



The cutting power, specific cutting energy and surface roughness characterization in milling of 8740 steel

Hacı Bekir Özerkan^{1*}, Ferah Sucularlı², Asım Genç³

¹Gazi University, Faculty of Engineering, Mechanical Engineering Department, 06570, Ankara, Turkey

²ASELSAN A.Ş., Radar Elekt.Harp Sist. (REHİS), 06830, Ankara, Turkey

³Gazi University, Vocational School of Technical Sciences, Machine and Metal Tech. Department, 06374, Ankara, Turkey

Highlights:

- Determination of the cutting power, specific cutting energy and surface roughness characteristics of AISI 8740 steel
- Calculation of the machining power using the electric current measured during the process and idle conditions
- Up and down face milling characteristics of AISI 8740 steel

Graphical/Tabular Abstract

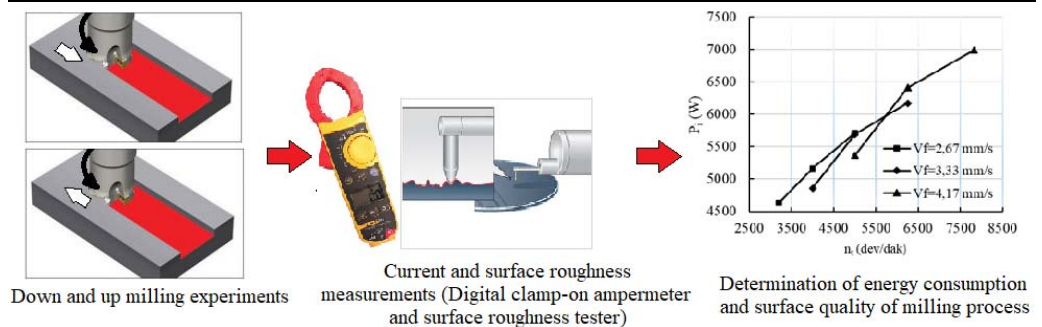


Figure A. Proposed Model Architecture

Keywords:

- AISI 8740 steel
- Up and down milling
- Cutting power
- Specific cutting energy
- Surface roughness

Article Info:

Research Article
Received: 05.06.2021
Accepted: 26.11.2021

DOI:

10.17341/gazimmfd.948426

Correspondence:

Author: Hacı Bekir Özerkan
e-mail: ozerkan@gazi.edu.tr
phone: +90 312 354 8401

Purpose: The AISI 8740 steel is extensively in use for the high strength requirements in the industry. Yet, the literature survey revealed no published work on the machining characterization of the material. So, the machining characterization properties (namely, cutting power P_c , specific cutting energy p_s and average surface roughness R_a) of AISI 8740 steel were found experimentally for different machining parameters (feed per tooth (uncut chip thickness)) f_z and up and down milling conditions) in this study.

Theory and Methods:

In the experiments, the channels with 1 mm depth, 10 mm width and 50 mm length were machined using a 5-axis CNC milling machine with a 10 mm diameter two-inserted (cement carbide) face milling cutter. The table feed rate (V_f) values were selected as 2.67, 3.33, 4.17 mm/s. The rotational tool speeds (n) were adjusted to keep the f_z constant at 0.25, 0.20, 0.16 mm values, which will be used to calculate p_s values in the experiments. The clamp-on amper meter was used in current measurements at idle and cutting conditions (I_i ve I_c , respectively). The R_a of the milled surfaces was measured using a tracing stylus type portable measurement device. The P_c ve p_s values of the AISI 8740 steel were calculated using the measured current values in the experiments in up and down milling operations. The variation of R_a was investigated for varying f_z values and up and down milling operations.

Results:

It The P_c values were between 217 W and 519 W for the experimental parameters used in up and down milling operations. The highest and the lowest P_c values were obtained at 4,17 mm/s setting (the highest V_f setting) in up-milling and 2,67 mm/s (the lowest V_f setting) in down-milling operation, respectively. A %2 to %15.5 lower P_c values were obtained in the down milling operation than the up-milling for the same V_f settings. The p_s values of the material were found as 7.1-15.7 Ws/mm³ for the parameter settings. The p_s decreased with the increasing f_z . The lower p_s values were experienced in down milling than the up milling for all experimental conditions. The R_a values were decreased slightly with the increasing f_z in up milling operations. The down-milling conditions yielded better R_a values (a 13-35% lower) than the up milling operations for the same machining parameters.

Conclusion:

The P_c values were decreased with increasing f_z . A %2 to %15.5 lower P_c values were obtained in the down milling operation than the up milling for the same V_f settings. The p_s values of the material were found as 7.1-15.7 Ws/mm³ for the parameter settings. The lower p_s values were experienced in down milling than the up milling for all experimental conditions. The R_a values were decreased slightly with the increasing f_z in up milling operations. The down milling operations yielded 13-35% lower R_a values than the up-milling for the same machining parameters.



AISI 8740 çeliğinin frezelenmesinde kesme gücü, özgül kesme enerjisi ve yüzey pürüzlülüğü karakteristiklerinin belirlenmesi

Hacı Bekir Özerkan^{1*}, Ferah Sucularlı², Asım Genç³

¹Gazi Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 06570, Ankara, Türkiye

²ASELSAN A.Ş., Radar Elekt.Harp Sist. (REHİS), 06830, Ankara, Türkiye

³Gazi Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Makine ve Metal Teknolojileri Programı, 06374, Ankara, Türkiye

Ö N E Ç İ K A N L A R

- AISI 8740 çeliğinin kesme gücü, özgül kesme enerjisi ve yüzey pürüzlülük özelliklerinin belirlenmesi
- İşleme ve boşta çalışma koşulları sırasında ölçülen elektrik akımı kullanılarak işleme gücünün hesaplanması
- AISI 8740 çeliğinin zıt ve eş yönlü alın frezeleme özellikleri

Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi

Geliş: 05.06.2021

Kabul: 26.11.2021

DOI:

10.17341/gazimmfd.948426

Anahtar Kelimeler:

AISI 8740 çelik,
zıt- ve eş-yönlü frezeleme,
kesme gücü,
özgül kesme enerjisi,
yüzey pürüzlülüğü

ÖZ

Bu çalışmada, endüstride yüksek mukavemet gerektiren uygulamalarda kullanılmasına rağmen talaşlı imalatla ilgili karakterizasyon özellikleri (kesme gücü P_c , özgül kesme enerjisi p_s ve yüzey pürüzlülüğü R_a) hakkında bilgi bulunmayan 8740 çeliğinin deneysel olarak P_c , p_s ve R_a değerleri değişik işleme parametreleri (diş başı ilerlemesi f_z ve zıt- ve eş-yönlü frezeleme işlemleri) için bulunmuştur. Tezgâhın değişik işleme koşullarındaki güç hesaplamalarında şebekeden çekilen akım değerleri (işleme olmadan ve işleme sırasında) kullanılmıştır. f_z değerinin artışıyla zıt- ve eş-yönlü frezeleme işlemlerinde p_s değerinin azaldığı, R_a değerlerinin arttığı, eş yönlü frezelemede zıt yönlü frezelemeye göre daha düşük P_c , p_s ve R_a değerleri elde edildiği tespit edilmiştir. Malzemenin p_s değerleri deneylerde kullanılan kesme koşulları için 7,1-15,7 Ws/mm^3 değerleri arasında bulunmuştur.

The cutting power, specific cutting energy and surface roughness characterization in milling of 8740 steel

H I G H L I G H T S

- Determination of the cutting power, specific cutting energy and surface roughness characteristics of AISI 8740 steel
- Calculation of the machining power using the electric current measured during the process and idle conditions
- Up and down face milling characteristics of AISI 8740 steel

Article Info

Research Article

Received: 05.06.2021

Accepted: 26.11.2021

DOI:

10.17341/gazimmfd.948426

Keywords:

AISI 8740 steel,
up- and down-milling,
cutting power,
specific cutting energy,
surface roughness

ABSTRACT

In this study, the machining characterization properties (namely, cutting power P_c , specific cutting energy p_s and surface roughness R_a) of AISI 8740 steel, which is used in high strength applications in the industry but do not have information about its machining characteristics in literature, were found experimentally for different machining parameters (feed per tooth (uncut chip thickness) f_z and up- and down-milling processes). The electric current measurements taken during non-cutting (idle) and cutting conditions were used in power calculations under different machining conditions. It was found that the p_s decreased and R_a increased with increasing f_z in the up- and down-milling operations and the lower P_c , p_s and R_a values were obtained in down-milling than the up-milling operations. The p_s values of the material was in between 7.1-15.7 Ws/mm^3 for the machining settings used in this study.

*Sorumlu Yazar/Yazarlar / Corresponding Author/Authors : *ozerkana@gazi.edu.tr, ferahco@hotmail.com, asimgenc@gazi.edu.tr /

Tel: +90 312 354 8401

2058

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

AISI 8740, gemi imalatında, araçlarda, uçaklarda, silah sanayisinde, demiryollarında, köprülerde, basınçlı kaplarda ve takım tezgâhlarında kullanılan yüksek mukavemetli bir çeliktir. Endüstride yaygın kullanımına rağmen, kaynaklanabilirliği, ısıl işlemleri, toz metal parça özellikleri, elektro erozyon ile işlenmesi, kriyojenik şartlarda talaşlı imalatı dışında bu çeliğin talaşlı imalat işlemleri için önemli karakterizasyon özellikleri olan kesme gücü P_c , özgül kesme enerjisi p_s ve yüzey pürüzlülüğü R_a üzerine çalışmalarının bulunmadığı görülmektedir. Bununla birlikte çeliklerin frezelenmesinde kesme kuvvetleri, özgül kesme ve toplam kesme enerjileri üzerine çalışmalar yapılmıştır.

Kuram vd. [1] AISI 304 paslanmaz çeliğin eş ve zıt frezelenmesinde köşe radyüsü (0,4, 0,8 ve 1,2 mm) ve kesme hızının aşınma, kuvvet, yüzey pürüzlülüğü ve talaş morfolojisi üzerindeki etkisi araştırmıştır. Kesme hızı ve frezeleme yönü ile ilintisiz olarak uç yarıçapındaki artışla kesme kuvvetleri düştüğü ve hem burun yarıçapındaki hem de hızdaki artışla pürüzlülüğün azaldığı belirtilmiştir. Ayrıca zıt frezeleme sırasında yüzey pürüzlülüğü ve ortaya çıkan kuvvetlerin eş frezeleme sırasında olduğundan daha düşük olduğu tespit edilmiştir. Sayısal kontrollü takım tezgahı enerji tüketiminin analiz edildiği bir çalışmada [2], özgül enerji tüketimi ve minimum işleme süresine yönelik optimizasyon modeli, süreç parametrelerine uygun olarak oluşturulmuştur. Optimize edilmiş işlem parametreleri ile harcanan toplam enerji tüketiminin, tercih edilen işlem parametrelerine göre %27,21, özgül kesme enerjisinin %32,07 ve işlem süresinin %34,11 azaldığı ifade edilmiştir. Araştırmacılar önerilen yaklaşım ile enerji tüketiminin neden olduğu olumsuz çevre etkisinin azalabileceği ve sürdürülebilir üretimi gerçekleştirmek için verimli bir çözüm sağlanacağını vurgulamışlardır. Zhang vd. [3] deneysel verilere dayalı temel bileşen ve regresyon analizi ile işlem süresini, enerji tüketimini ve karbon emisyonunu dengelemek amacıyla kuru frezeleme işlemleri için farklı bir optimizasyon yöntemi geliştirmişlerdir. Analiz sonucu kesme gücü P_c 'nin teorik ve ölçülen değerindeki sapmanın sırasıyla -%1,2 ve -%0,63, ve enerji tüketiminin değişimi ise -%0,8 olduğunu tespit etmişlerdir. Liu vd. [4], Al-7075 malzemenin kanal frezelenmesi sırasında özgül kesme enerjisi tüketiminin analitik hesaplamasını ve yüzey pürüzlülüğü ile arasındaki ilişkinin ampirik karakterizasyonunu birleştiren hibrit bir yaklaşım geliştirmiştir. Önerdikleri model, çeşitli kesme koşulları altında deneylerle doğrulanmıştır. Dhar ve Kamruzzaman [5], AISI 8740 çelik çubuğu kuru, soğutma sıvısı ve kriyojenik soğutma ortamlarında karbür kaplanmış uç kullanarak tornalamıştır. Her üç işleme ortamında da, takım ilerleme hızının artmasıyla yüzey pürüzlülüğünün önemli ölçüde arttığı belirtilmiştir. Sıvı nitrojen ile kriyojenik soğutmanın, kuru ve soğutma sıvılı işlemeye göre işleme sırasında açığa çıkan ısının büyük bir kısmını aldığı ve sıcaklığı düşürerek daha az takım aşınması, daha iyi yüzey kalitesi ve daha yüksek boyut hassasiyeti sağladığı

görülmüştür. En fazla takım aşınması ve yüzey pürüzlülüğü kuru işlemede tespit edilmiştir.

Malzemelerin işleme sırasındaki P_c ve p_s değerlerinin kabul edilebilir R_a değerleri için tespit edilmesi günümüzün düşük enerjili ve düşük maliyetli talaşlı imalat gereksinimleri için büyük önem teşkil etmektedir. Malzemelerin talaşlı imalattaki bu önemli karakterizasyon özelliklerinin tespitinde kullanılan en tipik işleme yöntemleri tornalama ve frezelemedir. Bu çalışmada 8740 çeliğinin bu özelliklerinin bulunmasında zıt- ve eş-yönlü parmak frezeleme işlemi kullanılmış olup, aşağıda bu işlemler konusunda yapılan bazı çalışmalara yer verilmiştir.

Zıt-yönlü frezelemede kesici takımın dönüş doğrultusu iş parçasının doğrusal ilerleme yönüne ters olduğundan, işlem ince talaşla (düşük kesme kuvveti) başlayıp kalın talaşla (yüksek kesme kuvveti) son bulur. Eş-yönlü frezelemede ise kesici takım ve iş parçası arasındaki hareket yönleri aynı olup talaş oluşumu ve kuvvetler zıt-yönlü frezelemenin tersidir. Alın frezeleme ile ilgili çalışmalar daha çok takım aşınması, kesme kuvvetleri ve yüzey pürüzlülüğü ile ilgilidir. Liu vd. [6] Inconel A286 alaşımının alın frezelemede değişik işleme koşullarındaki yüzey özelliklerinin (yüzey pürüzlülüğü ve yüzey kalıntı gerilmeleri) üç nokta eğme testi ile yorulma ömrüne etkilerini incelemişlerdir. Yüzey pürüzlülüğü ve kalıntı gerilmeleri arttığında yorulma ömrünün kısaldığı tespit edilmiştir. Diğer bir çalışmada [7] konik çakı ile eğrisel form frezelemede, çalışma kapsamında geliştirilen bir model yardımıyla işleme sonrası yüzey topoğrafyası tahmin edilmeye çalışılmıştır. Elde edilecek tahmini yüzey topoğrafyasının işleme sonrası yüzey hatalarının önceden kestirimi için faydalı olacağı ifade edilmiştir. Yao vd. [8] TB6 titanyum alaşımının frezeleme (F), frezeleme ve parlatma (FP), frezeleme, parlatma ve bilyalı dövme (FPD), frezeleme, parlatma, bilyalı dövme ve parlatma (FPDP) işlemleri sonrasında yüzey karakteristiklerini incelemiştir. FPDP numunelerinin F, FP ve FPD numunelere göre sırasıyla 68, 56 ve 48 kat daha uzun yorulma ömrü sağladığı belirtilmiştir. Yao vd. 'nin [9, 10] TB6 alaşımının yüksek hızlı frezelenmesi üzerine çalışmalarında, takım dönüş hızının ve diş başı takım ilerlemesinin yüzey pürüzlülüğünde önemli etkisi olduğu vurgulanmıştır.

Kesme enerjisini ve imalat maliyetini azaltabilmek için uygun kesme koşullarının tespiti önem taşımaktadır [11, 12]. Lee ve Tang çalışmalarında [13] imalat maliyetini azaltmak ve üretim hızını artırmak amacıyla tornalamada işleme parametreleri ile kesme kuvveti, takım ömrü ve yüzey pürüzlülüğü arasında ilişkilerin oluşturulması için polinomal bir kesme modeli sunmuşlardır. Mesquita vd. [14] tornalamada minimum işleme maliyeti, işleme enerjisi ve işleme süresi için bilgisayar destekli üretim planlama ve kesme parametreleri optimizasyonu çalışması yapmışlardır. Uygun kesme parametrelerinin belirlenmesinin enerji gereksinimini azaltacağı vurgulanmıştır. Mikro talaşlı işleme yöntemlerinin konvansiyonel talaşlı işlemlere göre daha

düşük enerji ihtiyacı olsa da [15], aynı hacimdeki malzemeyi kaldırırken mikro-frezeleme işlemi konvansiyonel frezelemeye göre yaklaşık 800 kat daha fazla enerji tüketmektedir [16]. Alın frezeleme işlemleri sonrasında yüzey profili belirgin trokoidal iz görüntüsü taşımaktadır. Bu görüntü “Lozenge Deseni” olarak adlandırılmakta olup, desenin şekli ve boyutları takım tipine, işleme parametre değerlerine ve takım dönüş eksenine göre değişmektedir [17-19]. Serin vd. [20], yüzey pürüzlülüğü ve özgül kesme enerjisini tahmin etmeye çalışmışlar ve çıkan sonuca göre girdi parametrelerini ayarlamışlardır. Böylece istenilen yüzey pürüzlülüklerinde parçaları daha az zamanda üretmişler ve kesici takım ömrünü de uzatmışlardır. Ayrıca bütün bu işlemleri gerçekleştirirken talaş kaldırma işlemi sırasında ne kadar enerji tüketileceğinin hesabının geliştirdikleri model aracılığıyla mümkün olacağını belirtmişlerdir. Kara ve Li [21], parça tasarımı ve işlem planlama evrelerinde, işlem enerji sarfiyatını azaltmak için özgül kesme enerjisinin tahmin modelini önermişlerdir. Bu sebeple, talaş kaldırma işlem parametreleri ile enerji tüketimi arasındaki ilişkiyi ortaya çıkarmak adına torna ve freze tezgâhlarında deneyler yapmışlardır. Deneyler sonucunda %90’ının üzerinde doğruluk ile özgül kesme enerjileri belirlenmiştir.

Bu çalışmada, 8740 çeliğinin kesme gücü, özgül kesme enerjisi ve yüzey pürüzlülüğü konularındaki literatürdeki belirgin eksiklikleri doldurma amacıyla, parmak freze ile değişik işleme koşullarında (diş başı ilerlemesi f_z ve zıt- ve eş-yönlü frezeleme) P_c , p_s ve R_a değerleri bulunmuştur. P_c değerinin hesaplanmasında tezgâhın işleme olmadan ve işleme koşullarında şebekeden çektiği değerleri kullanılmıştır.

2. YÖNTEM VE DENEYLER (METHOD AND EXPERIMENTS)

Literatürde, freze tezgâhının bütününün enerji tüketiminden p_s ’i elde etmeyi hedefleyen çalışmalar vardır. Bunlar arasında, Gutowski vd. [22] iş parçası sertliği ve işleme mekanikliğiyle bağlantılı bir model yardımıyla p_s ’i bularak tezgâhın enerji tüketimini modellemiştir. Kara ve Li [23] tezgâhtan doğrudan ölçülen enerji tüketimini işleme hızı ile ilişkilendiren bir model geliştirmiştir. Li vd. [24] iş mili hızı ve diğer tezgâha özel katsayıları içeren daha genel bir formül geliştirmiştir.

p_s ’i elde etmenin bir diğer yolu ise iş milinin enerji tüketiminin ölçülmesidir. Diaz vd. [25] işleme hızı ve p_s arasındaki ilişkiyi bulmak için iş mili üzerinden enerji tüketimini ölçmüştür. Draganescu vd. [26] işleme gücü ve takım tezgâhı verimine dayalı bir denklem önermişlerdir. Denklemdeki her bir değişken işleminin cinsinin ve işleme koşullarının bir fonksiyonudur. Velchev vd. [27] p_s ’i, işlemedeki toplam güç tüketimi ile iş milinin dönmediği durumda tezgâh modüllerinin tükettiği gücün farkından hesaplamıştır. Aramcharoen and Mativenga [28], kesme enerjisini, p_s , işleme hızı ve işleme süresinin çarpımı olarak hesaplamıştır. Balogun and Mativenga [29], bir kesilmemiş

talaş kalınlık değeri için ortalama p_s ’i, toplam güç-işleme hızı grafiğinin eğimi olarak ifade etmiştir. Bir diğer p_s ’i bulma yolu ise kesme kuvvetlerinin ölçülmesidir. Kuram vd. [30] eş-yönlü frezelemede kesme kuvvetlerini ölçerek p_s değerini elde etmiştir. Çalışmada, kesme hızı, kesme derinliği ve ilerleme hızı cinsinden bir denklem geliştirmişlerdir.

Sealy vd. [31] ise p_s ’i, kesici takım ve iş parçası arasında talaş oluşumundan kaynaklı olan enerji tüketiminden hesaplamıştır. Öztürk ve Kara [32], p_s değerini elde etmek için işleme sırasında x-ekseni servo motorunun ve iş milinin özgül enerji tüketim değerlerini incelemiştir. Bu çalışmada 8740 çeliğinin p_s değerinin belirlenmesinde tezgâh üzerinden işleme sırasında ölçülen toplam tüketilen güç ile iş mili dönmez iken ölçülen güç değerlerinin farkı kullanılarak hesaplamalar yapılmıştır.

2.1. f_z , P_c ve p_s Hesaplamaları (f_z , P_c and p_s Calculations)

Parmak frezeleme işleminde f_z (mm) değeri Eş. 1 ile bulunmaktadır.

$$f_z = \frac{V_f}{N.n_t} \quad (1)$$

V_f tabla hızı (mm/s), N takımın kesici diş (ağız) sayısı, n_t takımın dönüş hızıdır (dev/s). İş parçası işleme hızı Z_w (mm³/s) ise Eş. 2 ile bulunur.

$$Z_w = a_p d_t V_f \quad (2)$$

a_p kesme derinliği (mm) ve d_t takım çapıdır (mm). P_c (W) ise Eş. 3 olur.

$$P_c = p_s Z_w \quad (3)$$

Eşitlikteki p_s değeri iş parçası malzemesine ve ortalama kesilmemiş talaş kalınlığına ($a_{c,av}$) bağlı olarak değişmektedir. Bir malzemenin işlenmesi sırasında küçük $a_{c,av}$ değerlerinde p_s değerinin yüksek bulunduğu, $a_{c,av}$ arttıkça p_s değerinin küçüldüğü ve belli bir değerden daha yüksek $a_{c,av}$ değeri için p_s ’in dikkate değer bir değişim göstermediği bilinmektedir. Çeliklerin frezeleme işlemlerinde 0,02-0,2 mm $a_{c,av}$ değer aralığı için p_s değeri 3-18 W/mm³ olarak belirtilmiştir [33].

2.2. Elektriksel Güç Ölçümleri (Electrical Power Measurements)

Deneyler sırasında, işleme olmadan ve işleme sırasında tezgâh tarafından çekilen akımın (sırasıyla I_i ve I_t) ölçümü için pens (clamp-on) ampermetre kullanılmıştır. I_i ölçümlerinin alınması sırasında işleme deneylerinde kullanılan tabla ilerleme hızı (V_f) ve iş mili hızı (n_t) değerleri tezgâhta uygulanmıştır. Akım ölçümleri takımın gövdesinin iş parçasına tam olarak girmesini takiben alınmıştır. Elde edilen akım değerleri işleme olmadan ve işleme sırasında tezgâh elektriksel güç değerlerinin (sırasıyla $P_{i,el}$ ve $P_{t,el}$) Eş. 4- Eş. 12 yardımı ile hesaplanmasında kullanılmıştır.

$$P_{i,el} = \sqrt{3} V_{rms} I_i \text{ (güç faktörü)} \quad (4)$$

$$P_{t,el} = \sqrt{3} V_{rms} I_c \text{ (güç faktörü)} \quad (5)$$

Burada, V_{rms} tezgâh şebeke geriliminin RMS (ortalama karekök (root mean square)) değeri olan 380 V'dır. Güç faktörü, %50 ve %100 yüklü indüktif motorlar (tezgâhin motor tipi) için 0,73 ve 0,85 olup, kullanılan deney koşullarında tezgâh yarım yüklendiğinden 0,73 değeri kullanılmıştır. Sayısal değerler Eş. 4 ve Eş. 5'te yerine konulduğunda Eş. 5 ve Eş. 6 elde edilir.

$$P_{i,el} = \sqrt{3}(380)I_i(0,73) = 480,4I_i \quad (6)$$

$$P_{t,el} = 480,4 I_c \quad (7)$$

İşleme sırasında takım tezgâhi için toplam güç P_t (W) Eş. 8 olur .

$$P_t = P_i + P_c \quad (8)$$

Burada, P_i işleme olmadığı sırada tezgah gücüdür (W). Eş. 3'teki P_c değeri Eş. 8'de yerine konursa Eş. 9 olur [20].

$$P_t = P_i + p_s Z_w \quad (9)$$

Bu eşitlik çalışmada

$$P_{i,el} = P_i \quad (10)$$

$$P_{t,el} = P_t \quad (11)$$

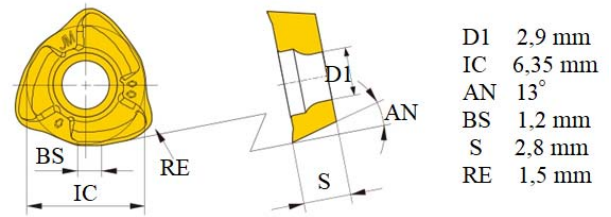
olduğundan p_s değerinin Eş. 12 ile bulunmasında kullanılmıştır.

$$p_s = 480,4(I_c - I_i)/Z_w \quad (12)$$

2.3. Deneysel Parametreler (Experimental Parameters)

Deneylerde 5 eksen MAZAK VARIAXIS-500 CNC tezgâhi (maks. iş mili hızı 12000 dev/dak, tablada işlenebilecek maks. parça eni/boyu 500/500 mm, maks. parça yüksekliği 350 mm, maks. iş mili motor gücü 11 kW) kullanılmıştır. Deneylerde 10 mm çaplı iki takma uçlu parmak freze kullanılmıştır (Şekil 2). Takma uç olarak Mitsubishi JOMT06T215ZZSR-JM VP15TF semente karbür uç ve bu takıma uygun HSK63 kodlu takım tutucu kullanılmış olup boyutsal ve geometrik bilgileri Şekil 1'de sunulmuştur. Deneylerde iş parçası malzemesi olarak kullanılan AISI 8740 çeliğinin kimyasal bileşimi ve mekanik özellikleri Tablo 1'de sunulmuştur. İş parçalarına 2 mm derinliğinde, 5 mm genişliğinde ve 50 mm boyunda kanallar işlenmiştir (Şekil 3). Kullanılan işleme parametreleri seçilen kesici takımın üretici firma kataloglarında tavsiye edilen kesme aralıklarına ve uzun takım ömrü elde edebilecek şekilde seçilmiştir. Kalın talaşta malzeme pekleşmesi olacağı için p_s ve P_c değerlerinin yüksek çıkmaması için mümkün

olduğunca büyük kesilmemiş talaş kalınlığından kaçınılmıştır. Deneylerde, değişik V_f değerlerinde p_s 'nin hesaplanmasında esas olacak f_z değerlerini sabit tutabilmek için n_t hızları ayarlanmıştır (Tablo 2). Deneylerde düşük işleme derinliği nedeniyle kesme sıvısı uygulaması yapılmamıştır. Akım değerlerinin ölçülmesi için Uni-T UT-210D 200A pens ampermetre kullanılmıştır. Frezelenmiş numunelerin R_a değerleri MAHR MarSURF M300 portatif tarayıcı uçlu yüzey pürüzlülük ölçüm cihazı ile yapılmıştır. Tarama uzunluğu (cut-off) 4 mm alınmış olup, her numunenin 4 ayrı bölgesinden alınan ölçüm değerlerinin ortalaması kullanılmıştır. İşlenmiş numune görüntüleri Şekil 2'de sunulmuştur. Deneysel ölçümlerin güvenilirliği açısından her deney en az iki kere tekrar edilmiştir.



Şekil 1. Deneylerde kullanılan kesici takım
(The cutting tool used in the experiments)

3. SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR (RESULTS AND DISCUSSIONS)

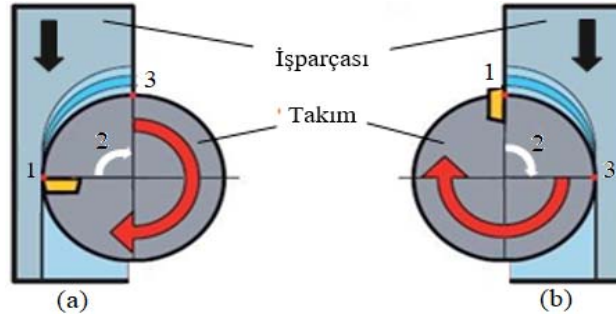
Belirlenen işleme parametrelerinde işleme olmadan ve işleme sırasında ölçülen akım değerleri Tablo 3'te sunulmuştur. Tablodan görüleceği üzere işleme olmayan koşullarda $I_{i,el}$ değerleri 9,65-14,55 A arasında değişmektedir. Bu koşullardaki P_i değerleri 4,64-7 kW arasındadır (Şekil 3). Tezgâh iş mili motor gücü maks. 11 kW olduğundan ve tezgah güç tüketiminin büyük bir kısmının iş mili motoruna ait olduğu düşünüldüğünde eşitlik 6 ve 7'de da $P_{i,el}$ ve $P_{t,el}$ hesaplamasında kullanılan 0,73 güç faktörünün (%50 yüklü indüktif motor) doğru bir varsayım olduğu anlaşılmaktadır. Şekil 3'te görüldüğü üzere iş mili hızı 3200 dev/dak'dan 7812 dev/dak değerine çıkarıldığında tezgâh motor güç gereksinimi %51 artmıştır. Bu güç değerlerine tabla x-eksen motorunun tükettiği güç değerleri dâhildir. Sabit n_t hızlarında (Tablo 2, 4000, 5000 ve 6250 dev/dak) tabla x-eksen hareket motor hızının (V_f) artması güç ihtiyacını oldukça az arttırmaktadır (Şekil 3).

Tablo 1. AISI 8740 çeliğinin kimyasal yapısı ve mekanik özellikleri (Chemical structure and mechanical properties of AISI 8740 steel)

| Kimyasal Yapı (% ağı.) | | Mekanik Özellikler | |
|------------------------|-------------|---------------------|---------|
| C | 0,38 – 0,43 | Sertlik | 284 HV |
| Cr | 0,40 – 0,60 | Çekme mukavemeti | 930 MPa |
| Fe | 96,5 – 97,7 | Akma mukavemeti | 550 MPa |
| Mn | 0,75 – 1,0 | Boy uzaması | 16% |
| Mo | 0,20 – 0,30 | Elastik modül | 205 GPa |
| Ni | 0,40 – 0,70 | Akma modülü | 80 GPa |
| P | <0,035 | Izod darbe enerjisi | 18 J |
| Si | 0,15 – 0,30 | | |
| S | <0,040 | | |

Tablo 2. İşleme parametreleri (Machining parameters)

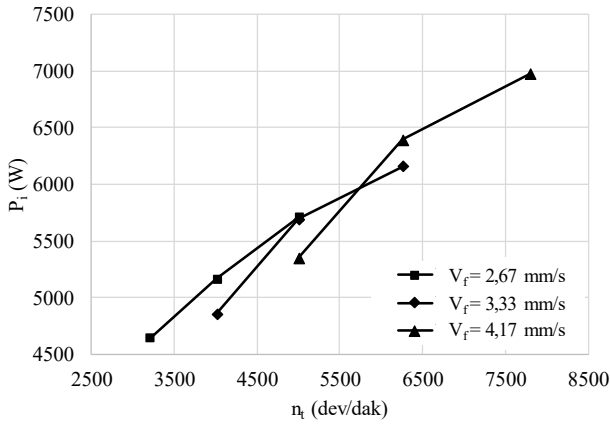
| V_f (mm/s) | f_z (mm) | n_t (dev/dak) / V (m/dak) |
|--------------|------------|-------------------------------|
| 2,67 | 0,025 | 3200/100 |
| | 0,020 | 4000 /125 |
| | 0,016 | 5000/155 |
| 3,33 | 0,025 | 4000/125 |
| | 0,020 | 5000 /155 |
| | 0,016 | 6250/195 |
| 4,17 | 0,025 | 5000/155 |
| | 0,020 | 6250 /195 |
| | 0,016 | 7812/245 |



Şekil 2. Deneylerde uygulanan frezeleme işlemleri (üst görünüş). a) zıt-yönlü, b) eş-yönlü parmak frezeleme (1 ve 3 kesici ağzın malzemeye giriş ve çıkış noktaları, 2 kesici ağzın hareketi) Milling operations applied in the experiments (top view). a) up, b) down end milling (1 and 3 entry and exit points of cutting edge to work piece, 2 movement of cutting edge)

Tablo 3. İşleme parametrelerinde zıt- ve eş-yönlü frezeleme için $I_{t,el}$ ve $I_{i,el}$ ölçümleri (Measurements of $I_{t,el}$ and $I_{i,el}$ for up and down milling in machining parameters)

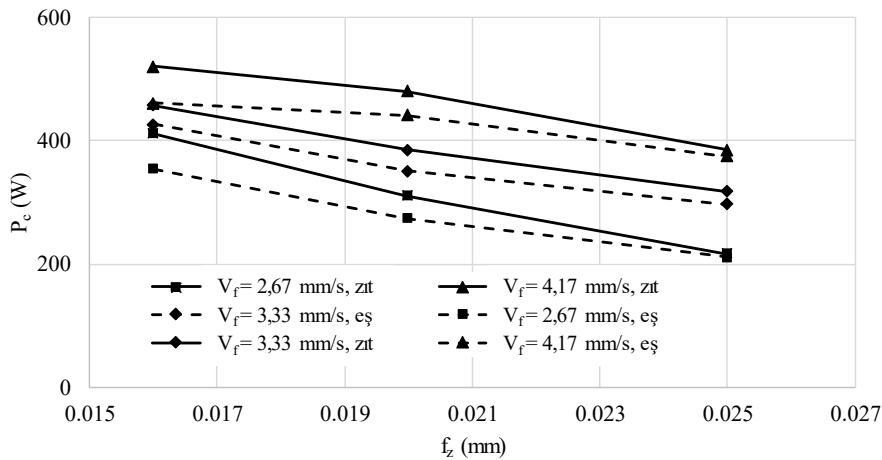
| V_f (mm/s) | 2,67 | | | 3,33 | | | 4,17 | | |
|----------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| f_z (mm) | 0,025 | 0,020 | 0,016 | 0,025 | 0,020 | 0,016 | 0,025 | 0,020 | 0,016 |
| Z_w (mm ³ /s) | 26,7 | 26,7 | 26,7 | 33,3 | 33,3 | 33,3 | 41,7 | 41,7 | 41,7 |
| $I_{i,el}$ (A) | 9,65 | 10,75 | 11,89 | 10,12 | 11,85 | 12,85 | 11,18 | 13,35 | 14,55 |
| Zıt-yönlü frezeleme | | | | | | | | | |
| $I_{t,el}$ (A) | 10,1 | 11,40 | 12,76 | 10,78 | 12,65 | 13,8 | 11,98 | 14,35 | 15,63 |
| Eş-yönlü frezeleme | | | | | | | | | |
| $I_{t,el}$ (A) | 10,08 | 11,3 | 12,6 | 10,74 | 12,57 | 13,7 | 11,95 | 14,27 | 15,50 |



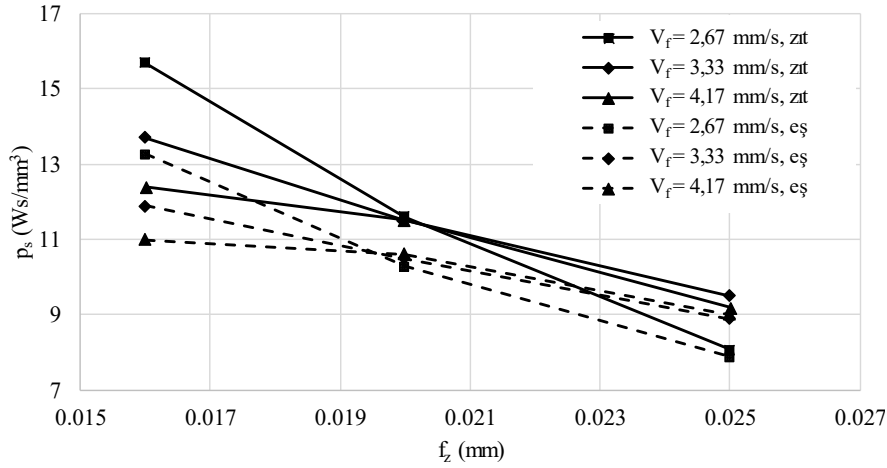
Şekil 3. P_i değerinin n_t ve V_f ile değişimi (Variation of P_i with n_t and V_f)

Şekil 4'te görüldüğü üzere zıt- ve eş-yönlü frezeleme işlemleri için kullanılan kesme koşullarındaki güç ihtiyacı (P_c) 217 W-519 W arasındadır. En büyük P_c değeri en yüksek V_f değeri olan 4,17 mm/s'de zıt-yönlü frezelemede, en düşük değer ise en düşük V_f değeri olan 2,67 mm/s'de eş-yönlü frezelemede elde edilmiştir. Deneilerde, aynı V_f değerlerinde zıt-yönlü frezelemeye göre eş-yönlü frezelemede %2 ile %15,5 arasında daha düşük P_c değerleri elde edilmiştir. Literatürden eş-yönlü frezeleme işlemlerinin aynı koşullardaki zıt-yönlü frezeleme işlemine göre daha düşük kesme kuvveti, dolayısıyla daha düşük P_c değeri, gerektirdiği bilinmektedir [34, 35]. f_z değerinin artması ile P_c düşmüştür. Şekil 4'teki P_c değerlerinin artan f_z ile azalmasının genel eğilimine bakıldığında, deneylerde kullanılan daha yüksek f_z değerlerinin uygulanması durumunda P_c değerindeki düşüşün devam edebileceği öngörülebilir. Ancak, daha yüksek f_z değerlerinin deneysel çalışmada kullanılan karbür takım için öngörülen f_z değerlerini geçeceğinden dolayı $f_z > 0,025$ mm kullanılmamıştır. Şekil 4'teki P_c değerleri kullanılarak eşitlik 3'ten AISI 8740 çeliğinin p_s değerleri elde edilmiştir (Şekil 6). Şekilden görüldüğü üzere malzemenin p_s değerleri

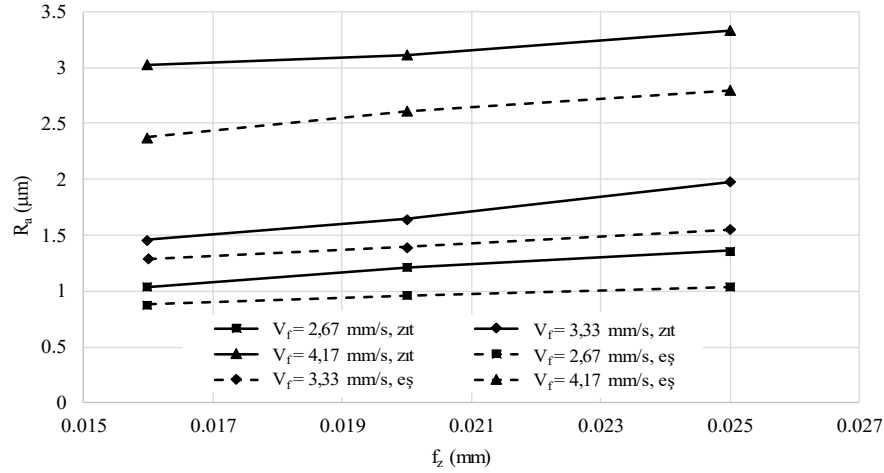
deneilerdeki kesme koşulları için 7,1-15,7 Ws/mm³ değerleri arasında bulunmuştur. Literatürde [36] 300M çelikleri için değişik işleme koşullarında özgül kesme enerjisi 4,576-9,811 Ws/mm³ aralığındadır. Bu çalışmada p_s değerini etkileyen parametre f_z olmuştur. Artan f_z ile p_s değerlerinin düşüşü literatürle uyumludur. Grafiğe bakıldığında, deneylerde kullanılan maksimum f_z değeri olan 0,025 mm'nin üzerine çıkılması durumunda p_s değerinin biraz daha düşmesi olasıdır. Bilindiği üzere bir malzeme için sabit p_s değeri ancak yüksek V_f ve kesme hızlarında (V) elde edilebilmektedir. Ancak, p_s değerinin artık değişime uğramadığı yüksek V_f ve V değerleri takım ömrünün azalması ve kötü yüzey pürüzlülüğü nedenleriyle talaşlı imalat uygulamalarında genelde kullanılmamaktadır. Literatür incelemesi bölümünde [33] nolu kaynakta belirtildiği üzere, çeliklerin frezeleme işlemlerinde 0,02-0,2 mm $a_{c,av}$ değer aralığı için p_s değeri 3-18 Ws/mm³'dür. Bu çalışmada kullanılan f_z ile [20] nolu referansta kullanılan $a_{c,av}$ tanımları arasında alın frezeleme işlemleri için $a_{c,av} = f_z/2$ bağıntısı olduğundan, referansta belirtilen $p_s = 3-18$ Ws/mm³ aralığı $f_z = 0,04-0,4$ mm içindedir. Bu çalışmada kullanılan $f_z = 0,016-0,025$ mm aralığı (yani $a_{c,av} = 0,008-0,0125$ mm) için ilgili referansa bakıldığında p_s değerleri yaklaşık 12-21 Ws/mm³'dir. Her ne kadar kesilmemiş talaşta kesme hızından doğabilecek gerinme pekleşmeleri bu referansta hesaba katılmamışsa da, referanstaki değer aralığı ile bu çalışmada elde edilen değerler uyumlu sayılabilir. Şekil 5'te görüldüğü üzere tüm işleme koşullarında eş-yönlü frezelemede zıt-yönlü frezelemeye göre daha düşük p_s değerleri elde edilmiştir. Bunda temel sebep, Şekil 4'te görüldüğü üzere eş-yönlü frezeleme işlemlerinde zıt-yönlüye göre daha düşük P_c ihtiyacıdır ($p_s = P_c/Z_w$). Esasen bu durum frezelemedeki kesme mekaniğinden kaynaklanmakta olup, eş yönlü işlemede kesme kuvvetleri zıt yönlü işlemeye göre daha küçük değerlerde oluşmaktadır [1, 34, 35]. Şekil 5'te düşük f_z değerinde V_f 'nin artışı ile p_s değerlerinin düştüğü, yüksek f_z değerinde ise tam tersi bir ilişki olduğu görülmektedir. Bunun sebebi, bu çalışmada f_z değerini yüksek V_f değerlerinde sabit tutabilmek için n_t 'nin artırılmış olmasıdır. n_t 'nin artması ile kesilmemiş talaşın daha yüksek



Şekil 4. Zıt- ve eş-yönlü frezelemede P_c 'nin f_z ve V_f ile değişimi (Variation of P_c with f_z and V_f in up and down milling)



Şekil 5. Zıt ve eş yönlü frezelemede p_s 'nin f_z ve V_f ile değişimi (Variation of p_s with f_z and V_f in up and down milling)



Şekil 6. Zıt ve eş yönlü frezelemede R_a 'nın f_z ve V_f ile değişimi (Variation of R_a with f_z and V_f in up and down milling)

hızda plastik deformasyonu gerçekleşmekte ve sonucunda gerinme pekleşmesi oluşmaktadır [37]. Kesilmemiş talaşın kaldırılması sırasında pekleşen AISI 8740 malzemesinin p_s değeri de yükselmektedir.

Şekil 6'da görüldüğü üzere, zıt- ve eş-yönlü frezeleme işlemlerinde artan f_z ile R_a değerlerinin az da olsa arttığı görülmektedir. Artan V_f değerleri ise R_a değerlerini belirgin olarak artırmaktadır. Deneylerde elde edilen 0,8 µm-3,3 µm aralığındaki R_a değerleri endüstriyel uygulamalarda kabul gören değerlerdir. Şekilden, aynı işleme koşullarında eş-yönlü frezeleme ile elde edilen R_a değerlerinin zıt-yönlüye göre daha iyi olduğu (%13-%35 aralığında daha düşük) görülmektedir. Pürüzlükteki azalma daha önce yapılmış çalışmalarla uyumlu olup [38,39], eş yönlü frezelemede kesici kenar işparçası işlenmiş yüzeyine eriştiğinde talaş kalınlığının sifira inmesi, eş yönlü frezelemede kesme kuvvetinin parçayı tablaya bastırarak etkime tarzı, tutturma tertibatında mevcut olan boşlukları ve bunların neden olduğu titreşimleri azaltması yüzey pürüzlülüğünü zıt yönlü işleme göre azaltmıştır.

4. SİMGELER (SYMBOLS)

- $a_{c,av}$: Ortalama kesilmemiş talaş kalınlığı (mm)
- f_z : Diş başı ilerlemesi (mm)
- a_p : Kesme derinliği (mm)
- d_t : Takım çapı (mm)
- HV : Vikers sertliği
- $I_{i,el}$: İşleme olmadan tezgah tarafından çekilen akım (A)
- $I_{t,el}$: İşleme sırasında tezgah tarafından çekilen akım (A)
- N : Takımın kesici diş (ağız) sayısı
- n_t : Takımın dönüş hızı (dev/s)
- P_c : Kesme gücü (W)
- $P_{i,el}$: İşleme olmadan tezgah gücü (W)
- $P_{t,el}$: İşleme sırasında tezgah gücü (W)
- p_s : Özgül kesme enerjisi (Ws/mm³)
- R_a : Yüzey pürüzlülüğü (µm)
- V : Kesme hızı (m/dak)
- V_f : Tabla ilerleme hızı (mm/dak)
- V_{rms} : Tezgah şebeke gerilimi (V)
- Z_w : İş parçası işleme hızı (mm³/s)

5. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışmada, yüksek mukavemet gerektiren uygulamalarda endüstride yoğun kullanılmasına rağmen talaşlı imalat ile ilgili karakterizasyon bilgilerinin literatürde bulunmadığı AISI 8740 çeliğinin kesme gücü (P_c), özgül kesme enerjisi (p_s) ve ortalama yüzey pürüzlülük (R_a) değerleri zıt- ve eş-yönlü parmak frezeleme işlemleri için değişik kesilmemiş talaş kalınlığı (f_z) ve tabla ilerleme hızı (V_f) değerlerinde elde edilmiştir.

Çalışmada kullanılan kesme koşullarında zıt- ve eş-yönlü frezeleme işlemleri için P_c değeri 217 W-519 W arasındadır. Aynı V_f değerlerinde zıt-yönlü frezelemeye göre eş-yönlü frezelemede %2 ile %15,5 arasında daha düşük P_c değerleri elde edilmiştir. f_z değerinin artması ile P_c düşmüştür. Deneysel sonuçlarında P_c değerlerinin artan f_z ile azalmasının genel eğilimine bakıldığında deneylerde kullanılan en yüksek f_z değeri olan 0,025 mm'den daha yüksek değerlerin kullanılması durumunda P_c değerindeki düşüşün biraz daha devam edebileceği öngörülebilir. Malzemenin p_s değerleri deneylerde kullanılan kesme koşulları için 7,1-15,7 Ws/mm³ değerleri arasında bulunmuştur. Bu değerler, malzemenin kimyasal bileşimleri ve işleme koşulları göz önünde bulundurulduğunda literatürle uyumludur [36]. Tüm işleme koşullarında eş-yönlü frezelemede zıt-yönlü frezelemeye göre daha düşük p_s değerleri elde edilmiştir. Bunda temel sebep, eş-yönlü frezeleme işlemlerinde zıt-yönlüye göre daha düşük P_c ihtiyacıdır. Zıt- ve eş-yönlü frezeleme işlemlerinde artan f_z ile R_a 'nın az ve artan V_f değerleri ile R_a 'nın belirgin olarak arttığı, eş-yönlü frezeleme ile elde edilen R_a değerlerinin zıt yönlüye göre %13-%35 daha düşük olduğu görülmüştür.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Kuram E., Nose radius and cutting speed effects during milling of AISI 304 material, *Mater. Manuf. Process.*, 32 (2), 185-192, 2017.
2. Deng Z., Zhang H., Fu Y., Wan L., Liu W., Optimization of process parameters for minimum energy consumption based on cutting specific energy consumption, *J. Clean. Prod.*, 166, 1407-1414, 2017.
3. Zhang H., Deng Z., Fu Y., Lv L., Yan C., A process parameters optimization method of multi-pass dry milling for high efficiency, low energy and low carbon emissions, *J. Clean. Prod.*, 148, 174-184, 2017.
4. Liu N., Wang S.B., Zhang Y.F., Lu W.F., A novel approach to predicting surface roughness based on specific cutting energy consumption when slot milling Al-7075, *Int. J. Mech. Sci.*, 118, 13-20, 2016.
5. Dhar N.R., Kamruzzaman M., Effects of cryogenic cooling on temperature, tool wear, surface roughness and dimensional deviation in turning AISI-8740 steel by coated carbide, *Proc. of the 1st Int. Conf. & 7th AUN/SEED-Net Fieldwise Seminar on Manuf. and Mater. Process.*, Kuala Lumpur, 36-41, 2006.
6. Liu G., Huang C., Zhu H., Liu Z., Liu, Y., Li, C., The modified surface properties and fatigue life of Incoloy A286 face-milled at different cutting parameters, *Mater. Sci. Eng. A*, 704, 1-9, 2017.
7. Urbikain G., de Lacalle L.N.L., Modelling of surface roughness in inclined milling operations with circle segment end mills, *Simul. Model. Pract. Theory*, 84, 161-176, 2018.
8. Yao C.F., Wu D.X., Ma L.F., Tan L., Zhou Z., Zhang J.Y., Surface integrity evolution and fatigue evaluation after milling mode, shot-peening and polishing mode for TB6 titanium alloy, *Appl. Surf. Sci.*, 387, 1257-1264, 2016.
9. Yao C.F., Wu D.X., Tan L., Ren J.X., Shi K.N., Yang Z.C., Effects of cutting parameters on surface residual stress and its mechanism in high-speed milling of TB6, *P. I. Mech. Eng. B-J. Eng.*, 227, 483-493, 2013.
10. Yao C.F., Wu D.X., Jin Q.C., Huang X.C., Ren J.X., Zhang D.H., Influence of high-speed milling parameter on 3D surface topography and fatigue behavior of TB6 titanium alloy, *Trans. Nonferr. Metal Soc.*, 23, 650-660, 2013.
11. Tekaüt İ., Experimental investigation of the effects of cutting parameters on the cutting surface quality and heat affected area (HAZ) width in plasma arc cutting processes, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 35 (3), 1509-1518, 2020.
12. Aydın K., Katmer Ş., Gök A., Şeker U., Experimental and statistical investigation of the machining performance of wave form end mills on AISI 316L stainless steel, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 36 (4), 2225-2238, 2021.
13. Lee B.Y., Tarn Y.S., Cutting-parameter selection for maximizing production rate or minimizing production cost in multistage turning operations, *J. Mater. Process. Technol.*, 105 (1-2), 61-66, 2000.
14. Mesquita R., Krasteva E., Doytchinov S., Computer-aided selection of optimum machining parameters in multipass turning, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 10 (1), 19-26, 1995.
15. Okazaki Y., Mishima N., Ashida K., Microfactory Concept, History, and Developments, *J. Manuf. Sci. Eng.*, 126 (4), 837-844, 2004.
16. Liow J.L., Mechanical micromachining: a sustainable micro-device manufacturing approach, *J. Clean. Prod.*, 17 (7), 662-667, 2009.
17. Hadad M., Ramezani M., Modeling and analysis of a novel approach in machining and structuring of flat surfaces using face milling process, *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, 105, 32-44, 2016.
18. Khomenko V.A., Cherdancev A.O., Cherdancev P.O., Goncharov V.D., Kulawik A., Analysis of the Face Milling Process Based on the Imitation Modelling, *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, 126, 012001, 2016.
19. Felhő C., Karpuschewski B., Kundrák J., Surface roughness modelling in face milling, *Procedia CIRP*, 31, 136-141, 2015.
20. Serin G., Kahya M., Özbayoğlu M., Ünver H.Ö., Ti6AL4V malzemesinin tornalama işleminde özgül

- kesme enerjisi ve yüzey pürüzlüğünün incelenmesi ve yapay sınır ağları temelli tahmin modeli geliştirilmesi, *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 24 (2), 517-536, 2019.
21. Kara S., Li W., Unit process energy consumption models for material removal processes. *CIRP annals*, 60 (1), 37-40, 2011.
 22. Gutowski T., Dahmus J., Thiriez A., Electrical energy requirements for manufacturing processes, 13th CIRP Int. Conf. on Life Cycle Eng., Leuven, 623-627, 2006.
 23. Li, W., Kara, S., An empirical model for predicting energy consumption of manufacturing processes: a case of turning process, *P. I. Mech. Eng. B-J. Eng.*, 225 (9), 1636-1646, 2011.
 24. Li L., Yan J., Xing Z., Energy requirements evaluation of milling machines based on thermal equilibrium and empirical modelling, *J. Clean. Prod.*, 52, 113-121, 2013.
 25. Diaz N., Redelsheimer E., Dornfeld D., Energy consumption characterization and reduction strategies for milling machine tool use, *Glocalized Solutions for Sustainability in Manufacturing: 18th CIRP Int. Conf. on Life Cycle Eng. Braunschweig*, 263-267, 2011.
 26. Draganescu F., Gheorghe M., Doicin, C.V., Models of machine tool efficiency and specific consumed energy, *J. Mater. Process. Technol.*, 141 (1), 9-15, 2003.
 27. Velchev, S., Kolev I., Ivanov K., Gechevski S., Empirical models for specific energy consumption and optimization of cutting parameters for minimizing energy consumption during turning, *J. Clean. Prod.*, 80, 139-149, 2014.
 28. Aramcharoen A., Mativenga P.T., Critical factors in energy demand modelling for CNC milling and impact of toolpath strategy, *J. Clean. Prod.*, 78, 63-74, 2014.
 29. Balogun V.A., Mativenga, P.T., Impact of un-deformed chip thickness on specific energy in mechanical machining processes, *J. Clean. Prod.*, 69, 260-268, 2014.
 30. Kuram E., Ozcelik B., Bayramoglu M., Demirbas E., Simsek, B.T., Optimization of cutting fluids and cutting parameters during end milling by using D-optimal design of experiments, *J. Clean. Prod.*, 42, 159-166, 2013.
 31. Sealy M.P., Liu Z.Y., Zhang D., Guo Y.B., Liu, Z.Q., Energy consumption and modeling in precision hard milling, *J. Clean. Prod.*, 135, 1591-1601, 2016.
 32. Öztürk B., Kara F., Calculation and estimation of surface roughness and energy consumption in milling of 6061 alloy, *Adv. Mater. Sci. Eng.*, 8, 1-12, 2020.
 33. Boothroyd G., Knight W.A., *Fundamentals of Machining and Machine Tools 3rd ed.*, Taylor&Francis, 2005.
 34. Balázs B.Z., Jacsó Á., Takács M., Micromachining of hardened hot-work tool steel: effects of milling strategies, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 108 (9), 2839-2854, 2020.
 35. Pa N.M.N., Sarhan A.A.D., Shukor M.H.A., Mohamed M.A.H., Investigate the lubrication effects on cutting force and power consumption in up and down end milling, In *Adv. Mat. Res.*, Trans Tech Publications Ltd., 748, 264-268, 2013.
 36. Zhu Z., Peng, F., Tang X., Yan R., Li Z., Chen C., Sun H., Specific cutting energy index (SCEI)-based process signature for high-performance milling of hardened steel, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 103 (1), 1-13, 2019.
 37. Wang G., Liu Z., Huang W., Wang B., Niu J., Influence of cutting parameters on surface roughness and strain hardening during milling NiTi shape memory alloy, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 102 (5), 2211-2221, 2019.
 38. Michalik P., Zajac J., Hatala M., Mital D., Fecova V., Monitoring surface roughness of thin-walled components from steel C45 machining down and up milling, *Measurement*, 58, 416-428, 2014.
 39. Akkurt M., *Talaş kaldırma yöntemleri ve takım tezgahları*, Birsen Yayınevi, 1991.