



POLİTEKNİK DERGİSİ

JOURNAL of POLYTECHNIC

ISSN: 1302-0900 (PRINT), ISSN: 2147-9429 (ONLINE)

URL: <http://dergipark.org.tr/politeknik>



Ti6Al4V titanyum alaşımasının delinmesinde delme yönteminin aşınmaya etkisinin incelenmesi

An investigation into the influence of drilling method on drill wear in drilling of Ti6Al4V

Yazar(lar) (Author(s)): İbrahim ÇİFTÇİ¹, Hüseyin GÖKÇE²

ORCID¹: 0000-0001-7875-6324

ORCID²: 0000-0002-2113-1611

Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article): Çiftçi İ. ve Gökçe H., “Ti6Al4V titanyum alaşımasının delinmesinde delme yönteminin aşınmaya etkisinin incelenmesi”, *Politeknik Dergisi*, 22(3): 627-631, (2019).

Erişim linki (To link to this article): <http://dergipark.org.tr/politeknik/archive>

DOI: 10.2339/politeknik.450289

Ti6Al4V Titanyum Alaşımının Delinmesinde Delme Yönteminin Aşınmaya Etkisinin İncelenmesi

Araştırma Makalesi / Research Article

İbrahim ÇİFTÇİ^{1*}, Hüseyin GÖKÇE²

¹Çankırı Karatekin Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, Makine Müh. Bölümü, Uluyazı, Çankırı, Türkiye

²Çankırı Karatekin Üniversitesi Meslek Yüksekokulu, Makine Prog., Taşmescit, Çankırı, Türkiye

(Geliş/Received : 23.03.2018 ; Kabul/Accepted : 29.05.2018)

ÖZ

Ti6Al4V titanyum alaşımı mükemmel özellikleri nedeniyle başta uzay ve havacılık olmak üzere çeşitli endüstri dallarında yaygın olarak kullanılan önemli bir mühendislik malzemesidir. Ancak, bu malzemenin düşük ısı iletkenliği, düşük kimyasal kararlılığı ve düşük elastiklik modülü işlenmesini zorlaştırmaktadır. Bu çalışmada, karbür matkapla Ti6Al4V malzemenin delinmesi sonucunda matkaplarda gerçekleşen aşınmalar incelenmiştir. Delme işlemleri sabit kesme hızı ve ilerleme değerinde üç farklı delme yöntemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Doğrudan dalma, 1 mm dalma ve 2 mm geri çıkma ve 1 mm dalma tam geri çıkma şeklinde üç farklı delme yöntemi kullanılmıştır. En düşük matkap aşınması 1 mm dalma ve tam geri çıkma yönteminde elde edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Ti6Al4V titanyum alaşımı, delme, aşınma.

An Investigation into the Influence Of Drilling Method On Drill Wear in Drilling of Ti6Al4V

ABSTRACT

Ti6Al4V titanium alloy is an important engineering material widely used in various industries (mainly in aerospace) due to its superior properties. However, its low thermal conductivity, low chemical inertness and low modulus of elasticity make it difficult to machine. In this study, wear of solid carbide drill bits was investigated in drilling Ti6Al4 titanium alloy. Drilling operations were performed at a constant cutting speed and a constant feed rate using the three different drilling methods. These drilling methods were direct drilling (without pecking), 1 mm plunging and 2 mm retract and 1 mm plunging and full retracts. Among the drilling methods 1 mm plunging and full retracts resulted in lowest wear.

Keywords: Ti6Al4V titanium alloy, drilling, wear.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Titanyum alaşımları havacılık ve uzay ve biyomedikal endüstrilerinde olağanüstü dayanım ağırlık oranı ve üstün korozyon direnci nedeniyle kullanılmaktadır. Ayrıca, titanyum miktarının gelecek nesil uçakların yapısında kullanımının % 7'den % 15'e çıkacağı öngörülmektedir. Bu nedenle talaşlı imalat işlemlerine maruz kalmış titanyum parçalar, büyüyen bir pazar olarak algılanmaktadır. Talaşlı imalat (işleme), maliyeti etkileyen önemli bir faktördür. Titanyum alaşımları çoğunlukla işlenebilirliği zor malzemeler olarak bilinmektedir [1]. Bu alaşımların düşük ısı iletkenliği, düşük elastiklik modülü, yüksek sıcaklıklarda sertliğini muhafaza etmesi ve düşük kimyasal kararlılığı işlenebilirliğinin zor olmasının nedenlerindedir. Bu özellikler nedeniyle hızlı takım aşınması, düşük talaş kaldırma oranı ve yüzey kalitesinin bozulması gibi problemlerle sıklıkla karşılaşılır [2].

Delik delme işlemleri yaygın olarak karşılaşılan üç talaşlı imalat işleminden bir tanesidir. Çeşitli parçalar incelendiğinde, çoğunda çeşitli delikler olduğu görülür.

Bir uçağın kanadındaki ve gövdesindeki perçinlerin, motor blokları ve silindir kapaklarındaki civataların ve çeşitli tüketici ürünlerindeki deliklerin çok sayıda olduğu görülür. Delikler tipik olarak bağlantı elemanlarıyla (delik gerektiren civata, vida, perçin gibi) montaj için kullanılırlar. Üretimde delik açma işlemi, en yaygın kullanılan operasyonlardan olup matkapla delik delme en yaygın olarak kullanılan yöntemdir. Delik delme işlemi otomotiv sektörü için motor üretiminde maliyeti en yüksek olan işlemlerden biridir [3].

Tornalama, frezeleme ve delme gibi talaşlı imalat işlemlerinin tamamı dikkate alındığında delik delme işleminin bu işlemler arasında yaklaşık % 33 gibi bir paya sahip olduğu bilinmektedir [4]. Hatta havacılık ve uzay sanayiinde bu oranın % 40 - 60'a kadar çıktığı rapor edilmiştir [5,6].

Titanyum alaşımlarının ısı iletkenliklerinin oldukça düşük olduğu bilinmektedir. Titanyum alaşımlarının düşük ısı iletkenlikleri talaşlı imalat işlemi esnasında oluşan ısının ciddi oranda kesme bölgesinde kalmasına sebep olmaktadır. Bu problem delme işlemi esnasında daha belirgin olmaktadır çünkü delme işlemi esnasında talaşın kesme bölgesinden uzaklaşması diğer talaşlı imalat işlemlerine göre daha yavaştır. Dolayısıyla ısının

*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)
e-posta : ibrahim.ciftci@yahoo.com.tr

çoğu kesme bölgesinde kalmakta ve kesici takımın (matkabın) hızlı aşınmasına neden olmaktadır. Aşınma ise takım maliyetini artırmakta, ürün kalitesini düşürmekte ve imalat süresini de sık takım değişikliğinden dolayı artırmaktadır. Ti6Al4V alaşımının delinmesi üzerine yapılan çalışmalara bakıldığında uygun matkap geometrisi, malzemesi, işlem değişkenleri ve soğutma yöntemlerinin optimize edilmesi amacıyla çok sayıda araştırmanın olduğu görülmektedir [5-11].

Delme işlemlerinde doğrudan delme ve gagalama gibi farklı delme yöntemleri kullanılabilir. Doğrudan delme yönteminde matkap delme işlemine başlar ve işlem bitinceye kadar belirlenen ilerleme değerinde aksel hareketine devam eder. Ancak bu yöntem derin deliklerin ve delinmesi zor malzemelerin delinmesinde ciddi sıcaklık artışlarına ve diğer bazı problemlere neden olabilir. Bu ciddi sıcaklık artışının önüne geçmek için de delme işlemi esnasında gagalama yöntemi tercih edilebilir. CNC takım tezgahlarında ve CAM programlarında delik delme işlemleri için gagalama yöntemi seçenekleri mevcuttur. Doğrudan delme yöntemiyle karşılaştırıldığında gagalama yöntemi ile derin delikler rahatlıkla delinebilir, talaşın kırılması ve matkap kanallarına yapışan talaşların atılması kolay olur ve düzenli aralıklarla geri çıkma nedeniyle sıcaklığın olumsuz etkisi azaltılır [12]. Delik delme ile ilgili yapılan bazı çalışmalarda gagalama yönteminin kullanıldığı görülmektedir [13,14].

Ti6Al4V malzemenin delinmesinde gagalama yönteminin matkap aşınması üzerindeki etkisi Wong ve diğerleri tarafından incelenmiştir. Farklı uç geometrilerine sahip kaplamasız karbür matkaplarla çeşitli kesme hızlarında ve delme yöntemlerinde (doğrudan delme ve gagalama) delik delme işlemleri gerçekleştirilmiştir. Gagalama yöntemi ile delme işleminde kullanılan matkapların doğrudan delme yönteminde kullanılan matkaplara göre çok daha düşük seviyelerde aşınma sergiledikleri görülmüştür [15].

Yapılan çalışmalardan, Ti6Al4V malzemenin delinmesinde delme yönteminin etkisini inceleyen çalışmaların Wong ve diğerlerinin [15] yaptığı çalışmadan ibaret olduğu görülmektedir. Bu çalışmada, plaka şeklindeki Ti6Al4V titanyum alaşımı malzemenin karbür matkapla delinmesinde delme yöntemlerinin (doğrudan dalma ve iki farklı gagalama) matkaplarda oluşan aşınmaya etkisinin incelenmesi amaçlanmıştır.

2. MATERYAL VE METOD (MATERIAL and METHOD)

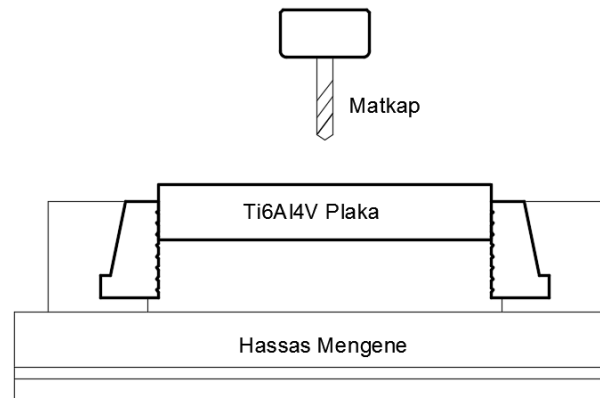
Bu çalışmada, iş parçası malzemesi olarak ASTM B381 standardına uygun 300 x 150 x 25 mm boyutlarında plaka şeklinde Ti6Al4V titanyum alaşımı kullanılmıştır. Kullanılan iş parçası malzemesi muhtemel çatlak ve kusurlara karşı üretici firma tarafından ultrasonik olarak teste tabi tutulmuştur ve kimyasal bileşimi ve çeşitli özellikleri Çizelge 1’de verilmiştir.

Çizelge 1. İş parçası malzemesi özellikleri (Properties of workpiece material)

İş parçası malzemesi	Ti6Al4V
Kimyasal bileşimi (%)	
Al	5,86
V	4,08
Fe	0,173
C	0,008
N	0,005
H	0,001
O	0,14
Ti	Kalan
Çekme dayanımı (MPa)	955
Akma dayanımı (MPa)	878
Yüzde uzama (%)	13,5

Ti6Al4V titanyum alaşımı iş parçası üzerinde delik delme işlemleri yapmak için helisel karbür matkap kullanılmıştır. Kullanılan matkapların çapları 5 mm, helisel kısımlarının uzunlukları 25 mm, tam boyları 52 mm ve uç açıları da 140°’dir. Özel olarak imal ettirilen matkaplar S15 kalite karbür olup kaplaması da AlCrN’dür.

Delme deneyleri ARION IMM-600 dik işlem merkezi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Plaka şeklindeki Ti6Al4V iş parçası malzemeleri hassas bir mengene vasıtasıyla tezgah tablasına bağlanmıştır. Şekil 1’de delme düzeneği şematik olarak gösterilmiştir. İş parçasının bağlanmasında, iş parçası yüzeyinin tezgah iş mili ekseni ile dikliğini sağlamak için komparatör kullanılmıştır. Ayrıca, delme işlemi öncesinde iş parçası yüzeyinden ince bir katman alın frezeleme yöntemiyle uzaklaştırılmıştır. Bu şekilde hem yüzeydeki muhtemel kusurlar giderilmiş ve hem de iş mili ile iş parçası yüzeyinin dikliği daha iyi sağlanmıştır.



Şekil 1. Delme düzeneğinin şematik gösterilmesi (Schematic view of drilling set-up)

Karbür matkaplar CNC dik işleme merkezinin iş mili koniğine uygun bir takım tutucu vasıtasıyla rijit bir şekilde bağlanmıştır. Bütün delme işlemlerinde matkaplar, takım taşma uzunlukları (tool overhang) 35 mm olacak şekilde takım tutucuya bağlanmıştır. Delme

işlemlerinde kesme hızı 20 m/dk ve ilerleme değeri de 0,01 mm/dev olarak alınmıştır. Ti6Al4V pahalı malzeme olması nedeniyle malzeme sarfiyatını azaltmak amacıyla delme deneyleri kesme sıvısı kullanılmadan gerçekleştirilmiştir. Bu şekilde matkaplarda gerçekleşen aşınmaların daha hızlı olacağı düşünülmüştür. Delme işlemlerinden önce matkaplardaki salgı bir komparatör yardımıyla ölçülmüştür. En yüksek salgı değeri 25 µm olarak ölçülmüştür.

Delme işlemleri üç farklı delme yöntemi ile gerçekleştirilmiştir. Birinci yöntemde matkap doğrudan iş parçasına dalarak delme işlemi gerçekleştirilmiştir. İkinci yöntemde, her defasında matkap 1 mm dalma ve akabinde 2 mm geri çıkma (gagalama) ile işlem gerçekleştirilmiştir. Üçüncü yöntemde ise, her defasında matkap 1 mm dalma ve tam geri çıkma (gagalama) ile delme işlemi gerçekleştirilmiştir. Delme işlemi yapan matkaplarda gerçekleşen aşınmalar bir Dinolite Dijital stereo mikroskop yardımıyla gözlemlenmiştir. Aşınmaların daha ayrıntılı bir şekilde incelenmesi için de bir Carl Zeiss Ultra Plus Gemini FESEM tarama elektron mikroskobu (SEM) kullanılmıştır.

3. SONUÇLAR VE TARTIŞMA (RESULTS AND DISCUSSION)

Üç farklı delme yöntemiyle yapılan delme işlemleri sonucu elde edilen gözlemler burada tartışılacaktır.

3.1. Doğrudan Dalma Yöntemi (Directly Plunging)

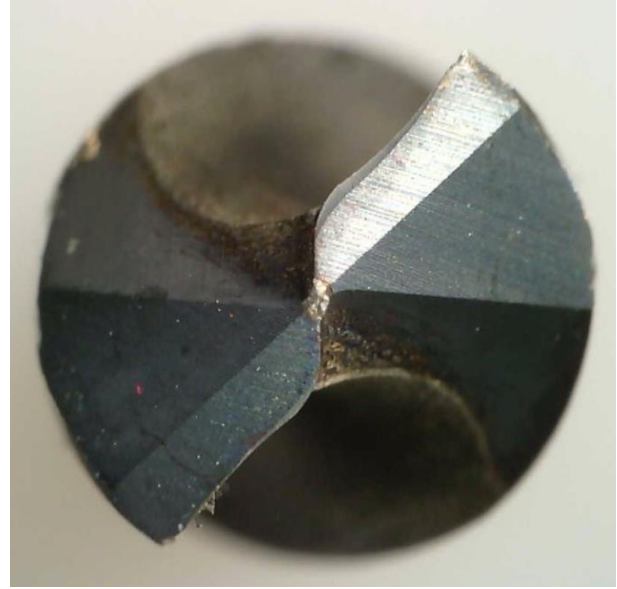
Geri çıkma olmadan doğrudan tek seferde yapılan delme işleminde ilk deliğin delinmesinden itibaren matkap ucunda ciddi kırmızılık gözlemlenmiştir. Ayrıca, delme işlemi esnasında oluşan talaşların yoğun bir şekilde matkabın talaş kanallarını doldurduğu ve sıkışmaya neden olduğu da gözlemlenmiştir. Yüksek sıcaklık ve talaş sıkışması nedeni ile işlemin sesinin normal bir delme işleminin sesinden çok farklı olduğu ve işlemin zor geçtiği anlaşılmıştır. 11. deliğin delinmesi esnasında matkap kırılmıştır.

Delme işlemi esnasında çıkan talaşların matkap kanallarını doldurarak sıkışmaya neden olduğu ve matkap ucundaki yüksek sıcaklık nedeniyle matkabın çok fazla aşındığı ve her iki durumun da kuvvetlerin artmasına neden olduğu ve kırılmanın gerçekleştiği düşünülmektedir. Ayrıca, delme işlemi esnasında kesme sıvısının da kullanılmaması çıkan talaşın daha kuvvetli bir şekilde matkabın talaş kanallarına yapışmasına ve daha fazla sıkışmaya ve akabinde de kırılmaya neden olduğu da düşünülmektedir.

3.2. 1 mm Dalma ve 2 mm Geri Çıkma (1 mm Plunging and 2 mm Retract)

1 mm dalma ve akabinde 2 mm geri çıkma yöntemi ile delmede 30 delik delinmiştir. Delme işlemi esnasındaki çıkan sestten başlangıçta delme işleminin gayet iyi bir şekilde yapıldığı anlaşılmıştır. Ancak, delinen delik sayısı arttıkça zorlamadan dolayı işlemin sesinin arttığı görülmüştür. Daha fazla delik delinmesi durumunda

matkabın kırılma ihtimaline karşı 30 delikten sonra delme işlemi gerçekleştirilmemiştir. İlk yöntemde olduğu gibi matkabın talaş kanallarının zamanla talaşla dolduğu görülmüştür. Şekil 2’de bu yöntemle delme işlemi yapan matkapta gerçekleşen aşınma görülmektedir.



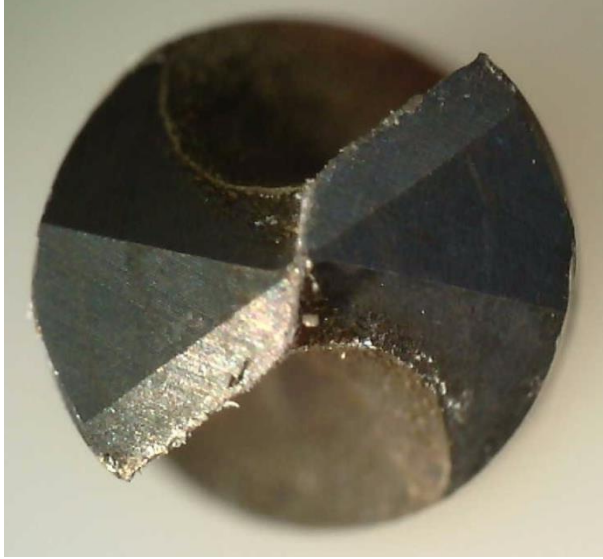
Şekil 2. 30 delik delme sonrası matkapta gerçekleşen aşınmanın dijital mikroskop fotoğrafı (Digital microscope image of the drill bit after drilling 30 holes)

Şekil 2’den aşınmaların genellikle yan yüzey aşınması şeklinde olduğu ve özellikle kesici ağızların matkap merkezine (yardımcı kesici kenara) yakın kısımlarında daha büyük olduğu görülmektedir. Matkabın dış çapına yakın kısımlarda ve dış çapta ise küçük kırılmalar görülmektedir.

3.3. 1 mm Dalma ve Tam Geri Çıkma (1 mm Plunging and Full Retract)

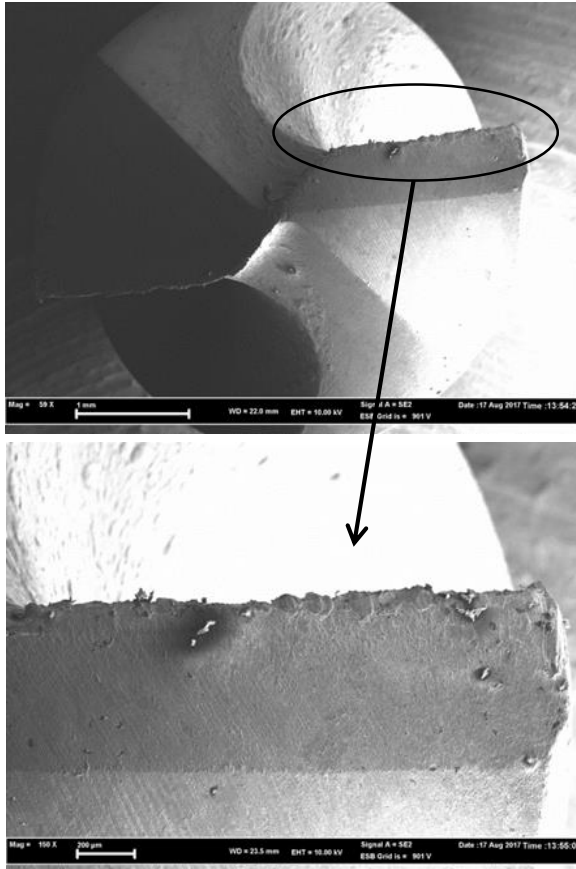
1 mm dalma ve akabinde tam geri çıkma yöntemi ile 150 adet delik delinmiştir. 2. yöntemde (1 mm dalma ve 2 mm geri çıkma) 30 delik delindiği düşünülürse bu yöntemle çok önemli derecede matkabın delme performanslarında bir iyileşme sağlandığı görülür. Şekil 3’de bu yöntemle delme işlemi yapan matkabın dijital mikroskop görüntüsü verilmektedir. Bu görüntüden, matkaptaki aşınmanın 2. yöntemde kullanılan matkabınkine göre çok daha düşük seviyede olduğu görülmektedir. Buradan da 2. yöntemdeki aşınma seviyelerine erişilene kadar delme işlemi yapılması durumunda 150’den çok daha fazla sayıda delik delinebileceği anlaşılabılır.

Şekil 3’ten matkabın kesici ağızlarına iş parçası malzemesinin yapıştığı/sıvıdığı ve kesici ağızların dış çapa yakın kısımlarında bir miktar kırılmalar olduğu görülmektedir. Kesici ağızlara iş parçasının yapışması/sıvınması aşınmanın bir göstergesidir. Az miktarda gerçekleşen aşınmanın yapışan malzemelerle gizlendiği görülmektedir.



Şekil 3. 150 delik delme sonrası matkapta gerçekleşen aşınmanın dijital mikroskop fotoğrafı (Digital microscope image of the drill bit after drilling 150 holes)

Şekil 4'te bu yöntemle delmede kullanılan matkabın SEM fotoğrafları verilmektedir. SEM fotoğraflarından kesici ağzın dış çapa yakın kısmında küçük kırılmalar ve merkeze doğru olan kısımlarında ise yapışan iş parçası malzemeleri görülmektedir.



Şekil 4. 150 delik delme sonrası matkapta gerçekleşen aşınmanın SEM fotoğrafları (SEM images of the drill bit after drilling 150 holes)

3.4. Genel Değerlendirme (General Evaluation)

Elde edilen sonuçlardan Ti6Al4V alaşımının delinmesinde delme yönteminin matkap aşınması üzerinde çok ciddi bir etkiye sahip olduğu görülmüştür.

1. yöntemde (geri çıkma olmaksızın doğrudan dalma) matkap 11. deliğin delinmesi esnasında kırılmıştır. Bu yöntem ile delme esnasında matkapta ciddi sıcaklık artışı gözlemlenmiştir. Kırılmanın yüksek sıcaklık sonucu gerçekleşen hızlı aşınmadan ve matkabın helisel kanallarına dolan/sıkışan talaşlardan kaynaklandığı düşünülmüştür.

2. yöntemde 1. yöntemdekine benzer bir sıcaklık artışı delme esnasında matkapta gözlemlenmemiştir. Ancak, delme işleminin ilerleyen aşamalarında matkabın kesme işlemi yaparken zorlandığı anlaşılmıştır. Bu yöntem kullanılarak 30 delik delinmiştir. 30 delik delinmesinden sonra matkaptaki en fazla aşınma 0,122 mm olarak ölçülmüştür.

3. yöntemde kullanılan matkap ile 150 adet delik delinmesine rağmen ikinci yöntemdekine benzer bir zorlanma delme işleminin hiçbir aşamasında gözlemlenmemiştir. 150 delik delme işlemi sonrasında matkaptaki aşınma çok düşük seviyelerde olduğu için aşınma ölçümü gerçekleştirilememiştir. İkinci yöntemde oluşan aşınma seviyesine ulaşmak için 150'den çok daha fazla delik delme işleminin yapılması gerektiği düşünülmüştür.

6. SONUÇ (CONCLUSION)

Ti6Al4V titanyum alaşımı plakalar üzerine karbür matkaplarla farklı delme yöntemleriyle delik delme işlemlerinin gerçekleştirildiği bu çalışmadan aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir:

1. Doğrudan dalma yöntemiyle (1. Yöntem) yapılan işlemlerde yalnızca 10 delik delinebilmiştir. 11. deliğin delinmesi esnasında matkap kırılmıştır. 1 mm dalma ve akabinde 2 mm geri çıkma (2. Yöntem) yöntemi ile yapılan delme işlemlerinde 30 adet delik delinmiştir. 1 mm dalma ve tam geri çıkma yöntemi (3. Yöntem) ile yapılan delme işlemlerinde ise 150 adet delinmiştir.
2. 1. yöntemde matkap kırıldığı için matkapta gerçekleşen aşınma incelenememiştir. 2. yöntemde kullanılan matkapta düzenli bir yan yüzey aşınması görülmüştür. 3. yöntemde kullanılan matkapta bir miktar aşınma görülmesine rağmen 2. yöntemdekine göre oldukça düşük seviyede kalmıştır.
3. Gerçekleşen aşınmalar matkabın kesici ağzının merkeze yakın olan kısımlarında yan yüzey aşınması şeklinde ve matkabın dış kısmına yakın olan kısımlarda da ağız kırılması şeklinde olduğu görülmüştür.
4. Farklı delme yöntemlerinin matkap aşınmasını çok ciddi bir şekilde etkilediği görülmüştür.
5. Farklı değerlerde geri çıkma miktarlarının takım aşınmasına etkisini incelemek amacıyla başka çalışmalar yapılabilir.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENT)

Bu çalışma Çankırı Karatekin Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü tarafından desteklenen MF200217B26 no'lu proje kapsamında gerçekleştirilmiştir. Desteklerinden ötürü kuruma teşekkür ederiz.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Ezugwu, E.O. and Wang Z.M., "Titanium alloys and their machinability - a review", *Journal of Materials Processing Technology*, 68: 262-274, (1997).
- [2] Ünal, E. ve Karaca, F., "Ti6Al4V alaşımının dik işlem merkezli CNC tezgahında işlenebilirliğinin araştırılması", *Doğu Anadolu Bölgesi Araştırmaları*, 6: 135-139, (2007).
- [3] Kalpakjian, S. and Schmid, S.R., "Manufacturing engineering and technology", 8th Edition, *Prentice Hall*, (2009).
- [4] Çakır, A., "AA 7075 ve AA 2024 alüminyum malzemelerine delik delinmesinde soğutma yöntemlerinin işleme performansına etkilerinin incelenmesi", *Doktora Tezi*, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, (2015).
- [5] Isbilir, O. and Ghassemieh, E., "Finite element analysis of drilling of titanium alloy", *Procedia Engineering*, 10: 1877-1882, (2011).
- [6] Kivak, T. and Seker, U., "Effect of cryogenic treatment applied to M42 HSS drills on the machinability of Ti-6Al-4V alloy", *Materials and Technology*, 49: 949-956, (2015).
- [7] Bıçakcı, N., "Ti6Al4V titanyum alaşımının delinebilirliğinin araştırılması", *Yüksek Lisans Tezi*, Karabük Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, (2015).
- [8] Sharif, S. and Rahim, E.A., "Performance of coated and uncoated carbide tools when drilling titanium alloy Ti6Al4V", *Journal of Materials Processing Technology*, 185: 72-76, (2007).
- [9] Shetty, P.K., Shetty, R., Shetty, D., Rehaman, F. and Jose, T.K. "Machinability study on dry drilling of titanium alloy Ti6Al4V using L9 orthogonal array", *Procedia Materials Science*, 5: 2605-2614, (2014).
- [10] Abdelhafeeza, A.M., Soo, S.L., Aspinwall, D.K., Dowson, A. and Arnold, D., "Burr formation and hole quality when drilling titanium and aluminium alloys", *Procedia CIRP*, 37: 230-235, (2015).
- [11] Li, R., Hegde, P. and Shih, A.J., "High-throughput drilling of titanium alloys", *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 47: 63-74, (2007).
- [12] Smid, P., "CNC programming handbook", 3rd Edition, *Industrial Press Inc.*, New York, (2008).
- [13] Pecat, O. and Brinksmeier, E., "Low damage drilling of CFRP/titanium compound materials for fastening", *Procedia CIRP*, 13: 1-7, (2014).
- [14] Chen, Y.C. and Liao, Y.S., "Study on wear mechanisms in drilling of Inconel 718 superalloy", *Journal of Materials Processing Technology*, 140: 269-273, (2003).
- [15] Wong, F.R., Sharif, S., Kamdani, K. and Rahim, E.A., "The effect of drill point geometry and drilling technique on tool life when drilling titanium alloy, Ti-6Al-4V", *Proceedings of International Conference on Mechanical & Manufacturing Engineering (ICME2008)*, Johor Bahru, Malaysia, 21–23 May (2008).