

TALAŞ KALDIRMA İŞLEMLERİNDE KESİCİ TAKIM VE TALAŞ ARASINDA OLUŞAN SICAKLIK DAĞILIMININ SONLU FARKLAR METODU İLE ANALİZİ

H. Mehmet ŞAHİN, Adem ACIR
Gazi Üniversitesi, Teknik Eğitim Fakültesi, Makine Eğitimi Bölümü
06500 Teknikokullar, ANKARA

ÖZET

Kesme sıcaklığı, takım aşınması, yüzey kalitesi ve talaş oluşumunun kontrolünde önemli bir faktördür. Takım talaş ara yüzeyinde sıcaklık artışının belirlenmesi, en iyi kesme performansını sağlamak açısından önemli bir parametre olarak tanımlanır. Bu çalışmada, sürekli işleme halinde takım ve talaş ara yüzeyindeki sıcaklığı belirlemek için, sonlu farklar metoduna dayalı nümerik bir model seçilmiştir. Dik kesme işlemlerinde, sürekli kesme halinde takım talaş kesme yüzeyi temas bölgesinde, takım talaş arasında oluşan ısı transfer analizi yapılmıştır. Birinci bölgede oluşan kayma enerjisi, ikinci bölgedeki kesici yüzey ile talaş temas bölgesinde oluşan sürtünme enerjisi ve sabit haldeki kesici takım ve hareket halindeki talaş arasındaki ısı dengesi ele alınmıştır. Birinci ve ikinci bölgedeki sıcaklık dağılımı sonlu farklar metodunu kullanan FORTRAN dilinde bir bilgisayar programıyla çözülmüştür. Matematiksel model ve elde edilen simülasyon sonuçları literatürde belirtilen deneysel değerlerle kabul edilir derecede uyumludur.

Anahtar Kelimeler : Talaş kaldırma işlemi, takım-talaş ara yüzeyi, sonlu farklar metodu, sıcaklık dağılımı

ANALYSIS OF TEMPERATURE DISTRIBUTION BETWEEN TOOL AND CHIP IN METAL CUTTING OPERATIONS BY USING FINITE DIFFERENCE METHOD

ABSTRACT

Cutting temperature is a major factor in controlling the tool wear, surface quality and chip formation mechanics. To understand the exact temperature rise in the tool chip interface has been recognized as an important study in achieving the best cutting performance. In this paper, a numerical model based on the finite difference method is presented to predict the temperature between tool and chip interface in continuous machining process. Continuous or steady-state machining operations in orthogonal cutting are studied by modeling the heat transfer between the tool and chip at the tool rake face contact zone. The shear energy created in the primary zone, the friction energy produced at the rake face chip contact zone in the secondary zone and the heat balance between the moving chip and stationary tool are considered. The primary and secondary zone temperature distribution was solved by a computer program written in FORTRAN using finite difference method. The mathematical model and simulation results are satisfactory compared with experimental measurements reported in the literature.

Key Words : Machining, Tool-chip interface, finite difference method, temperature distribution,

1. GİRİŞ

Talaş kaldırma esnasında kesici takım ve iş parçası ara yüzeyinde, sürtünmeden dolayı yüksek sıcaklıklar meydana gelmekte ve kesiciyi doğrudan etkilemektedir. Bu sıcaklıklar; kesici takım ömrünü ve çalışma performansını etkilemekte, kesici takımlarda aşınma, çatlama, kırılma ve çeşitli deformasyonlar oluşturmaktadır. Takım talaş arasında sürtünmeden dolayı oluşan ısınma, işlenebilirlik değerlendirilmesinde temel kriterdir ve kesicinin işlevini tam olarak yerine getirememesine yol açmaktadır. Bu yüzden talaş kaldırma işlemleri sırasında, kesici takım ve işlenen malzemenin termal özellikleri, kesici takım ve iş parçası ara yüzeyindeki sıcaklık dağılımını önemli bir parametre olduğu için analiz edilmelidir. Kesme işlemi sırasında oluşan sıcaklıkların doğru şekilde sıcaklık ölçüm cihazları ile belirlemek oldukça zordur. Örneğin iş parçası ve kesici takım ara yüzeyine talaş

kaldırma anında ısı çifti (thermo couple) yerleştirmek imkansızdır. Bu nedenle oluşan sıcaklığın doğru şekilde belirlenmesi için nümerik çözümlene tekniği kullanılmaktadır. Bu çalışmanın amacı, sonlu farklar metodu kullanarak dikey talaş kaldırma işlemlerinde sıcaklık dağılımını tespit etmek ve analizini yapmaktır.

Aşınma oranının büyük ölçüde takım-talaş ara yüzeyinde oluşan ısıya bağlı olduğu gözlenmiştir. Sıcaklık, titanyum ve nikel tabanlı alaşımlar gibi ileri düzeydeki malzemelerin üretilmesi ve işlenebilirliğinde, kararlılık sonrasında kesme hızı ve ilerleme oranı gibi işlem parametrelerinin seçiminde dikkat edilmesi gereken en önemli unsurlardan biridir. Bu malzemelerin düşük ısı iletkenliğe sahip olmalarından dolayı, kesme anında ortaya çıkan ısının %10-20'lik kısmı takıma akar ve bu nedenle kesici takım üzerindeki mekanik gerilimin yanı sıra şiddetli ısı gerilimleri ortaya çıkar. Bu ısı

gerilimler; takım yorgunluğu, ısıl kırılma, aşınma yada talaş kaldırmadan dolayı ortaya çıkan hatalara bağımlı olarak artar. Diğer yandan ısı, kesici takım kristal yapısının bağlanma sınırlarını aşarsa takım malzemesinde kristaller arasındaki bağların hızla kaybolmasına ve sonucunda takım aşınmasına neden olmaktadır.

Taylor 1907 yılında kesme ısısı adı altında yapmış olduğu deneysel çalışması sonucunda kesme hızını artırmanın takım ömrünü azalttığını ispat etmiştir. Trigger ve Chao kesme ısını ilk kez analitik olarak değerlendirmişlerdir (1). Talaş kaldırma sırasında oluşan ısı üretimini hesaba katarak takım-talaş ara yüzeyinde oluşan ısıyı hesaplamışlar ve şu sonuca varmışlardır.

Takım-talaş ara yüzeyinde oluşan ısı iki unsurdan oluşmaktadır.

- Kayma bölgesindeki talaş oluşumu ile ilişkili olan plastik deformasyon.
- Temas bölgesi boyunca talaş ve takım yüzeyinde oluşan sürtünme.

Ren ve Altıntaş (2) yüksek hızda dikey tornalama işleminde kalıp çeliklerinin işlenmesinde CBN takımları kullanmışlardır. Gerilme oranı ve malzemenin ısıya bağlı gerilimini, ayrıca kesici takımlarda dikey kesmeden dolayı ortaya çıkan kesici takım talaş yüzeyi ve takım-talaş ara yüzeyinde oluşan sürtünmeyi incelemişlerdir. Takım yüzeyinde oluşan krater aşınmasıyla, takım-talaş sürtünme yüzeyinde oluşan maksimum ısı ile ilişkilendirilmiş ve kabul edilebilir takım ömür sınırı için uygun kesme hız sınırlarının tespit edilmesini sağlamışlardır. Smith ve Armarego (3) sonlu farklar metodunu kullanarak dikey kesme işlemlerinde oluşan sıcaklığı tahmin etmişlerdir.

Stepson et al (4) profil tornalamadaki sıcaklığın tahmini üzerine çalışmalar yapmışlardır. Redulescu ve Kapoor (5) önceden belirlenen ısı akısı ile birlikte ısı iletim denklemlerini kullanarak takım-talaş ara yüzeyinde oluşan sıcaklığı analiz etmişlerdir. Bu analizde; mekanik kuvvet modelinden faydalanmışlardır. Çalışma sonuçları doğrultusunda takım-talaş ara yüzeyi ısının kesme hızına bağlı olarak arttığını ortaya koymuşlardır.

Lazoğlu ve Altıntaş (6) çalışmalarında sürekli ve süreksiz talaş kaldırma işlemlerinde meydana gelen, kararlı haldeki sıcaklık dağılımın tahmin edilmesi için sonlu farklar metodu kullanılmıştır. Termodinamiğin birinci kanuna dayalı ola-

rak, silindirik koordinatlardaki takım ve düzlemsel koordinatlardaki talaş için kısmi diferansiyel denklemi biçiminde ısı denge denklemleri belirlenmiştir. Frezeleme işlemlerindeki geçici ısı değişimlerini tespit edebilmek amacıyla talaş kalınlığının zamanla değişimini göz ardı etmişlerdir. Isıl nitelikler ve sınır koşullarına bağlı olarak her işlem aralığı için, kararlı haldeki talaş ve takım ısı alanları belirlenmişlerdir. Zamana ve kararlı haldeki ısı bilgisine dayalı olarak geçici sıcaklık değişimlerini belirlemek için bir algoritma geliştirilmiş ve literatürde belirtilen verilerle karşılaştırmışlardır.

Nedelik ve Lux (7) metal kesme işlemi sırasında kaplama yapılmış çeşitli takımlarda oluşan sıcaklık dağılımı için FEM/ANSYS programını kullanarak termal bir model geliştirmişlerdir. Kaplama işleminin; metal kesme takımlarında yüzey sıcaklıklarında etkili olduğu sonucuna varmışlardır. Soğutma sıvısı kullanmadan kesme hızını artırmayı başarmışlardır. Talaş kaldırma işleminde kesici takım kenarında yüksek sıcaklıklar oluşmaktadır. Mekanik kuvvet, kesme koşullarına bağlı olarak (hız, ilerleme, kesme derinliği) yüksek oranda ısıya dönüşmekte, ısı oluşumu takım malzemesi ve geometrisine bağlı olduğu kadar işlenen malzemeye de bağlı olmaktadır. Genel olarak ısı artışının, takım-talaş yüzeyi ve talaş kayma bölgesinde olduğu, oluşan sıcaklıkla aşınmanın arttığı ve takım ömrünün azaldığı gözlemlenmiştir.

Q'Sullivan (8), işlenebilirlikte oluşan takım-talaş arasındaki sıcaklığın, takım malzemesi ve iş parçasının niteliklerine bağımlı olarak sonuçlandırıldığını, takım aşınmasında önemli bir rol oynadığını deneysel olarak gözlemiştir. Bu çalışmada kesici takım kuvvet bileşenleri tanımlanarak kuvvet sonucu oluşan enerji, takım-talaş ve iş parçası malzemesine bağımlı olarak ısıya dönüştüğü ve takım aşınmasının kesme kuvvetleri ile bağlantılı olduğu belirtilmiştir. Yapılan çalışmada deney için kuvvet ve sıcaklık ölçümü simülasyonu yapılmıştır. Bu deneyde gömme ısıl çift ve kızıl ötesi termal kamera kullanılmıştır.

Chen et al. (9), kesici takım talaş yüzeyinde oluşan ısının tahmini için bir model geliştirmiştir. Bu çalışmada talaş kaldırma esnasında kesici takım talaş yüzeyinde oluşan ısı ve sıcaklık dağılımı 3 boyutlu olarak ısı transferi analizi yapılmıştır. Geliştirilen bu model, sadece kesici takımda oluşan ısı akısı ve aynı zamanda takım-talaş ara yüzeyinde oluşan sıcaklığın tahmininde kullanılmıştır.

Liu et al. (10), Si_3N_4 ve $\text{Ti}(\text{CN})$ seramik kesici takımlardaki talaş kaldırma işlemi sırasında oluşan ısı üretimini farklı malzemelerde incelenmesi amacıyla bilgisayar simülasyonu ve hesaplama işlemi yapan bir program geliştirmişlerdir. Yapılan bu çalışmada, ayrıca termal video sistemi ile deneysel ölçümler yapılmış, ve sonuçlar simülasyon ve hesaplamalar ile karşılaştırılmıştır.

Ay ve Yang (11), dikey kesmede iş parçası ve takım arasında oluşan ısıyı hem ısı çift hem de kızıl ötesi kamera kullanarak deneysel bir çalışma ile belirlemişlerdir. Kesme anında oluşan ısının takım talaş ve takım ve iş parçası yüzeyinde aşınmaya neden olduğu ve ayrıca iş parçası üzerinde istenen yüzey kalitesinin elde edilemediğini gözlemişlerdir.

Komanduri ve Hou (12,13,14) metal kesme işlemlerinde termal modelleme işlemlerini bölümler halinde incelemiştir. İlk çalışmada kayma düzlemi boyunca ısı kaynağında artan sıcaklık dağılımı ele alınmıştır. İkinci çalışmada takım-talaş arasındaki sürtünmeden dolayı oluşan sıcaklık dağılımı ve son çalışmada kayma düzlemi boyunca ısı kaynağında artan sıcaklık dağılımı ve takım-talaş arasındaki sürtünmeden dolayı oluşan sıcaklık dağılımları incelenmiştir.

Kwon et al. (15) tornalama işlemi süresince, sürekli halde takım ve talaş arasında oluşan ısının ortalama değerinin ölçümü için yeni bir teknik geliştirmişlerdir. Bu çalışmada IF (infrared) video kamera kullanılmış ve bu cihaz tezgahta gezer yatak üzerine monte edilmiş, talaş kaldırma işlemi sırasında ilerleme oranına bağlı olarak takım-talaş ara yüzeyinde oluşan sıcaklık dağılımı ölçülmüştür. Deneysel olarak geçici sıcaklık dağılımı ile birlikte, bir boyutlu elipsoid model, işlenebilirlik süresince takım-talaş arasındaki sürekli rejim halinde sıcaklık dağılımının hesaplanmasında kullanılmıştır. Çeşitli kesme koşulları altında kaplama yapılmış ve yapılmamış olan sementit karbür takımlarla GCI ve AISI 1045 çeliği tornalanmıştır.

2. TALAŞ KALDIRMA ESNASINDA OLUŞAN ISI VE SICAKLIK DAĞILIMININ MODELLENMESİ

Talaş kaldırmak için uygulanan kuvvetlerden oluşan mekanik enerjinin büyük bir kısmı ısıya dönüşür. Kesici takım-talaş ara yüzeyi ve takım-iş parçası arasında talaş kaldırmak için harcanan enerjiden dolayı kesici takım üzerinde yüksek sı-

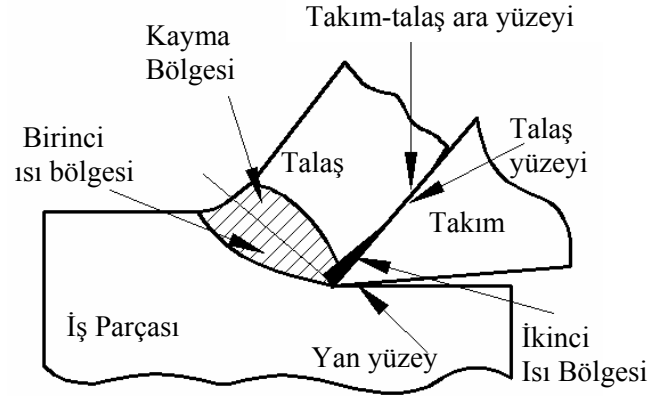
caklıklar meydana gelir. Bu sebeple kesme bölgesinde oluşan ısı ve sıcaklık talaş kaldırma işlemi sırasında önemli bir faktördür. Bu faktör kesici takım performansını ve iş parçası yüzey kalitesi açısından önemlidir. Yüksek sıcaklıklar; öncelikle yüksek kesme hızlarında sınırlamalara ve takım ömrünün azalmasına sebep olur (16).

Talaş kaldırma işleminde kesici takımla iş parçasında oluşan sürtünmeden dolayı oluşan sıcaklık, takım aşınmasında, iş parçası ve kesici takım malzeme özelliklerine bağlı olarak büyük rol oynar. Genel olarak çevresel etki, kesme hızı, ilerleme oranı, takım geometrisi gibi faktörlerin işlenebilirlik sıcaklığını artırdığı ve takım aşınmasına neden olduğu bilinmektedir.

Talaş kaldırma işleminde ısı oluşumu üç bölgeye ayrılmaktadır. Bunlar;

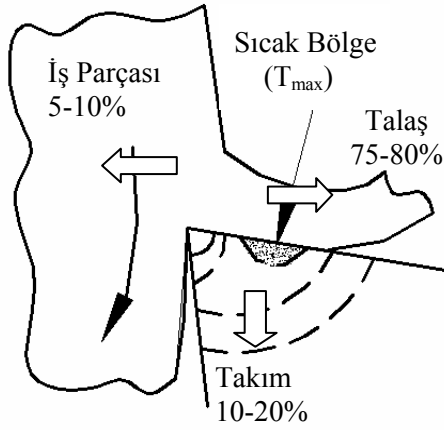
- Kayma bölgesi,
- Takım-Talaş ara yüzeyi temas bölgesi,

Takım-İş parçası ara yüzeyi (Kesici kenarın serbest yüzeyi)



Şekil-1: Talaş kaldırma işleminde oluşan ısı üretim bölgelerinin gösterilmesi (8,16)

Kesme bölgesinde, iş parçası ve takım arasında talaş oluşumu sırasında sürtünmeden dolayı kesme işlemi süresince ısı üretimi olmaktadır. Kesme işlemi sırasında oluşan ısı dağılımı ve ısı üretimi Şekil-1'de gösterilmiştir. Birinci ısı bölgesinde kesme işlemi süresince takım, kayma bölgesinde çok fazla ısı üretimine neden olmakta ve ısının bir kısmı iş parçası içine yayılırken, geri kalan kısmı ise çıkan talaşla uzaklaştırılmaktadır.



Şekil-2: Metal işlemede oluşan ısı dağılımı ve sıcaklık bölgesi (7)

Şekil-2'de gösterildiği gibi ikinci ısı bölgesinde, kesici takım ile işlenen malzeme temas yüzeyinde maksimum sıcaklık (T_{max}) vardır. Bu sebeple, takım ve talaş arasındaki oluşan ısı, takımın performansını ve işlenen malzemenin yüzey kalitesini etkilemektedir. Kayma bölgesinde, oluşan sürtünme, işlenen malzemenin mekanik özelliklerine tesir etmekte ve takım, talaş-takım ve iş parçası temas alanında meydana gelen ısıdan dolayı takım aşınmasına neden olmaktadır (8). Oluşan bu ısı (%75-80) talaş tarafından kesme bölgesinden uzaklaştırılmakta ve sadece (%5-10)'luk ısı akışı iş parçasına ve yaklaşık (%10-20)'lik üretilen ısı takım üzerine nüfuz etmektedir (8,16).

Takım talaş arasındaki sürtünme, kesici takım yüzeyinde yüksek sıcaklık dağılımına neden olmaktadır. Şekil 2'de gösterilen, kesici takım yüzeyindeki, talaşın ayrılma noktasındaki küçük bölge sıcak bölge olarak isimlendirilmektedir. Kesici takım yüzeyinde oluşan bu sıcak bölge takım ömrünü ve kesme performansını etkileyen önemli bir faktör olup, kesici takımlarda aşınma, çatlama, kırılma ve çeşitli deformasyonlar oluşturmaktadır. Kesme anında oluşan termal özellikler, takım ömrü ve aşınma ile sonuçlanacağından son derece önemlidir (10).

Isı dağılımının miktarı, işlenen malzemenin tipine bağlı olarak değişir. Süper alaşımların (HSTR) işlenmesinden alüminyum işlenmesine kadar değişen kesme hızları ısı oluşumunda oldukça önemli rol oynar. Kesme hızının artmasıyla, takım yüzey sıcaklığı hızla artmaktadır. Takım ucunda oluşan sıcaklık kullanılan kesici malzemenin sıcaklık dayanımını geçmemelidir. Aksi halde sertlik ve mukavemet değerleri düşerek malzemenin kesici özelliği kaybolmaktadır. Isı oluşumunda

kesme hızı daha fazla etkiye sahip iken, ilerleme ise daha az etkilemektedir.

2.1 Talaş Kaldırma Esnasında Oluşan Isı Üretimi

Kesilen talaş derinliği başına kesici takım-talaş içerisinde birinci ve ikinci bölgelerde üretilen ısı miktarı, Şekil-3'de gösterilen bir çok parametreye bağlı olarak değişmektedir.

Burada, F_s , kayma kuvvetidir. F_f , bu kuvvetin etkisiyle takım talaş ara yüzeyinde meydana gelen sürtünme kuvveti, V kesme hızı, V_s kesici takım ilerleme hızı ve V_c talaş akış hızlarıdır. Şekil-1'de gösterilen birinci ve ikinci bölgelerdeki üretilen ısı, kesme bölgesindeki kayma gerilmesi (τ), kayma açısı (ϕ_c), kesici takımın talaş açısı (α_r) ve sürtünme açısına (β_a) bağlı olarak da aşağıdaki (1) ve (2) nolu formüllerle belirlenebilir (6).

$$\dot{Q}_s = F_s V_s = \frac{\tau_s b h V \cos(\alpha_r)}{\sin(\phi_c) \cos(\phi_c - \alpha_r)} \quad (1)$$

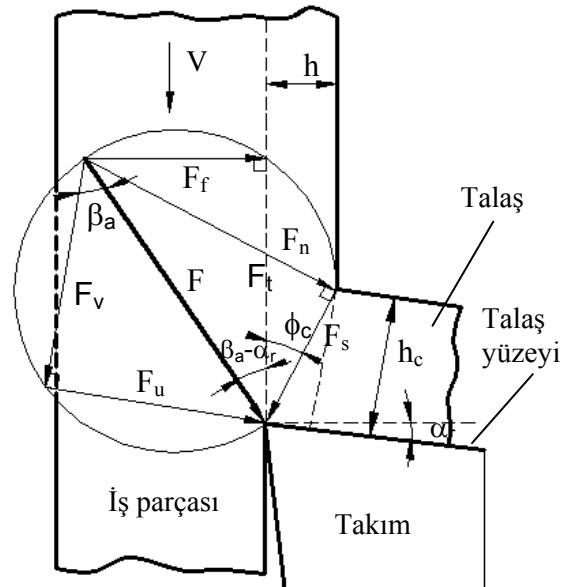
Bu eşitlikte,

$$F_s = \tau_s b \frac{h}{\sin \phi_c}, \quad V_s = V \frac{\cos \alpha_r}{\cos(\phi_c - \alpha_r)},$$

$$\tau_s = \frac{F_s}{A_s} \text{ ve } A_s = b \frac{h}{\sin \phi_c} \text{ olarak alınır.}$$

$$\dot{Q}_f = F_f V_c = \frac{\tau b h V \sin(\beta_n)}{\cos(\phi_n + \beta_n - \alpha_n) \cos(\phi_n - \alpha_n)} \quad (2)$$

$$V_c = r_c V = \frac{\sin \phi_c}{\cos(\phi_c - \alpha_r)} V$$



Şekil-3: Kesme kuvvet diyagramı (19)

$$Q_s = \dot{m}_c (T_s - T_\infty), \dot{m}_c = \rho b h V \text{ (kg/s)}$$

Kesme derinliği başına, kesici takım içerisinde ortalama sıcaklık artışı $\Delta \bar{T} = (T_s - T_\infty)$ aşağıda Oxley'in eşitliği ile verilmektedir [17].

$$\Delta \bar{T} = \dot{Q}_s \frac{(1-\psi)}{\rho c_s b h V} \quad (3)$$

Bu eşitlikte; \dot{Q}_s kesilen talaş derinliği başına birinci bölgede üretilen ısı miktarı, ψ termal sayısına (R_t) ve kayma açısına (ϕ_c) bağlı olarak belirlenen boyutsuz değer, ρ (kg/m^3), yoğunluk, c_s (J/kgK), özgül ısı kapasitesi, anlık kesilmemiş talaş kalınlığı $h=s.\sin(\theta)$ ve k_s (W/mK) kesilen talaşın iletkenlik katsayısıdır.

$$\psi = 0.5 - 0.35 \log_{10}(R_t \tan(\phi_c))$$

$$0.004 \leq R_t \tan(\phi_c) \leq 10$$

$$\psi = 0.3 - 0.15 \log_{10}(R_t \tan(\phi_c))$$

$$R_t \tan(\phi_c) \geq 10$$

Termal sayısı: $R_t = \frac{hV}{\alpha}$, ısı yayılım katsayısı:

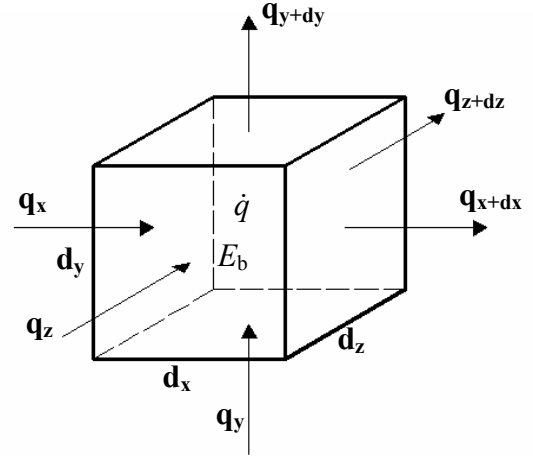
$$\alpha = \frac{k_s}{\rho c_s} \text{ (m}^2/\text{s)}$$

2.3. Isı İletim Genel Denklemine Elde Edilmesi

Şekil-4'de birim hacimdeki ($dV = dx dy dz$) bir düzlemsel diferansiyel kontrol hacim elemanı gösterilmektedir. Kontrol hacmine, birim zamanda enerjinin korunumu kanunu uygulanırsa; birim hacim ve birim zamanda: *sisteme giren enerji + sistemden çıkan enerji + sistemde üretilen enerji = sistemde biriken enerji* şeklinde bir eşitlik yazılabilir.

$$A_x \cdot q_x + A_y \cdot q_y + A_z \cdot q_z - A_x \cdot q_{x+dx} - A_y \cdot q_{y+dy} - A_z \cdot q_{z+dz} + \dot{q} dxdydz = E_b \cdot dxdydz \quad (4)$$

Bu (4) numaralı eşitlikte x , y ve z koordinatları için sırayla alanlar; $A_x = dy \cdot dz$, $A_y = dx \cdot dz$, $A_z = dx \cdot dy$, Fourier ısı iletim denklemini; $q_x = -k \frac{\partial T}{\partial x}$, $q_y = -k \frac{\partial T}{\partial y}$, $q_z = -k \frac{\partial T}{\partial z}$ ve biriken enerji; $E_b = \rho \cdot c_s \frac{\partial T}{\partial t}$ olarak yazılır.



Şekil-4: Düzlemsel eksenlerde dV diferansiyel kontrol hacmi

q_{x+dx} , q_{y+dy} ve q_{z+dz} için Taylor seri açılımının ilk iki terimini göz önüne alınıp yüksek mertebelerdeki terimleri ihmal edilirse;

$$q_{x+dx} \approx q_x + \frac{\partial q_x}{\partial x} dx, \quad q_{y+dy} \approx q_y + \frac{\partial q_y}{\partial y} dy \quad \text{ve}$$

$$q_{z+dz} \approx q_z + \frac{\partial q_z}{\partial z} dz \quad \text{şeklinde ifadeler yazılabilir.}$$

Bu değerleri eşitlik (4)'de yerlerine yazılırsa aşağıdaki eşitlik (5)'de verilen Isı İletiminin Genel denklemi elde edilir.

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{\dot{q}}{k} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} \quad \text{veya Laplace operatörü ile de } \frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \nabla^2 T + \frac{\dot{q}}{\rho c} \quad (5)$$

şeklinde yazılabilir. Bu eşitlikte, \dot{q} (W/m^3) birim hacimde birim zamanda üretilen ısıdır.

3. SÜREKLİ REJİM HALİNDE SICAKLIK DAĞILIMININ SONLU FARKLAR METODU İLE MODELLENMESİ

İki boyutlu ısı iletimi problemlerinde kullanılan ikinci dereceden kısmi diferansiyel eşitliklerin çözümlerinde analitik yöntemler kullanılabilir. Analitik çözüm genelde basit geometriler ve sınır şartları için uygundur. Ancak, iki boyutlu problemlerin analitik çözümlerinde geometri ve sınır şartlarından dolayı sonuca ulaşılması imkansız hale gelebilir. Bu gibi durumlarda en iyi çözüm; sonlu farklar, sonlu-elemanlar ve sınır-elemanlar gibi sayısal yöntemlerinden birini kullanmaktır. Sonlu-

Farklar Yöntemi, ısı transferi uygulamadaki kolaylıklar nedeniyle ve sayısal yöntemlerin en kolay şekli olmasından dolayı tercih edilmektedir. Bu çalışmada, sonlu farklar yöntemi kullanılmıştır.

Hareket Halindeki Talaş Üzerinde Sıcaklık Modeli: Birim talaş derinliği başına, yani kesilen talaş derinliğini $dz = 1$ birim olarak alındığında, kaldırılan talaşı iki boyutlu bir düzlem şeklinde düşünüp aşağıdaki eşitlik yazılabilir.

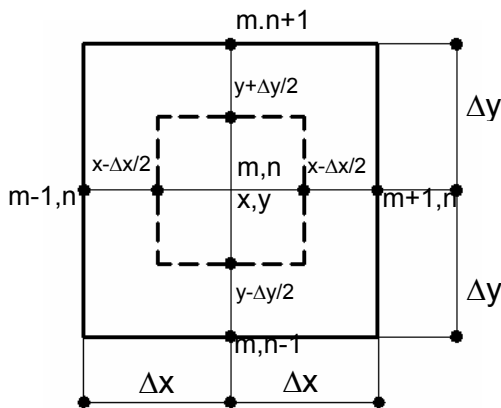
$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\dot{q}_s}{k} = \frac{\rho \cdot c_c}{k} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (6)$$

Yukarıdaki eşitlikte talaş hareket halinde olduğu için $\frac{\partial T}{\partial t}$ yerine $V_c \frac{\partial T}{\partial x}$ değeri yazılabilir, burada V_c talaş akış hızıdır. Böylece eşitlik aşağıdaki şeklini alır.

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\dot{q}}{k} = \frac{\rho \cdot c}{k} \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\rho \cdot c}{k} V_c \frac{\partial T}{\partial x} \quad (7)$$

Sonlu farklar, $x = x_0$ ve $y = y_0$ noktasında $F(x, y)$ fonksiyonunun türevi ile tanımlanır (20).

Sonlu Farklar Yönteminde referans noktası genelde düğüm noktası olarak adlandırılır ve bu noktaların tümüne ağ denir. Analitik çözümde bir bölgenin tümünde sıcaklık belirlenirken, sayısal çözümde sıcaklık sadece belirlenen düğüm noktalarında bulunur. Sayısal çözümün hassaslığı seçilen düğüm noktalarının sayısına bağlıdır ve bu sayı ne kadar büyükse (aralıklar o kadar sıktır) çözümde o kadar hassastır. Şekil-5’de iki boyutlu çözümler için numaralandırılmış düğüm noktaları görülmektedir ve düğüm noktalarının x ve y koordinatları, sırayla m ve n indisleri ile gösterilmektedir.



Şekil-5: İki boyutlu ısı iletimi için sonlu fark yaklaşım ağı (20, 21).

(11) ve (12) nolu eşitlikler (7) denkleminde yerlerine konursa;

$$\frac{T_{(m+1,n)} + T_{(m-1,n)} - 2T_{(m,n)}}{(\Delta x)^2} + \frac{T_{(m,n+1)} + T_{(m,n-1)} - 2T_{(m,n)}}{(\Delta y)^2} + \frac{\dot{q}_{(x,y)}}{k} = \frac{\rho \cdot c}{k} V_c \frac{\partial T_{(m,n)}}{\partial x} \quad (13)$$

(13) numaralı eşitlik elde edilir. Burada, $\Delta x = \Delta y$

$$\text{alınır ve } \frac{\partial T_{(m,n)}}{\partial x} = \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{m,n} \approx \frac{T_{m+1,n} - T_{m-1,n}}{2\Delta x}$$

değerleri ile denklem düzenlenirse;

$$T_{m,n+1} + T_{m,n-1} + (1-\varphi)T_{m+1,n} + (1+\varphi)T_{m-1,n} - 4T_{m,n} + \frac{\dot{q}_s}{k} (\Delta x)^2 = 0 \quad (14)$$

(14) numaralı eşitlik elde edilir.

Böylece m, n noktası için gerçekte bir diferansiyel denklem olan (7) numaralı ısı denklemi, yaklaşık olarak cebirsel eşitliğe indirgenir. Burada; \dot{q}_s birinci bölgede, birim zamanda birim hacimde

$$\text{üretilen ısı ve } \varphi = \frac{\Delta x V_c}{2 \alpha}, \text{ dir.}$$

Takım Üzerindeki Sıcaklık Modeli: Kesici takım üzerindeki sıcaklık dağılımında, kaldırılan talaştaki modelde olduğu gibi düzlem yüzeylerde ısı iletiminin genel denklemi benzer olarak uygulanırsa

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{\dot{q}_f}{k} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t}$$

Sürekli rejim hali ve iki boyutlu düzlem için bu denklem

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\dot{q}_f}{k} = 0 \quad (15)$$

şeklinde yazabilir. Benzer şekilde, diferansiyel bir denklem olan (15) numaralı ısı iletimi denklemi cebirsel eşitliğe indirgenir.

$$T_{m,n+1} + T_{m,n-1} + T_{m+1,n} + T_{m-1,n} - 4T_{m,n} + \frac{\dot{q}_f}{k} (\Delta x)^2 = 0 \quad (16)$$

Burada; \dot{q}_f : ikinci bölgede birim zamanda birim hacimde üretilen ısıdır. Özellikle ikinci bölgede üretilen ısının bir kısmı talaş üzerinde kalırken geriye kalan kısmı da takım üzerinde sıcaklığın artmasına sebep olmaktadır. Bu bölgede üretilen ısının hangi miktarının takım üzerinde kaldığını doğru belirlemek son derece önemlidir. Eşitlik (3)’de verilen Oxley bağıntısı ile ısı oranını belir-

lendikten sonra sıcaklık dağılımını elde etmek oldukça kolay olacaktır.

Sınır Şartları:

i). $x_0 = 0.333$ mm'de talaş kırılma noktasındaki bilinen sıcaklık $T_0 = 240^\circ\text{C}$,

$$T_{(x,y)} = T_0 \quad x = x_0 \quad \text{ve} \quad y = 0$$

ii). $-k_c \frac{\partial T}{\partial n} = -k_t \frac{\partial T}{\partial n}$ takım-talaş ara yüzeyinde,

iii). $\frac{\partial T}{\partial n} = 0$ takım ve talaş ile hava temas yüzeylerinde olarak alınmıştır.

Linear Denklem Takımının Çözüm Metodu: Kısmi diferansiyel bir eşitlik olan ısı denklemi sonlu farklar yöntemi ile cebirsel eşitliğe dönüştürülür (Eşitlik 14,16). Daha sonra probleme uygun yukarıda belirttiğimiz sınır şartlarının yardımıyla elde ettiğimiz lineer denklem takımlarını katsayılar matrisi şeklinde yazılır. Lineer denklem takımının çözümünde kullanılan direkt metotlardan biri olan Gauss Eliminasyon Metodu yardımıyla sonuçlara ulaşılır.

$$[A]. \{T\} = \{B\} \quad (17)$$

Burada, [A] bilinen katsayılar veya köşegenler matrisidir, {T} bilinmeyen talaş veya takım için sıcaklık değeridir ve {B} birinci ve ikinci bölgede üretilen ısı miktarıdır ve bilinmektedir.

4. PROBLEMİN TANIMI VE NÜMERİK SONUÇLAR

Kesici takım üzerine etki eden kuvvetler, talaş kaldırmanın önemli bir safhasını oluşturmaktadır. Talaş kaldırma işlemlerinde kesme kuvvetlerinin, takım ve talaş arasındaki temas uzunluğu ile ilgili olduğu bilinmektedir. Takım-talaş ara yüzeyinde, kesme işlemi sırasında etki eden kuvvetler sonucu, sürtünmeden dolayı temas bölgesi boyunca büyük oranda takım aşınmasına neden olan ısı oluşmaktadır. Takım aşınmasında belirleyici olan maksimum sıcaklığın ve sıcaklık dağılımının iyi bilinmesi gerekmektedir. Bu konuda bugüne kadar bir çok çalışma yapılmıştır. Genellikle, talaş kaldırma esnasında oluşan ısıyı ölçmek için deneysel çalışmalar yapılmaktadır. Ancak takım-talaş ara yüzeyinde oluşan ısıyı ve sıcaklık dağılımını hassas bir şekilde ölçerek belirlemek son derece önemlidir. Talaş kaldırma işlemlerinde özellikle kayma bölgesinde ve takım-talaş ara yüzeyinde

sıcaklık çok yüksektir. Burada kaldırılan talaş kalınlığı oldukça küçük olmasından ve sürekli olarak hava ile temas ederek akış halinde olduğundan burada oluşan sıcaklık dağılımının gerçeği yansıtacak şekilde ölçülmesi oldukça zordur.

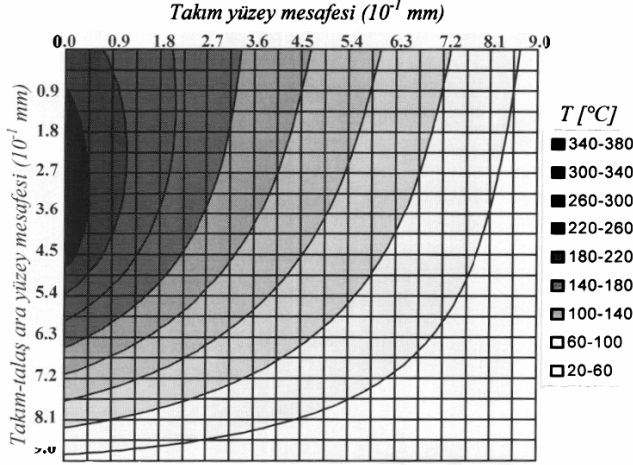
Bu çalışmada, sonlu farklar metodu kullanılarak takım-talaş ara yüzeyinde sıcaklık dağılımının hesaplanması yapılmıştır. Bu nümerik çözümleme metodu için, FORTRAN dilinde bir bilgisayar programı geliştirilmiştir. Geliştirilen program ile, takım ve talaş arasında oluşan sıcaklık dağılımı, belirtilen kesme koşullarına dayalı olarak çözümleme yapılmaktadır. Daha sonraki çalışmalar için ve yapılacak deneysel çalışmalar da bu bilgisayar programı ile sıcaklık tahmini yapılabilecektir. Bu çalışmada, nümerik çözümleme metodu yardımıyla, literatürde yapılmış deneysel çalışmalarla elde edilen sonuçlar değerlendirilmiş ve karşılaştırmalar yapılmıştır. Çizelge-1'de verilen daha önce deneysel olarak yapılmış çalışmanın kesme koşullarına bağlı olarak sıcaklık dağılımı nümerik olarak hesaplanmıştır.

Çizelge-1: Stepson ve Ali tarafından yapılan deneydeki kesme koşulları (18)

Model	V	f	F _s	F _f	t ₂
	m/s	mm	N	N	mm
1	1.36	0.165	573	329	0.333
2	1.36	0.109	393	238	0.262
3	1.36	0.165	479	250	0.315

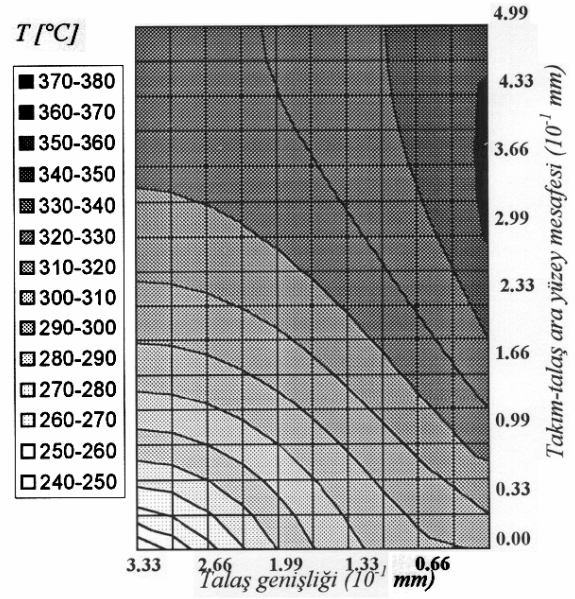
Stepson ve Ali (18) takım ve talaş için ısı çift yöntemi kullanarak, Çizelge-1'de verilen model 1, 2 ve 3, Al2024-T351 malzemesi için sürekli (model 1) ve süreksiz (model 2 ve 3) tornalama işlemlerini yaparak sıcaklığı ölçmüşlerdir. Yaptıkları çalışmada, standart C2WC kesici takımını seçilmiştir. Yaptıkları deneysel çalışmada sürekli talaş kaldırma işlemi yaparak, ortalama sıcaklık yükselmesini 280°C ölçmüşlerdir. Yapılan bu çalışmada (model 1), kesme hızı, devir başına ilerleme, kesme kuvveti, ilerleme kuvveti ve kesilen talaş kalınlığı 1.36 m/s, 0.165 mm/dev, 573 N, 329 N ve 0.333 mm olarak alınmıştır. Kesme genişliği 2.54 mm ve talaş açısı sıfır seçilmiştir. Stepson ve Ali (18) tarafından daha önceki yapılan deneysel çalışmalarda, takım-talaş temas bölgesinin uzunluğunu kaldırılan talaş kalınlığının 1.5 katı olarak almıştır. Deneysel çalışma şartlarına bağlı kalınarak (model 1), yapılan nümerik çözümleme işleminde, iş parçasının (Al2024-T351 malzemesi) iletimi, yoğunluk ve ısı kapasitesi sırayla 177 W/mK, 2700 kg/m³, 613 J/kgK olarak alınmıştır.

Kesici takımın ise iletimi, yoğunluğu ve termal kapasitesi 28.4 W/mK , 11100 kg/m^3 , 276 J/kgK olarak alınmıştır. Kayma açısı, 26.4° ve sürtünme açısı ise 29.8° olarak alınmış ve bu koşullarda, kayma düzlemi boyunca artan sıcaklık değeri, denklem (3)'den $\Delta T = T_s - T_\infty = 220^\circ\text{C}$ olarak bulunmuştur.



Şekil-6: Kesici takım düzlem yüzeyinde sıcaklık dağılımı

Belirtilen kesme parametrelerine göre çözümleme işlemi yapılmış ve sürekli kesme işlemi için (model 1) takım-talaş temas yüzeyinde oluşan sıcaklık dağılımı, Şekil-6 ve Şekil-7'de verilmiştir. Bu modelde takım-talaş temas uzunluğu 0.525 mm olup, Şekil-6'da gösterildiği gibi temas bölgesinde kesici takımında oluşan maksimum sıcaklık değeri, kesici takım kenarından yaklaşık 0.36 mm ileride ve 372°C olarak bulunmuştur. Şekil-6'daki kesici takım düzlem yüzeyinde, talaşla temas halinde olmayan bölgelere doğru sıcaklık dağılımı da sıcaklığına doğru azaldığı görülmektedir. Şekil-7'de akış halinde olan talaşta meydana gelen sıcaklık dağılımı görülmektedir. Talaşın, iş parçası kopma noktasının dış yüzeyindeki sıcaklık 240°C 'dir. Birinci ve ikinci bölgedeki ısı üretiminden dolayı, 0.0 noktasında 323°C , takım-talaş ara yüzey mesafesi 0.36 mm 'de maksimum sıcaklık 372°C bulundu. Hem takım, hem de talaş yüzeyinde elde edilen sıcaklık değerleri, Stepson ve Ali'nin yaptıkları deneyde ölçtükleri sıcaklık değerleri ile oldukça yakın ve kabul edilebilir mertebede olmuştur (6,18).



Şekil-7: Talaş yüzeyinde oluşan sıcaklık dağılımı

5. SONUÇ

Talaş kaldırma işlemleri süresince termal özellikler, takım ömrü ve aşınması açısından önemlidir. Kesme işleminde oluşan yüksek sıcaklıklar takımı ve iş parçası yüzey kalitesini etkilemektedir. Mekanik kuvvetler sonucu oluşan ısı, kesme koşullarına bağlıdır. Takımlarda termal yüke neden olacak kesme hızı, ilerleme oranı ve takım talaş ve boşluk açısından kaçınılmalıdır. Talaş kayma bölgesi ve takım talaş yüzeyinde sürtünmeden dolayı ısı üretimi olmakta ve bunun sonucu olarak takım aşınması artırmakta, takım ömrü de azaltmaktadır.

Bu çalışmada termodinamiğin birinci kanunundan başlayarak, Fourier ısı iletim denklemi yardımıyla iki boyutlu sürekli talaş kaldırma işlemlerinde takım ve talaş arasında oluşan sıcaklık dağılımı için sonlu farklar metoduna dayalı nümerik çözümleme yapılmıştır. Isı denge denklemleri, takım ve talaş için kısmi diferansiyel denklemler biçiminde belirtilmiştir, rejim halindeki takım talaş bölgesinde oluşan sıcaklığın çözümü için sonlu farklar metodu kullanılmıştır. Rejim halinde birinci ve ikinci bölgede ısının tahmini dağılımı elde edilerek, takım ve talaş yüzeyinde oluşan sıcaklık dağılımının simülasyonu elde edilmiştir. Yapılan bu çalışmada elde edilen sonuçların, literatürdeki deneylerde ölçülen değerlerle benzerlik gösterdiği tespit edilmiştir.

6. KAYNAKLAR

1. Trigger, K.J., Chao, B.T., An Analytical Evaluation of Metal cutting Temperatures, Transactions of ASME ,73, 57-68,1951.
2. Ren, H., Altıntaş, Y., Mechanics of machining with chamfered tools, Trans. ASME, Journal of Manufacturing and Engineering and Science, 122, 650–659, 2000.
3. Smith, A.J.R., Armarego, J.A., Temperature prediction in orthogonal cutting with a finite difference approach, Annals of CIRP, 1981.
4. Stephenson, D.A., Jen, T.C., Lavine, A.S., Cutting tool temperatures in contour turning: transient analysis and experimental verification, ASME, Journal of Manufacturing Science and Engineering, 119, 494–501, 1997.
5. Radulescu, R., Kapoor, S.G., An analytical model for prediction of tool temperature Fields during continuous and interrupted cutting, Transactions of ASME, Journal of Engineering for Industry, 116, 135–140, 1994.
6. Lazoğlu, İ., Altıntaş, Y., Prediction of tool and chip temperature in continuous and interrupted machining, International Journal of Machine tools and manufacture, 42, 1011-1022, 2002.
7. Nedelik, J., Lux, B., Improved tool performance by application of head spreading diamond layers within a multi-layer coating, International Journal of Refractory Metals and Hard materials, 17, 275-282, 1999.
8. Q'Sullivan, D., Cotterell, M., Temperature Measurement in single point turning, Journal of materials Processing Technology, 118, 301-308, 2001.
9. Chen, W.C., Tsao, C.C., Liang P.W., Determination of temperature distributions on the rake face of cutting tools using a remote method, Int. Comm. Heat Mass Transfer, 24-2, 161-170, 1997.
10. Liu, Y.R., Liu, J.J., Zhu, B.L., Luo, Z.B., Miao, H.Z., The computer simulation of the temperature distribution on the surface of ceramic cutting tools, Wear, 210, 39-44, 1997.
11. Ay, H., Yang, W.J., Heat transfer and Life of metal cutting tools in turning, Int.J. Heat Mass transfer 41-3, 613-623,
12. Komanduri, R., Hou, Z.B., Thermal modelling of the metal cutting process Part 1: Temperature rise distribution due to shear plane heat source, International Journal of Mechanical Sciences, 42, 1715-1752, 2000.
13. Komanduri, R., Hou, Z.B., Thermal modelling of the metal cutting process Part III: Temperature rise distribution due to the combined effects of shear plane heat source and tool chip interface frictional heat source, International Journal of Mechanical Sciences, 43, 89-107, 2001.
14. Komanduri, R., Hou, Z.B., Thermal modelling of the metal cutting process Part II: Temperature rise distribution due to frictional heat source at the tool chip interface, International Journal of Mechanical Sciences, 43, 57-88, 2001.
15. Kwon, P., Schiemann, T., Kountanya, R., An inverse estimation scheme to measure steady-state tool-chip interface temperatures using an infrared camera, International Journal of Machine Tools & Manufacture, 41, 1015–1030, 2001.
16. Modern Metal Cutting, A practical handbook, Sandvik Coromant, 1994.
17. Oxley, P.L.B., Mechanics of Machining: An Analytical Approach to Assessing Machinability, John Wiley & Sons, New York, USA, 1989.
18. Stephenson, D. A., Ali, A, Tool Temperatures in Interrupted Metal Cutting, Journal of Engineering for Industry, 114, 127-136, 1992.
19. Altıntaş, Y., Manufacturing Automation, Cambridge University Press, 2000.
20. Özişik, M. N., Finite Difference Methods in Heat Transfer, Mechanical and Aerospace Engineering Department, North Carolina State University, 1994.
21. Incropera, F., P., Dewitt, D., P., Fundamentals of Heat and Mass Transfer, Purdue University, School of Mechanical Engineering, John Wiley&Sons, 1996.