

# HAREKETLİ ISI KAYNAĞI İLE BİR YÜZEYİNDEN ISITILAN PLAKADA SICAKLIK VE TERMAL GERİLME DAĞILIMLARI

**Gülşah ÖZİŞİK ve M. Serdar GENÇ\***

Erciyes Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, 38039 Kayseri, [gulsah@erciyes.edu.tr](mailto:gulsah@erciyes.edu.tr)

\* Erciyes Üniversitesi, Sivil Havacılık Yüksekokulu, 38039 Kayseri, [musgenc@erciyes.edu.tr](mailto:musgenc@erciyes.edu.tr)

(Geliş/Received: 23.08.2007; Kabul/Accepted:14.02.2008)

## ÖZET

Bu çalışmada, durgun çevre şartları altında hareketli ısı kaynağı ile bir yüzeyinden ısıtılan plakadaki sıcaklık ve termal gerilme dağılımlarının sayısal analizi yapılmaktadır. Hareketli ısı akışı profili olarak Gauss dağılımı seçilmiştir. Isı kaynağı z ekseninde sabit açısal bir hızla ( $\Omega$ ) dönerken, plaka da aksel yönde ilerleme hareketi yapmaktadır. Sayısal çözümler, çeliğin farklı ısı iletim katsayıları ( $\lambda = 10$ 'dan  $50 \text{ W/m-K}$ 'ne kadar) ve ısı kaynağının farklı  $\Omega$ 'ları (5 ve 10 rpm) için gerçekleştirilmektedir. Isı kaynağı, plakanın çok küçük bir bölgesine etki etmesinden dolayı uniform olmayan dik sıcaklık gradyanları oluşturmaktadır.

**Anahtar Kelimeler:** Hareketli ısı kaynağı; sıcaklık dağılımı; termal gerilme.

## TEMPERATURE AND THERMAL STRESS DISTRIBUTION IN A PLATE HEATED FROM ONE SIDE SURFACE WITH A MOVING HEAT SOURCE

### ABSTRACT

In this study, temperature and thermal stress distributions in a steel plate heated from its one side surface under stagnant ambient conditions by a moving heat source are analyzed numerically. Gauss distribution was chosen as a moving heat source profile. While the heat source rotates with a constant angular speed ( $\Omega$ ) around the z axis, the plate moves forward the axial direction. The numerical solutions have been performed for the different thermal conductivity of steel ( $\lambda = 10$  to  $50 \text{ W/m-K}$ ) and for the different  $\Omega$ s of heat source (5 and 10 rpm). Heat source produces the non-uniform steep temperature gradients source due to the fact that the heat flux is subjected on a very small section of the plate.

**Keywords:** Moving heat source, temperature distribution, thermal stress.

### 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Hareketli ısı kaynağı (HIK), parça işleme esnasında ortaya çıkan yada doğrudan kullanılan ısı kaynağının bir çeşidi olup, birçok imalat prosesinde sık sık kullanılmaktadır. Bu imalat prosesleri kaynak, taşlama, talaş kaldırma, ısıl işlem gibi prosesleri içermektedir. Sürtünmeden dolayı malzemede meydana gelen sıcaklık artışı mekanik mikro deformasyonlara ve varsa soğutma suyunun aşırı ısınmasına sebep olur. Bu yüzden, HIK içeren problemlerin termal analizinin yapılması oldukça önemlidir. HIK analizleri, prosesler esnasında meydana gelen sıcaklık farklarının detaylı bir tanımlamasının yapılmasını gerektirir. Son yıllarda ise bu termal analizler birçok araştırmacı tarafından

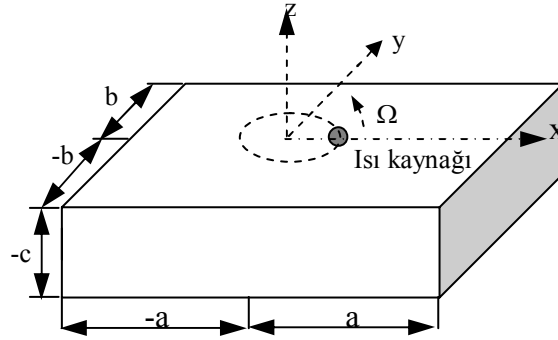
çeşitli geometri ve sınır şartları için yapılmış bulunmaktadır. Li ve Li taşlama ve talaş kaldırma esnasında iş parçası içerisindeki sıcaklık dağılımını sayısal ve analitik olarak araştırdılar [1]. İş parçasının yüzeyi boyunca hareket eden ısı kaynağının, ısı transferi prosesini simüle etmek için sonlu elemanlar metodu kullanmışlardır. Aynı ısı kaynağı için, temas eden ara yüzeydeki sıcaklık konturlarının taşınım katsayısına duyarlı olmadığını buldular. Alilat vd. eksenrik ısı kaynağına maruz kalan dönen bir disk içindeki üç boyutlu sıcaklık dağılımının hesaplanması için uygun analitik bir çözüm türetti [2]. Ayrıca, Alilat vd. sonlu hacimler metodu kullanarak sayısal bir sonuç buldular. Bu sayısal çalışmanın sonuçları ısı transfer katsayısının yüksek değerleri için önerilen analitik çözümlerin sonuçlarıyla paralellik

göstermektedir. Hou ve Komanduri farklı şekillerdeki durgun/hareketli düzlem ısı kaynağının sebep olduğu sıcaklık artışı ve ısı yoğunluğu dağılımları için sürekli ve geçici rejimde genel çözümler elde ettiler [3]. Shuja ve Yılbaş lazer ısıtma prosesi kullanarak bir model üzerinde çalıştılar ve bu çalışma iş parçası hareketinin, katı içerisindeki sıcaklık artışı oldukça etkilediğini gösterdi [4]. Cheng ve Lin Gaussian ısı kaynağı ile sabit bir hızla hareket eden sonlu bir levhanın üç boyutlu sıcaklık dağılımını tanımlamak için analitik bir model geliştirdi ve bu modeli kullanarak lazer parametrelerinin sıcaklık dağılımı üzerindeki etkilerini araştırdılar [5]. Araya ve Gutierrez hareketli ısı kaynağı ile ısıtılan sonlu bir katının geçici sıcaklık dağılımının analitik çözümü üzerine çalıştılar [6]. Bu çalışmada, değişkenlerine ayırma metodunu kullanarak üç boyutlu ısı iletim denklemi için analitik bir çözüm elde ettiler. Koç darbeleri lazer kaynağı esnasında malzemede meydana gelen sıcaklık dağılımını inceleyerek buharlaşmayı içeren üç boyutlu lazer ısıtma modelini elektronkinetik teorisi yaklaşımı ile çözdü [7]. Moulik vd. taşlama sırasında sertleşen çelikte meydana gelen termal gerilmeleri ve sıcaklıkları hesaplamak için sonlu eleman prosedürü geliştirdiler [8]. Bu çalışmada, sayısal olarak hesaplanan sıcaklık ve termal gerilmelerin analitik çözümlerle hemen hemen aynı sonucu verdiğini görmekteyiz. Eslam vd. içi boş kalın bir kürede termal ve mekanik gerilmeleri incelediler [9]. Laraqi vd. üç boyutlu sıcaklık dağılımını ve termal konstrüksiyon direncini hesaplamak için analitik çözümler geliştirdiler [10]. Elde edilen çözümler içinde, geometrik parametrelerin değişen değerleriyle hareketli ısı kaynağının benzersiz yada değişik geometrileri için çözümler elde ettiler. Liu vd. boruda meydana gelen sıcaklık farklarının sebep olduğu termal gerilmeyi analiz edip boru tabakasındaki termal gerilmeyi azaltmak veya elimine etmek için bazı çözümler sundular [11]. Al-Zaharah vd. tam gelişmiş boru akışında birleşik ısı transferini ve termal gerilmeyi analiz edip düşük Prandtl sayısı ve düşük ısı iletim katsayıları için çözümler elde ettiler. [12]. Ayrıca tam gelişmiş akıma ve darbeleri akışa maruz kalan kalın çeperli boruda termal gerilmeleri de hesapladılar [13, 14]. Yapıcı vd. çevresel olarak ısıtılan dairesel boru ve iş parçasındaki sıcaklık ve sıcaklık farklarının sebep olduğu termal gerilmenin dağılımını bilgisayar kodu kullanarak sayısal analizlerini yaptılar [15, 16, 17, 18]. Ayrıca ısı akısının radyal yönde periyodik olarak genişlemesiyle ısıtılan bir diskteki geçici sıcaklık ve termal gerilmenin sayısal çözümleri üzerinde çalıştılar [19, 20].

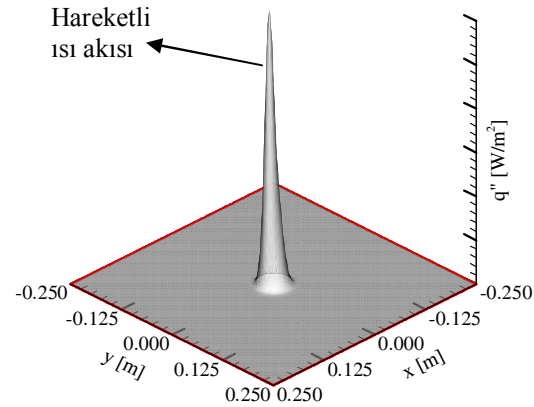
## 2. MATEMATİK MODELİ (MATHEMATICAL MODELING)

Bu çalışmada, durgun çevre şartları altında hareketli ısı kaynağı ile bir yüzeyinden ısıtılan plakadaki geçici sıcaklık dağılımları sayısal olarak analiz edilmektedir.

Uniform bir malzemede uniform olmayan ısıtma/soğutma yada uniform olmayan bir malzemede uniform ısıtma/soğutmadan dolayı oluşan sıcaklık farklılıkları termal gerilmelere sebep olur. Dolayısıyla, bu çalışmada ayrıca sıcaklık farklarıyla orantılı olan termal gerilme analizleri de yapılmaktadır. Ele alınan plakanın geometrik modeli ve koordinat sistemi Şekil 1'de gösterilmektedir. Hareketli ısı akısı profili olarak Gauss dağılımı seçilmiştir ve bu profil Şekil 2'de gösterilmektedir.



Şekil 1. Plakanın geometrik modeli ve koordinat sistemi (boyutlar ölçekli değil) (Figure 1. Geometric model of the plate and the coordinate system (dimensions are not in scale))



Şekil 2. Plakanın işleme yüzeyine uygulanan hareketli ısı akısı profili, (ısı akısı ölçekli değil) (Figure 2. The moving heat flux profile applied on the processed surface of the plate, (the profile is not in scale))

Isı kaynağı z ekseninde sabit açısal bir hızla ( $\Omega$ ) dönmekte ve her bir devrinin bitiminde ise dönme yörüngesinin yarı çapı genişlemektedir. Bir başka deyişle, ısı kaynağı plakanın yüzeyini dönerek süpürmektedir. Isı akısına maruz kalmayan diğer kısımlar ise durgun çevre koşulları altındadır. Yukarıdaki açıklamalardan da anlaşıldığı üzere bu analizde üç durum ele alınmaktadır:

- plaka içindeki ısı iletimi,
- plakanın yüzeyinden çevreye olan ısı transferi
- plakadaki termal gerilme.

Bu analizde, ayrıca, aşağıda sıralanan üç önemli varsayım yapıldı:

- Sıcaklık, T, x, y, z ve t'ye bağlıdır [T = T(x,y,z,t)]
- Plakanın termo-fiziksel değişimleri ihmal edildi
- Plakanın malzemesi homojen ve izotropikdir

Isı İletim Denklemi:

Plaka da (  $-a \leq x \leq a$ ,  $-b \leq y \leq b$ , ve  $-c \leq z \leq 0$ ),

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = \frac{\rho \cdot C_p}{\lambda} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1)$$

Başlangıç ve sınır şartları:

$$t = 0 \text{ da } T = T_\varphi \quad (2a)$$

$$x = \pm a \text{ da } -\lambda \cdot \frac{dT}{dx} = h \cdot (T - T_\varphi) \quad (2b,c)$$

$$y = \pm b \text{ de } -\lambda \cdot \frac{dT}{dy} = h \cdot (T - T_\varphi) \quad (2d,e)$$

$$z = -c \text{ de } -\lambda \cdot \frac{dT}{dz} = h \cdot (T - T_\varphi) \quad (2f)$$

$$z = 0 \text{ da } \lambda \cdot \frac{dT}{dz} = q'' \quad (2g)$$

Burada  $\lambda$  plakanın ısı iletim katsayısı, h ısı transferi katsayısı ve  $q''$  ise hareketli ısı akısı olup bu çalışmada matematiksel olarak aşağıdaki şekilde tanımlanmaktadır:

$$q'' = \left[ q_0 + h_\varphi \cdot (T - T_\varphi) \right] \cdot e^{-\left[ \frac{(x-\mu_x)^2}{2\sigma^2} + \frac{(y-\mu_y)^2}{2\sigma^2} \right]} - h_\varphi \cdot (T - T_\varphi) \quad (2h)$$

Burada  $q_0$  hareketli ısı akısının şiddeti,  $\mu$  ve  $\sigma^2$  sırasıyla Gauss dağılımının ortalaması ve varyansı, x ve y alt simgeleri ise kartezyen yönlerini göstermektedir.  $\mu$  işleme zamanına bağlı olarak aşağıdaki şekilde değişmektedir:

$$\begin{aligned} \mu_x &= r \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot \Omega \cdot \tau / 60) \\ \mu_y &= r \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot \Omega \cdot \tau / 60) \\ r &= (2 \cdot j - 1) \cdot \sqrt{2} \cdot \sigma \quad j = 1, 2, \dots, n \\ \tau &= t - (j - 1) \cdot P \\ P &= 60 / \Omega \end{aligned} \quad (2i-1)$$

Burada r ısı akısının merkezi ile plakanın merkezi arasındaki mesafe olup ısı akısının her bir devri sonunda  $2 \cdot \sqrt{2} \cdot \sigma$  kadar artmaktadır,  $\tau$  normalize zaman, j devir numarası, P periyot ve n ise toplam devir sayısıdır.

Termal Gerilme [21]:

Termal gerilme dağılımını elde etmek için, her bir zaman aralığı içinde plakanın termal dengede olduğu varsayıldı. Böylece, plakanın üst yüzeyindeki zamana bağlı termal gerilme dağılımı :

$$\sigma_z = \frac{E\alpha}{1-\nu} \left[ -T(y) + \frac{1}{2b} \int_{-b}^b T(y) \cdot dy + \frac{3y}{2b^3} \int_{-b}^b T(y) \cdot y \cdot dy \right] \quad (3a)$$

bağıntısıyla elde edilebilmektedir.

Von-Mises [20] teorisine göre efektif gerilmeler;

$$\sigma_{eff} = \sqrt{(\sigma_z)^2} \quad (3b)$$

elde edilebilir.

### 3. SAYISAL SONUÇLAR (NUMERICAL RESULTS)

#### 3.1. Hesaplama ve simülasyon araçları (Calculational and simulation tools )

Üç boyutlu ısı iletimi denklemine (1) kullanılan ikinci dereceden homojen ve lineer kısmi diferansiyel eşitliğini, verilen başlangıç ve sınır şartları (2a-1) ile analitik olarak çözmek oldukça zor ve karmaşıktır. Bu eşitlikler sonlu farklar metoduna dayanan uygun bir bilgisayar programı yardımı ile sayısal olarak çözülebilmektedir. Bu çalışmada, model oluşturmanın daha kolay olması ve yazılımın kullanıcıya özel analiz koşullarında alt programları değiştirme kolaylığı sunmasından dolayı FLUENT 6.1 programı bilgisayar kodu olarak seçildi [22]. FLUENT bilgisayar kodu katı içerisindeki iletimle ısı transferini çözmek için sonlu hacimler metodunu kullanmaktadır. Yüzeğe uygulanan ısı akısını tanımlamak için C dilinde yazılan bir UDF (kullanıcı tarafından tanımlanan fonksiyon) dosyası hazırlandı. FLUENT kodu ile hesaplatılan sıcaklıkları kullanarak, FORTRAN 77 dilinde yazılan bir programla termal gerilme dağılımları hesaplanmaktadır. Sayısal çözümler, çelik için ısı iletim katsayısının onar onar  $10^3$ 'den  $50 \text{ W/m} \cdot \text{K}$ 'ne kadar olması durumlarında ve her bir  $\lambda$  için  $\Omega$ 'nın 5 ve 10 rpm olması durumları için gerçekleştirilmektedir.

HIK sadece bir yüzeye uygulandığı için yüksek sıcaklık farkı ve dolayısıyla termal gerilmeler bu yüzeyde meydana gelmektedir (Şekil 1). Bu yüzden bu çalışmada, sıcaklık ve termal gerilme dağılımları sadece bu yüzeyde gösterilmektedir.

### 3.2. Simülasyon Parametreleri (Simulation parameters)

$\sigma^2 = 0.01^2/2 \text{ m}^2$ ,  $q_0 = 10^6 \text{ W/m}^2$ ,  $h_c = 20 \text{ W/m}^2\text{-K}$ ,  
 $T_c = 0 \text{ }^\circ\text{C}$ , Çelik için,  $\rho = 7800 \text{ kg/m}^3$ ,  
 $C_p = 470 \text{ J/kg-K}$ ,  $\lambda = 10, 20, \dots, 50 \text{ W/m-K}$ ,  
 $\Omega = 5 \text{ ve } 10 \text{ rpm}$ ,  
 $t = 0$ 'dan  $60 \cdot n/\Omega \text{ s}$   $0.01 \text{ s}$  aralıkla,  $n = 5 \text{ devir}$ ,  
 $x = r \cdot \cos(\theta)$  ve  $y = r \cdot \sin(\theta)$

Ayrıca termal özelliklerin sıcaklıkla değişmediği varsayıldı ve birim alan başına ısı akısının şiddetiyle elde edilen sıcaklık farklarıyla orantılı olan termal gerilme dağılımları (3a-b) eşitlikleri ile hesaplanmaktadır.

### 3.3. Sıcaklık Dağılımları (Temperature distributions)

HIK'a maruz kalan bir plakada, proses esnasında meydana gelen sıcaklık değişimlerinin ulaşabileceği en yüksek seviyeyi bilmek işlemin güvenli bir şekilde yerine getirilebilmesi için önemlidir.

Farklı açısız hız ve ısı iletim katsayıları için hareketli ısı kaynağının birinci ve beşinci devri sonunda plakada meydana gelen sıcaklık dağılımları Şekil 3 ve 4'de gösterilmektedir. Isı kaynağı, plakanın çok küçük bir bölgesine etki etmesinden dolayı uniform olmayan dik sıcaklık gradyanları oluşturmaktadır. Şekillerden de görüldüğü üzere, bu dik sıcaklık gradyanları ısı kaynağının hareketine bağlı olarak sürekli yer değiştirmektedir. Isı kaynağının etki etmediği diğer bölgeler çevre şartlarına maruz kaldığından dolayı buradaki sıcaklıkların seviyesi oldukça düşüktür. Bilindiği üzere, iş parçasında meydana gelen sıcaklık değişimleri  $\lambda$  ile orantılıdır ve  $\lambda$  arttıkça sıcaklık değişimleri azalacaktır. Sıcaklık gradyanlarının seviyesi,  $\lambda$ 'nın ve  $\Omega$ 'nın artmasıyla yaklaşık olarak sırasıyla %60 ve %25 oranında azalmaktadır.

Şekil 5 ve 6 çeşitli zaman aralıklarında plakadaki sıcaklık dağılımını  $\Omega$ 'nın 5 rpm,  $\lambda$ 'nın da 10 ve 50 W/m-K olması durumları için detaylı olarak göstermektedir. Hareketli ısı kaynağı bir devrini tamamlayıp diğer devre geçtiğinde ikinci bir dik sıcaklık gradyanına sebep olmaktadır. Şekillerden de görüldüğü gibi, ısı kaynağı radyal yönde hareket ederken bu ikinci dik sıcaklık gradyanının seviyesi giderek düşmekte ve belirli bir zaman sonra kaybolmaktadır. Kaynağın dönme hızını artırdığımızda bu sıcaklık gradyanının seviyesinin azaldığı görülmektedir.

### 3.4. Termal Gerilme Dağılımları (Thermal stress distributions)

Malzemede meydana gelen sıcaklık değişimleri termal gerilmelere neden olmaktadır. Bu termal gerilmeler seçilen çeliğin akma gerilmesini aşabilir.

Bilindiği üzere, termal gerilmeler çeliğin akma gerilmesini aştığı zaman malzemede plastik deformasyonlara, mikro çatlaklıklara, yorulma ömründe ve mukavemetinde azalmaya neden olmaktadır. Bu yüzden, termal gerilmenin proses boyunca çeliğin akma gerilmesini aşıp aşmadığının analizi yapılmalıdır. Bu çalışmada, sıcaklık farklarıyla orantılı olan termal gerilmeler Bölüm 2'de bahsedilen termal denge varsayımı ile 3a-b denklemleri kullanılarak nümerik olarak hesaplanmaktadır.

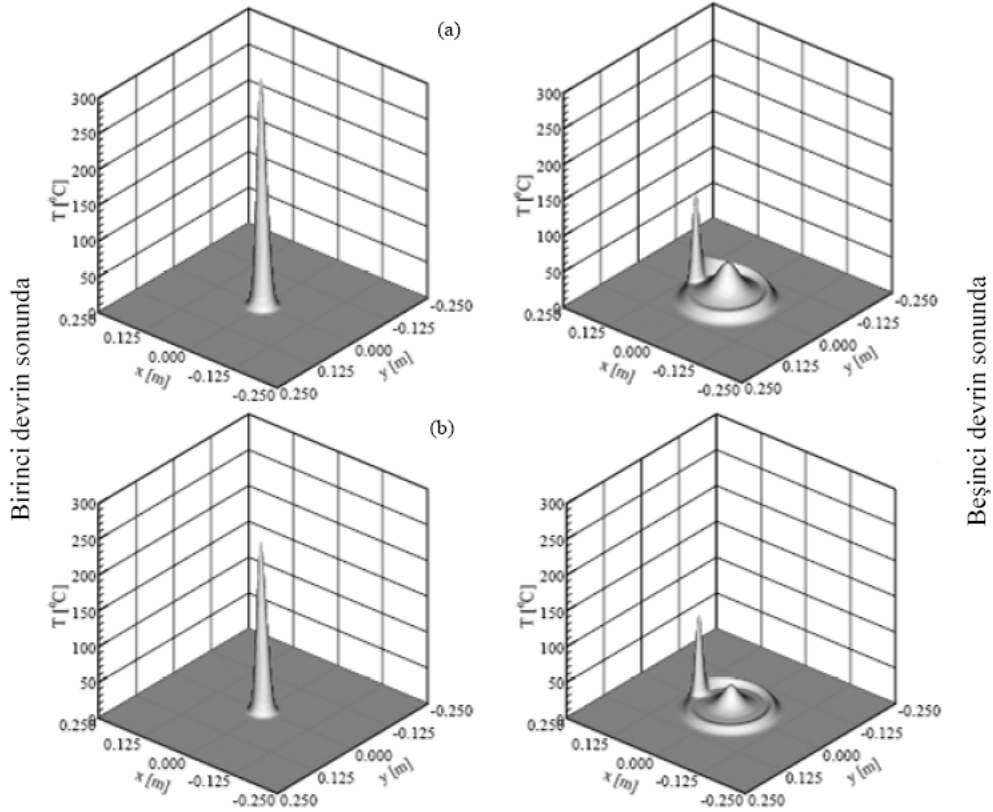
Şekil 7 ve 8 farklı açısız hız ve ısı iletim katsayıları için hareketli ısı kaynağının birinci ve beşinci devri sonunda plakada meydana gelen efektif termal gerilmeleri göstermektedir. Dik sıcaklık gradyanlarından dolayı meydana gelen dik efektif termal gerilmeler kaynağın etki ettiği ve yakın bölgelerde uniform değildir. Oluşan bu dik efektif gerilme profilleri sıcaklık değişimlerinde olduğu gibi ısı kaynağının hareketine bağlı olarak radyal yönde yer değiştirmektedir. Isı kaynağından uzak yerlerde termal gerilme oranları da oldukça düşüktür. Termal gerilme profillerinin sıcaklık profilleri ile aynı davranışı sergilemesi beklenen bir durumdur.  $\lambda$  ve  $\Omega$ 'nın artışıyla efektif termal gerilme oranları sıcaklık dağılımında olduğu gibi %60 ve %25 oranında azalmaktadır.

Çeşitli zaman aralıklarında plakada meydana gelen efektif termal gerilme dağılımını  $\Omega$ 'nın 5 rpm,  $\lambda$ 'nın da 10 ve 50 W/m-K olması durumları için detaylı olarak Şekil 9 ve 10'da gösterilmektedir. Bölüm 3.3'de de bahsedildiği gibi oluşan ikinci bir dik sıcaklık gradyanı dolayısıyla ikinci bir dik efektif termal gerilmeye sebep olmaktadır ve bu gerilmenin seviyesi hareketli ısı kaynağının bu bölgeden uzaklaşmasıyla düşmektedir.

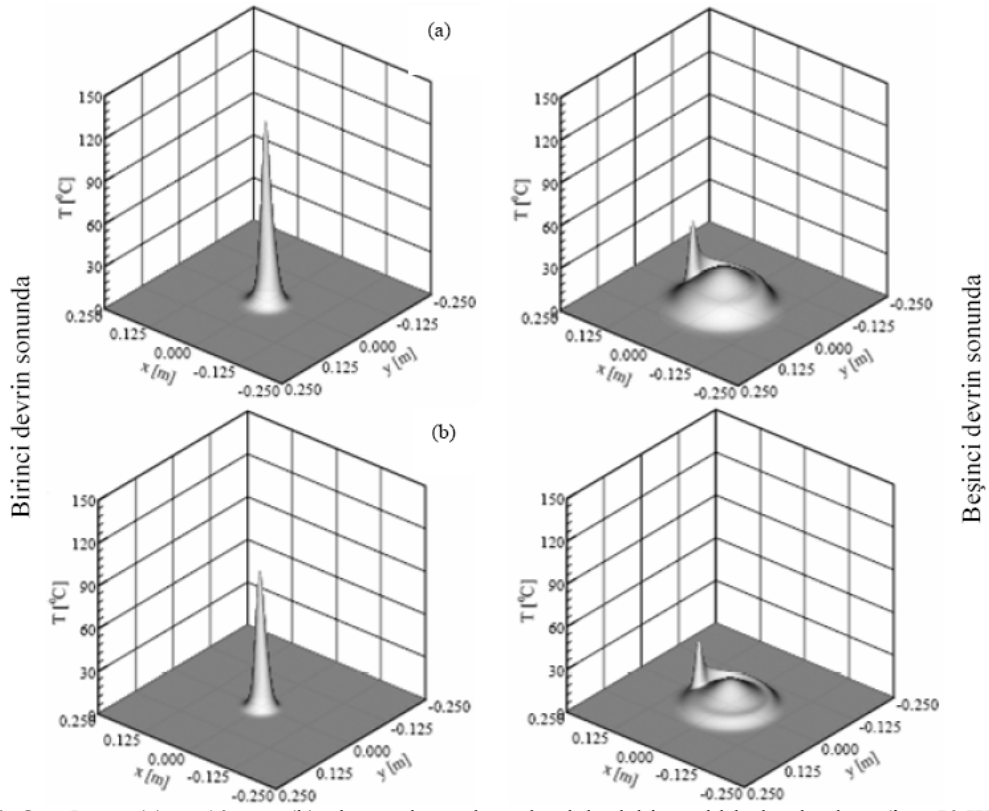
## 4. SONUÇLAR (RESULTS)

Bu çalışmada, durgun çevre şartları altında hareketli ısı kaynağı ile bir yüzeyinden ısıtılan plakadaki geçici sıcaklık dağılımları ve termal gerilme dağılımları sayısal olarak analiz edilmektedir. Sayısal analizler çeliğin farklı ısı iletim katsayıları ve hareketli ısı kaynağının farklı hızları için gerçekleştirilmiştir. Bu analiz sonucunda şu sonuçlara varılmıştır:

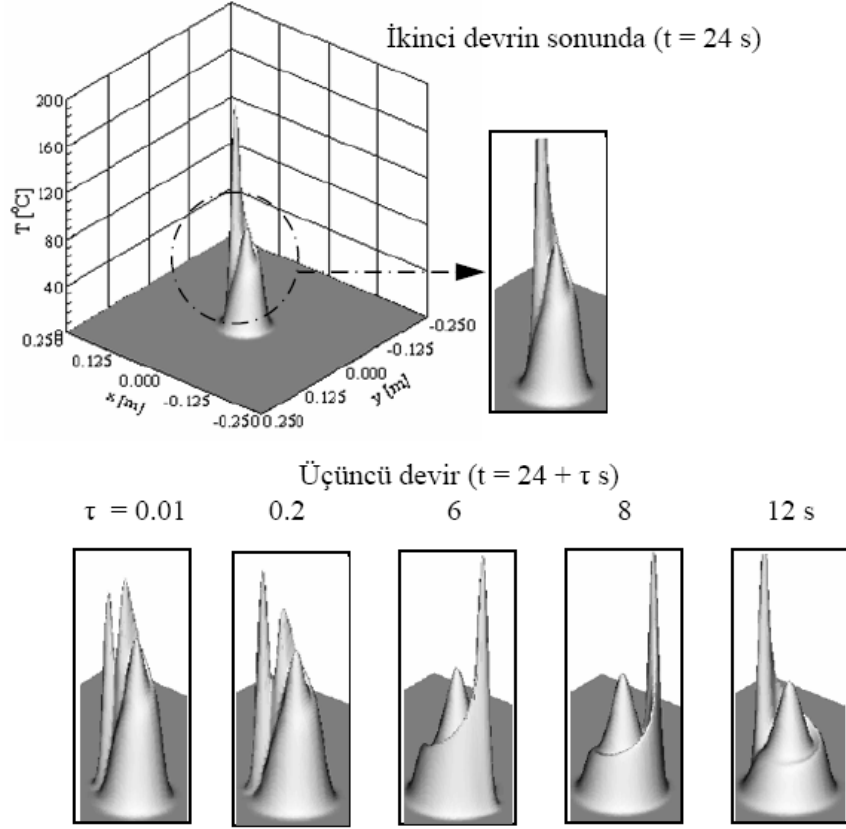
- ✓ Hareketli ısı kaynağı dik sıcaklık gradyanları ve termal gerilmeler oluşturmaktadır.
- ✓ Sıcaklık ve termal gerilmelerin seviyesi  $\lambda$  ve  $\Omega$ 'nın artmasıyla önemli miktarlarda azalmaktadır.
- ✓ Hareketli ısı kaynağına maruz kalmayan bölgelerde sıcaklık gradyanı ve efektif termal gerilme oranı oldukça düşüktür.
- ✓ Hareketli ısı kaynağı bir devrini tamamlayıp diğer devre geçtiğinde ikinci bir dik sıcaklık gradyanının oluşmasına ve dolayısıyla yeni bir dik efektif termal gerilmeye neden olmaktadır.



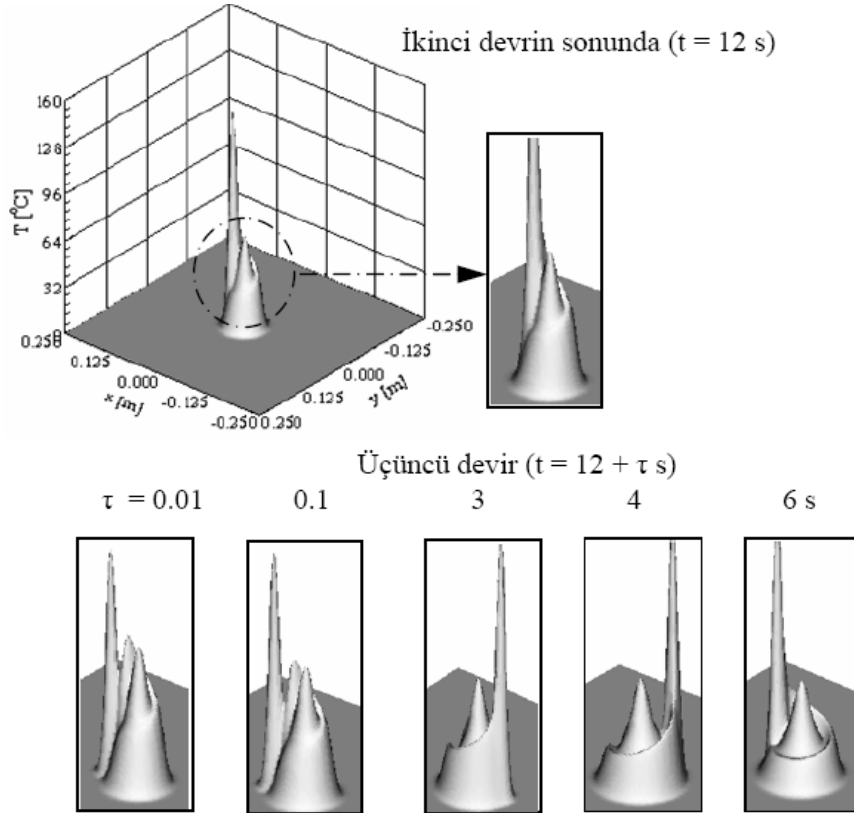
**Şekil 3.**  $\Omega = 5$  rpm (a) ve 10 rpm (b) olması durumlarında plakadaki sıcaklık dağılımları, ( $\lambda = 10$  W/m-K)  
 (Figure 3. Temperature distributions in the plate in the cases of  $\Omega = 5$  rpm (a) and 10 rpm (b), ( $\lambda = 10$  W/m-K))



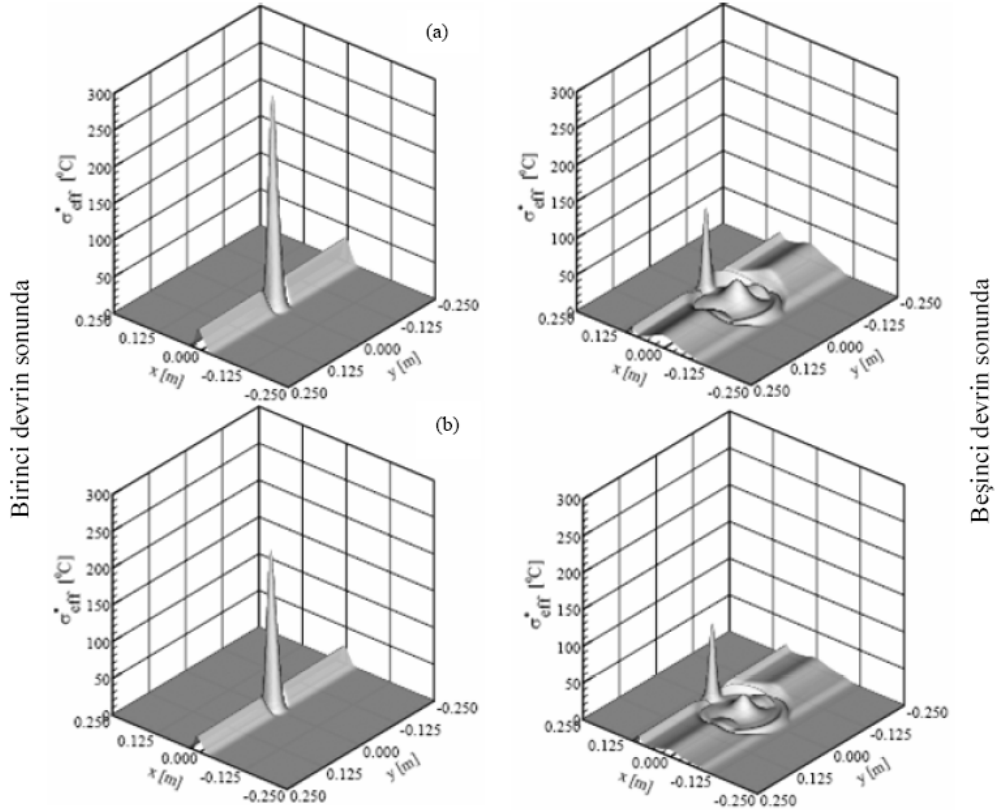
**Şekil 4.**  $\Omega = 5$  rpm (a) ve 10 rpm (b) olması durumlarında plakadaki sıcaklık dağılımları, ( $\lambda = 50$  W/m-K)  
 (Figure 4. Temperature distributions in the plate in the cases of  $\Omega = 5$  rpm (a) and 10 rpm (b), ( $\lambda = 50$  W/m-K))



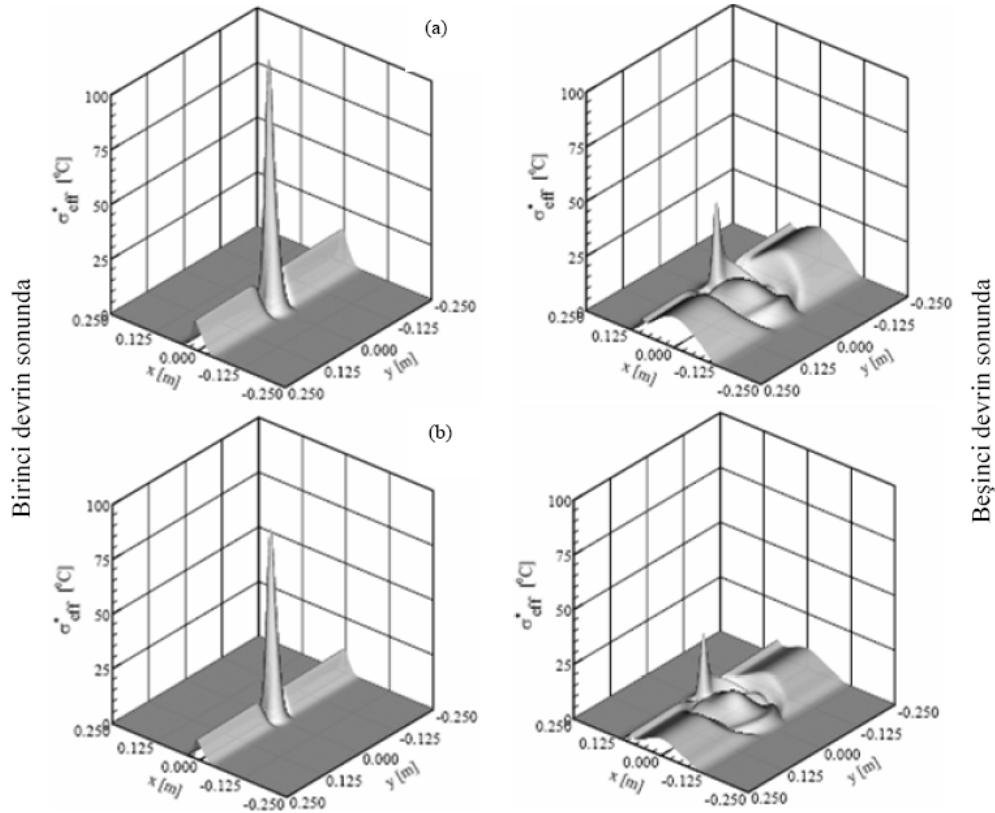
**Şekil 5.** Çeşitli zaman aralıklarında plakadaki sıcaklık dağılımları ( $\Omega = 5$  rpm,  $\lambda = 10$  W/m-K) (Figure 5. Temperature distributions in the plate at various times ( $\Omega = 5$  rpm,  $\lambda = 10$  W/m-K))



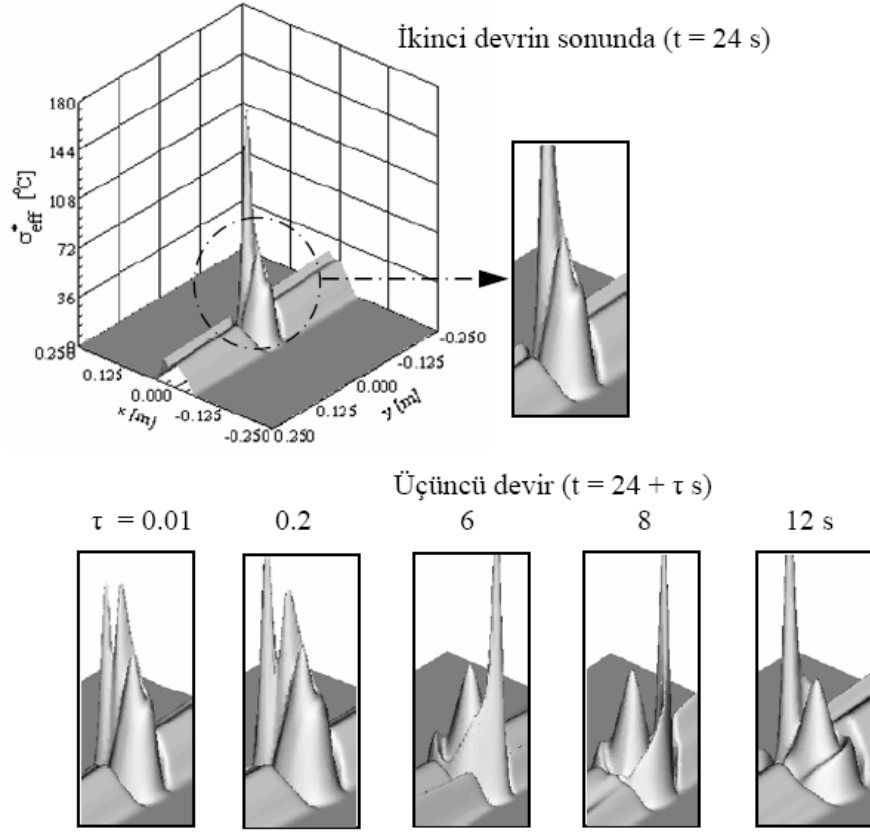
**Şekil 6.** Çeşitli zaman aralıklarında plakadaki sıcaklık dağılımları ( $\Omega = 10$  rpm,  $\lambda = 10$  W/m-K) (Figure 6. Temperature distributions in the plate at various times ( $\Omega = 10$  rpm,  $\lambda = 10$  W/m-K))



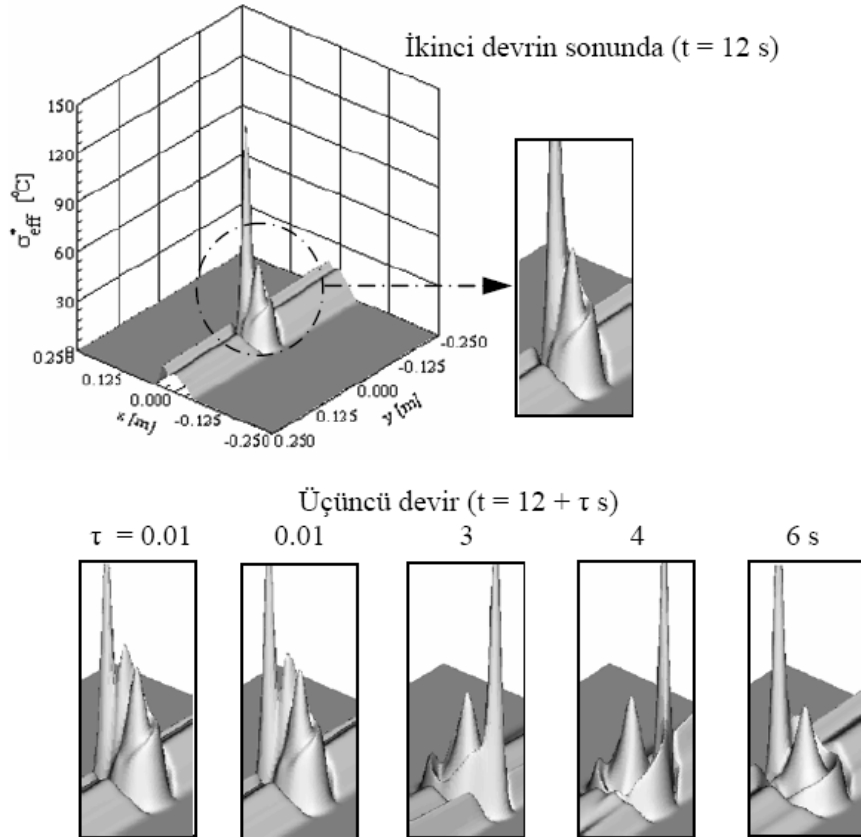
**Şekil 7.**  $\Omega = 5$  rpm (a) ve 10 rpm (b) olması durumlarında plakadaki efektif termal gerilme dağılımları, ( $\lambda = 10$  W/m-K) (Figure 7. Effective thermal stress distributions in the plate in the cases of  $\Omega = 5$  rpm (a) and 10 rpm (b), ( $\lambda = 10$  W/m-K))



**Şekil 8.**  $\Omega = 5$  rpm (a) ve 10 rpm (b) olması durumlarında plakadaki efektif termal gerilme dağılımları, ( $\lambda = 50$  W/m-K) (Figure 8. Effective thermal stress distributions in the plate in the cases of  $\Omega = 5$  rpm (a) and 10 rpm (b), ( $\lambda = 50$  W/m-K))



**Şekil 9.** Çeşitli zaman aralıklarında plakadaki efektif termal gerilme dağılımları ( $\Omega = 5$  rpm,  $\lambda = 10$  W/m-K) Figure 9. Effective thermal stress distributions in the plate at various times ( $\Omega = 5$  rpm,  $\lambda = 10$  W/m-K)



**Şekil 10.** Çeşitli zaman aralıklarında plakadaki efektif termal gerilme dağılımları ( $\Omega = 10$  rpm,  $\lambda = 10$  W/m-K) (Figure 10. Effective thermal stress distributions in the plate at various times ( $\Omega = 10$  rpm,  $\lambda = 10$  W/m-K))



**Semboller (Nomenclature)**

$C_p$	özgül ısı [J/kg-K]
$E$	elastiklik modülü [Pa]
$h$	ısı transferi katsayısı [W/m <sup>2</sup> -K]
$j$	devir numarası
HIK	hareketli ısı kaynağı
$n$	toplam devir sayısı
$q_0$	ısı akısı şiddeti [W/m <sup>2</sup> ]
$q''$	birim alan başına ısı akısı
$P$	periyot [s]
$t$	zaman [s]
$T$	sıcaklık [°C]
UDF	kullanıcı tarafından tanımlanan fonksiyon
$x, y, z$	kartezyen bileşenler [m]

**Yunan Harfleri (Greek symbols)**

$\Omega$	açısal hız
$\alpha$	termal genişleme katsayısı [1/°C]
$\lambda$	ısı iletim katsayısı [W/m-K]
$\mu$	Gauss dağılımının ortalaması
$\nu$	Poisson oranı
$\rho$	yoğunluk [kg/m <sup>3</sup> ]
$\sigma$	termal gerilme [Pa]
$\sigma^2$	Gauss dağılımının varyansı
$\sigma^*$	termal gerilme oranı [°C]
$\tau$	normalize zaman [s]

**Alt Simgeler (Subscripts)**

$\checkmark$	çevre
eff	efektif

**KAYNAKLAR (REFERENCES)**

- Li J., Li J.C.M., "Temperature distribution in workpiece during scratching and grinding", **Materials Science and Engineering**, A 409: 108-119, 2005.
- Alilat N, Bairi A, Laraqi N., "Three-dimensional calculation of temperature in a rotating disk subjected to an eccentric circular heat source and surface cooling", **Numerical Heat Transfer**, Part A 46: 167-180, 2004.
- Hou Z.B., Komanduri R., "General solutions for stationary/moving plane heat source problems in manufacturing and tribology", **International Journal Of Heat And Mass Transfer**, 43 1679-1698, 2000.
- Shuja SZ, Yılbaş BS., "3-Dimensional conjugate laser heating of a moving slab", **Applied Surface Science**, 167:134-148, 2000.
- Cheng PJ, Lin SC., "An analytical model for the temperature field in the laser forming of sheet metal", **Journal of Materials Processing Technology**, 101:260-267, 2000.
- Araya G, Gutierrez G. Analytical solution for a transient, three-dimensional temperature distribution due to a moving laser beam. **International Journal of Heat and Mass Transfer** 2006; 49:4124-4131.
- Koç A., "3-D analysis of temperature distribution in the material during pulsed laser and material interaction", **Heat and Mass Transfer**, 40:697-706, 2004.
- Moulik PN, Yang HTY, Chandrasekar S., "Simulation of thermal stresses due to grinding", **International Journal of Mechanical Sciences**, 43:831-851, 2001.
- Eslam MR., Babaei MH. and Poultangari R., "Thermal and mechanical stresses in a functionally graded thick sphere", **International Journal of Pressure Vessels and Piping**, 82: 522-527, 2005.
- Laraqi N., Bairi A., Segui L., "Temperature and thermal resistance in frictional devices", **Applied Thermal Engineering**, 24: 2567-2581, 2004.
- Liu M-S., Dong Q-W., Wang D-B., Ling X., "Numerical simulation of thermal stress in tube-sheet of heat transfer equipment", **International Journal of Pressure Vessels and Piping**, 76: 671-5, 1999.
- Alzaharnah T, Yilbas BS, Hashmi MS., "Conjugate heat transfer in fully developed laminar pipe flow and thermally induced stresses", **Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering**, 190: 1091-104, 2000.
- Alzaharnah T, Yilbas BS, Hashmi MS, "Pulsating flow in circular pipes—The analysis of thermal stresses", **International Journal of Pressure Vessels and Piping**, 78: 567-79, 2001.
- Alzaharnah T, Hashmi MS, Yilbas BS., "Thermal stresses in thick-walled pipes subjected to fully developed laminar flow", **Journal of Materials Processing Technology**, 118: 50-7, 2001.
- Yapıcı H, Albayrak B., "Numerical solutions of conjugate heat transfer and thermal stresses in a circular pipe externally heated with non-uniform heat flux", **Energy Conversion and Management**, 45: 927-37, 2004.
- Yapıcı H., Baştürk G., Albayrak B., "Numerical study on conjugate heat transfer in laminar fully-developed flow with temperature-dependent thermal properties through an externally heated SiC/SiC composite pipe and thermally induced stress", **Energy Conversion and Management**, 46: 633-654, 2005.
- Yapıcı H, Yalçın Ş., "Transient temperature and thermally induced stress distributions in a partly-circumferentially heated cylindrical workpiece", **Heat Mass Transfer**, 41: 104-111, 2004.
- Yapıcı, H., Baştürk G., "Numerical solutions of transient conjugate heat transfer and thermally induced stress distribution in a heated and rotating hollow disk", **Energy Conversion and Management**, 46: 61-84, 2005.
- Yapıcı H., Baştürk G., "Numerical solutions of transient temperature and thermally induced

- stress distributions in a solid disk heated with radially periodic expanding and contracting ring heat flux”, **Journal of Materials Processing Technology**, 159: 99–112, 2005.
20. Yapıcı, H., Baştürk, G., “Reduction of thermally induced stress in a solid disk heated with radially periodic expanding and contracting ring heat flux”, **Journal of Materials Processing Technology**, 180/1-3: 279-290, 2006.
  21. Faupel JH, Fisher FE., *Engineering design—A Synthesis of stress analysis and materials engineering* New York:Wiley, 1981.
  22. Fluent Incorporated, *FLUENT User's guide version 6.1*, 2003.