminde önemli derecede etkili olan işlem parametreleri olduğunu ifade etmişlerdir.

### 3. MATERYAL VE METOT (MATERIAL AND METHOD)

#### 3.1. Deneysel Düzenek ve Deneysel Çalışmalar (Experimental Setup and Experimental Studies)

Bu çalışmada deney malzemesi, ticari olarak piyasadan, 2 mm, 4 mm, 6 mm, 8 mm ve 10 mm kalınlıklarda ve 70x500 mm boyutlarında temin edilen A7075-T651 Alüminyum alaşımı ve St37 çelik plakalar kullanılmıştır. A7075-T651'in kimyasal bileşimi ise Tablo 1'de, St37'nin kimyasal analizi Tablo 2'de, A7075-T651 ve St37'nin mekanik özellikleri 5000 kN kapasiteli SHIMADZU marka çekme test cihazında 5 mm/dak çekme hızında çekme testine tabi tutularak tespit

edilmiş ve Tablo 3'te verilmiştir. HSS ve WC takımlar, Altek Metal Ticaret A.Ş.'den mekanik özellikleri tespit edilmiş olarak temin edilmişlerdir. Takımların mekanik özellikleri Tablo 4'te verilmiştir.

**Tablo 1.** A7075-T651 alüminyum alaşımının kimyasal bileşimi (Chemical composition of A7075-T651)

| Element           | t= 2-4 mm            | t=6-8 mm             | t= 10 mm             |
|-------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
|                   | % (Analiz sonuçları) | % (Analiz sonuçları) | % (Analiz sonuçları) |
| Silisyum (Si)     | 0,08                 | 0,06                 | 0,07                 |
| Demir (Fe)        | 0,28                 | 0,27                 | 0,16                 |
| Bakır (Cu)        | 1,67                 | 1,73                 | 1,4                  |
| Mangan (Mn)       | 0,61                 | 0,21                 | 0,04                 |
| Magnezyum (Mg)    | 2,37                 | 2,51                 | 2,5                  |
| Krom (Cr)         | 0,19                 | 0,18                 | 0,19                 |
| Çinko (Zn)        | 5,76                 | 5,97                 | 5,8                  |
| Titanyum (Ti)     | 0,036                | 0,05                 | 0,06                 |
| Geriye Kalan (Al) | 89,004               | 89,02                | 89,78                |

**Tablo 2.** St37 malzemenin kimyasal bileşimi (Chemical composition of St37)

| Element           | %     | Element       | %      |
|-------------------|-------|---------------|--------|
| Karbon (C)        | 0,17  | Kükürt (S)    | 0,05   |
| Mangan (Mn)       | 0,2   | Silisyum (Si) | 0,4    |
| Fosfor (P)        | 0,025 | Azot (N)      | 0,009  |
| Geriye kalan (Fe) |       |               | 99,721 |

**Tablo 3.** A7075-T651 ve St37 malzemelerinin mekanik özellikleri (Mechanical properties of A7075-T651 and St37)

| Malzemenin mekanik özellikleri          | Malzeme cinsi ve kesit kalınlığı (mm) |                    |             |
|---|---------------------------------------|--------------------|-------------|
|   | A7075-T6 (2-4mm)                      | A7075-T651 (6-8mm) | St37 (10mm) |
| Akma dayanımı (N/mm <sup>2</sup> )      | 580                                   | 605                | 235         |
| Çekme dayanımı (N/mm <sup>2</sup> )     | 505                                   | 550                | 340         |
| Kayma gerilmesi (N/mm <sup>2</sup> )    | 331                                   |                    | 370         |
| (%) Uzama                               | 11,7                                  | 10,5               | 21 26       |
| Elastiklik modülü (kN/mm <sup>2</sup> ) | 71,7                                  |                    | 210         |
| Isıl iletkenlik katsayısı (W/m·°K)      | 130                                   |                    | 76          |
| Erime sıcaklığı (°C)                    | 635                                   |                    | 1530        |

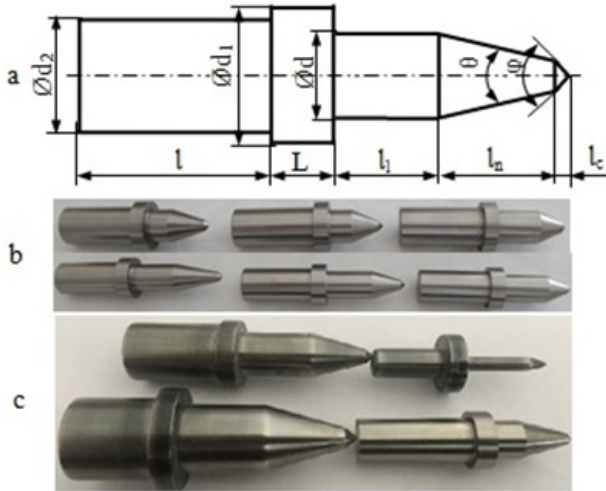
**Tablo 4.** Kesme takım malzemelerinin mekanik ve fiziksel özellikleri (Mechanical and physical properties of cutting tools)

| Malzemenin mekanik özellikleri       | Malzeme cinsi           |                      |
|--------------------------------------|-------------------------|----------------------|
|                                      | Yüksek hız çeliği (HSS) | Tungsten karbür (WC) |
| Maksimum çalışma sıcaklığı (°C)      | 600                     | 1000                 |
| Sertlik değeri                       | 64 HR <sub>C</sub>      | 92 HR <sub>A</sub>   |
| Elastik modülü (kN/mm <sup>2</sup> ) | 200                     | 600                  |
| Isıl iletkenlik katsayısı (W/m·°K)   | 21                      | 84                   |
| Erime sıcaklığı (°C)                 | 1540                    | 2850                 |

Deney çalışmalarında HSS ve WC kesici takımlar kullanılmıştır. HSS takımlar Referans Makine A.Ş., WC takımlar ise Kaya Ticaret A.Ş. firmaları tarafından ince silindirik taşlama yöntemi ile  $R_a=0.05-0.2 \mu\text{m}$  aralığında yüzey pürüzlülüğünde ve  $\pm 10\%$  boyut toleranslarında imal edilmişlerdir. Takımların,  $\text{Ø}d_2$ ,  $\text{Ø}d_1$ ,  $\text{Ø}d$ ,  $l_1$ ,  $l_n$ ,  $l_c$ ,  $l$ ,  $L$ ,  $\theta$  ve  $L$  geometrik boyutları Tablo 5’de, kesici takım şekilleri ise Şekil 2’de verilmiştir. Çalışmalarda toplam 20 adet HSS ve 8 adet WC sürtünmeli delme takımı kullanılmıştır.

**Tablo 5.** Kesici takımların boyutları  
(Dimensions of cutting tools)

| Takım sıra no: | $\text{Ø}d_2$ | $\text{Ø}d_1$ | $\text{Ø}d$ | $l_1$ | $l_n$ | $l_c$ | $l$ | $L$ | $\theta$   | Takım adedi |
|----------------|---------------|---------------|-------------|-------|-------|-------|-----|-----|------------|-------------|
| HSS            | 1             | 10            | 12.55       | 20    | 5     | 0.9   | 20  | 5   | $36^\circ$ | 5           |
|                | 2             | 14            | 16          | 10    | 20    | 1.8   | 25  | 5   |            | 5           |
|                | 3             | 20            | 22.5        | 15    | 20    | 1.5   | 25  | 5   |            | 5           |
|                | 4             | 24            | 30          | 20    | 20    | 3.6   | 30  | 5   | $36^\circ$ | 5           |
|                | 5             | 10            | 12.55       | 20    | 5     | 0.9   | 20  | 5   |            | 2           |
|                | 6             | 14            | 16          | 10    | 20    | 1.8   | 25  | 5   | 2          |             |
| WC             | 7             | 20            | 22.5        | 15    | 20    | 1.5   | 25  | 5   | 2          |             |
|                | 8             | 24            | 30          | 20    | 20    | 3.6   | 30  | 5   | 2          |             |



**Şekil 2.** Sürtünmeli delme yönteminde kullanılan takımlar  
a) Takım geometrisi b) HSS takımları c) WC takımları.  
(Tools used in friction drilling method a. Tool geometry b. High-speed steel (HSS) tools c. Tungsten carbide (WC) tools)

SDY ile  $n=1120$  (d/d) dönme hızı,  $f=25$  mm/dak ilerleme hızında ve takım koniklik açısı  $\theta=36^\circ$  olan A7075-T651 alaşımı HSS takım kullanılarak 72 adet, St37 çelik malzeme ise WC takım kullanılarak 60 adet delik delinerek toplam 132 deney yapılmıştır. Deneyler, Fırat Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Makine Mühendisliği bölümü CNC atölyesindeki TYT400 tipi universal freze tezgâhında yapılmışlardır (Şekil 3a). Çalışmada 70x500 mm boyutlarında hazırlanmış deney numuneleri bağlama kalıbı (Şekil 3b) kullanılarak freze tezgâhı tablasına civata ve papuçlar ile rijit bir şekilde bağlanmış ve iş parçası sıcaklığının oda sıcaklığına soğuması için gerekli zaman kaybını önlemek amacıyla delikler birbirlerinden 100 mm eşit aralıklı sabit mesafelerde ard arda delinmiştir.

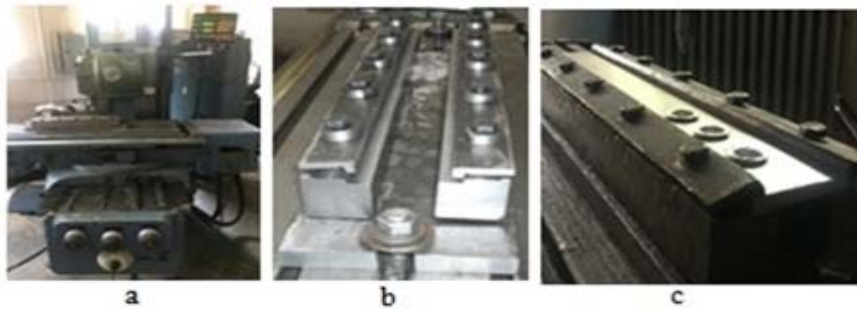
Deneylere önce alüminyum deney numuneleri ile başlanmış, her numuneye dört farklı çapta üçer adet toplam on iki adet delik delinmiştir (Şekil 4). Deneylere sırasıyla 2, 4, 6, 8, 10 mm kalınlıklardaki numunelerle devam edilmiş, deney numuneleri rijit şekilde sabitlendikten sonra delme takımları değiştirilerek yapılmıştır. Alüminyum için HSS kesici takımlar, St37 çeliği için ise WC (Tungstern Karbür) takımlar kullanılmışlardır.

### 3.2. Kovan Çeper Kalınlığı ve Kovan Yüksekliğinin Ölçülmesi (Measurement Bushing Wall Thickness And Bushing Height)

Şekil 5a’da kovanda çeper kalınlığı, kovan yüksekliği, 5b’de St37 ve 5c’de ise A7075-T651 malzemelerinde elde edilen kovanlar gösterilmektedir. Kovan yüksekliği ( $h_a$ ) ve kovan çeper kalınlığı ( $h_c$ ), iş parçasının yüzeyi referans alınarak ve derinlik mikrometresi ile üç farklı noktadan, kovan dış çapları ise 1/100 dijital kumpas ile kovanın iş parçası yüzeyine yakın ve silindirik bölgesinde dört farklı noktadan ölçülmüş ve elde edilen değerlerin ortalaması alınarak tespit edilmiştir.

### 3.3. Mikro Sertliğin Ölçülmesi (Measurement of Micro Hardness)

Kalınlıkları,  $t=2$ ,  $t=4$ ,  $t=6$ ,  $t=8$  ve  $t=10$  mm,  $n=1120$  d/d’da,  $f=25$  mm/min ilerleme hızında ve koniklik açısı  $\theta=36^\circ$ ,  $\text{Ø}d=5$ ,  $\text{Ø}d=10$ ,  $\text{Ø}d=15$  ve  $\text{Ø}d=20$  mm çaplarında HSS ve WC takımlar kullanılarak delinmiştir. Mikro sertlik ölçümleri ve SEM fotoğraflarının çekimi için numuneler bozulmayacak



**Şekil 3.** Deney seti a) Kullanılan freze tezgâhı b) Bağlama kalıbı c) Deney numunesi  
(Experimental set-up a. Milling machine b. Binding pattern c. Test sample)

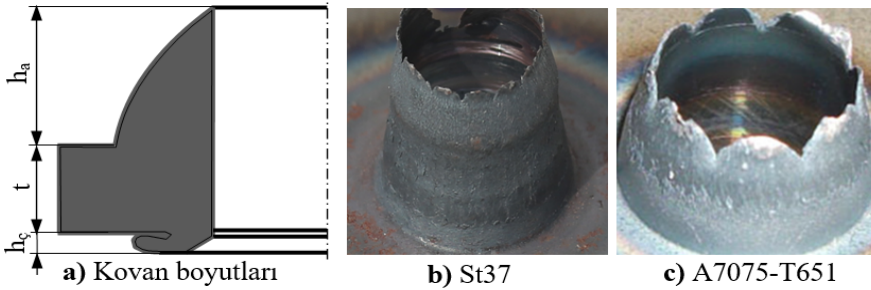
şekilde delik ekseninden iki eşit parça olacak şekilde testere ile kesilmişlerdir. Daha sonra iki eşit parçaya bölünerek elde edilen numuneler tekrar testere ile kesilerek ikiye bölünmüş ve ince diş eğe ile yüzeyleri temizlenmiştir. Temizlenen bu numuneler bakalıte alınıp sırasıyla A400, A600, A800 ve A1200 zımpara ile yüzeyleri zımparalandıktan sonra 1 µm tane boyutlu elmas pasta ve çuha kullanılarak parlatılmışlardır. A7075-T651 alüminyum numuneler, %5 ml HNO<sub>3</sub>, %1,5 ml HCl, %1 ml HF, %92,5 ml saf su bileşiminden oluşan ve keller olarak adlandırılan dağlayıcı ile yaklaşık olarak 40s dağlanmıştır. St37 çelik numuneler ise %10 ml HNO<sub>3</sub> ve %90 ml etil alkol bileşiminden oluşan ve nital olarak adlandırılan dağlayıcı ile yaklaşık olarak 60s dağlandıktan sonra hazır hale getirilmişlerdir.

Mikro sertlik ölçümleri, A7075-T651 alüminyum numuneler, dağlama işleminden sonra düşey ekseninde iş parçası kalınlığının orta çizgisinden, yatay ekseninde ise delik yüzeyinden 100 µm mesafelerde olmak üzere toplam 10 noktadan yapılmıştır. St37 çelik numuneler ise delik yüzeyinden itibaren 100 µm mesafelerde olmak üzere toplam 10 noktadan ölçüm alınarak yapılmıştır (Şekil 6). Delik yüzeyinden itibaren mikro sertlik ölçüm noktaları, sertlik değerinin iş parçası sertlik değerine eşit olduğu ve ısıdan etkilenmiş bölgenin delik yüzeyinden olan uzaklığına göre tespit edilmiştir. A7075-T651 alaşımında mikro sertlik ölçümlerinin 5 noktada, St37 için ise 6 noktada alınması, mikro sertlik değerlerinin esas malzemenin mikro sertlik değerine ulaşma mesafesine göre belirlenmiştir. A7075-

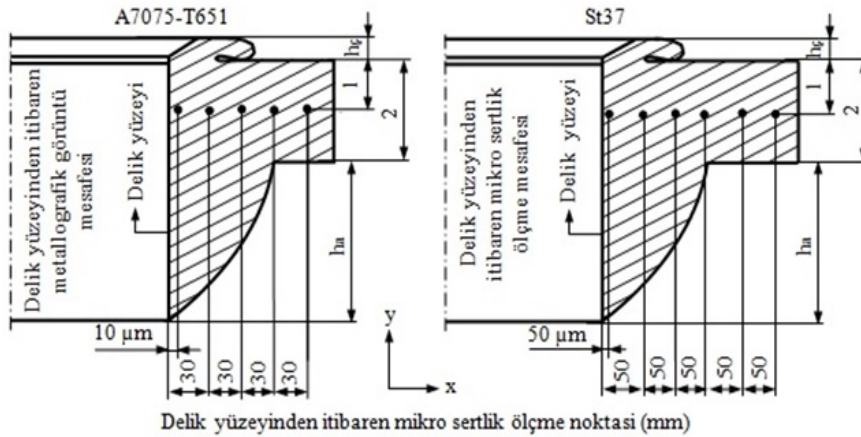
T651 alaşımında mikro sertlik değerine delik yüzeyinden en fazla 130 µm'de St37 çelik malzemede ise en fazla 300 µm mesafede ulaşılmıştır. Mikro sertlik ölçümleri, Future-Tech FM-700 marka bir mikro sertlik ölçme cihazında ölçülmüştür. Her bir numunenin mikro yapı (SEM) fotoğrafları, ZEISS EVO MA10 marka taramalı elektron mikroskopunda 5000X büyütmede, termal ve basınç gerilmelerinden dolayı delik yüzeyinde meydana gelen çatlaklar ise 2000X büyütmede çekilmiştir.



**Şekil 4.** Sürtüneli delme işlemi uygulanmış numuneler **a)** Numunenin alttan görünüşü **b)** Numunenin yandan görünüşü **c)** Numunenin üstten görünüşü  
(Samples with friction drilling a. Bottom view of the sample b. Side view of sample c. Top view of the sample)



**Şekil 5.** Elde edilen kovanlar: kovan yüksekliği ve kovan çeper yüksekliği  
(Bushings obtained: Bushing height and Bushing wall height)



**Şekil 6.** Mikro sertlik ölçüm yöntemi (Micro hardness measurement method)

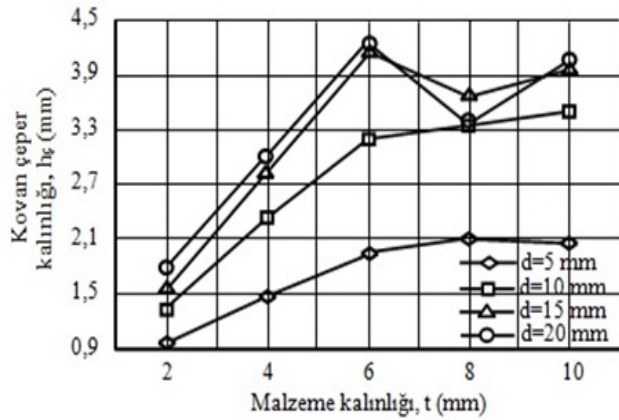


#### 4. SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR (RESULTS AND DISCUSSIONS)

##### 4.1. Takım Çapının ve Malzeme Kalınlığının Kovan Çeper Kalınlığına ( $h_c$ ) ve Kovan Yüksekliğine ( $h_a$ ) Etkisi (The Effect of Tool Diameter and Material Thickness on Bushing Thickness ( $h_c$ ) and Bushing Height ( $h_a$ ))

SDY’de kovan çeper kalınlığına ( $h_c$ ) etki eden en önemli faktör merkezkaç kuvvet etkisi oluşturan takımın dönme hızıdır. Dönme hızı artarken sürtünme ısısının etkisi ile yumuşayan ve akıcı hale gelen malzeme çevreye yayılmaktadır. Böylece delik üstünde pul biçiminde bir çeper oluşmakta, takım çapı ve malzeme kalınlığına bağlı olarak oluşan pulun kalınlığı da artmaktadır. Pul kalınlığının ve kovan boyunun yeterli olması malzeme kalınlığı ve delik çapına bağlı olarak doğrusal bir değişim göstermektedir. Malzeme kalınlığı arttıkça takım ile delinen malzeme arasındaki temas alanı artmakta, bu da takımın ilerleme yönünde malzeme akışını artırmaktadır. Takımın ilerleme yönünde akan malzeme miktarı oluşan kovan çeper kalınlığına ve kovan yüksekliğine etki etmektedir [5].

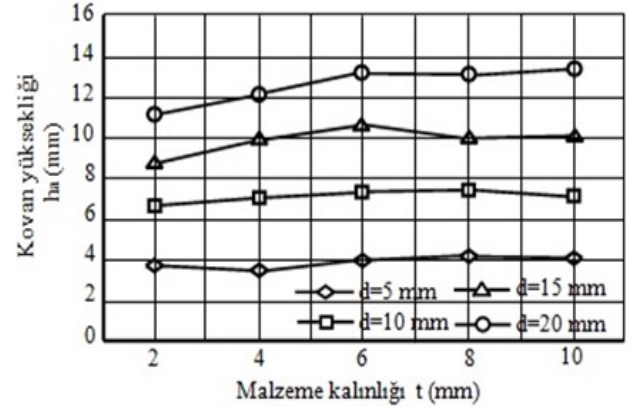
A7075-T651 malzemesi için, HSS takım kullanılarak, takım koniklik açısı  $\theta=36^\circ$ , ilerleme hızı  $f=25$  mm/dak ve dönme hızında  $n=1120$  dev/dak’da malzeme kalınlığı ve delik çapına bağlı olarak elde edilen kovan çeper kalınlığının değişimi verilmiştir (Şekil7).



**Şekil 7.** A7075-T651 için takım çapının kovan çeper kalınlığına etkisi  
(Effect of tool diameter on the bushing wall thickness of A7075-T651)

Şekilde görüldüğü gibi malzeme kalınlığı ve takım çapı arttıkça kovan çeper kalınlığının arttığı,  $\text{Ø}d=5$  mm ve  $\text{Ø}d=10$  mm takım çaplarında malzeme kalınlıklarına bağlı olarak lineer bir artış olduğu görülmektedir.  $\text{Ø}d=15$  mm ve  $\text{Ø}d=20$  mm takım çaplarında ise  $t=6$  mm malzeme kalınlığına kadar düzenli bir artış ve  $t=8$  mm de bir azalma,  $t=10$  mm ise tekrar bir artış meydana gelmiştir. En büyük kovan çeper kalınlığı  $\text{Ø}d=20$  mm takım çapında  $t=6$  mm malzeme kalınlığında  $h_c=4,25$  mm, en düşük kovan çeper kalınlığı ise  $\text{Ø}d=5$  mm takım çapında ve  $t=2$  mm malzeme kalınlığında  $h_c=0,965$  mm olarak elde edilmiştir. SDY’de kovan yüksekliğine etki eden faktörlerin başında, malzeme kalınlığı, takım çapı, delme takımının şaft uzunluğu ( $l_1$ ) ve sürtünme etkisi ile

meydana gelen ısıdır. Malzeme kalınlığı arttıkça dönen takım ile delinen malzeme arasındaki temas alanı arttığından takımın ilerleme doğrultusundaki malzeme akışı takımın şaft uzunluğu ( $l_1$ ) boyunca artmaktadır. Takımın ilerleme yönünde akan malzeme miktarı kovan yüksekliğine etki etmektedir [20]. A7075-T651 alaşımı için takım koniklik açısı  $\theta=36^\circ$ , ilerleme hızı  $f=25$  mm/dak ve  $n=1120$  dev/dak dönme hızında malzeme kalınlığına bağlı olarak elde edilen kovan yüksekliği değişimi verilmiştir (Şekil 8).



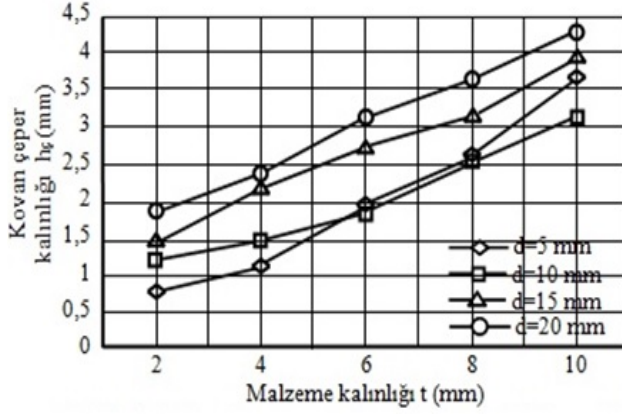
**Şekil 8.** A7075-T651 için takım çapının kovan yüksekliğine etkisi  
(Effect of tool diameter on bushing height for A7075-T651)

Takım çapının artmasına bağlı olarak malzeme temas alanı artacağından malzeme kalınlığı ve takım çapı arttıkça kovan yüksekliği lineer bir şekilde artmaktadır. Malzeme temas alanı arttıkça sürtünme etkisi ile meydana gelen ısı artmakta ve malzeme ısı etkisiyle yeterli derecede yumuşayarak viskoz hale gelmektedir. Takımın ilerleme doğrultusunda akan malzeme miktarı arttığından kovan yüksekliği de artmaktadır [20].  $\text{Ø}d=5$ ,  $\text{Ø}d=10$  mm ve  $\text{Ø}d=15$  mm takım çaplarında malzeme kalınlığına bağlı olarak kovan yüksekliği düzenli bir biçimde artmıştır. En yüksek kovan boyu,  $\text{Ø}d=20$  mm takım çapında ve  $t=10$  mm malzeme kalınlığında  $h_a=13,40$  mm, en düşük kovan boyu ise  $\text{Ø}d=5$  mm takım çapında ve  $t=2$  mm malzeme kalınlığında  $h_a=3,43$  mm olarak elde edilmiştir.

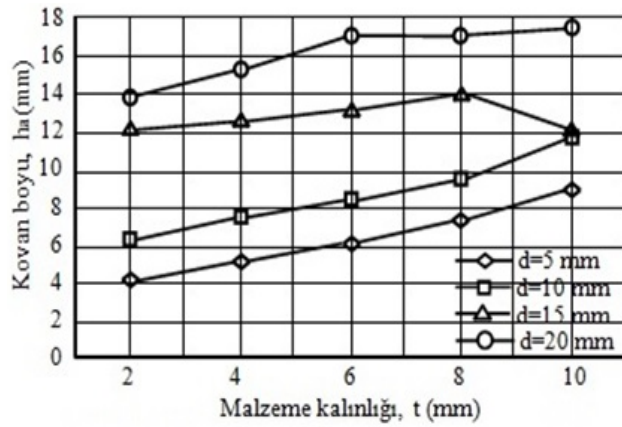
Şekil 9’da, St37 çelik malzemenin sürtünmeli delinmesinde WC takım kullanılarak takım koniklik açısı  $\theta=36^\circ$ , ilerleme hızı  $f=25$  mm/dak ve dönme hızı  $n=1120$  dev/dak’da elde edilen kovanın çeper kalınlığının farklı takım çapları için malzeme kalınlığına ve delik çapına bağlı olarak değişimi verilmiştir.

Şekilde görüldüğü gibi malzeme kalınlığı ve takım çapı arttıkça kovanın çeper kalınlığı da artmaktadır. En yüksek kovan çeper kalınlığı  $\text{Ø}d=20$  mm çapındaki takım ile  $t=10$  mm malzeme kalınlığında  $h_c=4,25$  mm, en düşük kovan çeper kalınlığı ise  $\text{Ø}d=5$  mm çapındaki konik takım ile  $t=2$  mm malzeme kalınlığında  $h_c=0,75$  mm olarak ölçülmüştür. Yapılan deneylerden görüldüğü gibi takım çapı ve malzeme kalınlığının oluşan kovan çeper kalınlığı üzerinde önemli bir etkisinin olduğu tespit edilmiştir. Şekil 10’da, takım koniklik açısı  $\theta=36^\circ$ , ilerleme hızı 25 mm/dak ve dönme hızı  $n=1120$

dev/dak'da WC takım kullanılarak St37 çelik malzemesinin sürtünmeli delinmesinde elde edilen kovan boyu için takım çapının malzeme kalınlığına bağlı olarak kovan yüksekliği ( $h_a$ ) üzerindeki etkisinin değişimi verilmiştir.



**Şekil 9.** St37 için takım çapının kovan çeper kalınlığına etkisi (Effect of tool diameter on the bushing wall thickness of St37)



**Şekil 10.** St37 için takım çapının kovan boyuna etkisi (Effect of tool diameter on bushing height for St37)

SDY'de malzeme kalınlığı arttıkça dönen takım ile delinen malzeme arasındaki temas alanı arttığından takımın ilerleme doğrultusundaki malzeme akışı artmakta ve takımın  $h_1$  uzunluğu boyunca daha fazla malzemenin yığılmasını sağlamaktadır. Yığılan malzeme takımın ilerleme doğrultusunda delik boyunca kovan boyunun artmasına etki etmektedir. Artan malzeme kalınlığına bağlı olarak takım çapı arttıkça kovan boyunun ( $h_a$ ) arttığı görülmüştür. Malzeme kalınlığı ve takım çapının artması ile temas alanının artması nedeniyle delik içerisinde takım boyunca akan malzeme miktarı artmaktadır [21, 27]. Küçük takım çaplarında, seçilen malzeme kalınlığının elde edilen kovan boyuna fazla bir etkisinin olmadığı görülmüştür. Malzeme kalınlığına bağlı olarak kovan boyunun artırılması isteniyorsa takım çapının büyük seçilmesi önemlidir. Malzeme kalınlığı sabit alındığında artan konik takım çapı ile kovan boyu orantılı bir şekilde artmaktadır. Belli değerlerde seçilen malzeme kalınlığı ve takım çapının kovanın boyuna etkisi belirli değerler için sınırlı olmaktadır.

Takım çapının ve malzeme kalınlığının artması ile kovan boyu doğrusal bir şekilde artmaktadır. En yüksek kovan boyu,  $\text{Ø}d=20$  mm takım çapında,  $t=10$  mm malzeme kalınlığında ve  $h_a=15,30$  mm, en düşük kovan boyu ise  $\text{Ø}d=5$  mm takım çapında,  $t=2$  mm malzeme kalınlığında ve  $h_a=4,16$  mm olarak elde edilmiştir.

Şekil 11'de, A7075-T651 ve St37 malzemelerinde, takım çapı ve malzeme kalınlığına bağlı olarak elde edilen bazı kovan resimleri verilmiştir. Şekil 11a'da A7075-T651 malzemenin SDY'de delme deneyleri sonucu takım çapı ve malzeme kalınlığına bağlı olarak elde edilen kovan resimleri verilmiştir. Kovanın taç yaprağı biçiminde meydana gelme olasılığı ve kovanın üzerindeki çatlakların oluşması artan malzeme kalınlığı ve takım çapının artması ile azalmaktadır. Malzeme kalınlığının ve takım çapının artması ile sürtünme sonucu meydana gelen ısının etkisiyle malzeme yumuşayarak viskoz hale geldiğinden takım itme yönünde kovan boyunu artırmaktadır. Böylece, amacına uygun çatlakların az olduğu ve silindirik biçimde kovanlar elde edilmiştir.



**Şekil 11.** Takım çapı ve malzeme kalınlığına bağlı olarak elde edilen kovan resimleri

(Bushing pictures obtained depending on tool diameter and material thickness)

Şekil 11b'de St37 çelik için SDY'de delinmesi ile takım çapı ve malzeme kalınlığına bağlı olarak elde edilen kovan resimleri verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi aynı kalınlıktaki malzeme için artan takım çapına bağlı olarak istenilen şekilde bir kovan biçiminin elde edildiği, belli bir kalınlık ve takım çapından sonra yırtılma ve taç yaprağı şeklindeki istenmeyen şekil bozukluğunda kovanların elde edildiği görülmektedir. Belli takım çapından sonra bozulmaların ve çatlakların artarak meydana geldiği, dolayısıyla takım çapının kovan yapısı üzerinde olumsuz bir etki yaptığı tespit edilmiştir.

#### 4.2. Takım Çapının ve Malzeme Kalınlığının Mikro Yapıya Etkisi

(Effect of Tool Diameter and Material Thickness on Microstructure)

SDY'de oluşan kovan yumuşamış ve aşağı doğru serbest kaldığından malzemenin mikro yapısında çeşitli boşluklar ve

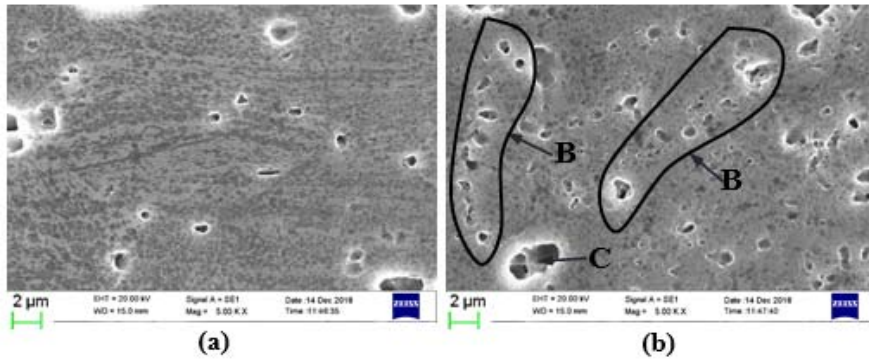
çatlaklar meydana geldiğinden mikro yapı değişir ve yapıdaki boşluklar artmış olur. Çatlak ve boşluklar malzemenin sertliğinin azalmasına sebep olur. Takımın dönme hareketi ve yumuşamış malzemeyi iş parçasının yüzeyine bastırması ile mikro yapının tane yapısı değişmektedir. Delik yüzeylerine yakın bölgelerde mikro sertlik değerleri yüksek, delik yüzeyinden uzaklaştıkça sertlik değeri azalmaktadır [26].

Şekil 12’de takım çapı  $\text{Ø}d=10$  mm ve iş parçası kalınlığı  $t=2$  mm olan A7075-T651 için hem ana malzemenin mikro yapı fotoğrafını hem de işlem sonrası oluşan kovanın mikro yapı (SEM) fotoğraflarını göstermektedir. Şekil 12a’da ana malzeme için tane büyüklüğü ve tane sınırı ile malzeme içerisinde bulunan boşlukların mikro yapı görüntüsü, Şekil 12b’de ise işlem sonrası oluşan kovanın görüntüsünde (SEM), tane yapısının ve oluşan boşlukların ve sıvıların mikro yapı değişiminin fotoğrafları verilmiştir.

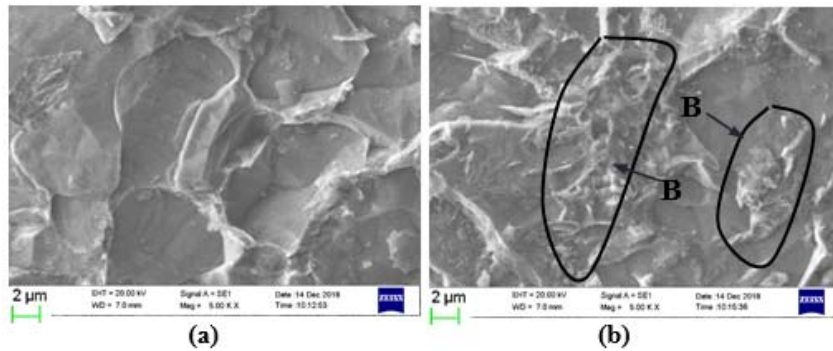
İş malzemesinin takıma yapışması ve takımdan yeniden kopması mikro yapıdan görülmektedir. Alüminyumun takım yüzeyine yapışma eğilimi fazla olduğundan malzemenin bir kısmı iş parçasından kopmuştur. Takımın yapıştırma enerjisi iş malzemesinin yapışma enerjisinden daha fazla olduğundan oluşturulan büyük basınç ve yüksek sıcaklık, iş parçası malzemesinin takıma yapışmasına neden olur. Mikro yapıdan, delik kenarlarına yakın yüzeylerde deformasyonun fazla olduğu net olarak görülmektedir (Şekil 12b, C noktası).

Şekilde görüldüğü gibi deformasyon sertleşmesi sonucu tane yapısının küçüldüğü, ince taneli ve takımın ilerlemesi sonucu akan malzemenin delik kenarlarına sıvanması ile ortaya çıkan bir yapı oluşmaktadır (Şekil 12b’de B yüzeyleri). Dönen takım iş parçasından çıkan malzemeyi aşağı doğru iterken iş parçasının mikro yapısında önemli değişiklikler meydana gelmektedir. İş parçasını oluşturan tane boyutlarının küçülmesi, sürtünmeden ve dönen takımın yapmış olduğu baskıdan dolayı tane sınırlarının değişmesi ve uzaması, taneler arası boşlukların artmasına sebep olur. Özellikle kovan yapısında dönen takımın etkisinden dolayı mikro yapıda önemli miktarda boşluklar meydana gelmektedir.

Şekil 13’de takım çapı  $\text{Ø}d=15$  mm ve iş parçası kalınlığı  $t=10$  mm olan St37 için ana malzemenin mikro yapı fotoğrafını ve işlem sonrası oluşan kovanın mikro yapısının fotoğraflarını (SEM) göstermektedir. Şekil 13a’da,  $\text{Ø}d=15$  mm ve  $t=10$  mm kalınlığında St37 için esas malzemenin tane yapısı ve tane sınırı boşluklarını, Şekil 13b’de ise takım çapı  $\text{Ø}d=15$  mm olan WC takım ile sürtünmeli delinmesi sonucunda oluşan kovanın SEM görüntüsü verilmiştir. SDY’de takım yumuşamış olan iş parçasından çıkan malzemeyi aşağı doğru iterken kovanın mikro yapısında önemli etkiler ve özellikle kovan yapısında boşluklar meydana gelmektedir. Bu boşluklar kovanı oluşturan tane boyutlarının küçülmesi, sürtünmeden ve dönen takımın yapmış olduğu baskıdan dolayı tane sınırlarının uzaması ve



Şekil 12. A7075-T651 için SEM görüntüsü a) Ana malzemesinin SEM görüntüsü b) Kovan SEM görüntüsü (SEM image for A7075-T651 a. SEM image of the main material b. SEM image of the bushing)



Şekil 13. St37 için SEM görüntüsü a) Ana malzemesinin SEM görüntüsü b) Kovan SEM görüntüsü (SEM image for St37 a. SEM image of the main material b. SEM image of the bushing)

taneler arası boşlukların artması olarak düşünülmekte ve mikro sertliği etkilemektedir [24, 26]. Şekilde görüldüğü gibi sürtünmeli delme sırasında ısıl değişimler sonucu malzemede meydana gelen deformasyon serleşmesi sonucu tane yapısının küçüldüğü ve dönen takımın ilerlemesi ile akan malzemenin delik kenarlarına sıvanması ile oluşan bir yapı meydana gelmiştir.

St37 çeliğin mikro yapısında önemli bir aşınma, hasar veya plastik deformasyon olmadığı söylenebilir. Takımın dönme hızından kaynaklanan ince çizgiler (Şekil 13b, B alanı) ve bununla birlikte, sürtünmeli delme işleminde yer alan yüksek sıcaklıklar nedeniyle küçük ve gözenekli yapılar görülmektedir. Alüminyum da olduğu gibi, St37 malzemesi için doğrudan mikro yapıyı tespit etmek kolay değildir. Yüzey dokusunun, takımın dönme yönüne göre mikro yapıda soldan sağa doğru kaydığını göstermektedir. Mikro yapıda, St37 çeliğinin takıma daha az yapıştığı, SDY’de St37 çeliği A7075-T651 alaşımından çok daha az sıvama yapmaktadır. Bu yüzden, St37 çeliğinin SDY’de delinmesi A7075-T651 alaşımına göre daha uygun olmaktadır.

Mikro yapı görüntülerinde, A7075-T651 alaşımında yüksek oranda yapışmanın ve dolayısıyla malzeme transferinin fazla, St37 çeliğinde ise çok daha az sıvama olduğundan malzeme transferinin az olduğu sonucuna varılmıştır.

#### 4.3. Takım Çapının ve Malzeme Kalınlığının Mikro Sertlik Değişimine Etkisi

(Effect of Tool Diameter and Material Thickness on Micro Hardness Change)

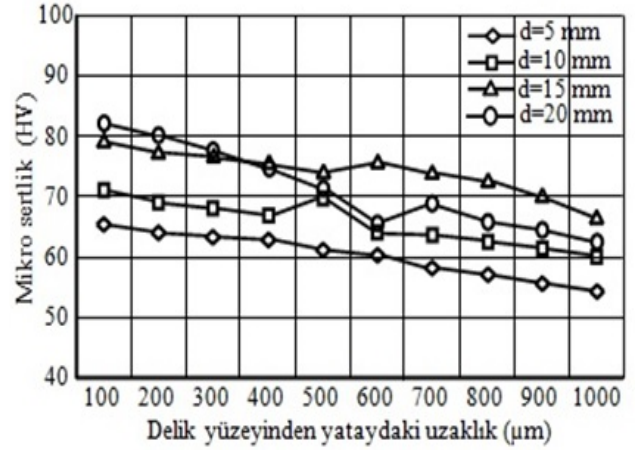
SDY’de yumuşayan malzeme takımın ilerleme yönünde serbest bir şekilde takım ile birlikte ilerleyerek malzemenin akmasını sağlamaktadır. Akma işlemi serbest bir şekilde olduğu için malzemenin mikro yapısında taneler arası boşluklar meydana gelmektedir. Malzeme içerisinde boşluklu mikro yapı, malzemenin mikro sertliğini etkilemektedir [24-26].

A7075-T651 malzemesinin HSS takım kullanılarak,  $t=8$  mm,  $\theta=36^\circ$ ,  $n=1120$  d/min ve  $f=25$  mm/min ilerleme hızında SDY ile delinmesinde, Şekil 14’de delik yüzeyinden yatay, Şekil 15’de ise düşey doğrultuda 100’er  $\mu$ m mesafelerde elde edilen mikro sertlik değişimleri verilmiştir.

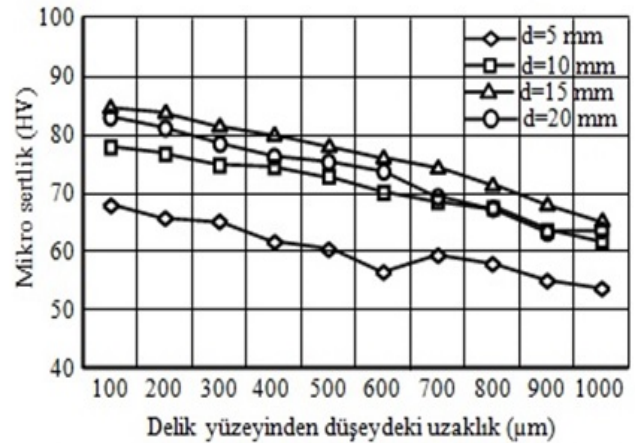
Mikro sertlik değerleri yatayda delik yüzeyinden uzaklaştıkça düşmüştür. En yüksek mikro sertlik değeri 100  $\mu$ m mesafede  $\text{Ø}d=20$  mm takım çapında 82,3 HV, en düşük mikro sertlik değeri 1000  $\mu$ m mesafede  $\text{Ø}d=5$  mm takım çapında 54,4 HV, yine mikro sertlik değerleri düşeyde delik yüzeyinden uzaklaştıkça azalmıştır. En yüksek mikro sertlik değeri 100  $\mu$ m mesafede  $\text{Ø}d=15$  mm takım çapında 84,6 HV, en düşük mikro sertlik değeri 1000  $\mu$ m mesafede  $\text{Ø}d=5$  mm takım çapında 53,7 HV olarak elde edilmiştir. Görüldüğü gibi yatayda ve düşeyde aynı numunede mikro sertlik değerleri birbirine yakın sonuçlar olduğu tespit edilmiştir.

SDY’de, delik etrafındaki farklı bölgelerin tane büyüklüğü, hacim fraksiyonu ve kararsız ikinci faz parçacıkları

nedeniyle mikro sertlik artmaktadır. Sürtünmeli delme işleminde plastik deformasyonun, yüksek sıcaklığın ve sürtünmenin, tane yapısının yeniden kristalleşmesine neden olduğu çözünme etkisine bağlı kararsız ikinci faz parçacıklarının çözünmesine yol açtığı düşünülmektedir.



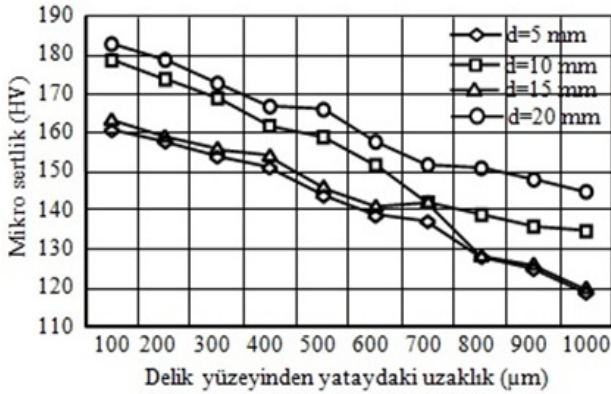
Şekil 14. A7075-T651 için delik yüzeyinden yatay doğrultuda elde edilen mikro sertlik değişimi (Micro hardness change in horizontal direction from hole surface for A7075-T651)



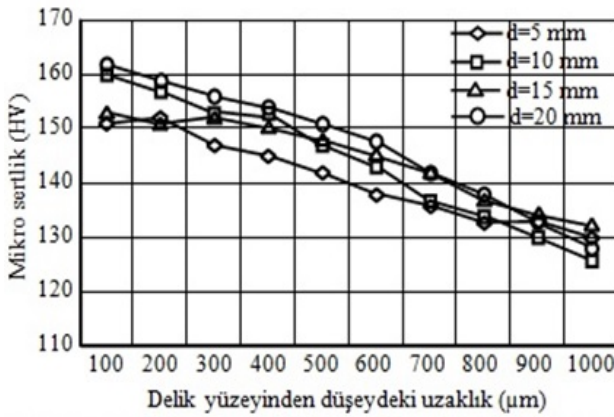
Şekil 15. A7075-T651 için delik yüzeyinden düşey doğrultuda elde edilen mikro sertlik değişimi (Micro hardness change in vertical direction from hole surface for A7075-T651)

St37 malzemesinin WC takım kullanılarak,  $t=8$  mm,  $\theta=36^\circ$ ,  $n=1120$  d/min ve  $f=25$  mm/min ilerleme hızında SDY ile delinmesinde, Şekil 16’da delik yüzeyinden yatay ve Şekil 17’de ise düşey doğrultuda 100’er  $\mu$ m mesafelerde elde edilen mikro sertlik değişimleri verilmiştir.

St37 için mikro sertlik değerleri yatayda delik yüzeyinden uzaklaştıkça gene azalmıştır. En yüksek mikro sertlik değeri 100  $\mu$ m mesafede  $\text{Ø}d=20$  mm takım çapında 183 HV, en düşük mikro sertlik değeri 1000  $\mu$ m mesafede  $\text{Ø}d=5$  mm takım çapında 119 HV, aynı şekilde düşeyde de, takım çapı arttıkça elde edilen mikro sertlik değerlerinin arttığı görülmüştür.



Şekil 16. St37 için delik yüzeyinden yatay doğrultuda elde edilen mikro sertlik değişimi  
(Micro hardness change in horizontal direction from hole surface for St37)



Şekil 17. St37 için delik yüzeyinden düşey doğrultuda elde edilen mikro sertlik değişimi  
(Micro hardness change in vertical direction from hole surface for St37)

A7075-T651 ve St37 çeliği için yapılan deneylerde delik merkezinden çevreye doğru uzaklaştıkça mikro sertliğin azaldığı tespit edilmiştir. Bunun nedeni, merkezden çevreye doğru uzaklaştıkça plastik deformasyona uğramış tabakadan esas malzeme yapısına ulaşılmaktadır. Delik merkezine yakın, ısının tesiri altındaki bölgede deformasyon sertleşmesi sonucu ince taneli bir yapı oluşmaktadır. Buna bağlı olarak mikro sertlikte delik çevresine yakın, ısının tesiri altındaki bölgede yüksek, delik merkezinden uzaklaştıkça esas malzeme sertliğine yakın olarak artmakta ve esas malzeme sertliğine ulaşmaktadır. Esas malzeme sertliği 305 HV iken, sürtünmeli delme yapıldıktan sonra en yüksek sertliğin 183 HV olarak elde edilmiştir.

Isının tesiri altındaki bölgede mikro sertliğin azalması, sabit ikinci faz parçacıklarının artan hacim fraksiyonundan ve artan katı çözeltideki tane boyutundan kaynaklanmaktadır. Isının tesiri altındaki bölgede maksimum mikro sertlik, ince taneli yeniden kristalize olmuş malzeme tabakasında olmaktadır. Mikro sertlik sürekli ve düzenli olarak azalmakta, esas malzeme sertliğine ulaşmaktadır. SDY'de, sürekli bir şekilde esas malzeme sertliğine yakın ve giderek azalan mikro sertlik değişimi deliğin yakın bölgesinde

malzemenin sertleşmesine sebep olmaktadır. Maksimum mikro sertlik, delik çevresine yakın ve yeniden kristalize olmuş malzeme tabakasında olduğu tespit edilmiştir.

## 5. SEMBOLLER (SYMBOLS)

- t : Sac kalınlığı (mm)  
n : Takım dönme hızı (d/d)  
f : İlerleme hızı (mm/dev)  
 $\theta$  : Takım koniklik açısı ( $^{\circ}$ )  
d : Delik çapı/takım çapı (mm)  
 $h_c$  : Kovan çeper kalınlığı (mm)  
 $h_a$  : Kovan yüksekliği (mm)  
 $R_a$  : Ortalama yüzey pürüzlülüğü ( $\mu$ m)  
 $d_2$  : Takım shaft çapı (mm)  
 $d_1$  : Takım omuz çapı (mm)  
 $l_1$  : Takım delme boyu (mm)  
 $l_n$  : Takım koniklik uzunluğu (mm)  
 $l_c$  : Takım özü yüksekliği (mm)  
l : Takım shaft uzunluğu (mm)  
L : Takım omuz uzunluğu (mm)

## 6. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Yapılan deneylerden görüldüğü gibi takım çapı ve malzeme kalınlığının oluşan kovan çeper kalınlığı ve kovan yüksekliği üzerinde önemli bir etkisinin olduğu tespit edilmiştir. Buna göre;

- Malzeme kalınlığı ve takım çapı arttıkça kovan çeper kalınlığının arttığı görülmüştür. A7075-T651 malzemesinde, en büyük kovan çeper kalınlığı  $\text{Ø}d=20$  mm takım çapında  $t=6$  mm malzeme kalınlığında  $h_c=4,25$  mm, en düşük kovan çeper kalınlığı ise  $\text{Ø}d=5$  mm takım çapında ve  $t=2$  mm malzeme kalınlığında  $h_c=0,965$  mm dir. St37 malzemesinde ise en büyük kovan çeper kalınlığı  $\text{Ø}d=20$  mm çapındaki takım ile  $t=10$  mm malzeme kalınlığında  $h_c=4,25$  mm, en düşük kovan çeper kalınlığı  $\text{Ø}d=5$  mm çapındaki takım ile  $t=2$  mm malzeme kalınlığında  $h_c=0,75$  mm olarak elde edilmiştir.
- Malzeme kalınlığına bağlı olarak kovan yüksekliği düzenli bir biçimde artmaktadır. A7075-T651 malzemesinde en yüksek kovan boyu,  $\text{Ø}d=20$  mm takım çapında ve  $t=10$  mm malzeme kalınlığında  $h_a=13,40$  mm, en düşük kovan boyu ise  $\text{Ø}d=5$  mm takım çapında  $t=4$  mm malzeme kalınlığında  $h_a=3,43$  mm ve St37 malzemesinde ise en yüksek kovan boyu,  $\text{Ø}d=20$  mm takım çapında,  $t=4$  mm malzeme kalınlığında ve  $h_a=15,30$  mm, en düşük kovan boyu  $\text{Ø}d=5$  mm takım çapında,  $t=2$  mm malzeme kalınlığında ve  $h_a=4,16$  mm olarak elde edilmiştir.
- A7075-T651 alaşımının ve St37 çeliğinin sürtünmeli delinmesinde yapılan tüm deneylerde delik merkezinden çevreye doğru uzaklaştıkça mikro sertliğin azaldığı tespit edilmiştir. Delik merkezine yakın, ısının tesiri altındaki bölgede deformasyon sertleşmesi sonucu ince taneli bir yapı oluşmuştur. Mikro sertlik değerleri delik yüzeyinden yatay doğrultuda delik çevresinden uzaklaştıkça azalmıştır. Takım çapı arttıkça elde edilen mikro sertlik değerlerinin arttığı ve esas malzeme sertliği 305 HV iken,

sürtünmeli delme yapıldıktan sonra en yüksek mikro sertlik 183 HV olarak elde edildiği görülmüştür.

- A7075-T651 malzemesinde; en yüksek mikro sertlik değeri yatay eksende 100 µm mesafede Ød=20 mm takım çapında 82,3 HV, en düşük mikro sertlik değeri düşey eksende 1000 µm mesafede Ød=5 mm takım çapında 53,6 HV olmuştur. St37 malzemesinde; en yüksek mikro sertlik değeri yatay eksende 100 µm mesafede Ød=20 mm takım çapında 183 HV, en düşük mikro sertlik değeri ise düşey eksende 1000 µm mesafede Ød=10 mm takım çapında 126 HV olarak elde edilmiştir.

Literatürdeki benzer çalışmalardan farklı olarak, Sünek malzemelerde amacına uygun silindirik boyu fazla ve bağlantı uzunluğunu artıracak biçiminde bir kovan meydana gelmektedir. Gevrek malzemelerde istenilen biçimde bir kovan elde edilemediği belirlenmiştir. SDY’de kovanın mikro yapısında önemli değişiklikler ve özellikle kovan yapısında boşluklar meydana gelmektedir. Bu boşluklar kovan yapısında tane boyutlarının küçülmesine, sürtünmeden ve dönen takımın yapmış olduğu baskıdan dolayı tane sınırlarının uzamasına ve taneler arası boşlukların artması ile mikro sertliği etkilemektedir. Delik merkezine yakın, ısının tesiri altındaki bölgede deformasyon sertleşmesi sonucu ince taneli bir yapı oluşmaktadır. Buna bağlı olarak mikro sertlik delik çevresine yakın, ısının tesiri altındaki bölgede artarken, delik merkezinden uzaklaştıkça esas malzeme sertliğine yakın ve giderek esas malzeme sertliğine ulaşmaktadır.

#### KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Miller S. F., Wang H., Shih A. J., Experimental and Numerical Analysis of the Friction Drilling Process, *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 128, 802-810, 2006.
2. Miller S. F., Tao J., Shih A. J., Friction Drilling of Cast Metals, *International Journal of Machine Tool and Manufacture*, 46, 1526 -1535, 2006.
3. Miller S. F., Blau P. J., Shih A. J., Microstructural Alterations Associated With Friction Drilling of Steel, Aluminum, and Titanium, *Journal of Materials Engineering and Performance*, 14, 647-653, 2007.
4. Miller S. F., Shih A. J., Thermo-Mechanical Finite Element Modelling of the Friction Drilling Process, Department of Mechanical Engineering, University of Michigan, Ann. Arbor. MI. 48109, 129, 531-538, 2007.
5. Miller S. F., Blau P. J., Shih A. J., Tool Wear in Friction Drilling, *International of Machine Tool and Manufacture*, 47, 1636-1645, 2007.
6. Chow H. M., Lee S. M and Yang L. D., Machining Characteristics Study of Friction Drilling on AISI304 Stainless Steel, *Journal of Materials Processing Technology*, 207, 180-186, 2008.
7. Ku W. L., Sheu T. S., Chow H. M., Lee S. M., Yang L. D., Lin Y.C., Optimization of Machining Parameters of a Novel Friction Drilling Process, *Journal of Materials Processing Technology*, 207, 180-186, 2008.
8. Lee S., M., Chow H., M., Huang F., Y., Yan B, H., Friction Drilling of Austenitic Stainless Steel by Uncoated and PVD, AlCrN and TiAlN Coated Tungsten Carbide Tools, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 49, 81-88, 2009.
9. Krishna, P. V. G, Kishore, K., Satyanarayana, V.V., Some Investigation In Friction Drilling AA6351 Using High Speed Steel Tools, *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*, 5 (3), March, 11-15, 2010.
10. Pantawane P. D., Ahuja, B. B., Experimental Investigations and Multi-Objective Optimization of Friction Drilling Process on AISI1015, *International Journal of Applied Engineering Research*, 2 (2), 448-461, 2011.
11. Ku W.L, Hung C. L, Lee S.M., Chow H.M., Optimization in Thermal Friction Drilling for SUS304 Stainless Steel, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 53 (9-12), 935-944, 2011.
12. Raju B. P., Swamy M. K., Effect of Tool Material in Friction Drilling A Case Study, *International Journal of Mechanical and Production Engineering Research and Development*, 2 (4), Dec. 51-60, 2012.
13. Yang L.D., Ku W.L., Chow H.M., Wang D.A., Lin Y.C., Mar-M247, Haynes-230&Inconel-718 Study of Machining Characteristics for Ni-based Superalloys on Friction Drilling, *Advanced Materials Research*, 459, 632-637, 2012.
14. Raju B.P., Swamy M.K., Finite Element Simulation of a Friction Drilling Process Using Deform-3D, *International Journal of Engineering Research and Applications*, 2, 716-721, 2012.
15. Krasauskas P., Keselys T., Kilikevicius S., Experimental Investigation and Simulation of Stainless AISI304 Steel Thermo Mechanical Drilling, *Proceedings of 17th International Conference-Mechanika*, 18 (2), 150-154, 2012.
16. Boopathi M., Shankar S., Manikandakumar S., Ramesh R., Experimental Investigation of Friction Drilling on Brass, Aluminium and Stainless Steel, *Procedia Engineering*, 64, 1219-1226, 2013.
17. Özek C., Demir Z., A7075-T651 Alaşımının Sürtünmeli Delinmesinde Kovan Yüksekliğinin Malzeme Kalınlığına Göre Araştırılması, *Dicle Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Mühendislik Dergisi*, 4 (2), 61-67, 2013.
18. Özek C., Demir Z., Investigate the Friction Drilling of Aluminium Alloys According to the Thermal Conductivity, *TEM Journal*, 2 (1), 93-101, 2013.
19. Kaya M., Aktaş A., Beylergil B., Akyıldız H. K., An Experimental Study on Friction Drilling of St12 Steel, *Transactions of the Canadian Society for Mechanical Engineering*, 38 (3), 319-329, 2014.
20. Hynes N. R. J., Kumaran M. M., Rakesh N., Gurubaran, C. K., Numerical Analysis in Friction Drilling of AISI1020 Steel and AA6061-T6 Alloy, *Recent Advances in Environmental and Earth Sciences and Economics*, ISBN:978-1-61804-324-5, 145-149, 2015.
21. Sara E. B., Midany T. E., Elshourbagy H., Optimization of Thermal Friction Drilling Process Based on Taguchi

- Method and Fuzzy Logic Technique, International Journal of Science and Engineering Applications, ISSN-2319-7560, 4 (2), 55-59, 2015.
22. Wu J., Wen J. M., Wang Z.Y., 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), 1-8, 2016.
  23. Demir Z., 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, 2016.
  24. Eliseev A.A., Fortuna S.V. Kolubaev E.A., Kalashnikova T. A., Microstructure Modification of 2024 Aluminum Alloy Produced by Friction Drilling, Materials Science&Engineering, A691, 121-125, 2017.
  25. Bilgin M. B., Gök K., Gök A., Three-dimensional Finite Element Model of Friction Drilling Process in Hot Forming Processes, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering, 231 (3), 548-554, 2017.
  26. Rajesh N., Hynes J., Kumar R., Jebaraj A., Sujana J., Optimum Bushing Length in Thermal Drilling of Galvanized Steel Using Artificial Neural Network Coupled With Genetic Algorithm, Materials And Technology, ISSN1580-2949, MTAEC, 9, 51 (5), 813-822, 2017.
  27. Sara A., E. B., Hazem E., Shourbagy E., Ahmed M., Tawfik E.B., Experimental and Thermo-Mechanical Modeling Optimization of Thermal Friction Drilling for AISI304 Stainless Steel, CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology, 20, 84-92, 2018.

