



Frezeyle tornalamada takımda ortaya çıkan termal deformasyonların modellenmesi

Umut Karagüzel^{1*}, Mustafa Bakkal², Erhan Budak³

¹Işık Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 34980, İstanbul, Türkiye

²İstanbul Teknik Üniversitesi, Makine Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 34469, İstanbul, Türkiye

³Sabancı Üniversitesi Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye

Ö N E Ç İ K A N L A R

- Frezeyle tornalama operasyonunda kuvvet, sıcaklık ve takım deformasyonlarının modellenmesi
- Soğutucu hava ile takım deformasyonlarının azaltılması
- Kuru ve soğutucu hava ile takım aşınması deneyleri

Makale Bilgileri

Geliş: 01.12.2016

Kabul: 21.03.2017

DOI:

10.17341/gazimmfd.337635

Anahtar Kelimeler:

Frezeyle tornalama,
modelleme,
termal deformasyonlar

ÖZET

Frezeyle tornalama işleminde işlemlenmiş parça doğruluğu ve üretkenliği artırarak işlem performansını iyileştirmek kesme kuvvetlerini ve takım ucundaki ısı kaynaklı deformasyonları kontrol etmekle mümkündür. Bu çalışmanın amacı frezeyle tornalama sırasında ortaya çıkan ısı kaynaklı deformasyonları belirlemek ve bunları basınçlandırılmış soğuk hava kullanarak azaltmaktır. Kesme kuvvetleri, takım sıcaklıkları ve deformasyonlar sonlu elemanlarla modellenmiş ve deneylerle doğrulanmıştır. Kuru kesme koşullarında bu deformasyonların paso derinliğinin %40'ı kadar olabileceği ve bunun sonlu elemanlarla tahmin edilebileceği gösterilmiştir. Ayrıca bu deformasyonlar soğuk hava ile %65'e kadar azaltılabilir. Termal deformasyonlara ek olarak çalışmada takım aşınması ve işlenen parçada yüzey pürüzlülüğü değerleri de ölçülmüştür ve özellikle frezeyle tornalamada yüzey pürüzlülüğü değerlerinin taşlamadaki kadar iyi olabileceği gösterilmiştir.

Modelling thermally induced deformations on tool during turn-milling

H I G H L I G H T S

- Modelling of cutting forces, temperatures and tool deformations in turn-milling operation
- Reducing tool deformations by cooled air
- Tool wear experiments under dry and cooled air conditions

Article Info

Received: 01.12.2016

Accepted: 21.03.2017

DOI:

10.17341/gazimmfd.337635

Keywords:

Turn-milling,
modeling,
thermally induced
displacements

ABSTRACT

It is possible to increase the machined workpiece accuracy and productivity during turn-milling operation by modeling the cutting forces and thermally induced deformations on cutting tool. In order to achieve this task, the main objective of this study is to determine the thermally induced deformations on tool during turn-milling operation and reduce them by applying pressurized cooled air. In this study cutting forces, tool temperatures and deformations modelled by FEM coupled with analytical and mechanistic expressions are compared to those obtained by some series of experiments. It was shown in the study that those deformations could be upto 40% of the depth of cut during fine turn-milling. However they can be reduced by means of cooled air by 65%. Furthermore, tool wear and surface roughness values of machined workpiece were also measured and as it is stated in the paper that the surface values in fine turn-milling operation could be as good as they are in grinding operation.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Yüksek performanslı kesme daha yüksek kesme hızlarında, düşük takım aşınması ile birlikte yüksek verimlilik sağlarken işlenen parçada hassas boyutsal doğruluk ve yüksek yüzey kalitesini de elde etmeyi amaçlamaktadır. Literatürde kesme parametrelerinin özellikle yüzey kalitesi üzerine etkisi ile ilgili birçok çalışma bulunmaktadır. Bu çalışmalardan biri Kacal ve Yıldırım [1] tarafından gerçekleştirilmiştir, çalışmalarında PMD23 çeliğinin tormalanması sırasında CBN takımların yüzey kalitesine etkisi incelenmiştir ve ANOVA metodu ile en etkin parametrenin kesme derinliği olduğu bulunmuştur. Yine bir yüzey kalitesi çalışmasında Yurdakul vd. [2] honlama işleminde yüzey kalitesini taguchi deney tasarımı metodu ile incelemiş ve honlama taşının tane büyüklüğünün en önemli parametre olduğunu bulmuşlardır. Kesme işlemlerinde statik ve dinamik özelliklerin yanısıra ısı oluşumu da işlenmiş parça doğruluğu ve kalitesini etkilemektedir. Bu nedenle Tekait ve Demir'in [3]'de belirttiği gibi kesme bölgesinde oluşan sıcaklığın araştırılması daha verimli bir üretim gerçekleştirmek için oldukça önemlidir. Talaşlı imalatta ısı oluşumu iki mekanizma vasıtası ile gerçekleşir bunların birinci yüksek miktarda plastik deformasyon iken ikincisi sürtünmedir. Talaşlı imalat süreci için harcanan enerjisinin çok büyük bir kısmı ısıya dönüşür, bunun sonucu olarak ta kesme sıcaklığı önemli bir artış gösterir [4]. Talaşlı imalat sırasında kesme sıcaklıklarının ölçülmesi yoğun bir çaba gerektirir. İşlemin çok hızlı olması ve ısı oluşumunun küçük bir alanda gerçekleşmesi sıcaklık ölçümünü çok zorlaştırmaktadır. Yağmur vd. [5] AISI 1050 çeliğinin delik delinmesi sırasında kesme parametrelerinin kesme sıcaklıkları üzerine etkisini incelemişlerdir ve bu çalışma sırasında sıcaklıkları termoeleman yardımı ile ölçmüşlerdir ve ilerleme ile kesme sıcaklığının azaldığını gözlemlemişlerdir. Sürekli olmayan kesme işlemi söz konusu olduğunda ise bu ölçme zorluğu daha da artmaktadır, çünkü sıcaklık zamanla değişmektedir. Bu konuda literatürde az sayıda yayın bulunmaktadır. Bunlar arasında Sato fiber optik kablolar ve pirometre kullanarak frezeleme sırasında sıcaklık ölçmüştür [6]. Bu çalışmada kablolar tezgah anaminden geçirilmiş ve dışarıdaki pirometreye ulaştırılmıştır. Bir başka çalışmada ise Armendia vd. freze tezgahında takım yerine özel hazırlanmış bir iş parçası bağlayarak termal kamera yardımıyla sıcaklık ölçmüşlerdir [7]. Ayrıca yapılan çalışmalar göstermiştir ki benzer kesme koşulları altında sürekli olmayan kesme işleminde sürekli kesmeye göre daha düşük sıcaklıklar elde edilir [8]. Bu nedenle çok ağızlı kesme takımlarının kullanıldığı frezeyle tormalama işlemi, sürekli bir kesme işlemi olan tormalamada kesme sıcaklıklarının düşürülmesi için bir seçenek olabilir. Frezeyle tormalama işlemi temel olarak bir tormalama işlemi olup işlemin mekanikliği açısından ise bir freze işlemidir. İşleminde freze takımı kullanılması nedeniyle süreç kesintili bir işlem olup bu sayede yüksek talaş kaldırma hızları elde edilebilir. Ayrıca kesintili işlem nedeniyle takım bir dönüşü sırasında ısınma ve soğuma döngülerine maruz kalır. Bu sayede kesme sıcaklıkları geleneksel tormalamaya göre daha düşük olur. Takımda ısı

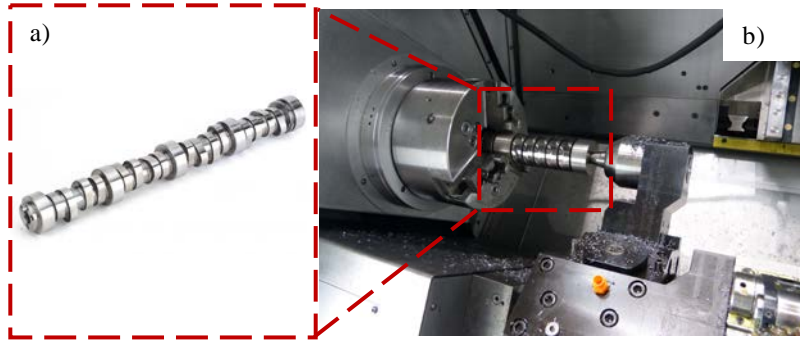
kaynaklı deformasyonların azaltılması ve kompanzasyonu parça kalitesi ve işlem doğruluğu açısından oldukça önemlidir. Isı kaynaklı deformasyonlar çevreden kaynaklanabileceği gibi iç ısı kaynakları nedeniyle de oluşabilir [9]. Bununla birlikte bu deformasyonlar kesme sürecinin kendisi nedeniyle de oluşabilir. Literatürde kesme sıcaklıklarının modellenmesi için birçok sayısal ve analitik model bulunmaktadır. Sunulan bu modellerin birçoğu iki boyutlu dik kesme işlemi içindir [10]. Buna rağmen frezeyle tormalama işlemi dik kesme geometrisinden çok daha karmaşıktır. Ayrıca süreç kesintili olduğu için problemin zamana bağlı çözülmesi gerekmektedir. Kesintili işlemlerde kesme sıcaklığı üzerine literatürde birkaç çalışma bulunmaktadır. Stephenson [8] Green fonksiyonlarını kullanarak üç boyutlu ve zamana bağlı olarak iletim problemini çözerek kesme sıcaklıklarının kesintili işlemlerde sürekli işlemlere göre daha düşük olduğu sonucuna ulaşmıştır. Radulescu ve Kapoor [11] analitik bir model geliştirerek bu modele zamana bağlı ısı akışı ve taşınım terimlerini eklemişlerdir.

Bu çalışmada Şekil 1 a ve b'de görülen kam milinin hassas frezeyle tormalama işleminde ısı kaynaklı deformasyonların tahmin edilmesi için bir termo-mekanik model geliştirilerek, bunun deneysel doğrulaması yapılmıştır. Buna ek olarak bu deformasyonların azaltılması için bir soğutulmuş havanın kullanıldığı bir soğutma stratejisi de sunulmuştur. Bu amaçlar doğrultusunda bu makalede şu kısımlar anlatılmıştır: Bölüm 2'de süreç modeli detaylı olarak tartışılmıştır. Süreç modelinin doğrulanması ve ısı kaynaklı deformasyonların azaltılması için gerçekleştirilen deneysel çalışma Bölüm 3'te verilmiştir. Sonuçlar Bölüm 4 'te sunulmuş ve bunların üzerine detaylı bir tartışma yapılmıştır. Bölüm 5'te ise takım aşınması ve yüzey pürüzlülüğü ile ilgili sonuçlar paylaşılmıştır. Son olarak Bölüm 6'da elde edilen çıktılar özetlenmiştir.

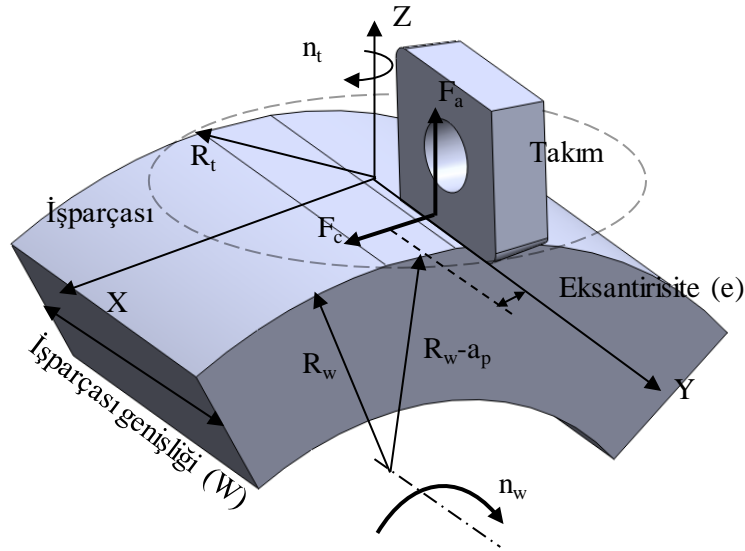
Bunlara ek olarak çalışmada da belirtildiği gibi hassas frezeyle tormalamada ısı kaynaklı deformasyonların hesaba katılması işlem doğruluğu açısından önemlidir, çünkü bu deformasyonlar seçilen paso derinliğinin %40 kadar olabilir. Ayrıca çalışmada bu deformasyonların çeşitli simülasyonlarla tahmin edilebileceği ve kullanılan doğru soğutma teknikleri ile azaltılabileceği gösterilmiştir.

2. FREZEYLE TORNALAMA OPERASYONUNUN MODELLENMESİ (MODELING OF TURN-MILLING OPERATION)

Bu çalışmada kesici takımda meydana gelen ısı kaynaklı deformasyonların tahmin edilebilmesi amacıyla bir termomekanik model geliştirilmiştir. Bu model 3 boyutlu sonlu elemanlar modeli ile kimi analitik ve mekanistik yaklaşımların birleştirilmesinden oluşmaktadır. Çalışmada kesme kuvvetleri kesilmemiş talaş geometrisi ve kesme sabitlerini kullanarak mekanistik yaklaşımla elde edilmiştir. Bu kesme kuvvetleri kullanılarak, takım-talaş arayüzünde oluşan ısı enerjisi takımın bir dönüşü için hesaplanmıştır. Bu



Şekil 1. a) Kam mili [12] b) Deneylerde kullanılan işparçası (a) Camshaft [12] b) Workpiece used in the experiments)



Şekil 2. Frezeyle tormalama işleminin kinematığı ve geometrisi (Kinematics and geometry of turn-milling)

ısıya karşılık gelen ısı akısı takımın kesme kenarına bir sınır koşulu olarak uygulanmış ve ortaya çıkan iletim problemi zamana bağlı olarak sonlu elemanlar metodu (MSC. MARC) ile bütün bir takım geometrisi için çözülmüştür. Son olarak ısıya bağlı ortaya çıkan takım deformasyonları hesaplanmış ve bunlar deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır.

2.1. Kesilmemiş Talaş Geometrisi ve Kesme Kuvvetleri (Uncut Chip Geometry and Cutting Forces)

Frezeyle tormalama işlemine ait temel kinematik parametreler Şekil 2'de verilmiştir. Takımda eğim açısı olmaması nedeniyle işlem sürecince iki yönde kuvvet oluşmaktadır; kesme kuvveti F_c ve aksenal kuvvet F_a . Bu kuvvetler kullanılarak kesme sırasında ortaya çıkan ısı akısı ve buna bağlı olarak kesme sıcaklıkları bulunabilir. Frezeyle tormalamada geleneksel tormalama işleminden farklı olarak kesilmemiş talaş geometrisi zamanla değişir. Bunun sonucunda da kesme kuvvetleri değişir. Şekil 3'te bu çalışmada konu alınan işlem için kesilmemiş talaş geometrisi ve temsili olarak aksenal kuvvetin takımın bir dönüşü için zamana bağlı olarak değişimi verilmiştir. Kesme kuvvetlerinin modellenmesi için ilk aşama Şekil 3'te gösterilen kesilmemiş talaş geometrisinin elde edilmesidir.

Şekilde W ile gösterilen kesilecek parçanın genişliğini temsil etmektedir. Yine şekilde e ile gösterilen eksantrisite olup işparçası ve takım eksenleri arasındaki mesafe olarak tanımlanmaktadır; çalışmada bu parametre kesici takımın kesme kenar uzunluğu ve işparçası geometrisi hesaba katılarak uygun bir değerde seçilmiştir. Çalışmada uygulanan frezeyle tormalama işlemi dik frezeyle tormalama olarak bilinmektedir, dik frezeyle tormalamada talaş takımın hem altı hem de yan ile oluşturulmaktadır [13]. Ancak bu çalışmada seçilen eksantrisite değeri ve düşük paso derinliği nedeniyle talaş sadece takımın altı ile kesilmektedir. Kesilmemiş talaş geometrisinin sınırları x_1 , x_2 ve x_3 noktaları ile belirlenmektedir. x_1, x_2 ve x_1, x_3 doğruları arasında kalan açı θ Eş. 1 kullanılarak bulunabilir.

$$\theta = \frac{2\pi}{m \cdot r_n} \quad (1)$$

Burada m kesme ağız sayısı ve r_n ise takımın dönme hızının (n_t) işparçası dönme hızına (n_w) oranıdır. Talaş geometrisinin hesabına geçmeden belirtilmesi gerekir ki bu çalışmada eksantrisite (e) bazı kıstaslara göre seçilmiştir. Şekil 2'den de görüleceği üzere takım yarıçapı (R_t), işparçası

kuvvetini vermektedir. Buradan hareketle talaş yüzeyindeki üretilen ısı miktarı Eş. 8 ile bulunabilir.

$$Q = F_a \cdot V_{talaş} \quad (8)$$

burada Q ikinci deformasyon bölgesinde sürtünmeye bağlı olarak ortaya çıkan ısı miktarını temsil etmekteyken $V_{talaş}$ ise talaş akış hızıdır. Şekil 3'ten de görüleceği gibi radyal yöndeki takım ve işparçası teması takımın dönüş hareketi boyunca değiştiğinden kesme hızı da dönüş boyunca değişir. Bu nedenle simülasyonda ortalama hız değeri kullanılmıştır. Üretilen ısı miktarı Q ve Şekil 4'te gösterilen takım-talaş temas alanı A kullanılarak ortalama ısı akısı q Eş. 9'daki gibi hesaplanabilir.

$$q = Q/A \quad (9)$$

A alanının büyüklüğü bölgedeki maksimum sıcaklık miktarı üzerinde büyük bir öneme sahipken ısı kaynaklı deformasyonlar üzerinde sadece küçük bir etkiye sahiptir; çünkü ısı kaynaklı deformasyonlar talaş yüzeyindeki ısı akısından ziyade üretilen ısı miktarı ile alakalıdır. Bu üretilen ısının da büyük bir kısmı talaş tarafından uzaklaştırılırken belirli bir miktarı ise kesici takıma iletilir.

Frezeyle tornalama kesintili bir işlemdir; bu nedenle takımın bir dönüşü ısınma ve soğuma döngülerinden oluşur. Buradan hareketle çalışmada ısı akısı bir basamak fonksiyonu şeklinde tanımlanmıştır.

2.3. Zamana Bağlı Isı İletimi ve Isı Kaynaklı Deformasyon Analizi

(Transient Heat Conduction and Thermally Induced Displacement Analysis)

Takım ucunda meydana gelen ısı kaynaklı deformasyonların bulunabilmesi için zamana bağlı ısı iletim denklemi Eş. 9'da verilen ısı akısı kullanılarak bütün bir takım geometrisi için çözümlenmelidir. Şekil 4'te zamana bağlı ısı iletim problemi için takım geometrisi ve sınır koşulları verilmiştir. Analize söz konusu olan kesici takım 23.7 mm çapa ve 270 mm uzunluğa sahiptir. Oluşturulan sonlu elemanlar modelinde takım shaftı 67017 elemana sahipken, takma uç 26140 elemana sahiptir; ayrıca takma uçta ısı akısının uygulandığı bölgede daha küçük elemanlar kullanılarak analiz hassasiyeti artırılmıştır. Modelde hem takım shaftı hem de takma uç elastik malzemeler olarak tanımlanmıştır; böylelikle ısı kaynaklı deformasyonlar hesaplanabilmektedir. Shaft ve takma uç arasındaki ısı transfer katsayısı 40000 W/m²/K olarak seçilmiştir, bu sayede takım ucunda uygulanan ısı akısının takımın geneline ulaşması sağlanmıştır. Diğer termo-elastik ve termo-fiziksel parametreler program kütüphanesi kullanılarak analize aktarılmıştır.

Analiz sırasında taşınımın çevreye olan ısı kaybının da hesaba katılması için bütün yüzeylerde taşınım özellikleri tanımlanmıştır. Takım shaftının üst yüzeyinde yani takımın anamile bağlandığı bölgede sınır koşulu sabit oda sıcaklığı olacak şekilde 20° olarak ifade edilmiştir. Isı akısı ise Şekil 4'te yeşil renkte görülen bölgeye zamanın bir fonksiyonu

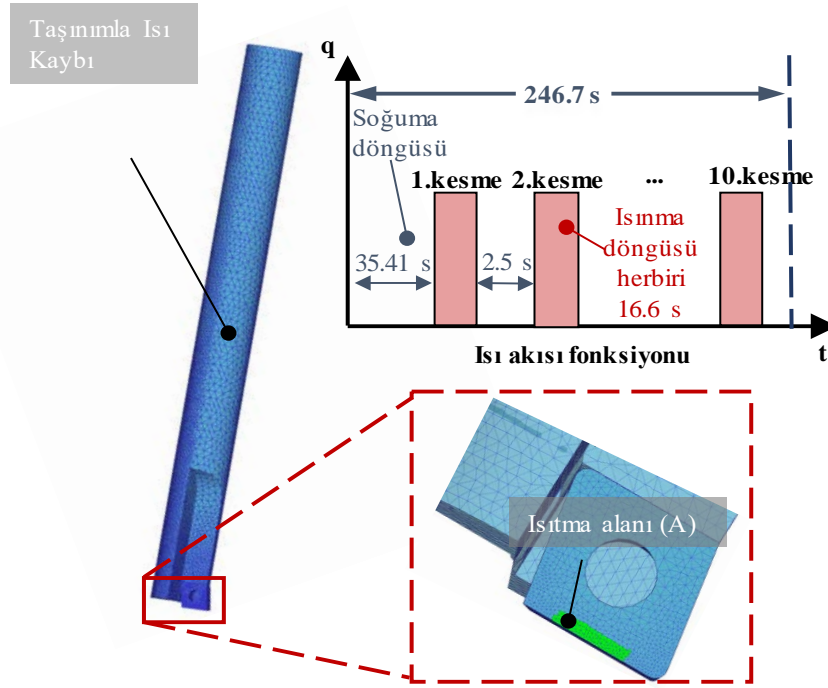
olarak uygulanmıştır. Isı akısı fonksiyonu ısınma (takımın kesme halinde olduğu zaman dilimi) ve soğuma döngülerini (takımın kesme halinde olmadığı zaman dilimi) içermektedir. Şekil 4'te gösterildiği gibi her ısınma süresi 16.6 saniye sürmektedir. Bütün bir analiz süresi Şekil 4'ten de görüleceği üzere 246.7 saniyedir.

3. DENEYSEL ÇALIŞMA (EXPERIMENTAL STUDY)

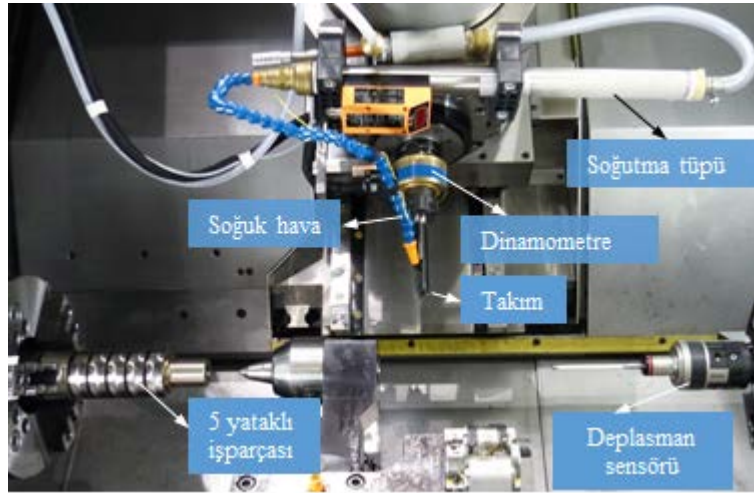
Geliştirilen modellerin doğrulanması ve ısı kaynaklı deformasyonların azaltılması için GMX 250 çok maksatlı takım tezgahında kesme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Yüzeyi indüksiyon ile 58±2 HRC'ye sertleştirilmiş beş adet yatağa sahip EN-GJS-600-3 kam mili malzemesi CBN takma uç kullanılarak frezeyle tornalanmıştır. Takma ucun, takımın ve işparçasının geometrik özellikleri şu şekildedir; talaş açısı $\gamma = 0^\circ$, serbest açısı $\alpha = 7^\circ$, eğiklik açısı $\lambda = 0^\circ$, takım yarıçapı $R_f = 11.8$ mm ve işparçası yarıçapı $R_w = 30$ mm. İşlemede kullanılan kesme parametreleri ise; takımın dönme hızı $n_r = 6000$ dev/dak, paso derinliği $a_p = 0.1$ mm, diş başına ilerleme $f_z = 0.114$ mm/rev ve eksantirisite $e = 4.5$ mm. Şekil 5'te soğutulmuş hava tertibatı ile birlikte deney kurulumunu göstermektedir. Testler kuru ve basınçlı soğutulmuş hava koşulları altında gerçekleştirilmiştir. Soğutulmuş havanın sıcaklığı çıkış ağzında termoeleman yardımı ile ölçülmüştür bu sıcaklık deney sırasında -6 ila -8 °C arasındadır, havanın hacimsel debisi ise 1 m³/dak. civarındadır. Kuru kesme koşulları altında 28 deney gerçekleştirilirken, soğuk hava ile birlikte 14 deney gerçekleştirilmiştir. İşparçasına ait her yatak 2 paso halinde işlemiştir dolayısı ile her testte toplam 10 adet kesme yapılmıştır. Testler sırasında kesme kuvvetleri, sıcaklık ve ısı kaynaklı deformasyonlar ölçülmüştür. Kesme kuvvetleri Kistler marka döner dinamometre ile ölçülmüştür. Testlerde kullanılan dinamometre eksenel yöndeki (Z yönü) ve torku (Z etrafında) ölçebilmektedir. Sıcaklık ve deformasyon ölçümleri ilki kesmeden önce ($t=0$) ikincisi ise kesmeden sonra ($t=246.7$ saniye) olmak üzere iki kez gerçekleştirilmiştir. Deformasyon ölçümleri için Şekil 5'te görülen deplasman sensörü yardımı ile gerçekleştirilmiştir. Sıcaklık ölçümleri ise termal kamera yardımı ile yapılmıştır. Emissivite parametresi termal kamera ile ölçüm sırasında oldukça önemli bir parametredir. Bu nedenle ölçümlerde kullanılan emissiviteyi kalibre etmek amacıyla emissivite değeri bilinen özel bir boya kullanılmıştır.

4. MODELİN DENEYSEL SONUÇLARLA KARŞILAŞTIRILMASI (COMPARISON OF RESULTS)

Çalışma sırasında kesme kuvvetleri Bölüm 2.1'de tartışıldığı şekilde elde edilmiş ve bunlar deneylerle elde edilen kuvvetlerle karşılaştırılmıştır. Şekil 6'da bu kesme kuvvetlerinin karşılaştırılması verilmiştir, şekilden de görüleceği üzere elde edilen kuvvetler arasında oldukça iyi bir uyum vardır. Ortalama kesme kuvveti ve ortalama kesme hızı verileri kullanılarak ısı üretimi hesaplanmış ve bundan yola çıkarak kesme ağzına uygulanan ısı akısı bulunmuştur. Şekil 4'te gösterilen ısınma ve soğuma döngüleri sonlu



Şekil 4. Kesici takımdaki sıcaklık modeli (Temperature model for cutting tool)

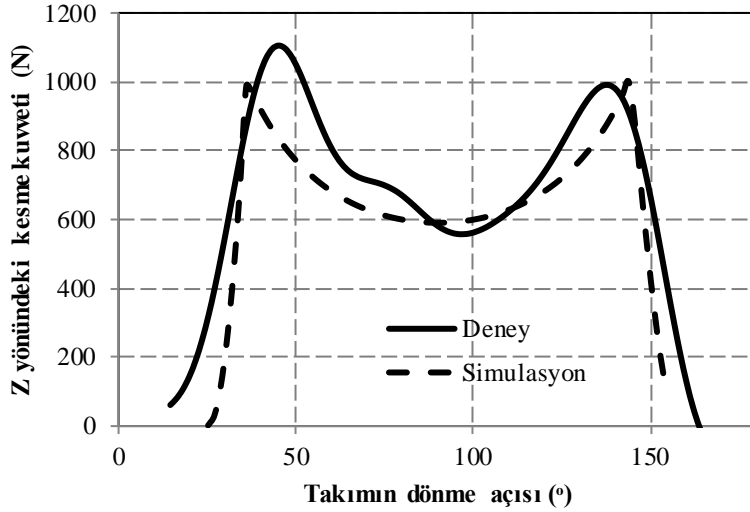


Şekil 5. Deney kurulumu (Experimental setup)

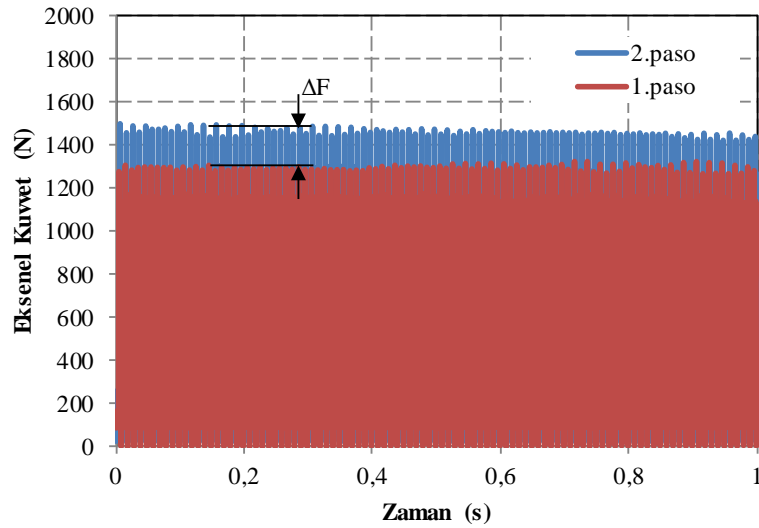
elemanlar metodu ile modellenmiş ve bunlar deneylerle doğrulanmıştır. Zamana bağlı ısı iletimi analizinde ısınma döngülerinde 22 W'lık bir ısı girdisi kullanılırken bu değer soğuma döngülerinde 0'dır. Bu döngüler sonucunda $t=246.7$ saniye sonucunda takım ucunda hesaplanan deformasyon değeri $44 \mu\text{m}$ 'dir. Çalışma sırasında $t=0$ anında ve $t=246.7$ sn anında iki adet ölçüm alınarak bunların farkından deformasyon değeri bulunmuştur. Gerçekleştirilen 28 adet kuru kesme testi sonrasında ölçülen ve ortalaması alınan deformasyon değeri ise $40 \pm 10 \mu\text{m}$ 'dir. Bu sonuçlardan açıkça görüleceği üzere zamana bağlı ısı iletim analizi ve deneyler arasında iyi bir korelasyon vardır. Bu analizdeki ısı girdisi değeri kilit bir öneme sahiptir ve bu değer talaşlı imalatta ısı paylaşım miktarı ile belirlenmektedir. Takıma olan ısı paylaşım oranı literatürde %1-20 arasında olarak

belirtilmiştir [16]. Bu çalışmada ise ısı paylaşım oranı % 3.43 olarak alınmıştır, bu değer geliştirilen model ve deneysel sonuçlardaki sıcaklıkların karşılaştırılması ile elde edilmiş olup, literatürde belirtilen değer aralığındadır. Isı kaynaklı deformasyonların kesme işlemi üzerinde etkisi olduğuna dair diğer bir kanıt ise kesme kuvveti sonuçlarıdır.

Deneysel çalışma bölümünde anlatıldığı üzere işparçası beş adet yataktan oluşan bir kam milidir ve her testte bu yataklardan her birinden iki paso talaş kaldırılmıştır. Takım ısınması nedeniyle uzayacağından bunun kuvvetler üzerinde de bir sonuç yaratması gerektiği düşünülmüş ve bu nedenle aynı yatak için artarda gelen pasolar incelenmiştir. Aynı yatak için aynı takım ile kesilen birinci ve ikinci paso değerleri karşılaştırıldığında kesme kuvvetlerinde ΔF kadar



Şekil 6. Kesme kuvvetlerinin karşılaştırılması (Comparison of cutting forces)

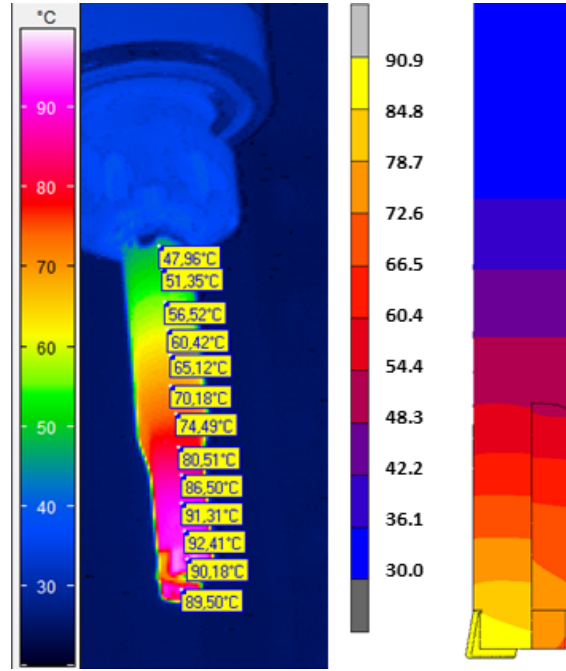


Şekil 7. Birinci yatağa ait kesme kuvveti sonuçları (Cutting force results for the first bearing)

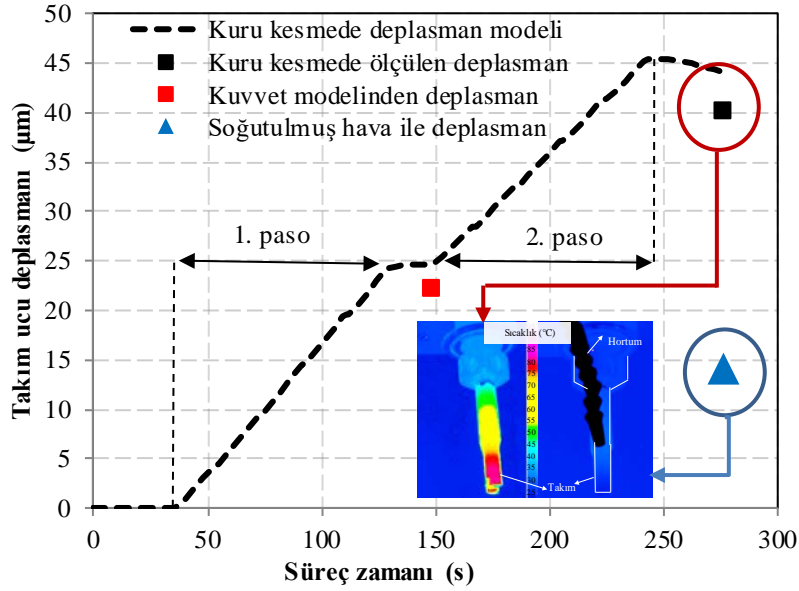
bir artış gözlemlenmiştir. Bu artış Şekil 7’de 1 saniyelik kesme zamanı için görülebilir. Kesme kuvveti modeline (mekanistik model) göre böyle bir artışa kesme ucundaki 22 μm ’lik bir deformasyon yol açabilir, zamana bağlı ısı iletimi analizinde (sonlu elemanlar) ise bu değer 25 μm ’dir ve farklı yollardan elde edilen bu değerler birbirine oldukça yakındır. Böylelikle iki farklı modelle takımda meydana gelen deformasyonlar doğrulanmıştır. Yukarıda da bahsedildiği gibi takımdaki kesme sıcaklıkları termal kamera yardımı ile ölçülmüştür. Şekil 8’de bu ölçüm sonuçları ve sonlu elemanlar modelinden elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Sonlu elemanlar modelinde malzemesi 4140 olan takım 67017 elamana bölünürken, malzemesi CBN olan plaket ise 26140 elemana bölünmüştür bunun nedeni ısı gradyanının plakette daha yüksek olmasıdır. Ayrıca Şekil 3’ten de görüleceği gibi takım üst yüzeyine sabit sıcaklık sınır şartı verilirken takımın geri kalanına taşınım sınır şartı uygulanmıştır. Kesme kuvveti ve kesme

hızı kullanılarak bulunan ısı akışı ise plaketin Şekil 3’te belirtilen temas bölgesine yine sınır şartı olarak uygulanmıştır. Şekil 8’den de görüleceği üzere deneysel sonuçlar sonlu elemanlar modelini doğrulamaktadır. Şekil 9’da ise ısı kaynaklı termal deformasyonlar için elde edilen analiz sonuçları ve bunların deneysel sonuçlar ile karşılaştırılması bütün bir kesme işlemi için verilmiştir.

Buradaki süreç zamanı 5 adet yatağın 2 paso ile işlenmesini ve arada geçen kesim yapılmayan zamanı ifade eden toplam süredir. Bu sayede geliştirilen termo-mekanik model üç farklı deneysel yöntem ile doğrulanmıştır ve sonuçlar oldukça tatmin edicidir. Geliştirilen model ve deneysel sonuçlar arasındaki farklar %10-12’lik bir aralıkta değişmektedir. Deneysel çalışmanın ikinci adımında soğutulmuş hava kullanılmıştır, bu deneylerde takım ucunda ölçülen ısı kaynaklı termal deformasyonların ortalaması 14 μm olmuştur. Bu değer Şekil 8’de de görülebilir. Kuru



Şekil 8. Takım üzerindeki sıcaklıkların SEM ile karşılaştırılması (Comparison of tool temperatures to FEM results)



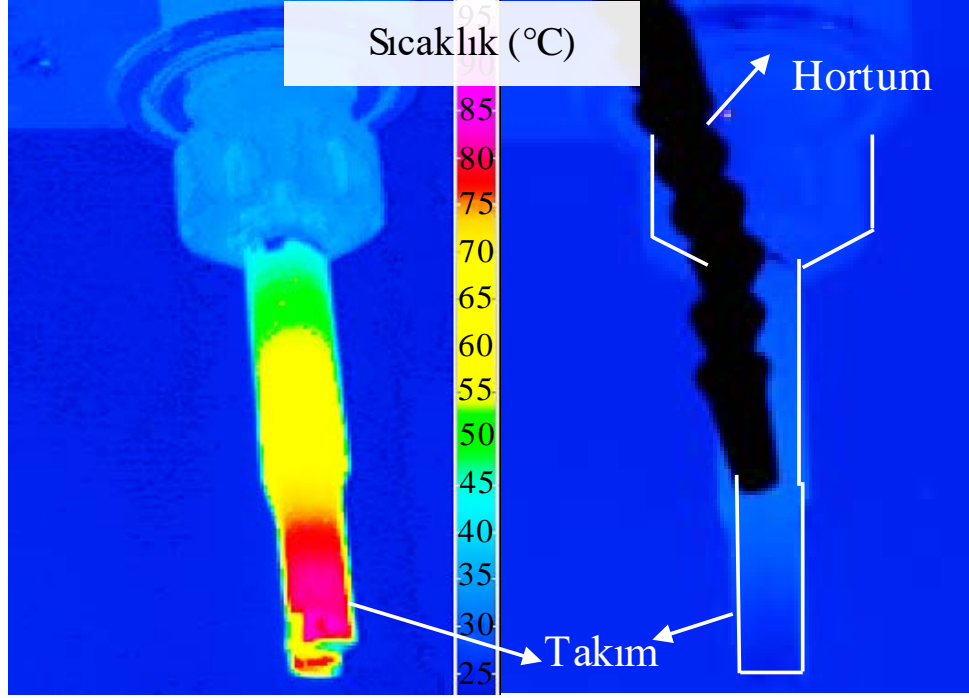
Şekil 9. Takım ucundaki termal deformasyonların karşılaştırılması (Comparison of thermally induced displacements)

kesmede bu değerin 40 µm olduğu hatırlanırsa bu oldukça kayda değer bir azalmadır. Şekil 10'da ise soğutulmuş havanın etkisi termal kamera görüntülerinden açıkça görülmektedir. Her iki görüntü de kesme işlemi sonunda elde edilmiştir.

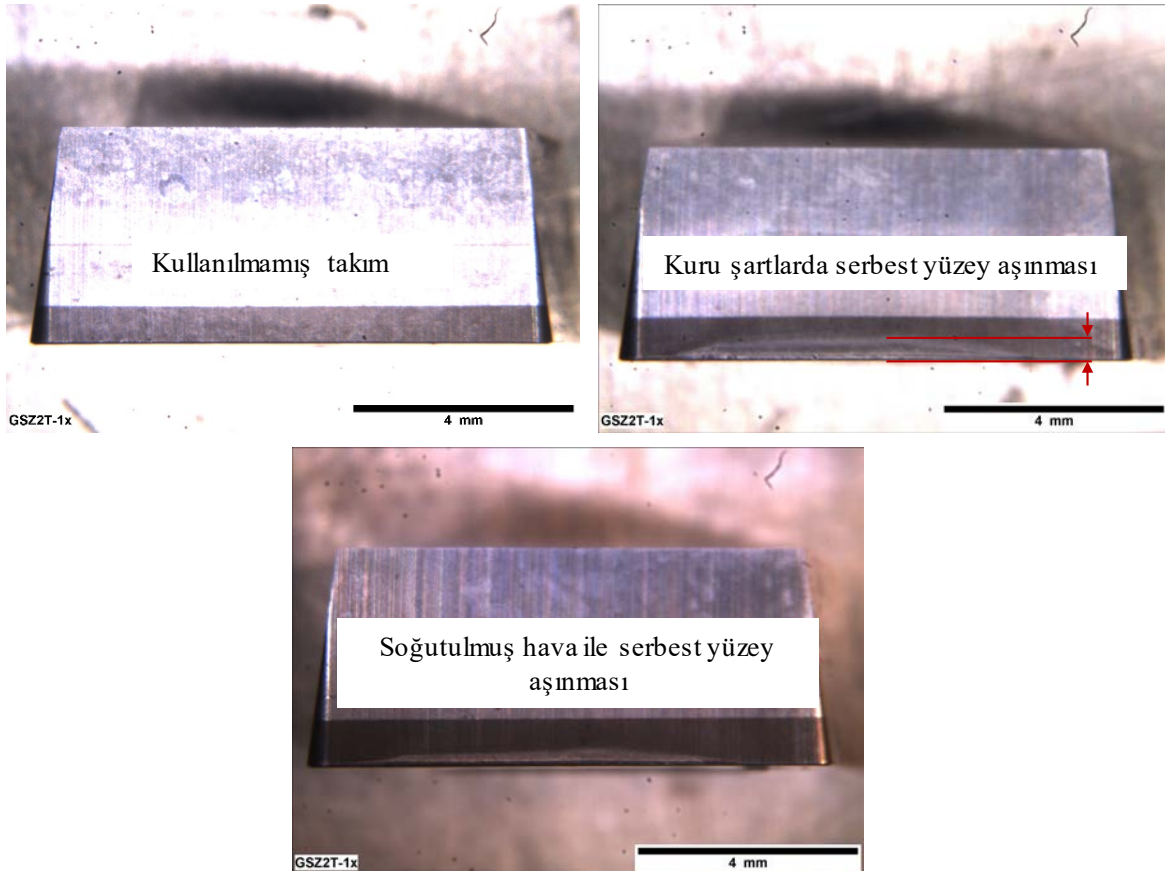
5. TAKIM AŞINMASI VE YÜZEY KALİTESİ (TOOL WEAR AND SURFACE QUALITY)

Kesimler gerçekleştirildikten sonra CBN takım üzerinde optik mikroskop yardımı ile takım aşınması da ölçülmüştür. Bu amaçla takım her 70 kesim (5 yatak için 14 paso)

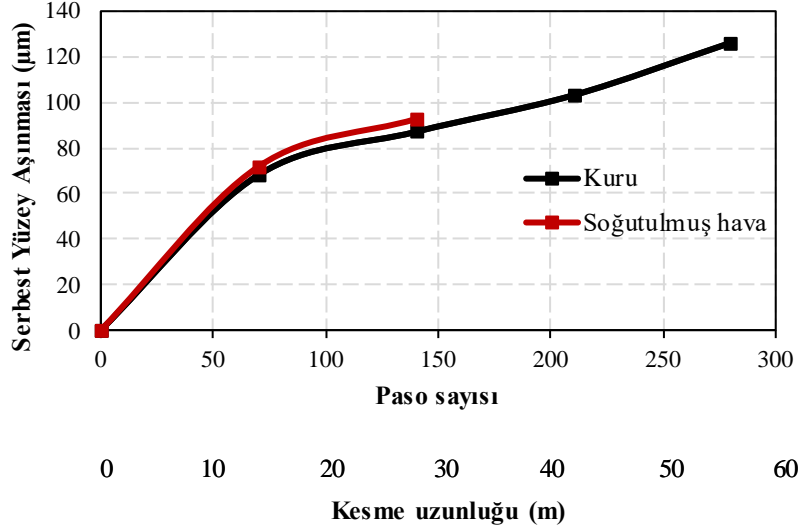
sonrasında periyodik olarak ölçülmüş ve serbest yüzey aşınması aşamalı olarak elde edilmiştir. Şekil 11'de kullanılmamış takım ve bir miktar aşınmış takım birarada görülebilir. Şekil 12'de ise kuru ve soğutulmuş hava ile işlemede CBN takımda gerçekleşen serbest yüzey aşınmasının paso sayısı ve kesilen uzunlukla nasıl değiştiği verilmiştir. Şekil 12'den de görüleceği üzere soğutulmuş havanın aşınma üzerinde büyük bir etkisi yoktur. Çalışmada Hommel marka CNC Profilometre kullanılarak yüzey pürüzlülüğü de ölçülmüştür. Buna göre yapılan 10 ölçümün ortalamasında ortalama yüzey pürüzlülüğü $Ra=0.14\pm 0.03$ µm olarak bulunmuştur.



Şekil 10. Kuru ve soğuk hava ile işlemede sıcaklık karşılaştırılması
(Comparison of tool temperatures obtained during dry cutting and cutting with cooled air)



Şekil 11. Kuru ve soğutulmuş hava ile işlemede CBN takımında serbest yüzey aşınması
(Wear on CBN tool under dry and cooled air conditions)



Şekil 12. Kuru ve soğutulmuş hava ile işlemede CBN takımında serbest yüzey aşınmasının gelişimi (CBN flank tool wear propagation)

Literatürde çalışmada konu edilen kam milinin yüzey kalitesi taşlama ile artırılmaktadır, ve bu taşlama sonucunda yüzey kalitesi $Ra=0.5-1 \mu\text{m}$ aralığında verilmiştir [17]. Bu karşılaştırma ile çalışmada elde edilen yüzey pürüzlülüklerinin oldukça iyi olduğu iddia edilebilir.

6. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışma frezeyle tornalama operasyonunun analitik ve mekanistik araçlar kullanılarak 3B sonlu elemanlar metodu ile başarıyla modellenebileceğini göstermektedir. Analiz ve deneyler ısı kaynaklı takım ucunda meydana gelen deformasyonların frezeyle tornalama sırasında önemli olduğunu göstermektedir. Bu deformasyon miktarı kesme koşullarına bağlı olarak paso derinliğinin %40'ına kadar ulaşabilir. Ancak bu deformasyonlar uygun yöntemlerle tahmin edilebilir ve çalışmada da gösterildiği gibi soğuk hava kullanılarak azaltılabilirler. Gerçekleştirilen deneyler göstermektedir ki basınçlandırılmış soğuk hava bu deformasyonları %65'e kadar azaltabilir ve böylelikle frezeyle tornalanan parçaların geometrik doğruluğu artırılabilir. Bunlara ek olarak aşınma deneyleri gerçekleştirilmiş ve takım aşınması periyodik olarak ölçülmüştür. Ayrıca yüzey pürüzlülüğü de ölçülmüş ve deneyler sonrasında frezeyle tornalama işleminde taşlama değerlerine yakın yüzey kalitesi elde edilebileceği gösterilmiştir.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENT)

Yazarlar bu çalışmada Dr. Ulrich Semmler'e Alman araştırma kuruluşları Fraunhofer ve DFG'ye ve TÜBİTAK'a teşekkürü bir borç bilirlir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Kacal A., Yildirim F., Determining the Effects of CBN Cutting Insert's Cutting Performance on Surface

Roughness and Tool Wear at Turning of PMD 23 Steel, Journal of the Faculty of Engineering Architecture of Gazi University, 31 (1), 181-189, 2016.

2. Yurdakul M., Güneş S., İç Y., Improvement of the Surface Quality in the Honing Process Using Taguchi Method, Journal of the Faculty of Engineering Architecture of Gazi University, 31 (2), 347-360, 2016.
3. Tekaut İ., Demir H., The Effects Of Cutting Tool Coating and Machining Parameters in Drilling of Steel AISI H13 and AISI D2, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 30 (2), 289-296, 2015.
4. Steven L., Shih A., Cutting Temperature and Thermal Analysis, Analysis of Machining and Machine Tools, Springer US, 141-153, 2016.
5. Yağmur S., Adem A., Şeker U., Günay M., An Experimental Investigation of Effect of Cutting Parameters on Cutting Zone Temperature In Drilling, Journal of the Faculty of Engineering & Architecture of Gazi University, 28 (1), 1-6, 2013.
6. Sato M., Tamura N., Tanaka H., Temperature variation in the cutting tool in end milling, J. Manuf. Sci. Eng. , 133 (021005), 1-7, 2011.
7. Armendia M., Garay A., Villar A., Davies M.A., Arrazola P.J., High bandwidth temperature measurement in interrupted cutting of difficult to machine materials, CIRP Ann., 59 (1), 97-100, 2010.
8. Stephenson D.A., Ali A., Tool temperatures in interrupted metal cutting, J. Manuf. Sci. Eng. , 114 (2), 127-136, 1992.
9. Mayr J., Jedrzejewski J., Uhlmann E., Alkan Donmez M., Knapp W., Hartig F., Wendt K., Moriwaki T., Shore P., Schmitt R., Brecher C., Würz T., Wegener K., Thermal issues in machine tools, CIRP Ann., 61 (2), 771-791, 2012.
10. Abukhshim N.A., Mativenga P.T., Sheikh M.A., Heat generation and temperature prediction in metal cutting:

- A review and implications for high speed machining, *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, 46 (7), 782-800, 2006.
11. Radulescu R., Kapoor S.G., An analytical model for prediction of tool temperature fields during continuous and interrupted cutting, *J. Manuf. Sci. Eng.*, 116(2), 135-143, 1994.
 12. Onallcylinders. An automotive blog, <http://www.onallcylinders.com/2014/02/07/camshaft-faqs-lobe-separation-intake-exhaust-centerlines/>. Yayın tarihi Şubat 7, 2014. Erişim tarihi 20 Kasım, 2016.
 13. Karagüzel U., Uysal E., Budak E., Bakkal M., Analytical modeling of turn-milling process geometry, kinematics and mechanics, *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, 91, 24-33, 2015.
 14. Bouacha K., Yallese M.A., Mabrouki, T., Rigal, J. F. Statistical analysis of surface roughness and cutting forces using response surface methodology in hard turning of AISI 52100 bearing steel with CBN tool. *Int. J. Refract. Met. Hard Mater.*, 28 (3), 349-361, 2010.
 15. Altintas Y., *Manufacturing automation: metal cutting mechanics, machine tool vibrations, and CNC design*, 2nd ed. Newyork: Cambridge university press, Newyork, A.B.D., 2012.
 16. Semmler U., Bräunig M., Drossel W.G., Schmidt G., Wittstock V., Thermal deformations of cutting tools: measurement and numerical simulation, *Prod. Eng.*, 8(4), 1-8, 2014.
 17. Jackson M.J., Mills B., *Materials selection applied to vitrified alumina & CBN grinding wheels*, *J. Mater. Process. Technol.*, 108 (1), 114-124, 2000.

