



Al6061-T6 Malzemenin Derin Haddelenmesinde Yeni Tip İnsert Uç Kullanımının Deneysel Olarak Araştırılması

Feyza AYDIN^{1, a}, Oktay ADIYAMAN^{2, b}

¹Batman Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Malzeme ve İmalat Mühendisliği Bölümü, Batman, Türkiye

²Batman Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Makine ve Metal Teknolojileri Bölümü, Batman, Türkiye

^aORCID: 0000-0002-2836-1030; ^bORCID: 0000-0002-2674-3836

✉ Sorumlu Yazar: feyzaay7272@gmail.com.tr

Geliş tarihi: 22/01/2023

Kabul tarihi: 08/06/2023

Özet: Derin haddeme, malzeme yüzeylerinin iyileştirilmesi için uygulanan ve yaygın olarak kullanılan bir yüzey düzeltme metodudur. Bu metod ile malzeme yüzeyindeki mekanik özellikler (sertleşme, aşınma direnci, yorulma) ve yüzey pürüzlülüğünde iyileşmeler meydana gelmektedir. Bu çalışmanın amacı, yeni tasarlanmış ve mevcut katerlere takılabilen bir ezici uç ile farklı tormalama işlemlerine sahip (boyuna, konik, radüslü) AL6061-T6 malzemenin derin haddelenmesi yoluyla kullanılabilirliğinin araştırılması ve deneysel olarak derin haddeme sonuçlarının incelenmesidir. Çalışmada, WNMG insert uç modeli baz alınarak küresel uca sahip ezici tip uç imal edilerek, farklı parametreler kullanılmış ve AL6061-T6 malzemeye derin haddeme işlemi uygulanmıştır. Derin haddeme işlemleri CNC torna tezgahında yapılmış ve işlem parametreleri olarak 143N, 330N, 495N haddeme kuvveti, 0.04 mm/dev, 0.08 mm/dev ve 0.12 mm/dev ilerleme miktarı ile 400 dev/dak, 600 dev/dak ve 800 dev/dak devir sayısı belirlenmiştir. Tormalanan Al6061-T6 parçalardaki yüzey pürüzlülüğü incelenmiş, parametrelerin yüzey pürüzlülüğü üzerine etkileri analiz edilmiştir. Regresyon yöntemi kullanılarak yüzey pürüzlülüğü üzerinde parametrelerin etki değerleri araştırılmıştır. Çalışma sonunda mevcut standart tormalama katerlerine uyumlu olarak tasarlanan küresel uçlu ezici ucun derin haddemede kullanılabilir olduğu, farklı tormalama kontürlerine sahip torna parçalarının derin haddelenmesinde yüzey pürüzlülüğünü iyileştirdiği görülmüştür. Yapılan regresyon analizinde de, yüzey pürüzlülüğü üzerinde en büyük etkinin ilerleme değeri olduğu tespit edilmiştir.

Anahtar Sözcükler: Al6061, Derin haddeme, Triboloji, Yüzey pürüzlülüğü, Bilyeli haddeme

Experimental Investigation of New Type Insert in Deep Rolling of Al6061-T6 Material

Abstract: Deep rolling is a widely used surface treatment method for improving material surfaces. With this method, the mechanical properties (hardening, wear resistance, fatigue) and surface roughness of the material surface are improved. The aim of this study is to investigate the usability of AL6061-T6 material with different turning processes (longitudinal, conical, radius) by deep rolling and to experimentally examine the results of deep rolling with a newly designed insert that can be fixed to used tool holders. In the study, based on the WNMG insert tip model, a spherical tip insert type was manufactured, different parameters were used and deep rolling process was applied to AL6061-T6 material. Deep rolling processes were performed on a CNC lathe and the process parameters were 143N, 330N, 495N rolling force, 0.04 mm/rev, 0.08 mm/rev and 0.12 mm/rev with feed rate of 400 rpm, 600 rpm and 800 rpm. spindle speeds has been determined. Surface roughness of turned Al6061-T6 parts were investigated and the effects of parameters on surface roughness were analyzed. The effect values of the parameters on the surface roughness were investigated using the regression method. At the end of the study, it was seen that the insert tip designed in accordance with the used turning tool holders can be used in deep rolling, and it improves the surface roughness in deep rolling of turning parts with different turning contours. In the regression analysis, it was determined that the biggest effect on the surface roughness was the feed rate value.

Keywords: Al6061, Deep rolling, Tribology, Surface roughness, Ball burnishing

1. Giriş

Malzemelerin işlenen yüzeylerinde oluşan olumsuzlukları düzeltmek için yüzeylere taşlama (Çetin vd., 2018), honlama, lepleme (Akyüz vd., 2020), ses titreşimleri ile derin haddeleme (Zu Y., 2009, Bozdana, 2008) farklı yüzey kaynak yöntemleri (Kiliç vd., 2020) gibi birçok ikincil işlem uygulanmaktadır. Prabhu ve arkadaşları yüzeyin düzeltilmesi için uygulanan yöntemleri iki ana kategoriye ayırmıştır. Bunların ilki taşlama vb. yöntemler gibi malzeme kaybını içeren, ikincisi ise bilyeli haddeleme (ball burnishing) ve derin haddeleme (deep rolling) yöntemleri gibi malzeme üzerinde yeniden dağıtma ile yüzeyin plastik olarak sıkıştırılmasına bağlı olarak çalışan ve malzeme kaybı içermeyen yöntemlerdir (Prabhu vd., 2011).

Haddeleme işlemi, iş parçası yüzeylerinin talaş kaldırılmadan ezilmek suretiyle işlenmesi tekniğine verilen isimdir. Bu işlem elde edilen yüzeyin kalitesini arttırmakta (Ra vb.) ve malzemeye ait mekanik özelliklerin de (sertleşme, aşınma direnci, yorulma direnci) iyileşmesini sağlamaktadır. Bu noktada haddeleme işlemi, bu özelliklerin istenildiği durumlarda taşlama (yüzey ve silindirik) işlemine göre tercih edilen bir yöntem olarak karşımıza çıkmaktadır (Başak vd., 2015).

Makine elemanları yüzeylerinin iyileştirilmesi amacıyla ezici bir uç veya makara vasıtasıyla talaş kaldırılmadan yüzeylerin plastik deformasyonu esasına dayanan derin haddeleme tekniği çoğunlukla tormalanmış ve taşlanmış iş parçalarının iç ve dış yüzeylerine uygulanır (Mendi vd., 1996, Özkan vd., 2006). Yöntem düşük ve yüksek deformasyon olmak üzere yüzeye uygulanan gerilme şiddetine bağlı olarak iki farklı aralıkta adlandırılmaktadır. Yüksek deformasyonlarda yüzeye genellikle 30 MPa'dan daha yüksek basınçlar uygulandığından, yüzey altında oluşan artık çekme gerilme derinliğinin 1 mm'nin üzerine çıktığı görülmüştür (Akyüz vd., 2020). Sabit veya yuvarlanmalı olan ezme takımı için gerekli baskı kuvveti, yay baskısı, hidrolik baskı ya da manyetik baskı ile elde edilmektedir. Genellikle kalıp yüzeyleri, miller, türbin kanatlarının bağlantı kısımları, araç süspansiyon sistemleri, kaynaklı bağlantılar ve yatak yüzeyleri gibi parçalara düşük deformasyonla haddeleme uygulanmaktadır (Rodríguez vd., 2012). Geleneksel hassas tormalama, taşlama ve honlama yöntemlerine kıyasla, haddeleme işlemi yaklaşık 15 kat daha ekonomiktir (Luca vd., 2002). İşlem sonucunda, malzemenin yüzey pürüzlülüğü (Ra) önemli ölçüde azalırken yüzey sertliği de artmaktadır. Ayrıca işlem sonucunda, yüzeydeki çekme gerilmeleri basma gerilmelerine dönüştüğünden, yorulma ömrü büyük oranda iyileşmektedir (Akyüz vd., 2020). Derin haddeleme işlemi çelik malzemelere uygulandığı gibi diğer hafif metallere de (pirinç, Al vb) uygulanabilmektedir.

Endüstride çelikten sonra ikinci sırayı alüminyum almaktadır (Smith vd., 2001). Bu nedenle derin ve bilyeli haddeleme ile ilgili yapılan çalışmalar alüminyum ve alaşımlarına da uygulanmıştır. Haddeleme işleminin Al ve alaşımlarına uygulanışı gerek tormalama uygulamalarında silindirik yüzeylere (Hassan vd., 2000, Luo vd., 2011, Hassan vd., 1997, Yu vd., 1999, El Axir vd., 2003, Zhuang vd., 2014, Majzoobi vd., 2016) ve gerekse frezeleme uygulamalarında düzlemsel yüzeylere (Khabeery vd., 2001, Başak vd., 2009, Tadic vd., 2013) uygulanarak analiz ve araştırmalar yapılmıştır. Delik iç yüzeylerinin haddeleme sonrası dairesellikleri incelenmiş ve Ra bakımından işleme yöntemleri ile karşılaştırılmıştır. (Akkurt ve Ovalı, 2009). Benzer bir başka çalışmada (Akkurt vd., 2009), farklı işleme yöntemlerinden matkapla delme, delik tormalama, delik taşlama, honlama, raybalama ve ezerek haddeleme işlemleri sonucunda Al-6061 alaşımı malzemenin delik iç yüzeyindeki Ra, mikro yapı ve yüzeydeki sertlik değişimleri karşılaştırılmıştır. Ayrıca haddeleme yönteminde uygulanan işlem parametrelerinin (hadde basıncı ve paso sayısı) yorulma, artık gerilme, mikrosertlik ve Ra üzerine etkileri deneysel olarak araştırılmıştır. Bilyeli haddeleme yönteminin yüzey pürüzlülüğünü iyileştirdiği, paso sayısının Ra üzerinde %41 oranında etkili olduğu saptanmıştır. Uygulanan kuvvet ve paso sayısının malzemenin mikrosertliğini artırdığı, kuvvet ve paso sayısındaki artışa bağlı olarak ta yaklaşık 20 Hv oranında mikrosertliği arttırdığı belirlenmiştir. Hadde kuvvetinin artması ile malzemede yüzey altı kalıntı gerilmenin arttığı belirlenmiştir. Yorulma dayanımında iyileşme sağlandığı ve yorulma ömrünün arttığı gözlemlenmiştir (Akkurt vd., 2009). İşlem parametrelerinin sonuçlar üzerine etkisi yanında haddelemede kullanılan takımlarla ilgili de benzer çalışmalar bulunmaktadır. Bu amaçla farklı parametreler kullanılarak (haddeleme kuvveti, ilerleme miktarı ve paso sayısı) tasarlanan üç farklı aparat ile işlem parametrelerinin etkileri Al-6061-T6 malzemesi üzerindeki yüzey sertliği ve yüzey

pürüzlülüğüne bağlı olarak incelenmiş ve karşılaştırılmıştır. En iyi Ra ve yüzey sertliğinin bilyeli ezici uca sahip aparat ile elde edildiği görülmüştür (Başak ve Sönmez, 2015). Farklı bir çalışmada ezici ucun farklı çaplardaki etkisi incelenmiş, 5083 Al-Mg malzeme yüzeyi 11.112 mm, 13.494 mm, 15.081 mm ve 16.669 mm bilye çapları ile farklı parametreler kullanılarak haddeme işlemine tabi tutulmuştur (Başak, 2015). Frezeleme uygulaması şeklinde uygulanan haddeme işlemi ile ilgili olarak basit bir ezici uç ile farklı işlem parametreleri kullanılarak ezerek parlatma işlemi yapılmış (Malyer vd. 2018), meydana gelen kalıntı gerilmeler incelenmiş ve sonuçlar sayısal analiz programında bulunan sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Haddeme işlemi yapılan tüm yüzeylerde basma kalıntı gerilmelerinin olduğu tespit edilmiştir. İşlem parametreleri yanında haddeme yönü ve yağlayıcı kullanımının etkisi de incelenmiştir.

Yapılan çalışmalar incelendiğinde genellikle düz yüzeyler üzerine derin haddeme ve bilyeli haddeme uygulamalarının yapıldığı görülmüştür. Çekme numunesi veya yorulma deney numuneleri üzerindeki eğrisel formlar hariç uygulamalarda ya delik içine, ya da dış yüzeylerdeki silindirik yüzeylere haddeme uygulamalarının yapıldığı görülmüştür. Ancak tormalanan parçalarda hem silindirik, hem konik, hem de eğrisel kontürlerin olduğu bilinmektedir. Bu nedenle bu formlara sahip tormalanan parçaların tüm yüzey kontürü (boyuna, konik, radüslü veya eğrisel) üzerinden derin haddeme yöntemiyle yüzeylerinin iyileştirilmesi bir ihtiyaç olarak karşımıza çıkmaktadır. Derin haddeme veya bilyeli haddeme takımlarının da bu yüzeyleri haddedecek bir tasarımda imal edilmesi de ayrıca incelenmesi gereken bir konudur. Tasarlanacak haddeme ezici ucun mevcut takım tutuculara monte edilebilir olması da ayrıca bir avantaj sağlayacaktır. Bu çalışmada bu amaçlara katkı sunmak amacıyla mevcut takım tutuculara monte edilebilen bir haddeme ezici ucun tasarımı ve imalatı yapılmış, bu ezici uç ile farklı kontürlere sahip tormalanmış parçaların derin haddelenmesi incelenmiştir. Farklı işlem parametreleri kullanılarak derin haddelenmiş silindirik ve konik yüzeylerin yüzey pürüzlülükleri incelenmiş, Ra üzerine bu parametrelerin etkisi incelenerek en fazla etkinin hangi parametre olduğu tespit edilmeye çalışılmıştır.

2. Materyal ve Metot

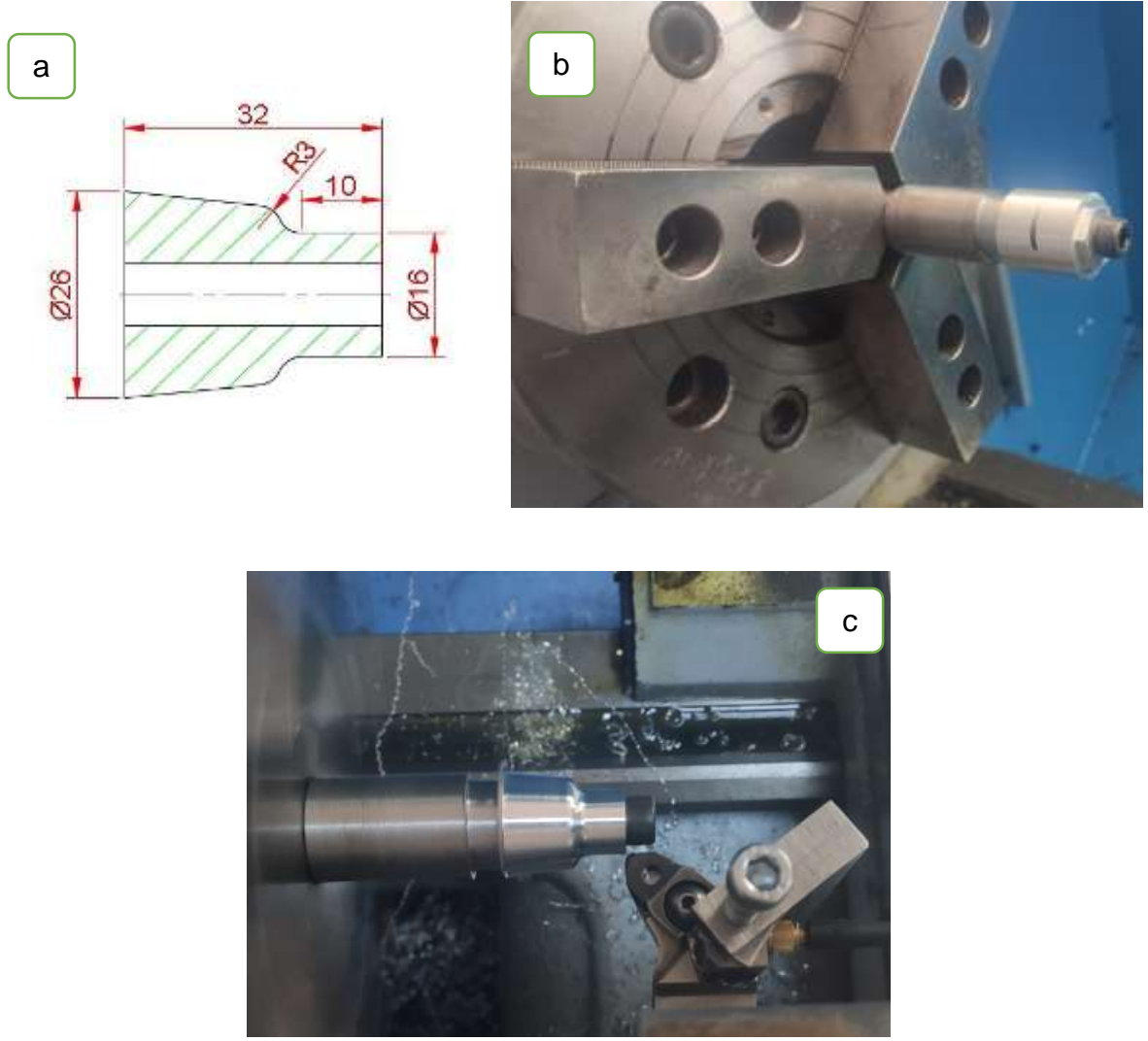
2.1. Deney Malzemesi ve Deneylerin Uygulanması

Tüm haddeme işlemleri SMARC marka CAK6166B X200 model CNC torna tezgahında gerçekleştirilmiştir. Deneylerin uygulanmasında haddeme işleminin uygulanacağı malzeme cinsi olarak Al6061-T6 kullanılmıştır. Al6061-T6 malzemeye ait kimyasal kompozisyon ve mekanik özellikler Tablo 1’de verilmiştir.

Tablo 1. Al 6061-T6 kimyasal bileşimi

Kimyasal İçerik				Mekanik Özellikler	
Elementler					
Al	Kalan	Zn	0,25	Temper	T6
Si	0,4-1,0	Cr	0,1	Akma Mukavemeti (MPa) min-max	240-270
Cu	0,6-1,1	Fe	0,5	Çekme Mukavemeti (MPa) min-max	260-310
Mn	0,2-0,8	Ti	0,1	Uzama (\square 50) min-max	20
Mg	0,8-1,2	Diğer	0,15	Sertlik(brinel) min-max	95

Derin haddeme için 30 mm çapında ve 32 mm boyunda Al6061-T6 malzemedan numuneler kesilerek ortası delinmiş ve sonrasında standart bir işleme sağlanması amacıyla bir malafa yardımıyla CNC aynasına bağlanmıştır. Bağlanan numunelere ait teknik resim ve bağlantı şekli, Şekil 1’de gösterilmektedir.

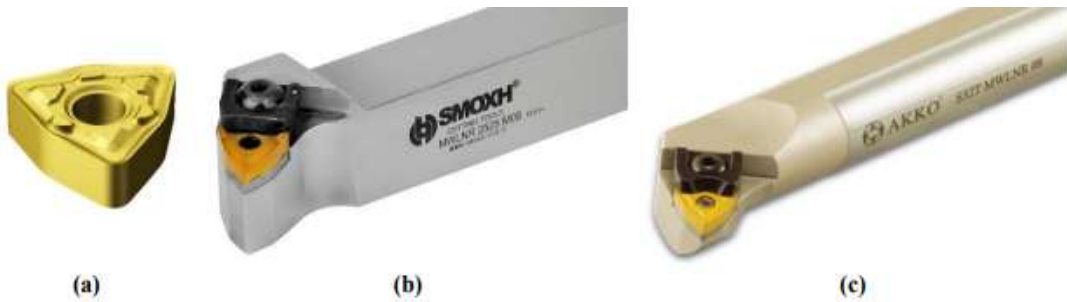


Şekil 1. İşleme biçimi a) Numune teknik resmi b) Ham malzemenin malafaya alınması c) Numunenin işlenmesi sonrası derin haddeleme işleminin yapılması

Şekil 1 a'da teknik resmi verilen numuneler, öncelikle kaba ve finiş tornalama ile işlenmiş ve sonrasında iş parçasına ezici uç ile derin haddeleme işlemi uygulanmıştır. Tüm derin haddeleme işlemleri yağlı ortamda gerçekleştirilmiştir.

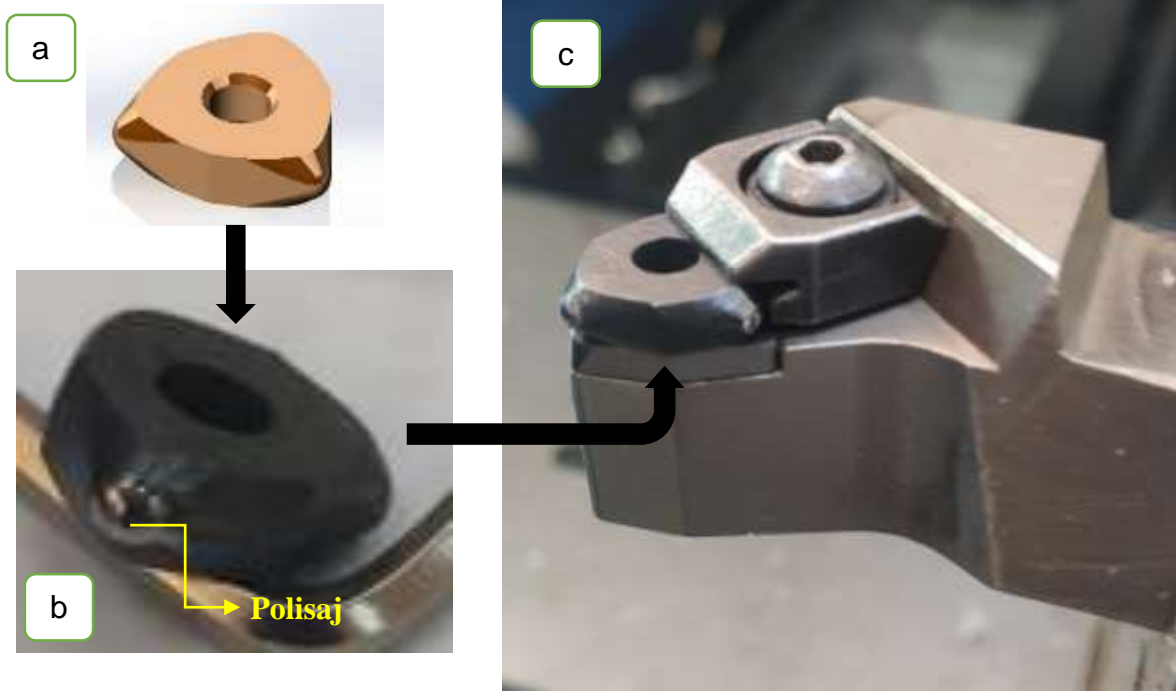
2.2. Ezici Uç Tasarımın Yapılması

Endüstride kullanılan kesici uçlar arasında en yaygın olarak kullanılan uç tiplerinden biri WNMG insert uçlar olup bu kesici uçlar dış kesme uygulamalarında MWLNR kodlu takım tutuculara iç kesme operasyonlarında S25S MWLNR kodlu takım tutuculara bağlanmaktadır (Şekil 2).



Şekil 2. Standart kesici uçlar ve tutucu takımları a) Kesici uç b) Dış kater c) İç delik kateri

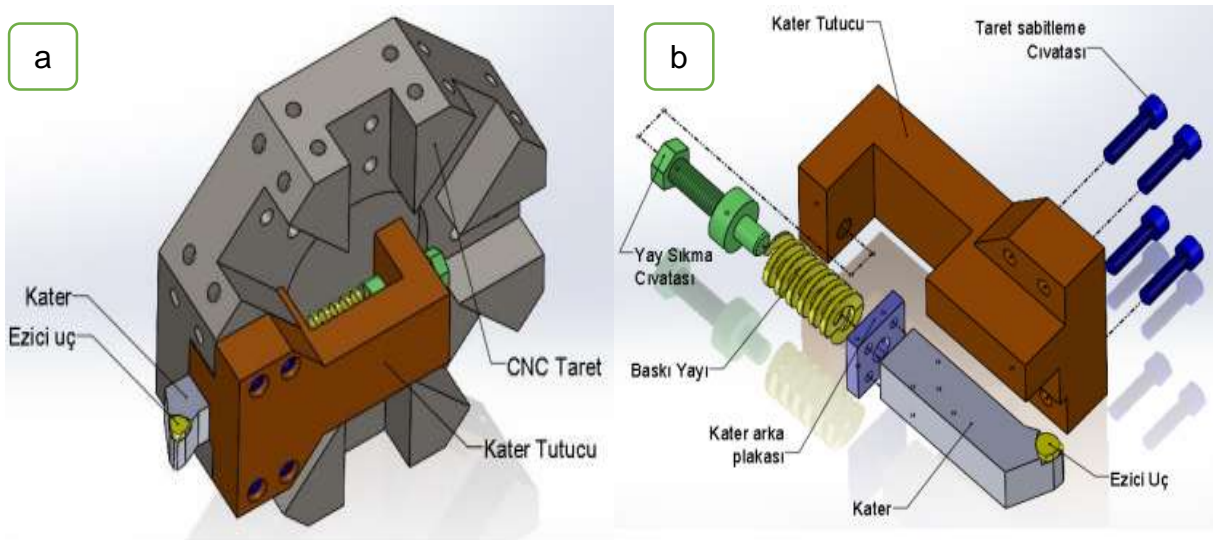
Derin haddelemede mevcut takım tutuculara bağlanabilen WNMG uç formunda yeni bir uç tasarımı yapılmış olup tasarlanan ucun kesici kenar formu 1 mm uç radüslü küresel tipli olarak tasarlanmıştır (Şekil 3 a). Tasarlanan ve üretilen (Şekil 3 b) ezici uç, konik ve eğrisel kontüre sahip kaba ve finiş olarak tornalanan deney numunelerine derin haddeleme işlemi uygulamasında kullanılmıştır. Tasarımı yapılan küresel uçlu radüs WNMG tip uç MWLNR kodlu takım tutuculara bağlanmış (Şekil 3 c) ve böylece esnek ve özel bir takım tutucu ihtiyacı ortadan kalkmıştır. Üretilen ezici uç üzerindeki küresel burun kısmına sürtünmeyi azaltmak amacıyla ayrıca polisaj işlemi uygulanmıştır.

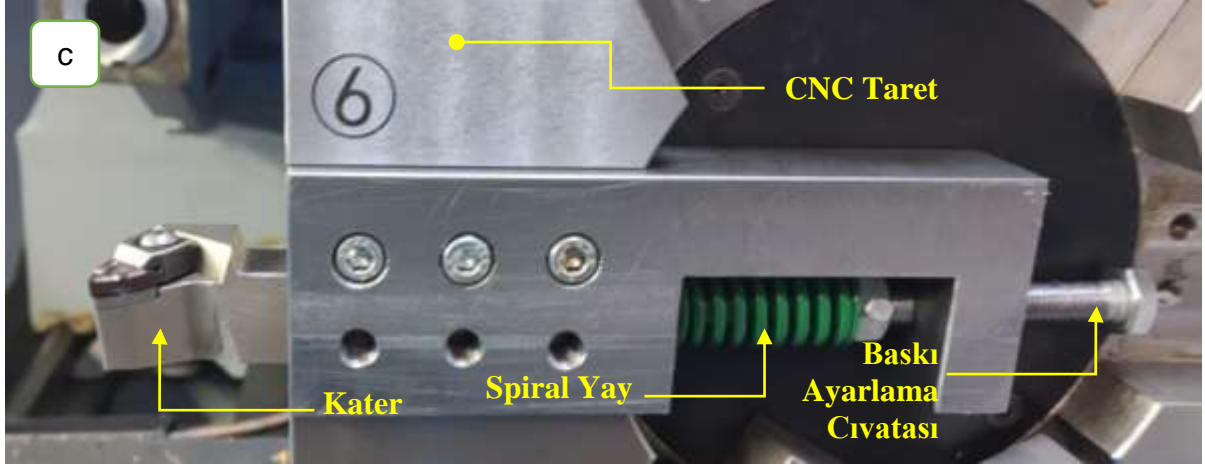


Şekil 3. Kullanılan kesici uç a) WNMG tasarımı b) İmal edilen uç c) Standart katere ucun bağlantısı

2.3. Bağlantı Aparatının Tasarımı ve Montajı

Şekil 3 c’de gösterildiği şekliyle ezici uç montajı yapılmış kater, farklı haddeleme kuvveti elde edilebilmesi amacıyla kater tutma aparatı tasarlanmıştır (Şekil 4 a ve b). Tasarımı yapılan aparatın CNC torna taretine bağlantısı Şekil 4 c’de gösterilmektedir.





Şekil 4. a) Tasarım yapılan kater tutucu aparat montajı b) Aparat demontaj gösterimi c) Aparatın CNC taretine bağlantısı

2.4. Deney Tasarımı ve İşlem Parametrelerinin Belirlenmesi

Tüm deneylerde L27 ortogonal deney tasarımı referans alınarak haddelme kuvveti, ilerleme miktarı ve devir sayısı olacak şekilde 3 farklı işlem parametresi ve bu parametrelere ait her bir parametre için 3 seviye belirlenmiştir. Tablo 2’de deneylerde uygulanacak işlem parametreleri (faktörler) ve bu faktörlere ait seviyeler verilmektedir.

Tablo 2. Deney tasarımı ve işlem parametreleri

Parametre	Seviye 1	Seviye 2	Seviye 3
Haddelme Kuvveti (N)	143	330	495
İlerleme (mm/dev)	0,04	0,08	0,12
Devir Sayısı (dev/dak)	400	600	800
Paso sayısı	1		
Haddelme Ortamı	Yağlı		


Yapılan 27 deneyde kullanılan parametreler ve bu parametrelerin deneylerdeki dağılımı Tablo 3’te verilmektedir.

Tablo 3. Seçilen faktör ve bu faktörlere ait seviyeler

Deney no	Haddelme kuvveti (N)	İlerleme (mm/dev)	Devir Sayısı (dev/dak)	Deney sıra no	Haddelme kuvveti (N)	İlerleme (mm/dev)	Devir Sayısı (dev/dak)
1	143	0,04	400	15	330	0,12	600
2	143	0,08	400	16	330	0,04	800
3	143	0,12	400	17	330	0,08	800
4	143	0,04	600	18	330	0,12	800
5	143	0,08	600	19	495	0,04	400
6	143	0,12	600	20	495	0,08	400
7	143	0,04	800	21	495	0,12	400
8	143	0,08	800	22	495	0,04	600
9	143	0,12	800	23	495	0,08	600
10	330	0,04	400	24	495	0,12	600
11	330	0,08	400	25	495	0,04	800
12	330	0,12	400	26	495	0,08	800
13	330	0,04	600	27	495	0,12	800
14	330	0,08	600				

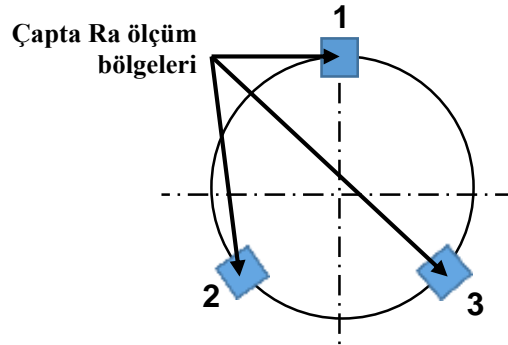
2.5. Sonuçların Analizi ve Yüzey Pürüzlülük Ölçümleri

Yapılan Taguchi deney tasarımında “en küçük en iyi” (smaller is better) prensibine göre sonuçlar üretilmiştir. İşlenen 27 adet numunenin yüzey pürüzlülük ölçümü yapılmıştır. Numunelerin ortalama yüzey pürüzlülük değerleri ölçümünde, Surface Roughness Tester SRT-6210 markalı ölçüm cihazı kullanılmıştır. Cihaza ait özellikler Şekil 5’te görülmektedir.

	Cihaz Markası ve Modeli	SRT-6210
	Ölçme yöntemi (Filtreleme Yöntemi):	GAUSS
	Ölçme birimi	Ra
	Ölçme hızı	0,25 Vt:0,135 mm/s

Şekil 5. Yüzey pürüzlülük cihazı ve özellikleri

İşlenebilirlik işlemleri sonucunda tüm işlenen yüzeylerin Ra ölçümleri yapılmıştır. Derin haddeleme işlemi uygulanmış iş parçası üzerindeki ölçümlerde, hem düz kısımdaki hem de konik kısımdaki yüzey pürüzlülüğünün kıyaslanması ve farklılığın tespit edilmesi amaçlanmıştır. Ayrıca konik ve düz kısımdaki elde edilen Ra değerleri arasında bir korelasyonun olup olmadığı, derin haddelemenin konik yüzey üzerinde de iyileştirici etkisinin olup olmadığı tespit edilmeye çalışılmıştır. Ölçümler düz ve konik yüzeylerdeki çap üzerinde ve numune tornalama eksenine paralel doğrultuda eşit açılarda çevresel 3 bölge seçilerek ve her bir bölge üzerinden 3 ölçüm alınarak bu değerlerin aritmetik ortalama değerleri alınmış ve elde edilen sonuç Ra değeri olarak kabul edilmiştir (Şekil 6).



Şekil 6. Ra değerlerinin ölçüm bölge ve yüzeyleri

Elde edilen Ra değerleri ile ilgili olarak varyans analizi yapılmış ve işlem parametrelerinin etki katsayıları belirlenmiştir. Tüm analizlerde %95 güven katsayısı esas alınmıştır.

Regresyon analizi bağımsız değişkenlerin bağımlı değişken olan sonuçlar üzerindeki etkisinin incelenmesi amacıyla kullanılan bir yöntemdir. Belirlenen üç farklı parametrenin ve buna bağlı olarak uygulanan üç seviyenin Ra üzerindeki etkisini incelemek amacıyla bu çalışmada regresyon analizi uygulanmıştır. Bağımsız değişken olarak ilerleme, devir sayısı ve haddeleme kuvveti, bağımlı değişken olarak Ra belirlenmiştir. Çoklu regresyonun elde edilmesi amacıyla 1 nolu denklem ve regresyon analizinde Minitab istatistik programı kullanılmıştır.

$$GXg, GYg, GZg = k_0 + k_1f + k_2a + k_4Kr \quad (1)$$

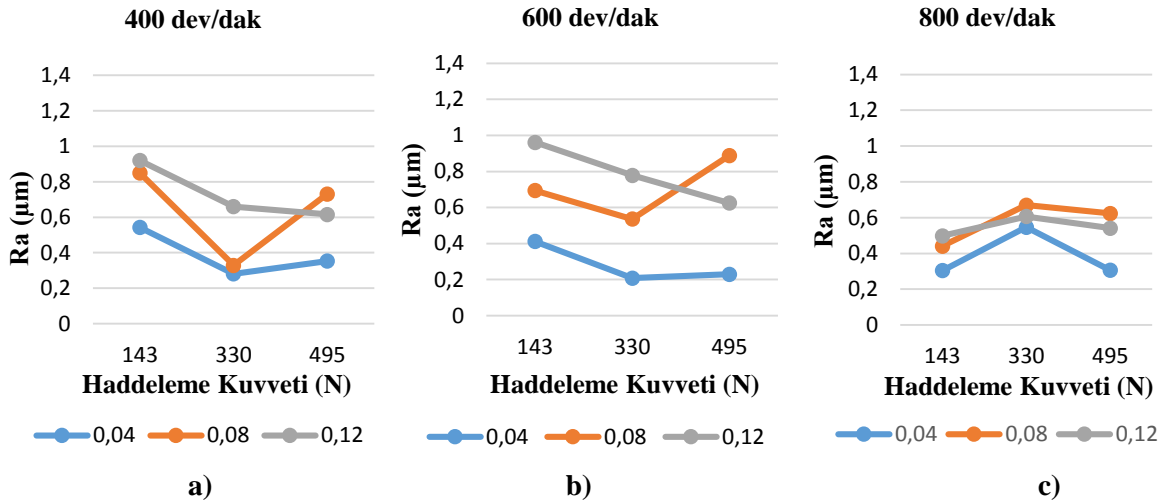
3. Bulgular

Taguchi L27 deney tasarımına göre işlenen deney parçalarındaki düz ve konik yüzeyler üzerinden alınan Ra değerleri Tablo 4'te verilmektedir.

Tablo 4. Deney parametreleri faktör seviyeleri ve Ra değerleri

Den.No	A	B	C	Ra Düz (µm)	Ra Konik (µm)	Den.No	A	B	C	Ra Düz (µm)	Ra Konik (µm)
1	1	1	1	0,543	0,81	15	2	2	3	0,778	1,99
2	1	1	1	0,85	0,746	16	2	3	1	0,546	0,626
3	1	1	1	0,92	1,396	17	2	3	1	0,67	1,148
4	1	2	2	0,412	0,705	18	2	3	1	0,606	1,74
5	1	2	2	0,694	1,753	19	3	1	3	0,353	0,66
6	1	2	2	0,961	2,286	20	3	1	3	0,731	1,166
7	1	3	3	0,304	0,753	21	3	1	3	0,616	1,926
8	1	3	3	0,441	0,883	22	3	2	1	0,23	0,69
9	1	3	3	0,498	2,503	23	3	2	1	0,888	1,005
10	2	1	2	0,281	0,659	24	3	2	1	0,625	1,726
11	2	1	2	0,329	1,06	25	3	3	2	0,306	0,875
12	2	1	2	0,66	2,163	26	3	3	2	0,623	1,076
13	2	2	3	0,208	0,628	27	3	3	2	0,541	1,636
14	2	2	3	0,536	1,201						

Yapılan deneyler sonucunda elde edilen Ra değerlerine yönelik devir sayısının haddeleme kuvvetine Ra üzerindeki etkisi incelenmiş ve Şekil 7'deki grafikler elde edilmiştir.

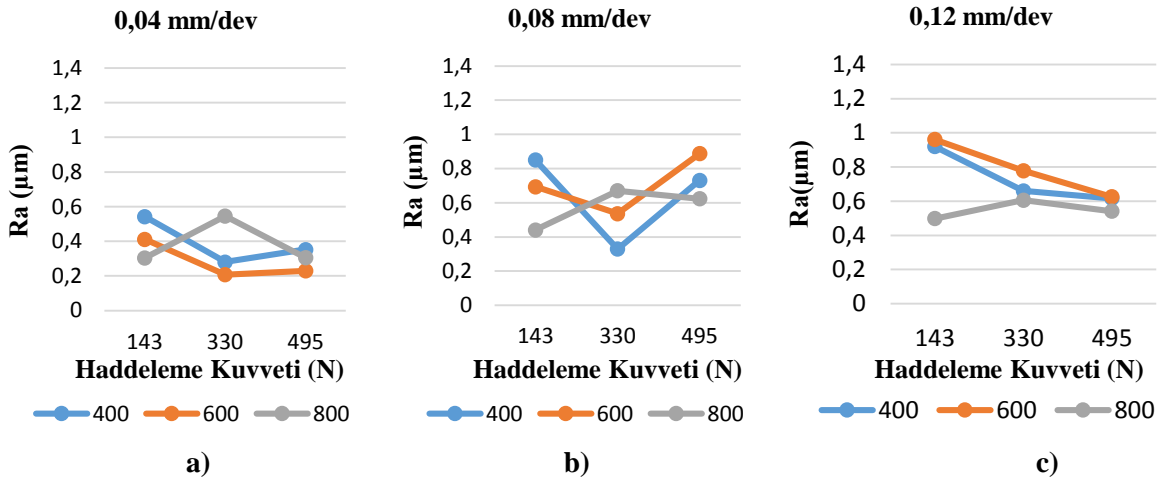


Şekil 7. Deney parametrelerinin Ra üzerindeki etki grafikleri a) 400 dev/dak devir sayısı b) 600 dev/dak devir sayısı c) 800 dev/dak devir sayısı

Şekil 7 incelendiğinde, haddeleme kuvvetinin en düşük değerinde (143 N) düşük devirlerde yüzey pürüzlülüğünün yüksek çıkmasına karşın yüksek devirlerde daha düşük Ra değerlerinin olduğu görülmektedir (Şekil 7 a ve c). Ayrıca tüm ilerleme değerlerinde, en düşük ilerleme değerleri uygulandığında Ra değerlerinde de en düşük değerler elde edilmiştir. İlerlemenin 0,08 mm/dev olduğu durumlarda 400 ve 600 dev/dak değerlerinde, 0,04 mm/dev ilerlemeye göre daha düşük Ra değerleri elde edilmiştir ancak 800 dev/dak devir sayısında bu sıralama değişmiştir (Şekil 7 c). Genel olarak bir değerlendirme yapıldığında 0,08 mm/dev ilerleme değerinde en düşük Ra değerleri elde edilmektedir (Şekil 7 a ve b) ancak yüksek değerlere çıktığında bu eğilim değişmektedir (Şekil 7 c). Bu nedenle düşük ve orta devir sayılarında 0,08 mm/dev ilerlemenin seçilmesi tavsiye edilebilir ve bu yönüyle yapılan diğer çalışmalara benzer sonuçlar elde edilmiştir. Genel bir kural olarak Ra değeri, ilerleme

değerinin artışı ile orantılı olarak artmaktadır (Sarhan vd., 2014; Luo vd., 2011; Basak, vd., 2009). Burada önemli diğer bir husus ta ilerleme değerlerinin çok küçük seçilmesi durumunda Ra değerlerinin benzer şekilde her zaman azalmadığı ve burada her malzeme için farklı ilerleme sınır değerlerinin bulunmasıdır. Bu çalışmada da 0,08 mm/dev ilerlemede 0,04 mm/dev ilerlemeye göre daha düşük Ra değerleri elde edilmiştir. Bunun 0,04 mm/dev ilerlemenin parça yüzeyindeki girintileri doldurma noktasında yetersiz kalmasından kaynaklandığı veya düşük ilerleme değerlerinde ezici uç ve parça yüzeyi temasının artışı (Maximov vd., 2020) sonucu oluşan ısı nedeniyle de (Martins vd., 2022) elde edilebileceği düşünülmektedir. Derin haddelemede temel prensibin yüzey üzerindeki çıkıntılı yapının baskı ile yüzey üzerindeki çukurlara doldurulması ile deformasyona uğratılması olduğu bilinmektedir. Ancak yeterli ilerleme değerinde bu deformasyonun tam olarak yerine getirilemeyeceği nedeniyle Ra değerinde istenen değerler elde edilememiştir. Cagan ve arkadaşları magnezyum için, haddeleme ve ilerleme arasında iyi bir dengenin iyi bir Ra için ideal olduğunu belirtmektedirler (Cagan vd., 2020). Haddeleme kuvvetinin Ra üzerinde optimum değerlerinin özellikle 400 ve 600 dev/dak devirlerde, 330 N olduğu durumlarda olduğu ayrıca görülmektedir (şekil 7 a ve b). Yüksek devirlerde ise haddeleme kuvvetinin etkisinin Ra üzerinde daha az etkili olduğu ve yataya doğru eğilim gösterdiği görülmektedir (şekil 7 c). Buradan en iyi Ra değerlerinin 0,04 mm/dev ilerleme, 330 N haddeleme kuvveti ve 600 dev/dak devir sayısında elde edildiği kanaatine varılabilir (şekil 7 b).

Devir sayısının farklı ilerleme değerlerindeki Ra üzerindeki etkisi incelenmiş ve Şekil 8'deki grafikler elde edilmiştir.

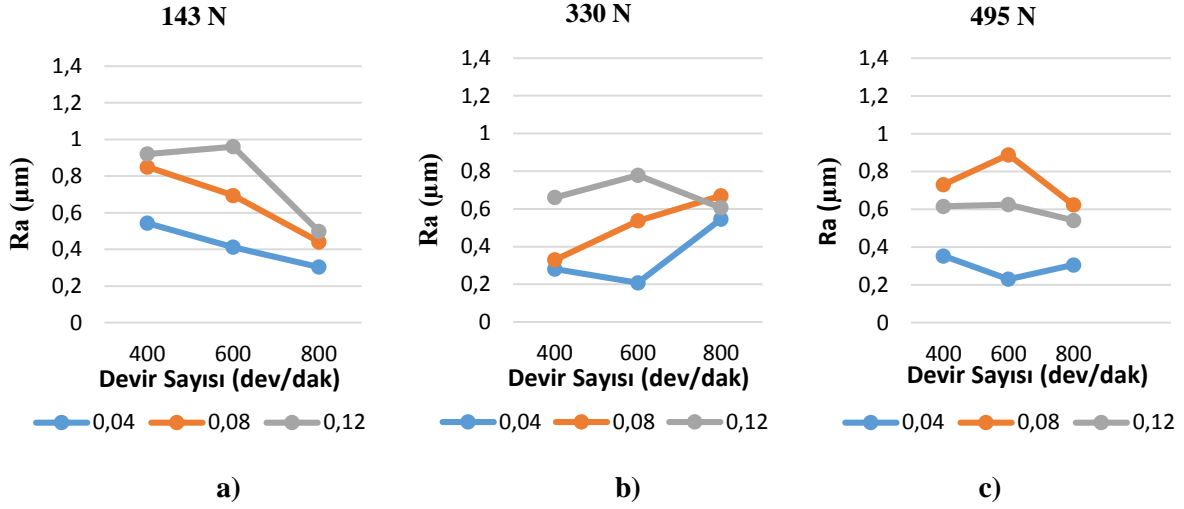


Şekil 8. Deney parametrelerinin Ra üzerindeki etki grafikleri a) 0,04 mm/dev ilerleme sayısı b) 0,08 mm/dev ilerleme sayısı c) 0,12 mm/dev ilerleme sayısı

Şekil 8'de gösterilen üç grafik beraber incelendiğinde ilerleme artışına bağlı olarak Ra değerlerinde artış olduğu görülmektedir. Ayrıca 0,04 mm/dev ve 0,08 mm/dev ilerlemelerde düşük 400 dev/dak ve 600 dev/dak devir sayılarında en iyi Ra değerlerinin 330 N'luk haddeleme kuvvetinde elde edildiği görülmektedir. Ayrıca 0,04 mm/dev ve 0,08 mm/dev ilerleme değerlerinde tüm devir sayılarının ve haddeleme kuvvetlerinin Ra üzerindeki etkisi birbirinin aynı eğilimde gerçekleşmiş, bu devir ve haddeleme kuvvetlerinde benzer tepkiler alınmıştır. Yüzey pürüzlülüğünde en büyük artış ilerlemenin en yüksek olduğu 0,12 mm/dev değerinde elde edilmiştir. En yüksek ilerleme değerinde (0,12 mm/dev) ise haddeleme kuvvetinin artışına paralel olarak Ra değerlerinde düşüş gözlenmiştir (Şekil 8 c). Devir sayısının artışı ve azalmasına bağlı olarak stabil bir yönelim gözlenmemiştir. Yapılan çalışmalar incelendiğinde benzer olarak ilerlemenin azalması, ezici uç yakınındaki yüzey tabakalarının deforme olması ve bununla da daha yüksek iş parçası sıcaklıklarının oluşmasına sebep olduğu ifade edilmiştir. Yüksek ilerlemelerde ise derin haddeleme için daha fazla güç (bilye-iş parçası temas bölgesinde kısmen ısıya dönüşür) gerektiği belirtilmiştir (Martins vd., 2022). İlerlemenin düşük ve yüksek oluşu bu nedenle yüzey üzerinde Ra bakımından farklılıklara neden olmaktadır. Bu veriler ışığında ilerlemenin etkisi

konusunda ilerleme değerinin düşük veya yüksek olmasından ziyade malzeme cinsi ve diğer parametreler ile birlikte optimum değerlerin belirlenmesi gerektiği kanaati oluşmuştur.

Konu haddelene kuvveti ve Ra değerleri arasındaki ilişki bakımından değerlendirildiğinde Şekil 9'daki grafikler elde edilmiştir.



Şekil 9. Deney parametrelerinin Ra üzerindeki etkisi a) 143 N haddelene kuvveti b) 330 N haddelene kuvveti c) 495 N haddelene kuvveti

Şekil 9'daki grafikler incelendiğinde düşük haddelene kuvvetinde (143 N) her üç ilerleme değerinde de devir sayısının artışı ile Ra değerlerinde aşağı yönlü bir yönelim gözlenmektedir (Şekil 9 a). Haddelene kuvveti 330 N değerine yükseltildiğinde 0,04 ve 0,08 mm/dev ilerleme değerlerinde devir sayısının artışı ile Ra'da iyileşme görülmekte ancak yüksek ilerlemede aynı eğilimin olmadığı görülmektedir (Şekil 9 b). En iyi yüzey pürüzlülük değerleri için düşük haddelene basıncında (143N) yüksek devir ve düşük ilerleme değerleri, orta haddelene basıncında (330 N) ise düşük devir ve düşük ilerleme seçilmelidir (Şekil 9 a ve b). Tüm haddelene kuvvetlerinde ve tüm devir sayılarında en düşük ilerleme değerlerinde Ra değerleri en düşük çıkmıştır. Yapılan başka bir çalışmaya bakıldığında, düşük ilerleme hızı ve yüksek haddelene kuvvetleri seçildiğinde en iyi Ra değerleri elde edilmiştir (Buldum vd., 2017). Baskı kuvvetinin artışının yüzey pürüzlülüğünde artışa neden olduğu söylenmesine karşılık (Abrao vd., 2014, Prabhu vd., 2011), bunun tersi olarak baskı kuvvetinin artmasının, daha kötü yüzey kalitesine yol açtığını belirten çalışmalar da mevcuttur (Abrao vd., 2015). Bazı çalışmalar bu durumu yorumlarken, baskı kuvvetinin belirli değeri aşması durumunda malzemenin aşırı yüklenmesi sonucu bozulmaların oluştuğunu belirtmişlerdir (Zhu vd., 2009). Şekil 9'daki grafikler haddelene kuvvetlerinin azalması veya artmasıyla Ra değerinin yönelimi ile ilgili olarak net bir sonuca varma imkanı vermemektedir.

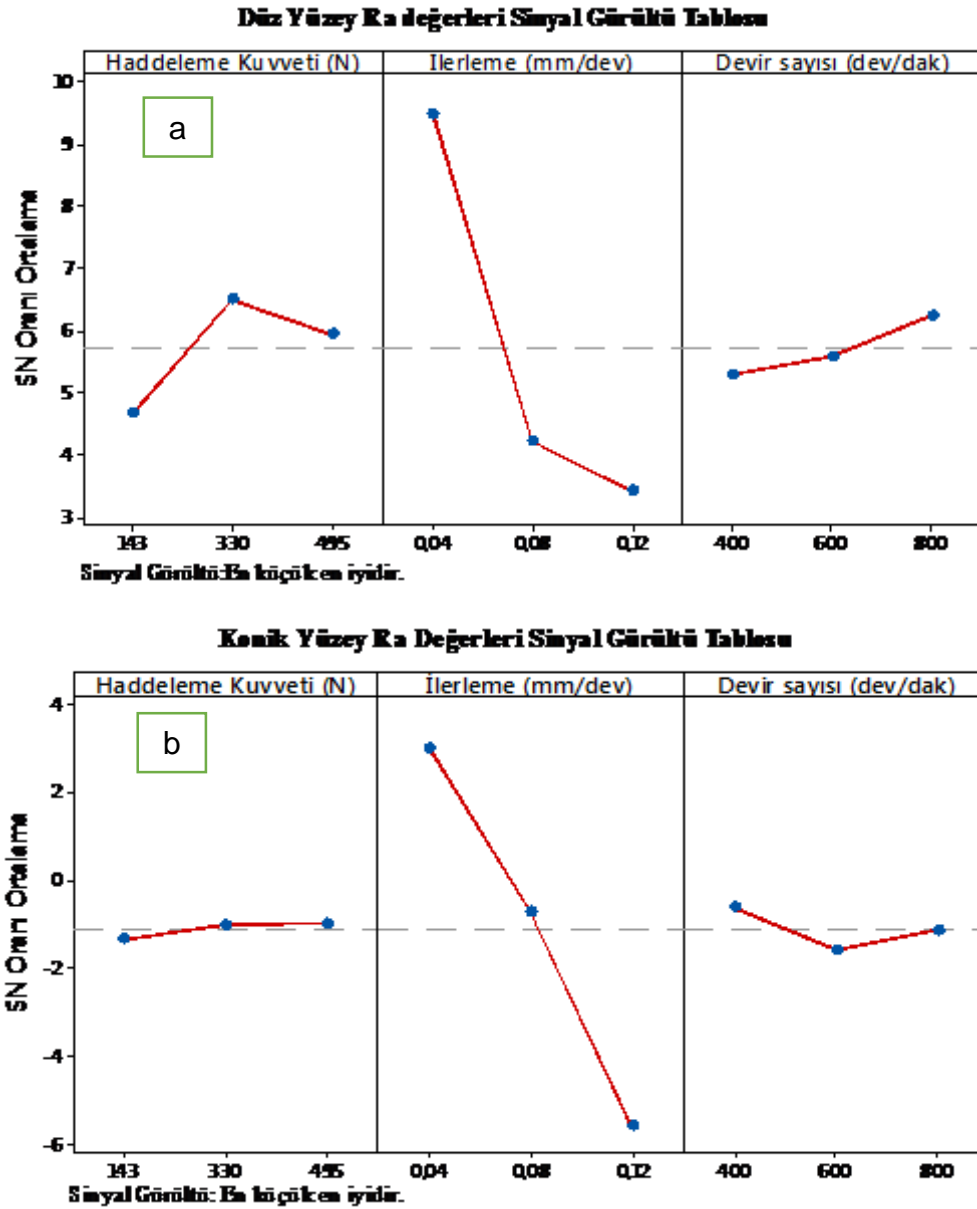
Derin haddelenmiş deney numunelerinin düz konik yüzeylerinden ölçülen Ra değerlerinin birbiri ile korelasyonu ve işlem parametrelerinin Ra değerleri ile korelasyonu incelendiğinde Tablo 5'teki veriler elde edilmiştir.

Tablo 5 incelendiğinde devir sayısı ve haddelene kuvvetinin Ra değerleri korelasyonu düşük değerlerde katsayılar elde edilmiş ve P anlamlılık değerleri ise 0,05'ten küçük çıkması ile de Ra üzerinde anlamlı bir etkilerinin olmadığı görülmüştür. İlerleme değerinin deney numunelerinin düz kısımlarından elde edilen Ra değerleri ile korelasyonu 0,653, konik kısımlarından elde edilen Ra değerleri ile korelasyonu ise 0,882 olarak elde edilmiştir. Bu sonuçlar bize ilerlemenin etkili olduğu ve güçlüye yakın bir korelasyonunun olduğunu göstermektedir. Ayrıca P değerlerinin <0,05 çıkması da bu korelasyonun anlamlı olduğunu belirtmektedir. Düz yüzey ve konik yüzeylerden alınan Ra değerlerinin kendi aralarındaki korelasyonunda 0,51 katsayısı elde edilmiştir. Bu da orta düzey bir korelasyonun varlığını teyit etmektedir. P değerinin de 0,05'e yakın 0,07 olarak elde edilmesi de bunu kanıtlamaktadır.

Tablo 5. İşlem parametreleri ile düz ve konik yüzeylerdeki Ra değerleri korelasyonu

	Haddeleme Kuvveti	İlerleme (mm/dev)	Devir sayısı (dev)	Ra düz kısım (μm)
İlerleme (mm/dev)	0,000			
P Değeri	1,000			
Devir sayısı (dev/dak)	-0,000	0,000		
P Değeri	1,000	1,000		
Ra düz kısım(μm)	-0,159	0,653	-0,162	
P Değeri	0,428	0,000	0,421	
Ra konik kısım(μ)	-0,087	0,882	0,053	0,510
P Değeri	0,667	0,000	0,794	0,007

Parametrelerin hangi değerlerde en etkili olduğu ile ilgili yapılan analizde sinyal gürültü tablosu elde edilmiştir. “En düşük en iyidir” prensibi esas alınarak düz ve konik yüzeylere ait sinyal gürültü tablosu aşağıda verilmektedir (Şekil 10).



Şekil 10. Sinyal-gürültü tablosu a) Düz yüzey b) Konik yüzey

Şekil 10 daki sinyal gürültü tabloları incelendiğinde, düz (silindirik) yüzeylerde en ideal Ra değerlerinin haddeme kuvvetinin 330 N, ilerleme değerini 0,04 mm/dev ve devir sayısının 800 dev/dak olduğu durumlarda olduğu görülmektedir (Şekil 10 a). Konik yüzeylerde ise bu durumun haddeme kuvveti ve ilerleme değerleri yönünden benzer olduğu (330 N, 0,04 mm/dev), devir sayısında ise farklı olarak 600 dev/dak değerinde el edildiği görülmektedir (Şekil 10 b).

3.1. ANOVA ve Regrasyon Eşitliği

Yapılan deneyler sonucunda elde edilen Ra değerleri ile ilgili olarak parametrelerin anlamlı olup olmadıkları ve sonuç üzerindeki etkilerinin incelenmesi amacıyla varyans analizi yapılmıştır. Varyans analizinde %95 güven katsayısı esas alınmıştır. Model özeti ve varyans tablosu Tablo 6'da görülmektedir.

Tablo 6. Model özeti ve Varyans Analizi

Model Özeti							
S	R-sq	R-sq(adj)	PRESS	R-sq(pred)			
0,271289	82,83%	77,68%	2,68264	68,70%			
Varyans Analizi							
Kaynak	DF	Seq SS	Etki	Adj SS	Adj MS	F-Değer	P-Değer
Haddeme Kuvveti (N)	2	0,06471	0,75%	0,06471	0,03235	0,44	0,650
İlerleme (mm/dev)	2	6,92639	80,80%	6,92639	3,46320	47,06	0,000
Devir sayısı (dev/dak)	2	0,10873	1,27%	0,10873	0,05436	0,74	0,490
Hata	20	1,47195	17,17%	1,47195	0,07360		
Total	26	8,57178	100,00%				

Tablo 6 incelendiğinde model özeti kısmında gösterilen R² değerinin 82,83 olarak elde edildiği görülmektedir. Bu değer, elde edilen regresyon modelinin ve varyans analizinin ideale yakın bir düzeyde temsil yeteneği olduğunu göstermektedir. Ayrıca varyans analizi tablosundan, ilerleme değerinin P değeri olarak 0,05 anlamlılık değerinden düşük çıktığı ve Ra üzerinde anlamlı bir etkisinin olduğu görülmektedir. Haddeme kuvveti ve devir sayısının ise 0,05'ten büyük çıkması nedeniyle Ra üzerinde anlamlı bir etkisinin olmadığını görülmektedir. Bu durum yukarıda izah edilen grafiksel gösterimlerdeki yorumlara paralellik arz etmektedir.

Yüzey pürüzlülüğünü tahmin etmek için derin haddeme yönteminde regresyon analizi yapılmıştır. Regresyon analizine ait katsayılar Tablo 7'de gösterilmektedir. İşlem parametrelerinin yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkisine ait matematiksel ilişki ise 2 nolu denklemde gösterilmiştir.

Tablo 7. Regresyon katsayıları

	Katsayılar	Standart Hata	t Stat	P-değeri	Düşük %95	Yüksek %95	Düşük 95,0%	Yüksek 95,0%
Kesişim	0,03514	0,273	0,129	0,89862	-0,529	0,600	-0,529	0,600
Haddeme kuvveti (N)	-0,00034	0,000	-0,906	0,37458	-0,001	0,000	-0,001	0,000
İlerleme (mm/dev)	15,22222	1,653	9,209	0,00000	11,803	18,642	11,803	18,642
Devir Sayısı (dev/dak)	0,00018	0,000	0,549	0,58797	-0,001	0,001	-0,001	0,001

$$Ra = 0,035 + 0,00018 * Devir sayısı + 15,22 * ilerleme - 0,00034 * haddeme kuvveti \quad (2)$$

Elde edilen regresyon analizinden Ra üzerinde en etkili parametrenin 15,22 katsayı ile ilerleme değeri olduğu ve bunu sırasıyla haddeme kuvveti ve devir sayısının izlediği görülmektedir.

4. Sonuçlar ve neriler

Yapılan konik ve boyuna derin haddeleme işlemleri için kullanılabilen ve mevcut kater üzerine monte edilebilen ezici uç ile Al 6061-T6 alüminyum malzemenin derin haddeleme yöntemi ile işlenmesinde elde edilen sonuçlar aşağıdaki şekildedir:

- Finiş tormalama işlemi uygulaması sonrasında tüm derin haddeleme işlemi uygulanmış yüzeylerde Ra değerlerinin azaldığı görülmüştür.
- Ra değerlerinin en düşük değerlerinin, haddeleme kuvvetinin 330 N, ilerleme değerini 0,04 mm/dev ve devir sayısının 800 dev/dak olduğu durumlarda olduğu görülmektedir. Konik yüzeylerde ise bu durumun haddeleme kuvveti ve ilerleme değerleri yönünden benzer olduğu (330 N, 0,04 mm/dev), devir sayısında ise farklı olarak 600 dev/dak değerinde el edildiği görülmektedir.
- Yeni tasarlanan ucun derin haddelemede kullanımının uygun olduğu ve aynı anda konik, radsl ve boyuna haddeleme işlemlerinde kullanılabilceği tespit edilmiştir.
- Devir sayısının yüksek olduğu durumlarda Ra üzerinde ilerleme değerlerinin etkisinin azaldığı ve haddeleme kuvvetinin değişiminin de buna paralel olarak daha az etkili olduğu görülmüştür.
- Tüm haddeleme kuvvetlerinde ve tüm devir sayılarında en düşük ilerleme değerlerinde Ra değerleri en düşük çıkmıştır.
- Regresyon ve varyans analizi sonuçlarına göre, Ra üzerinde en etkili parametrenin ilerleme değeri olduğu görülmüş, haddeleme kuvveti ve devir sayısının anlamlı bir etkisinin olmadığı görülmüştür.
- Sonuçların ve parametrelerin birbiri ile korelasyonunda ilerleme değerinin Ra ile ilişkisinde düz silindirik yüzeylerde 0,65 konik yüzeylerde ise 0,88 katsayısı ile güçlü bir korelasyonun olduğu görülmüştür. Elde edilen P değerlerinin 0,05'ten kk olduğu ve böylece anlamlı bir korelasyonun olduğu sonucuna varılmıştır.
- Elde edilen modelin %82,83 katsayısı ile deneyi temsil ettiği tespit edilmiştir.
- Daha iyi Ra değerleri için düşük ve orta ilerleme, orta değerdeki devir sayıları ve haddeleme kuvveti uygulanmalıdır.
- Haddeleme işleminin yağlı ortam seçilerek uygulanması daha iyi Ra değerleri için daha uygundur.

ıkar atışması

Bu alışma ile ilgili herhangi bir çıkar atışması bulunmamaktadır.

Yazarların Katkı Oranı

Yazarlar makaleye eşit oranda katkı sağlamışlardır.

Etik Beyan

Bu çalışmada sunulan veri, bilgi ve belgeler akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde edilmiştir.

Finansal Destek

Araştırmanın yürütülmesi için Batman Üniversitesi BAP (Bilimsel Araştırma Projeleri) birimi tarafından BTBAP-2022-YL-05 numaralı çalışmaya mali destek sağlanmıştır.

Teşekkür

Çalışmamın her aşamasında katkı sağlayan ve yardımını esirgemeyen Dr. Öğr. Üyesi Oktay ADIYAMAN' a sonsuz teşekkürlerimi bir borç biliririm.

Açıklama

Çalışma bir tezden türetilmiş, özet metin 2. Uluslararası Rahva Teknik ve Sosyal Araştırmalar Kongresinde yayınlanmıştır.

Kaynakça

- Abrão, A.M.; Denkena, B.; Köhler, J.; Breidenstein, B.; Mörke, T. (2014). The influence of deep rolling on the surface integrity of AISI 1060 high carbon steel. *Procedia CIRP*, 13, 31–36. [https://doi:10.1016/j.procir.2014.04.006](https://doi.org/10.1016/j.procir.2014.04.006)
- Akkurt, A., Ovalı, İ. (2009). Ezme ve Geleneksel Bitirme İşlemlerinin Al 6061 Alüminyum Alaşımı Parçaların Yüzey Pürüzlülüğü ve Daireselliği Üzerine Etkisi, *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 15(3), 371-382.
- Akkurt, A. (2009, Mayıs 13-15). *Delik Yüzeylerine Uygulanan Yüzey İyileştirme İşlemlerinin Alüminyum Alaşımı Malzemeler Üzerinde Araştırılması*, 5. Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu (IATS'09). Karabük, Türkiye
- Akyüz, M. (2020). *Bilyeli Haddeme yönteminde işlem parametrelerinin Al7075-T6 alüminyum alaşımının mekanik özellikleri üzerindeki etkilerinin deneysel olarak araştırılması*. (Yayın No:612983) [Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi].
- Avilés, R., Albizuri, J., Rodríguez, A., López de Lacalle L.N. (2013). Influence of low-plasticity ball burnishing on the high-cycle fatigue strength of medium carbon AISI 1045 steel. *International journal of fatigue*, 55, 230-244. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2013.06.024>
- Basak H., Goktas H.H. (2009). Burnishing process on Al-alloy and optimization of surface roughness and surface hardness by fuzzy logic. *Materials and Design*, 30, 1275-1281. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2008.06.063>
- Başak, H., Sönmez, F. (2015). Haddeme işleminde haddeme aparat tipinin (bilyeli, makaralı, çift makaralı) yüzey pürüzlülüğü ve yüzey sertliğine etkilerinin incelenmesi, *Politeknik Dergisi*, 2015, 18 (3), 125-132. : <https://doi.org/10.2339/2015.18.3,125-132>
- Başak, H. (2015). Haddeme (Galetaj) ile 5083 Al-Mg malzeme yüzeyinin işlenmesi, haddeme parametrelerinin yüzey pürüzlülüğü ve yüzey sertliğine etkilerinin incelenmesi. *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 3(2):471-476.
- Bozdana A. T. & Gindy N. N. Z.. (2008) Comparative experimental study on effects of conventional and ultrasonic deep cold rolling processes on Ti–6Al–4V. *Materials Science and Technology*, 24(11), 1378-1384. <https://doi.org/10.1179/174328408X302431>
- Buldum, B., B. (2017). AZ31B Magnezyum Alaşımının Bilyalı Parlatma Yöntemi ile Mikrosertlik ve Yüzey Pürüzlülüğünün Araştırılması. *Selçuk Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, S.Ü. Müh. Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 6(1), 152-161.
- Cagan, S. C., Pruncu, C. I., Buldum, B. B. (2020). An investigation into ball burnishing process of magnesium alloy on CNC lathe using different environments. *Journal of Magnesium and Alloys*, 8(4), 1061-1070. <https://doi.org/10.1016/j.jma.2020.06.008>
- Çetin, Ö., Ballıkaya, H., Altuğ, M., Savaş, V., Sağlam, M. (2018). Investigation of the effects of processing parameters on the vibration of tangential cylindrical grinding method. *Science and Eng. J of Fırat Univ.*, 30(1), 311-317.
- El-Axir, M.H., El-Khabeery, M.M. (2003). Influence of orthogonal burnishing parameters on surface characteristics for various materials. *Journal of Materials Processing Technology*, 132, 82–89. [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(02\)00269-8](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(02)00269-8)
- Hassan A. D., Maqableh A. M. (2000). The effects of initial burnishing parameters on non-ferrous components. *Journal of Materials Processing Technology*, 102 (1-3), 115-121. [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(00\)00464-7](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(00)00464-7)
- Hassan A. M., Momani A. M. S. (2000). Further improvements in some properties of shot peened components using the burnishing process. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 40(12), 1775–1786. [https://doi.org/10.1016/S0890-6955\(00\)00018-3](https://doi.org/10.1016/S0890-6955(00)00018-3)
- Hassan A.M. (1997). An Investigation into the surface characteristics of burnished cast Al-Cu Alloys”, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 37(6), 813-821.

- Khabeery M. M., Axir M. H. (2001). Experimental techniques for studying the effects of milling roller-burnishing parameters on surface integrity. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 41(12), 1705–1719. [https://doi.org/10.1016/S0890-6955\(01\)00036-0](https://doi.org/10.1016/S0890-6955(01)00036-0)
- Kiliç, M., Batı S., Biliz, I., Demir, F., Ceyhan, A. A. (2020). SHS yöntemiyle üretilen cr takviyeli katmanlı NiAl-Ni₃Al intermetalik bileşiğinin mikroyapı ve mikrosertlik özelliklerinin belirlenmesi. *Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 9(2), 862-874.
- Liviu L. (2002). *Investigations into the use of ball-burnishing of hardened steel components as a finishing process*. (Publish No: 3071977) [PhD dissertation, University of Toledo]
- Luo H., Wang L., Zhang C. (2011). Study on the aluminum alloy burnishing processing and the existence of the outstripping phenomenon. *Journal of Materials Processing Technology*, 116(1), 88-90. [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(01\)00847-0](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(01)00847-0)
- Malyer, E. (2018). Ezerek Parlatma Yapılan AA7075-T6 alüminyum alaşımında meydana gelen kalıntı gerilmelerin incelenmesi. *Gazi Üniversitesi Politeknik Dergisi*, 21(3) : 565-573. <https://doi.org/10.2339/politeknik.389592>
- Majzoobi, G.H., Jouneghani, F.Z., Khademi, E. (2016). Experimental and numerical studies on the effect of deep rolling on bending fretting fatigue resistance of Al7075. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 82, 2137–2148. <https://doi.org/10.1007/s00170-015-7542-z>
- Martins, A. M. Leal, C. A. Campidelli, A. F. Abrao, A. M.; Rodrigues, P. C. Magalhães, F. C. Meyer, K. (2022). Assessment of the temperature distribution in deep rolling of hardened AISI 4140 steel. *Journal of Manufacturing Processes*. 73, 686-694. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2021.11.052>
- Maximov, J. T. Duncheva, G. V. Anchev, A. P. Dunchev, V. P. (2020). Slide burnishing versus deep rolling-a comparative analysis. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 110 (7), 1923-1939. <https://doi.org/10.1007/s00170-020-05950-2>
- Mendi, F. (1996). *Takım tezgâhları teori ve hesaplamaları*. ISBN:975-06008-0-3, Ankara.
- Özkan, S. (2006). *Sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirilen parçalarda haddeleme (burnishing) ile yüzeylerin işlenmesi, Haddelemenin Yüzey Pürüzlülüğüne ve Sertleşmeye Etkisinin İncelenmesi*. (Yayın No:180412) [Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi].
- Prabhu, P. R., Kulkarni, S. M., & Sharma, S. S. (2011). An experimental investigation on the effect of deep cold rolling parameters on surface roughness and hardness of AISI 4140 steel. *World Academy of Science, Engineering and Technology*, 60, 1594-1598.
- Rodríguez, A., Lopez de Lacalle LN, Celaya A., Lamikiz A., Albizuri J. (2012). Surface improvement of shafts by the deep ballburnishing technique. *Surface and Coatings Technology*, 206(11-12), 2817-2824. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2011.11.045>
- Sarhan A. A. D., El-Tayeb N. S. M. (2014). Investigating the surface quality of the burnished brass C3605--fuzzy rule-based approach, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 71, 1143-1150. <https://doi.org/10.1007/s00170-013-5543-3>
- Smith, W. F. (2001). Mühendislik alaşımlarının yapı ve özellikleri demir dışı alaşımlar,(Çev. M. Erdoğan). Nobel Yayın Dağıtım, 2.
- Tadic B., Todorovic M. P., Luzanin O., Miljanic D., Jeremic M. B., Bogdanovic B., Vukelic D. (2013). Using specially designed high-stiffness burnishing tool to achieve high-quality surface finish. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 67, 601–611. <https://doi.org/10.1007/s00170-012-4508-2>
- Yu X., Wang L. (1999). Effect of various parameters on the surface roughness of an aluminium alloy burnished with a spherical surfaced polycrystalline diamond tool. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 39(3), 459–469. [https://doi.org/10.1016/S0890-6955\(98\)00033-9](https://doi.org/10.1016/S0890-6955(98)00033-9)
- Zhu, Y. L., Wang, K., Li, L., & Huang, Y. L. (2009). Evaluation of an ultrasound-aided deep rolling process for anti-fatigue applications. *Journal of materials engineering and performance*, 18, 1036-1040. <https://doi.org/10.1007/s11665-008-9341-2>
- Zhuang, W., Liu, Q., Djugum, R., Sharp, P.K., Paradowska, A. (2014). Deep surface rolling for fatigue life enhancement of laser clad aircraft aluminium alloy. *Applied Surface Science*, 320, 558–562. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2014.09.139>