İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

FREZELEME İŞLEMİ SIRASINDA İŞ PARÇASINDAKİ SICAKLIK DAĞILIMININ ANALİZİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Taygun Recep GÜNGÖR

Makina Mühendisliği Anabilim Dalı

Isı Akışkan Programı

Mayıs 2014

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

FREZELEME İŞLEMİ SIRASINDA İŞ PARÇASINDAKİ SICAKLIK DAĞILIMININ ANALİZİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Taygun Recep GÜNGÖR
503111137

Makina Mühendisliği Anabilim Dalı

Isı Akışkan Programı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Mustafa ÖZDEMİR

Mayıs 2014

İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 503111137 numaralı Yüksek LisansÖğrencisi **Taygun Recep GÜNGÖR** ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı **"FREZELEME İŞLEMİ SIRASINDA İŞ PARÇASINDAKİ SICAKLIK DAĞILIMININ ANALİZİ"** başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Prof. Dr. Mustafa ÖZDEMİR**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Doç. Dr. Mustafa Bakkal**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Doç.Dr. Ş. Özgür Atayılmaz**
Yıldız Teknik Üniversitesi

Teslim Tarihi : **5 Mayıs 2014**
Savunma Tarihi : **28 Mayıs 2014**

Gezi'de kaybettiklerimize,

ÖNSÖZ

Öncelikle bana bu tez çalışmasının gerçekleştirildiği İtü Isı Ve Kütle Geçişi Araştırma Laboratuvarı'nda çalışma fırsatını veren ve çalışmalarım boyunca engin bilgisini ve anlayışını benden esirgemeyen saygıdeğer hocam Prof. Dr. Mustafa Özdemir'e teşekkürlerimi sunarım.
Bu tez çalışmasının da bir parçası olduğu projeye beni de dahil eden ve her türlü imkanı bana sunan Doç. Dr Mustafa Bakkal'a teşekkür ederim.
1,5 yılı geçen tez çalışmamın her bölümünüde beraber çalıştığımız ve tezim üzerinde büyük emeği bulunan hocam ve arkadaşım Ali Taner KUZU'ya verdiği destek ve yaptıkları için teşekkür ederim.
Tez çalışmamın farklı dönemlerinde benden desteklerini esirgemeyen değerli hocam Dr. Ersin SAYAR'a, Kaveh RAHİMZADEH'e, Umut KARAGÜZEL'e, Selman BENLİ'ye, Erdal DİNÇ'e ve Osman ÇELEBİ'ye teşekkür ederim.
Son olarak da elde ettiğim tüm başarıların mimarı olan aileme ve kız arkadaşıma şükranlarımı sunarım.

Mayıs 2014 Taygun Recep GÜNGÖR

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ ..... **vii**
İÇİNDEKİLER ..... **ix**
ÇİZELGE LİSTESİ ..... **xi**
ŞEKİL LİSTESİ ..... **xiii**
ÖZET ..... **xv**
SUMMARY ..... **xvii**
1. GİRİŞ **1**
1.1 Literatür Araştırması **1**
2. TALAŞ KALDIRMA VE ISI ÜRETİMİ **5**
2.1 Isı Üretiminin Ortaya Çıkışı 5
2.2 Isı Üretim Bölgeleri ve Sebepleri 6
2.3 Talaş Kaldırma Sırasında Sıcaklıkların Önemi 7
2.4 Deneysel Yöntemler 8
3. MATEMATİK MODEL VE FORMÜLASYON **13**
4. TERSİNE ISI GEÇİŞİ **19**
5.DENEYSEL ÇALIŞMA **23**
5.1 Deney Düzeneği 23
5.2 Deneyin Yapılışı 24
5.3 Sıcaklık Deneyleri ve Sonuçları 26
5.4 Kuvvet Testleri Deneyleri ve Sonuçları 28
6. SAYISAL MODEL VE OPTİMİZASYON **33**
7. SONUÇLAR VE TARTIŞMA **37**
7.1 Hata Analizi 37
7.2 İş Parçasındaki Sıcaklık Dağılımı 41
7.3 Zamana ve Yere Bağlı Noktasal Sıcaklık Değişimleri 46
7.4 Isı Akıları 48
7.5 Isının Dağılma Oranları 51
7.6 Ortalama Talaş Sıcaklıkları 55
8. YORUMLAR **57**
KAYNAKLAR **59**
ÖZGEÇMİŞ **63**

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1 : Isı dağılım oranları. 7
Çizelge 5.1 : AISI 1020 Çeliğinin Malzeme Özellikleri 24
Çizelge 5.2 : Kesme Parametreleri 25
Çizelge 7.1 : Toplam Bağıl Hatalar 39

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1 : Talaş kaldırma sırasında ısı oluşum bölgeleri. 5
Şekil 2.2 : Talaş kaldırma sırasındaki kuvvetler. 7
Şekil 2.3 : Kesme ortamı sıcaklıkları için deneysel yöntemler. 10
Şekil 2.4 : PVD Film Yöntemi. 11
Şekil 2.5 : Kızıl Ötesi Kamera Görüntüsü. 12
Şekil 3.1 : Freze işleminin şematik görünümü 13
Şekil 3.2 : Problemin şematik görünümü. 15
Şekil 3.3 : Problemin gösterimi. 15
Şekil 3.4 : Problemin diferansiyel gösterimi. 15
Şekil 5.1 : Deney düzeneği genel. 23
Şekil 5.2 : Deney öncesi görünüm. 26
Şekil 5.3 : Sıcaklıkların zamana göre değişimi 26
Şekil 5.4 : Deney sonrası görünüm 27
Şekil 5.5 : Sıcaklık verilerinin karşılaştırılması 27
Şekil 5.6 : Kuveet Ölçümleri 28
Şekil 5.7 : Kesme ve sürtünme kuvvetleri. 29
Şekil 5.8 : Kesme Kuvvetinin Harcadığı Güç. 30
Şekil 5.9 : Sürtünme kuvvetinin harcadığı güç 30
Şekil 5.10 : Toplam Güç. 31
Şekil 6.1 : Zaman Adımları. 33
Şekil 6.2 : Isı kaynağının hareketi. 34
Şekil 7.1 : Deney ve sayısal çözüm sonuçları 37
Şekil 7.2 : Bağıl hatalar. 38
Şekil 7.3 : Rastgele hataların etkisi 40
Şekil 7.4 : Rastgele hataların etkisi 40
Şekil 7.5 : Sıcaklık verileri. 42
Şekil 7.6 : Farklı ısı akıları için sonuçlar. 42
Şekil 7.7 : İş parçasının sıcaklık dağılımı. 43
Şekil 7.8 : Sıcaklık dağılımları. 44
Şekil 7.9 : Sıcaklık dağılımları. 44
Şekil 7.10 : Sıcaklık dağılımları. 44
Şekil 7.11 : Sıcaklık dağılımları. 45
Şekil 7.12 : Sıcaklık dağılımları. 45
Şekil 7.13 : Koordinat eksenin yerleştirilmesi 46
Şekil 7.14 : Sıcaklık değişimleri 47
Şekil 7.15 : Sıcaklık değişimleri 47
Şekil 7.16 : Isınma grafiği 48
Şekil 7.17 : Soğuma grafiği 48
Şekil 7.18 : Dikeydeki ısı akıları 49
Şekil 7.19 : Yataydaki ısı akıları 50
Şekil 7.20 : Toplam ısı akısı 50
Şekil 7.21 : Toplam ısı akısı 51
Şekil 7.22 : Enerjinin dağılımı 53
Şekil 7.23 : Toplam enerjinin dağılımı 54
Şekil 7.24 : Isı üretim bölgeleri 54
Şekil 7.25 : Meshlerin çıkarımı 55

Şekil 7.26 : Meshlerin çıkarımı..... 56
Şekil 7.27 : Ortalama talaş sıcaklığı 56

FREZELEME İŞLEMİ SIRASINDAKİ İŞ PARÇASINDAKİ SICAKLIK DAĞILIMININ ANALİZİ

ÖZET

Talaş kaldırma işlemi sırasında üretilen ısı ve bu ısının oluşturduğu sıcaklıklar büyük önem taşımaktadır. Kesme ortamının sıcaklıklarını ölçmek için farklı deneysel yöntemler olsa bile bu yöntemlerin doğruluğu ve doğruluğu ve güvenirliği henüz istenilen seviyeye ulaşmamıştır. Bunun yanında sıcaklık dağılımları üzerine yapılan farklı çalışmalar olsa bile bu çalışmalar birbirini doğrulamamış ve deneysel olarak kanıtlanmamıştır. Bu sebeplerden dolayı hem kesme ortamının sıcaklığının ölçülmesine gerek kalmadan ortamdaki sıcaklıkları ve oluşan ısı akılarını belirleyebilecek tersine ısı geçişi yöntemi popülerlik kazanmıştır.

Tersine ısı geçişi yöntemi deneysel veriler ile sayısal çözümlerden alınan sonuçları karşılaştırarak ilerleyen ve ölçümü yapılamayan değişkeni elde etmeye yaratan bir yöntemdir. Talaş kaldırma işleminde bulunmak istenilen değişken ısı akısıdır. Bu çalışmada frezeleme işlemi sırasında parçaya gelen ısı akısının ve iş parçasındaki sıcaklık dağılımının bulunması için tersine ısı geçişi yöntemi kullanılmıştır.

Tersine ısı geçişi yöntemi doğrudan problem, deneysel veriler ve tersine problem olmak üzere genel olarak üç ana bölümden oluşur. Doğrudan problem bulunmak istenilen değişkeninin biliniyor olarak kabul edildiği problemdir. Deneysel veriler ise doğrudan problemin sonucunda ortaya çıkacak sonuçların deneysel olarak toplanmasıyla elde edilir. Tersine problem ise doğrudan problemin çözümü ile deneysel veriler arasında karşılaştırmalı olarak ilerleyerek, bulunmak istenilen değişkenin tahmin edilmesidir. Bu çalışmada doğrudan problem talaş kaldırma sırasında iş parçasına gelen ısı akısının bilinmesi durumunda iş parçasındaki sıcaklık dağılımının bulunmasıdır. Doğrudan problem Abaqus ve Matlab programları ile birlikte çözülmüştür. Deneysel veriler frezeleme işlemi sırasında iş parçasından iki tane termoeleman ile toplanmıştır. Tersine problem ise deneysel veriler ile sayısal çözümndeki ilgili noktaların sıcaklık farklarının toplamınının amaç fonksiyon olduğu bir optimizasyon problemidir. Bu optimizasyon probleminde amaç fonksiyonu en düşük yapacak olan ısı akısı aranmaktadır. Optimizasyon problemi de Matlab programı tarafından çözülmüştür.

THERMAL ANALYSIS OF WORK PIECE DURING MILLING PROCESS

SUMMARY

This master thesis is about heat generation phenomena and determination of work piece temperature during milling process. Heat generation in milling, more generally in machining is a highly complex process due to complex nature of machining.

Heat is generated in three different zones that are called primary zone or shear zone, secondary zone or rake face zone and lastly tool clearance face or work surface zone. In primary zone, heat is generated because of the plastic deformation of the work piece. Most of heat is generated during the machinin operation is generated in this region. In secondary zone, the heat is generated because of the fricton between tool and chip. Heat generated in primary zone generally flows to work piece and chip, on the other hand, heat is generated in secondary zone generally flows chip and tool. Heat is generated in work surface zone is generated due to fricton between tool and work surface, usually unsharpened tools cause this heat generation and heat flows work piece and tool. As it mentioned there are three different heat generation mechanism in machining. During machining heat have to be carried away from cutting medium, work piece, tool and chip behave as heat sink. Besides that in many applications coolant liqiuds is used to carry heat from cutting medium. Temperature of cutting medium is a very important subject about machining because of its effects on productivity, efficiency and quality of manufacturing process. However, any analytical solution or empirical formula, which is verified by tests for heat generation in milling, has not been derived yet. Many analytical or numerical solutions or techniques have been developed since middle of 20^{th} century, but still there is no verified general solution about heat generation or formula / tehcnique about determination of cutting medium temperature. Due to this, heat generation cannot be controled by cutting parameters.

Apart from these cutting medium temperatures cannot be measured by any technique. There are many measurement technique such as tool-work piece thermocouples, embedded thermocouples, single-wire thermocouples, infared based measurement methods, thermal cameras. Every measurment technique has its advantages and disadvantages, and all of them are used in different applications. However, these methods are not accurate or reliable enoguh to determine exact temperature of a exact place in cutting medium.

Due to the reason that there is no verified approach for heat generation and measurement techniques for cutting medium temperature; inverse heat transfer method is employed to estimate them. Inverse heat transfer method is used for estimation an unknown such as a thermo- psychical property or a heat flux. In this method unknown is determined iteratively between based on experimental results. In this study, it is used for estimating heat flux generated by machining process.

Inverse heat transfer method is used to estimate an unkown function or variable in different problems where direct measurement techniques cannot be applied. This method is used first time n the middle of 20^{th} centruy, however, because of the mathematical problems of this method it had not been used effectively since numerical and optimization methods were developed. Espically in last decade of 20^{th} century, after computer powers increase, inverse heat transfer method gained popularity and its applications increased.

Mainly inverse heat transfer method has three different parts namely direct solution, experimental results and optimization. Direct solution is solution of the direct problem, which is the problem while the unknown is estimated. Generally, direct problem is solved by numerical methods. In this problem, direct solution is the solution of heat transfer problem of milling operation with a random heat flux, in other words thermal analysis of milling operation. A 100 x 100 x 2 milimeters work piece is choosen for this study. Due to its very small thickness, the temperature gradient in z direction is assumed as zero.

Thermal analysis of milling operation is a 3-D transient heat transfer problem, which involves a moving heat source and chip disposal process. In milling, process heat is generated by cutting of metal and due to this fact location of the tool can be considered as location of the heat source. For this reason, heat source is modelled as a moving heat source and its motion is modelled based on motion of the tool. In real situtation heat flux applied to work piece might increase and decrease, but in this study heat flux is assumed as constant during the operation to simplify model. Besides this heat source in real is a half circle because of shape of the tool, however, in this study heat source is modelled as linear since tool has high angular and linear velocity of tool. Another important subject of this problem is chip disposal. Due to the chip disposal process, there has to be a mass extraction from system based on motion of tool or another word heat source. Top, bottom and side surfaces of work piece, there is a natural convection boundary condition and heat is convected to ambient air. Shortly, therma analysis of work piece is a 3 D transient heat transfer problem with a heat flux boundary condition that has a motion, a mass extraction process and natural convection boundary condition.

To model motion of heat source and chip disposal process, two different software packages, which are Abaqus (uses finite element method to solve heat transfer problems) and Matlab, are used to solve this problem. Motion of heat source is not modelled as continous, instead of it, it is modelled discretely. There are different ways to model a moving heat source in a commercial code, but chip disposal process cannot be done by conventional methods. To model milling process with motion of heat source and chip disposal process, thermal analysis is divided into 125 steps. In every step, specific meshes are discarded from problem for chip disposal and heat source is replaced for motion of it. Temperature distribution of work piece at the end of a step is used as intial condition of next step. After mesh are discarded, heat source is relocated. Hence, heat source does not move continously, it moves discretely step by step. Basically, thermal analysis of milling process is not a one analysis, it is a sum of 125 analysis. Mesh discarding process and replacement of heat source for every step is done by Matlab. Thermal analysis is done by Abaqus but analysis is prepared by Matlab. Meshes that need to be discarded are determined for every step, so relevant Abaqus files are rewritten for every step to prepare a new analysis and Abaqus is executed via Matlab. Therefore, motion of heat source and chip disposal could be modelled.

Next step of inverse heat transfer method is collecting experimenta data. Experimental results are temperature data, which is collected from spesicific points in work piece during milling. Experimental data for inverse heat transfer method is collected from milling test. Work piece, dimension of which are specified, are milled with specific cutting parameter by a CNC machine. Temperature data is collected from specific points of work pieces by two thermocouples. Thermocouples has approximately 0.1 milimeter diameter and they are located to holes that has diameter of 1 milimeter. They

are located in the middle of work piece in z direction. In addition, to eliminate side effects they are located 45 milimeter and 55 milimeter to front face. Thermocouples distance to cutting surfaces is 2 milimeter. They should be close to cutting surface to increase accuracy of inverse heat transfer method. On the other hand, if thermocouples are located more close to cutting surface, temperature rise might be too rapid for dynamic response of thermocouples and measurement errors can occur. To prevent those errors and increase accuracy, they are located to 2 milimeter to cutting surface.

Last step of inverse heat transfer method is the solution of the inverse problem. In this part, result of direct solution and experimental temperature data are compared. Heat flux value of direct solution is altered respectively those comparison and the heat flux makes differences between minimum is determined as solution of the problem. In other words, this step is an optimization problem, which aims to minimize objective function, which is sum of differences between temperature of specified points in work piece in solution of direct problem and experimental temperature data. Simplex method is used for optimization of inverse heat transfer method. In this step of inverse heat transfer method Optimization Toolbox of Matlab is used.

Heat flux generated by milling operation and applied to work piece is obtained by the last step of inverse heat transfer method. After estimation of heat flux, temperature of specific points are determined to analyze accuracy of method. Experimental temperature data and estimated temperature values are compared and sum of errors for a single thermocouple varies from 3% to 5%. In addition, similar heating and cooling trends are observed in both experimental and numerical results. Therefore, it can be assumed that inverse heat transfer method is applied succesfully to milling operation.

During milling operation, forces that applied to work piece to mil work piece are measured by a force measurement system. Forces are collected for three directions. Total work to remove metal from work piece are calculated by analytical methods for milling. To calculate total work done by tool, firstly shear and friction forces are calculated based on force data what are collected during test. Then work are done by shear and friction forces are obtained based on friction, shear forces and cutting velocity and chip velocity. Sum of those works is total work done by machining process.

After determination of the heat flux which is generated by machining process and applied to work piece, temperature distribution of work piece is obtained from numerical solution. Therefore temperature of different regions of the work piece for whole milling operation is obtained. Also temperature varitaion in time and space for specific points is determined. Effects of milling operation is observed and heating and cooling trends is investigated during and after milling process. Avarage chip temperatures are estimetad from numerical solution of milling process. Temperature determination of work piece and chip temperature during milling process are important for milling operations.

Total heat energy which flows to work piece and total work done by machinin process are calculated. Therefore energy rate or in another world energy partition rate is obtained.

1. GİRİŞ

Talaşlı imalat Dünya üzerindeki en çok kullanılan imalat yöntemlerinden birisidir. Talaş kaldırma işlemi en basit ürünlerin üretimlerinden, kompleks imalat süreçlerine kadar neredeyse her türlü imalat sürecinin içinde yer almaktadır. Özellikle imalat ve otomasyon teknolojilerinin gelişmesi ve endüstride otomasyonlaşma oranının yükselmesiyle önemi eskiye oranla daha da artmıştır. Talaş kaldırma işlemi bu önemi sayesinde farklı yönleriyle, bilimsel çalışmalara konu olmaktadır. Bu konuda yapılan ilk çalışmaların tarihi 16. yüzyıla kadar gitmektedir, bu konuda ilk ciddi çalışmalar da 1900'lü yılların başında Taylor tarafından yapılmıştır.

Talaş kaldırma işleminde ortaya çıkan ısı enerjisi ile kesici takımın, iş parçasının ve talaşların sıcaklığı, talaş kaldırma işlemine dair önemli parametrelerden birisidir. Bu konuya dair ilk çalışmalar 20. yüzyılın ilk yarısında yapılmaya başlamasına rağmen talaş kaldırmanın karmaşık doğası yüzünden ne ısı üretimi ne de sıcaklık değerleri için kesin olarak kabul edilen bir teori veya deneysel yöntem geliştirilememiştir.

Bu çalışma kapsamında endüstride en çok kullanılan talaş kaldırma yöntemlerinden birisi olan frezenin kullanımı sırasında iş parçasına gelen ısı akısı, iş parçasındaki sıcaklık dağılımları ve talaş sıcaklıkları incelenmiştir. İlk olarak iş parçasına gelen ısı akısının tahmin edilmesi için sayısal model hazırlanmış ve ilgili deneyler yapılmıştır. Bu model ve deney sonuçları kullanılarak iş parçasına gelen ısı akısı tersine ısı geçişi yöntemiyle elde edilmiştir. Elde edilen ısı akısıyla frezeleme işlemi sırasında iş parçasındaki sıcaklık dağılımları bulunmuştur. En son olarak iş parçasından kaldırılan talaşların takımın yüzeyine gelmeden önceki sıcaklıkları ortalama olarak elde edilmiştir.

1.1 Literatür Araştırması

Talaş kaldırma sırasında kesme ortamındaki sıcaklıkların bulunması için kullanılan analitik, nümerik ve deneysel olarak 3 farklı genel metot vardır. Kesme ortamındaki

sıcaklıkların bulunması ile ilgili ilk ciddi çalışmalar 20. Yüzyılın ortalarında başlamıştır.

Trigger ve Chao 1951 yılında yayınladıkları çalışma [1] ile talaş ve takım arasındaki sıcaklığı analitik olarak bulmaya çalışmışlardır. Bunun ardından 1955 yılında yine Trigger ve Chao bir başka çalışma daha yayınladılar [2]. İlk çalışmada plastik şekil değiştirmeden kaynaklanan enerjinin bir kısmının ısı enerjisine dönüştüğü kabulü yapılırken, ikinci çalışmada hepsinin ısı enerjisine dönüştüğü kabul edilmiştir. Yine aynı yıl Loewen ve Shaw tarafından yayınlanan bir çalışmada 1951 yılında Trigger ve Chao tarafından geliştirilen model değiştirilerek yeni bir model geliştirmiştir [3]. Bu model ile talaşa gidecek olan enerjinin kesme hızı, kesme derinliği ile artacağını ve kayma uzamaları ile düşeceğini göstermiştir. Stephenson ise 1995 yılında bu modeli kullanarak iş parçasına giden ısı akısını ve iş parçasındaki termal uzamaları modellemiştir [4]. Yine 1954 yılında Weiner kayma düzlemindeki sıcaklık dağılımını iki boyutlu olarak elde etmiştir [5]. Young ve Liou 1994 yılında Weiner'in metodunu değiştirerek aynı problemi daha gerçekçi sınır şartlarıyla çözmüş ve verilerini termal kameralar ile karşılaştırmıştır [6]. Venuvinod ve Lau 1986 yılında Loewen'in yöntemini geliştirmiş ve farklı kesme yöntemleri için uyarlamıştır[7]. Shiak ve arkadaşları 1995 [8] ve 1991 yılında Subramini ve arkadaşları [9] farklı analitik yöntemler geliştirmiştir. Bu analitik yöntemlerde genel olarak ortalama sıcaklıklar incelenmiş ve özellikle geometrilerde ve sınır şartlarında ciddi basitleştirmeler, kabuller yapılmıştır.

Analitik yöntemlerin dışında takım, talaş ve iş parçası geometrilerinin tam olarak incelebildiği ve ortam sıcaklığı yerine daha kesin noktaların sıcaklıklarının ölçülebildiği nümerik çalışmalar özellikle nümerik modellerin gelişmesi ve bilgisayar teknolojisinin gelişmesiyle ortaya çıkmıştır. 1974 yılında Tay ve arkadaşları [10] ve 1979 yılında Muraka ve arkadaşları[11] bu konudaki sonlu elemanlar yöntemini kullanan ilk çalışmaları yapmıştır. 1982 yılında Usui ve Shirakashi [12] ve 1989 yılında Oxley [13] yine sonlu elemanlar yönteminin kullanarak sıcaklık dağılımlarını hesaplamışlardır. Lazoğlu ve Altıntaş'ın 2002 yılında yaptığı çalışma da görece yeni bir konu olan interrupted talaş kaldırma konusunda yapılan çalışmalardan birisidir[14]. Sonlu elemanlar yöntemi haricinde Smith ve Armarego'nun 1981 yılında sonlu farklar yöntemiyle [15], Chan ve Chandra 1991 yılında boundary element yöntemiyle [16] farklı çözümler üretmiştir. Özellikle bilgisayar teknolojisinin gelişmesinden itibaren

nümerik yöntemler üzerine yapılan çalışmalar hız kazanmıştır ve özellikle sadece talaş kaldırma üzerine analizler yapan paket programlar piyasada yer almaya başlamıştır. Bu yöntemlerin hepsinde talaş kaldırma sırasında üretilen ısının bilindiği kabulüyle başlanmaktadır.

Talaş kaldırma sırasında iş parçası ve takımda oluşan sıcaklıkların bulunması için pek çok farklı deneysel metot bulunmaktadır. Bu deneysel metotlar 1997 yılında Silva ve Wallbank tarafından [17], 2005 yılında Longbottom ve Lanham [18] tarafından, 2005 yılında Abukhshim ve arkadaşları [19] tarafından yapılan review çalışmaları ile incelenmiştir. Bu incelemelerde de görülebileceği gibi kesme ortamındaki herhangi bir noktanın yerini yeterli doğrulukta ve güvenilirlikte ölçebilen bir deneysel metot bulunmamaktadır.

Deneysel yöntemlerle nümerik yöntemlerin bir birleşimi olan tersine yöntemler talaş kaldırma esnasında üretilen ısının bilinmesine ihtiyaç duyulmadığı ve yeterli doğrulukta ölçümün alınamadığı kesme ortamından sıcaklık verisi alınmasına ihtiyaç duyulmadığı için gittikçe önem kazanmıştır. Tersine ısı geçişi yöntemi uzun yıllardır bilinen bir metot olmasına rağmen özellikle bilgisayar teknolojisinin gelişmesiyle ve bu konuda yapılan çalışmaların artmasıyla gelişmiştir. Tersine ısı transferinin 1 boyutlu ısı transferi problemleri için çözümü Beck ve arkadaşları [20] tarafından 1985'te ve Özışık [21] tarafından 1993'te yapılmıştır. Yine 1985 yılında bu teknik Alifanov ve arkadaşları [22] tarafından ve Beck ve arkadaşları [23] tarafından iki boyutlu ısı transferi problemlerine uygulanmıştır. Jarny ve akradaşları tarafından da 1991 yılında [24] üç boyutlu ısı transferi problemleri için incelenmiştir.

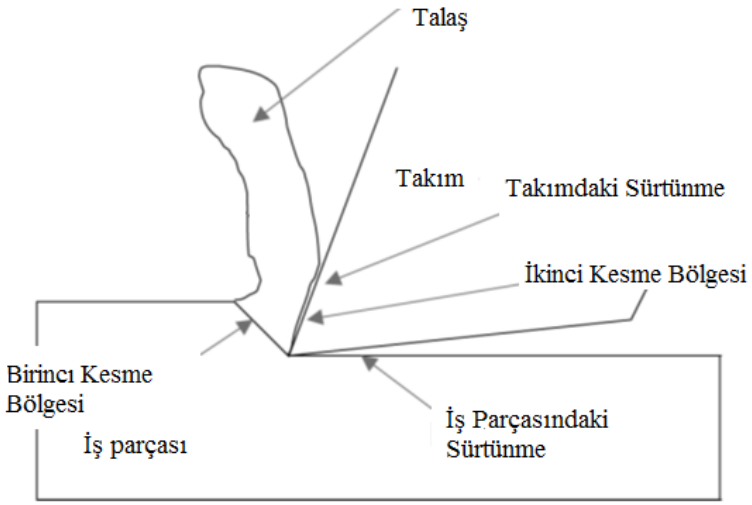
Lima ve arkadaşları [25] 1999 yılında tersine ısı geçişi yöntemini, takım sıcaklığını ölçmede kullanabilmek için bir çalışma yapmıştır. Metal kesme işleminin gerçekleştirilmediği sadece simüle edildiği bu çalışmada yöntemin uygulanabilir olduğu kanıtlanmıştır. 2002 yılında Palazzo ve Pasquino [26] kızılötesi kameraların kullanarak tersine ısı geçişi yöntemini uygulamıştır. Battaglia ve Kusiak [27] 2005 yılında yayınladıkları çalışmada yüksek hızlı delik delme işleminde takım üzerindeki değişimleri incelemek için tersine ısı geçişi yöntemini uygulamışlardır. Yöntemin de test edildiği bu çalışmada, takım üzerinden sıcaklık ölçümü yapılmış ve takım üzerine gelen ısı akıları tahmin edilmiştir. 2006 yılında Richardson ve arkadaşları [28] soğutma sıvısının olduğu frezeleme işlemi sırasında iş parçası üzerinde oluşan sıcaklıkları elde etmiş, yine 2006 yılında Carvalho ve arkadaşları [29] tornalama işlemi

sırasında takım ve takım tutucunun sıcaklıkları ile kesme ortamının sıcaklığını tahmin etmiştir. Bu iki çalışma sırasında da termoelemanlarla elde etmiş sıcaklık verileri kullanıştır. 2007 yılında Huang ve arkadaşları [30] titanyum iş parçasının delinmesi sırasında takımda oluşan sıcaklık değişimlerini incelemiştir. 2011 yılında Gostimiroviç ve arkadaşları [31] taşlama sırasındaki kesme ortamının sıcaklığını ve oluşan ısı akılarını incelemiştir. 2013 yılında ise Elmoussami [32] kesici takımın kenarlarında oluşan ortalama sıcaklıkları incelemiştir.

2. TALAŞ KALDIRMA ve ISI ÜRETİMİ

2.1 Isı üretiminin Ortaya Çıkışı

Talaş kaldırma işlemlerinde ısı üretimi en çok birinci deformasyon bölgesi, kesme bölgesi (shear zone) veya kısaca birinci bölge de denilen kısımda gerçekleşir. Burada oluşan ısı talaş ve iş parçası arasında paylaşılır.Bu ısının büyük bir kısmı talaşla beraber dışarıya atılırken, bir kısmı da iş parçasına geçmektedir[33]) Burada üretilen ısı ile ortaya çıkan sıcaklık artışı iş parçasının mekanik özelliklerini ve dolaylı olarak uygulanan kuvveti etkiler. Talaş yüzeyi bölgesi (rake face zone), ikinci deformasyon bölgesi veya kısaca ikinci bölgede denilen bölümde oluşan ısı ise talaşın takım üzerinde kayması sonucunda oluşan sürtünme kuvveti ile ortaya çıkar. Birinci bölgeden sonra en çok ısı genel olarak bu bölümde oluşur. Buradaki ısı talaşla dışarıya atılır ve kesici takımın içine dağılır. Oluşan ısı ile kesici takımın sıcaklığının yükselmesi takımı yumuşaklaştırır ve aşındırır. Burada takımın sıcaklığı takım ömrünü etkileyen önemli etkenlerden birisidir.



Şekil 2.1 Talaş kaldırma sırasında ısı oluşum bölgeleri

Takım serbest yüzeyi / iş yüzeyi bölgesi (tool clearance face / work surface zone) veya kısaca üçüncü bölge de denilen bölümde oluşan ısı ise talaşlanmış yüzeyin kalitesini ve metalurjik özelliklerini etkileyebilir. Genel görünüme bakıldığı zaman oluşan ısı talaş, iş parçası ve kesici takıma dağılır ve küçük bir kısmı taşınım yoluyla havaya gider. Soğutucu sıvının kullanıldığı talaş kaldırma işlemlerinde ise ısı ayrıca soğutucu sıvı ile kesme ortamından uzaklaştırılır.

2.2 Isı Üretim Bölgeleri ve Sebepleri

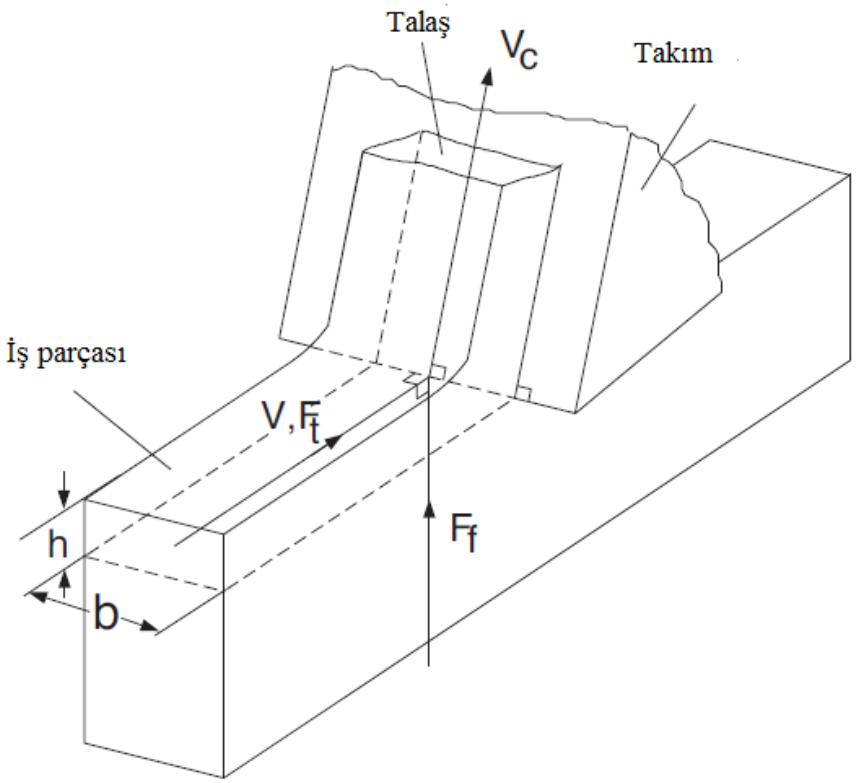
Frezeleme işlemi sırasında kullanılan enerji iş parçasından talaş kaldırmak için gerekli olan plastik deformasyonu sağlamak ve kesici takımla parça ve talaş arasındaki sürtünmeyi yenmek için kullanılır. Bu işlemleri gerçekleştirmek için harcanan güç freze tezgahının motorundan gelir. Motorla frezeye kesici takımın bağlandığı mil döndürülür. Milin dönme hareketi sayesinde kesici takım hem parçayı plastik deformasyona uğratır hem de kesici takımla parça arasındaki sürtünme kuvvetlerini yener. Yüksek plastik şekil değiştirme miktarı yüzünden metalin kesimi sırasında uygulanan kuvvetlerin yaptığı işin %1'den daha az bir kısmı elastik enerji olarak depolanır ve kalan kısmı da ısı olarak ortaya çıkar. Bu sebepten genel olarak talaş kaldırma sırasında yapılan bütün işin ısıya dönüştüğü kabul edilebilir [34]). Ortaya çıkan ısının diğer bölümlerine oranla çok az bir bölümü taşınım yoluyla havaya dağılır. Işınımla ısı kaybı ise genel olarak ihmal edilir. Isının büyük bölümü ise iş parçası, kesici ve takım arasında dağılır. Ortamdan uzaklaştırılan ısının hangi yollarla ne kadarının uzaklaştırıldığına dair farklı tahminler bulunmaktadır. Bununla beraber bu tahminleri destekleyecek herhangi bir veri literatürde bulunmamaktadır. Bu yorumlardan genel olarak en fazla kabül görenleri Çizelge 2.1'de gösterilmiştir.

Isı ayrılma oranları için literatürde bu kabüller şunlardır. [35]

	Talaş	Takım	İş parçası
Shaw	90	5	5
Cormorant	80	10	10
Luer	75	20	5
Jack	80	10	10

Çizelge 2.1 Isı dağılım oranları

Talaş kaldırma esnasında iki tip kesim türü vardır. Bunlar ortagonal ve oblik kesim yöntemleridir. Ortagonal kesim endüstride ve sanayide kullanılmayan daha temel bir yöntemdir. Bununla beraber tez içerisindeki çalışmalar da ortagonal kesim yöntemi kullanılmıştır. İki yöntemin farkı ortagonal kesimde kesici takım iş parçasına dik olarak talaş kaldırma işlemini gerçekleştirirken, oblik kesim yönteminde takım iş parçasına belirli bir açıyla girmektedir. Ortagonal kesim yönteminde, talaş kaldırma sırasında ısı üretimine sebep olan kuvvetler şu şekilde gösterilebilir. [36]



Şekil 2.2 Talaş kaldırma sırasındaki kuvvetler

Burada F_t tanjant kuvvetini ve F_f besleme kuvvetini göstermektedir. Talaş kaldırma sırasında yapılan iş bu kuvvetler tarafından yapılır ve ortaya çıkan bütün ısının bu kuvvetler tarafından yapılan işin sürtünme veya plastik şekil değiştirme gibi farklı şekillerde ısı enerjisine dönüşmesi ile ortaya çıkar

2.3 Talaş Kaldırma Sırasında Sıcaklıkların Önemi

Talaş kaldırma işlemi için çıkan son ürünün kalitesi ve üretim verimliliği işlemin kalitesini belirleyen en önemli parametrelerdendir. Son ürünün kalitesi verilen toleransların ne kadar oranla sağlandığı, yüzey kalitesi, metalurjik özellikleri gibi

farklı etkenlere bakılırken, üretim verimliliği işlemin ne kadar hızlı yapıldığı ve maliyet ile alakalıdır. Bu farklı parametreler pek çok uygulamada talaş kaldırma sırasında ortaya çıkan ısı ve kesme ortamı sıcaklıkları ile doğrudan ilişkilidir. Talaş kaldırma işleminde sürelerin kısalması veya daha kaliteli son çıktıların elde edilmesi için alınan paso miktarının arttırılması, ilerleme hızının arttırılması veya kesme hızınının arttırılması gerekmektedir. Bununla beraber bu parametrelerin arttırılması durumunda harcanan güç de artmakta ve buna bağlı olarak ortaya çıkan ısı ve ortam sıcaklığı da yükselmektedir. Kesme ortamındaki sıcaklıkların fazla yükselmesi durumunda takımın ömrü azalmakta ve takımın fazla ısındığı uygulamalarda sıcaklıktan dolayı takım deforme olmaktadır.. Takımın deforme olmasından dolayı iş parçasının yüzey kalitesi düşmekte ve ayrıca iş parçasındaki sıcaklıkların aşırı derecede artması durumunda iş parçasında hassas toleransların yakalanması daha da zorlaşmaktadır. Bazı durumlarda ise iş parçası yüzeyinin metalurjik özellikleri değişebilmektedir. Bunların sonucu olarak da istenilen ölçülere ve mekanik özelliklere tam olarak uymayan son ürünler ortaya çıkmaktadır. Ayrıca takımın ömrünün azalması da talaş kaldırma işleminin hem maliyetini hem de verimini önemli ölçüde etkilemektedir. Kesici takımların maliyeti özellikle bazı uygulamalar için ciddi bir gider kalemi oluşturmaktadır, takımların ömrünün kısalması maliyetleri daha da arttırmaktadır. Bunun yanında sürekli üretim yapılan tesislerde takım ömrünün azalması üretim işinin durmasına ve verimliliğin düşmesine sebep olmaktadır. Talaş kaldırma sırasında ortaya çıkan ısı ve kesme ortamında bulunan bileşenlerin sıcaklıkları yukarı belirtildiği şekilde talaş kaldırma işleminin dahil olduğu pek çok uygulama için büyük önem taşımaktadır. Isı oluşumu ve sıcaklıklar pek çok işlemde kesme parametrelerini doğrudan etkileyecek kriterlerden birisidir.

2.4 Deneysel Yöntemler

Tarihte ilk olarak 1907 yılında sıcaklığın takım ömrünü, iş parçası yüzeyinin özelliklerini ve güç tüketimini etkilediği Taylor tarafından gösterilmiştir. Kesme ortamı sıcaklığı 1920'li yıllarda ABD, Almanya ve İngiltere'de farklı bilim adamları tarafından termoelemanlarla ölçülmeye çalışılmıştır. Longbottom ve Lanham tarafından 2005 yılında University of the West of England'da yayınlanan Cutting temperature measurement while machining – a review isimli makalede talaş kaldırma

sırasında takım ve iş parçası yüzeyindeki sıcaklıkların ölçümü için şimdiye kadar yapılan çalışmalar incelenmiştir. [37]

Bu çalışmalar şunlardır.

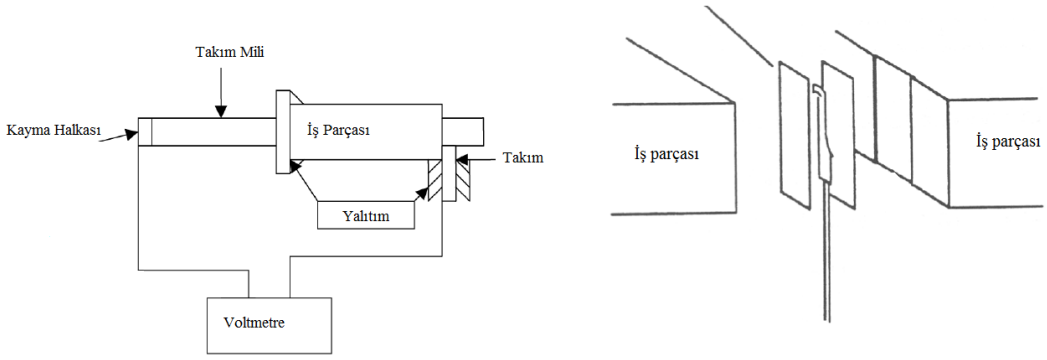
Kalorifik Metot (*CalorificMethod*): Bu konudaki yapılmış en eski yöntemlerden birisi olan bu yöntemde, 1798 yılında Count Rumford su altında yaptığı işlemde suyun sıcaklığını ölçerek dışarı çıkan ısıyı bulmaya çalışmıştır. Büyük çapta işlemler için pratik değildir ve talaş sıcaklığını ölçmek, talaş su sebebiyle ısınmadığı için olanaksızdır.

Takım – İş Parçası Termoelemanları (*Tool-Work Thermocouples*): Bu yöntemde parça ve takım termoeleman olarak kullanılır ve parça takım arasındaki yüzeyin sıcaklığı ölçülür. Bu tip çalışmalar daha önce Shaw ve Stephenson tarafından bu konuda yapılan en iyi yaklaşımlar olarak gösterilmiştir. Burada en önemli sorun, termoelemanların nerenin sıcaklığını ölçtüğünün bilinmemesidir. Termoelemanların en düşük sıcaklığı mı ölçtükleri yoksa ara yüzeyin ortalama sıcaklığını mı ölçtüğü bilinmemektedir. Ayrıca bu ölçümler için bazı limitler mevcuttur. Takım ve parça kısa devre riskine karşı tamamen yalıtılmalıdır. Yüksek hızlı kesimlerde bazı özel maddeler kullanılmalıdır. Maddelerin özellikleri ve dönme işlemi yüzünden kalıcı bir elektriksel temas kurulamamakta bu da ölçülecek sıcaklıkların doğruluğu konusunda şüphe doğurmaktadır. Ayrıca kalibrasyon önemli bir sorun olarak ortaya çıkmaktadır. Soğutma sıvısı da bu yöntemde uygulanamamaktadır. Bütün bu problemlere rağmen bu yöntem laboratuvar ortamında çok geniş olarak kullanılmakta ve iyi sonuçlar vermektedir ancak yöntemin malzeme özelliklerine hassaslığı yöntemin daha geniş alanlarda uygulanmasında sıkıntı çıkarmaktadır.

Gömülü Termoelemanlar (*Embedded Thermocouples*): Bu yöntemde termoeleman hangi kısmın döneceğine bağlı olarak takım veya parça içinde delinin bir deliğin içine yerleştirilir. Termoeleman yüzey sıcaklığını ölçemez ancak yüzeye çok yakın bir yerin sıcaklığını ölçer. Böylece yüzey sıcaklığı ölçülemese bile takım veya parçanın sıcaklık dağılımı ölçülebilir. Yüzey sıcaklığını ölçmek için farkı ısı geçişi modelleri uygulanır. Bununla beraber ölçümlerde delikten veya termoelemandan dolayı doğruluk problemleri oluşabilmektedir. Özellikle termoelemandan dolayı kaynaklanan hataların oranı %50'ye kadar çıkabilmektedir. Bu hatalar delikteki havadan ve katı bir cismin içindeki termoelemanda transient ısı iletiminden kaynaklanmaktadır. Ayrıca

termoelemanların kalibrasyon sorunları ve özellikle yüksek sıcaklıklarda hızlı sıcaklık değişimlerine tepki verememeleri diğer problemlerdir. Bu tekniğin uygulamasının takım-parça termoelemanlara göre bile daha zor olduğu belirtilmiştir

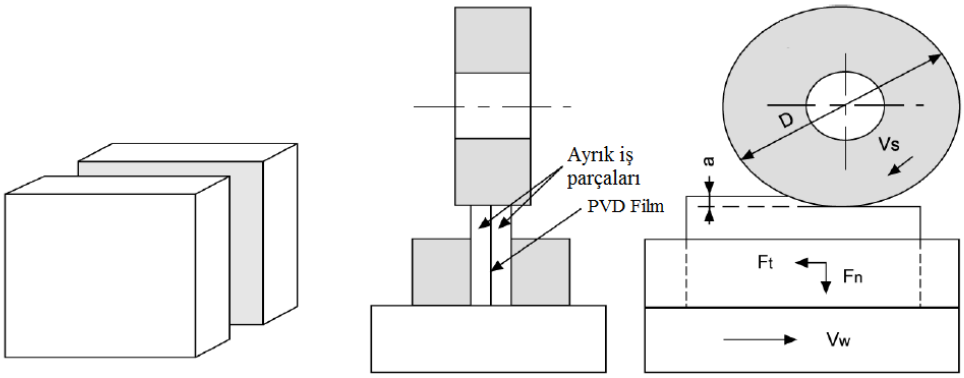
Tek Kablo Termoelemanları (*Single Wire Thermocouples*): Parçanın ikiye ayrılarak içine termoeleman yerleştirildi bu yöntem deneysel çalışmalar için iyi bir örnek oluşturmaktadır ancak parçanın ikiye ayrılmasından dolayı üretimde kullanılabilecek bir yöntem değildir. Bununla beraber parçanın kesilmesi sırasında termoeleman çok kısa bir süre (0.02 saniye) ölçüm alabilmektedir. Bu yüzden termoelemandan çok yüksek örnekleme hızında ölçüm alınması şarttır.



Şekil 2.3 Kesme ortamı sıcaklıkları için deneysel yöntemler [38]

Cam Elyaf Izgaraları (*Fibre Grass Gratings*): Bu metotta sıcaklık değişimlerinin efektif kırılma indekslerini değiştirmesiyle sıcaklığı algılayan bir deney düzeneğiyle sıcaklık ölçülmektedir. Termooptik bir etki söz konusudur. İlk defa 2004 yılında ortaya sürülmüş yeni bir metottur. Şu an için uygulama için pratik değildir.

PVD Film Metodu: PVD (Fiziksel buhar kalıntıları – *Physical Vapor Deposition*) metodu için önce parça ikiye ayrılır. Bu ikiye ayrılan parçanın ara yüzeyi cilalanır. Bu cilalanan yüzeylere erime sıcakları bilinen malzemelerden buhar biriktirme yöntemiyle film çekilir. Daha sonra birleştirilen parçalar takımla işlenir. İşlemeden sonra parça tekrar ikiye ayrılarak aradaki filmin ne kadarının eridiği görülür ve böylece penetre eden sıcaklık belirlenir. Farklı malzemelerle ve sıcaklıklarla yapılan deney sonucunda bir sıcaklık dağılımı oluşturulur. Parçaların arasına kaplama yapma sürecinin pahalı olması işlemin dezavantajlarındandır. Ayrıca rutin testler için parçanın ikiye ayrılması gerektiğinden pek uygun değildir.



Şekil 2.4 PVD Film Yöntemi [39]

Kızıl ötesi termometreler (*Infrared Thermometers*): Kızılötesi pirometreler ve termometreler talaş kaldırma işlemi için doğru güvenilir yöntemler olarak gösterilmiştir. Temasın olmaması, yüksek sıcaklık değerlerinde hızlı tepki vermeleri, ısıl dağılıma zarar vermeden sıcaklık ölçebilmesi bu cihazların başta gelen avantajlarıdır. Bununla beraber doğru emissivity değerlerini ölçmek düzenli kalibrasyonla üstesinden gelebilecek bir sorun olarak ortaya çıkıyor. Bunun haricinde talaş kaldırma sırasında talaşların, soğutucu sıvının ölçümü etkilemesi bekleniyor. Talaş, toz veya dumanın etkilerini iki renkli pirometre kullanarak çözmek mümkün olsa da soğutucu sıvı bir problem olarak kalıyor.

Kızıl ötesi kameralar (*Infrared Cameras*): Kızılötesi kameralarla belirli bir alandaki sıcaklık dağılımı bulunabilmektedir. Bu sayede dinamik bir ısı alanı çıkarılabilmektedir. Kızılötesi termometreler gibi bu yöntemde de doğru emissivity değeri işin en önemli bölümünü oluşturmaktadır.

Uzaktan ölçümler ve tersine yöntemler (*Remote Measuring / Inverse Methods*): Remote measuring analitik ve deneysel sonuçlarla sıcaklık tahmini için bir model oluşturmaktadır. Farklı yaklaşımların avantajlarından aynı anda kullanabilmesi bu yöntemin en önemli avantajlarından birisidir. Farklı yöntemlerle sıcaklık ölçümü yapılarak, ısı transferi modelleriyle kaynağın sıcaklığı tahmin edilebilmektedir. Ayrıca bu yöntemler okunan değerleri doğrulamak için de kullanılabilmektedir. Termografik fosfor termometresi (*Thermographic Phosphor Thermometry*): Bu yöntem daha önce talaş kaldırma sırasında sıcaklık ölçme için kullanılmamıştır. 2004 yılında ImperialCollege'de ortaya atılan bu yöntem türbin kanatlarının sıcaklıklarını ölçmek için kullanılmıştır. Bu yöntemde sıcaklığı ölçülmek istenen cismin etrafı fosforla karışık bir tozla kaplanıp, bu tozun davranışına göre sıcaklık ölçülmektedir. Teorik

olarak talaş kaldırmada da aynı işlem yapılabilir olsa bile pratikte bir deneme yapılmamıştır.



Şekil 2.5 Kızıl Ötesi Kamera Görüntüsü [40]

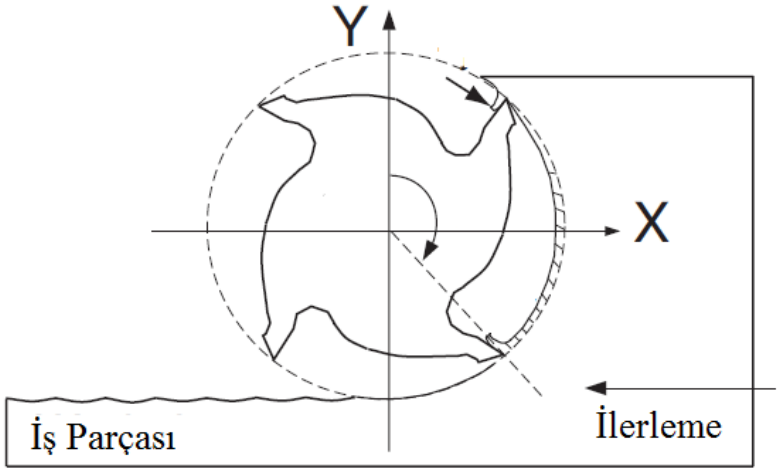
Termografik fosfor termometresi (*Thermographic Phosphor Thermometry*): Bu yöntem daha önce talaş kaldırma sırasında sıcaklık ölçme için kullanılmamıştır. 2004 yılında ImperialCollege'de ortaya atılan bu yöntem türbin kanatlarının sıcaklıklarını ölçmek için kullanılmıştır. Bu yöntemde sıcaklığı ölçülmek istenen cismin etrafı fosforla karışık bir tozla kaplanıp, bu tozun davranışına göre sıcaklık ölçülmektedir. Teorik olarak talaş kaldırmada da aynı işlem yapılabilir olsa bile pratikte bir deneme yapılmamıştır.

Literatürde bu konuda yapılmış pek çok farklı çalışma vardır. Bununla beraber yapılan çalışmalar çok büyük farklılıklar içermektedir ve genel olarak bu ölçüm yöntemlerine dair parametrik çalışmalar yapılmamıştır. Bu durum ölçüm yöntemlerinin birbiriyle kıyaslanmasını zorlaştırmaktadır. Talaş kaldırma sırasında parçadaki ve iş parçasındaki sıcaklık ölçümlerine dair yapılan çalışmalar sonucunda bu yöntemlerden herhangi birisinin diğerine göre daha üstün veya güvenilir olmadığı belirtilmiştir. Her bir ölçme tekniğinin kendine göre daha başarılı olduğu yanları olmakla birlikle hiç birisi yeteri kadar güvenilir bulunmamaktadır. [41]

3. MATEMATİK MODEL VE FORMÜLASYON

Bu çalışmanın konusu olan frezeleme işleminde 10 milimetre çapa sahip freze çakısının kesici takım olarak kullanılmaktadır. Bu kesici takım ile 100 milimetre kenar ölçülerine sahip ve 2 milimetre kalınlığında bir iş parçası kesilecektir. İşlemin sonunda iş parçası iki ayrı parçaya ayrılmış olacaktır.Frezeleme işleminde iş parçasındaki sıcaklık dağılımının ve ısı akıların bulunması ilerleyen bir ısı kaynağının bulunduğu zamana bağlı üç boyutlu bir ısı transferi problemidir. Bu problemin en önemli kısmı kesici takımın ilerlemesi ve geçtiği bölümleri keserek iş parçasından uzaklaştırmasıdır. Sınır şartları incelendiği zaman görülecektir ki parçaya uygulanan ısı akısı dışındaki tek sınır sınır şartı iş parçasının her bölümünde bulunan doğal taşınımla havaya ısı geçişi vardır.

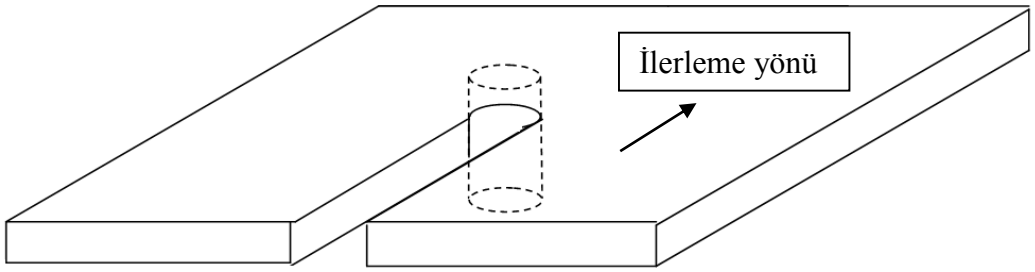
İlk olarak ısı akısını üreten kesici takım incelenmiştir. Şekil 3.1'de frezeleme işleminin şematik bir görünümü vardır. Burada da görülebileceği gibi parçayı keserek ısı akısı oluşturan kesici kalem dairesel olarak ilerlemektedir. Dönme ve ilerleme hareketlerinden dolayı ısı akısı f(x,y,t) şekliden bir fonksiyon olarak iş parçasına uygulanmaktadır.



Şekil 3.1 Freze işleminin şematik görünümü [42]

Şekil 3.2'de ise problemin genel görünümü gösterilmektedir. Buradan da görülebileceği gibi iş parçası frezeleme işlemi ile iki parçaya ayrılacaktır. İlk olarak

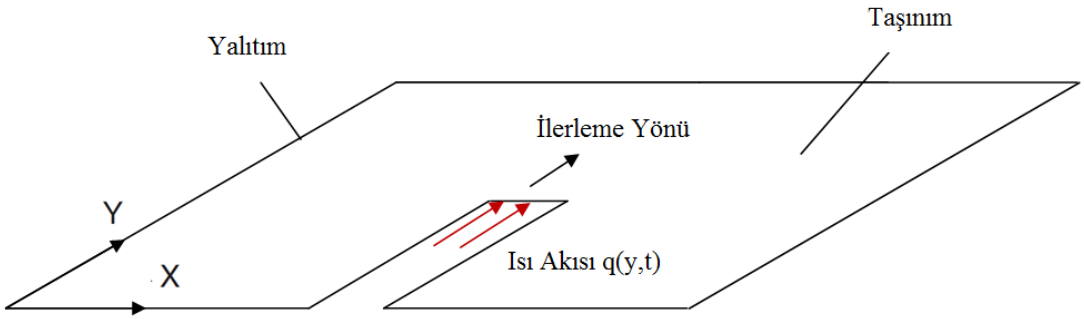
frezeleme işlemi sırasında kesici takımın yüksek hızda dönmesinden dolayı ısı akısının Şekil 3.1'deki eksen takımına göre y eksenindeki değişimi ihmal edilmiştir. Bu sayede ısı akısının parçaya periyodik olarak değil sabit olarak etkilediği kabülü yapılmıştır. Kesici takımın yüksek hızdaki açısal hareketinden dolayı bu kabülün yapılması bir problem oluşturmamaktadır ve bu kabül sayesinde problem farkedilir biçimde basitleşmektedir. Bu yapılan kabülden sonra frezeleme işleminden kaynaklanan ısı akısı iş parçasına yarım daire şeklinde ancak sabit bir şekilde uygulanmaktadır. Burada da işlemi kolaylaştırmak için bir basitleştirme yapılarak ısı akısının uygulanma şekli yarım daire yerine, düz bir çizgi olarak kabul edilmiştir. Freze çakısının çapı ve ilerlemesi düşünüldüğü zaman bu kabülün yapılması da problemin genelini etkilemeyecektir.



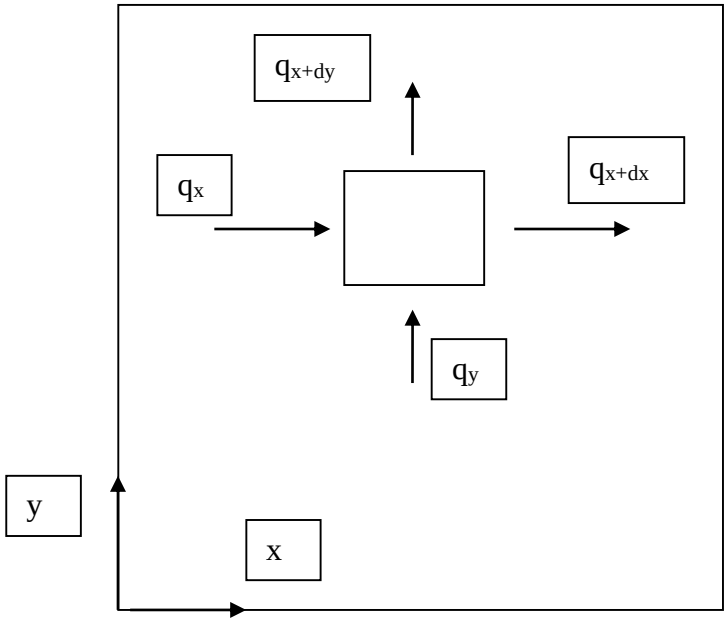
Şekil 3.2 Problemin şematik görünümü

Bunun yanında iş parçasının eni ve boyu dikkate alındığı zaman kalınlığının çok düşük olduğu görülecektir. Probleminin çözümünün basitleştirilmesi için iş parçasının kenarları yalıtımlı kabul edilmiştir. Buradan taşınımla kaybedilecek ısı, parçanın alt ve üst iki yüzeyinden taşınımla kaybedilecek ısıya göre çok daha düşüktür. Ayrıca parçanın kalınlığının çok küçük olması sebebiyle sıcaklığın kalınlık üzerinde değişimi de ihmal edilmiş ve problem iki boyutlı olarak kabul edilmiştir. Bu kabüllerden sonra problem Şekil 3.3'teki halini almıştır.

Problem hakkında ilgili basitleştirmek yapıldıktan sonra diferansiyel analiz yapılması için kontrol hacmi ve bir diferansiyel eleman seçilir. Problemdeki kontrol hacmi iş parçasının kendisidir ve diferansiyel eleman olarak da dx ve dy boyutlarına sahip bir diferansiyel eleman seçilir. Bu parça üzerinde enerji dengesi yazılırsa,



Şekil 3.3 Problemin gösterimi



Şekil 3.4 Problemin diferansiyel gösterimi

$$q_x dx + q_y dy + hA_T (T - T_\infty) = q_{x+dx} + q_{y+dy} + \rho C_p V \frac{\partial T}{\partial t} \qquad \textbf{(3.1)}$$

Bu denklemde,

$$q_x = -kA_x \frac{\partial T}{\partial x}$$

$$q_y = -kA_y \frac{\partial T}{\partial y}$$

$$q_{x+dx} = -kA_x \frac{\partial T}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x}\left(-kA_x \frac{\partial T}{\partial x}\right) dy$$

$$q_{y+dy} = -kA_y \frac{\partial T}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial y}\left(-kA_y \frac{\partial T}{\partial y}\right)dx$$

$$A_x = dy\delta \;\; A_y = dx\delta \;\; A_T = dxdy \;\; V = dxdy\delta$$

Değişken değişimi yapılırsa,

$$T - T_\infty = \theta$$
$$\frac{\partial T}{\partial n} = \frac{\partial \theta}{\partial n}$$

Denklem yeniden düzenlenirse,

$$-kdy\delta \frac{\partial \theta}{\partial x} - kdx\delta \frac{\partial \theta}{\partial y} + hdxdy\theta = -kdy\delta \frac{\partial \theta}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x}\left(-kdy\delta \frac{\partial \theta}{\partial x}\right)dx - kdx\delta \frac{\partial \theta}{\partial y} +$$
$$\frac{\partial}{\partial y}\left(-kdx\delta \frac{\partial \theta}{\partial y}\right)dy + \rho C_p dxdy\delta \frac{\partial \theta}{\partial t}$$

Gerekli düzenlemeler yapılınıp denklemin her iki tarafı dxdy δ ile bölünürse,

$$-k\frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} - k\frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2} + \rho C_p \frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{h}{\delta}\theta$$

$$\frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2} + \frac{h}{k\delta}\theta = \frac{1}{\alpha}\frac{\partial \theta}{\partial t}$$

İş parçası başlangıçta ortam ile aynı sıcaklıktadır bu yüzden başlangıç şartı,

$$\theta(x, y, 0) = 0$$

Sınır şartları,

İş parçasının 3 kenarında yalıtım kabülü vardır,

$$\frac{\partial \theta(0, y, t)}{\partial x} = 0$$

$$\frac{\partial \theta(x, L, t)}{\partial y} = 0$$

$$\frac{\partial \theta(L, y, t)}{\partial x} = 0$$

İş parçasının alt yüzeyinin kesim olmayan bölümlerinde de aynı şekilde yalıtım kabülü vardır bu yüzden,

$x < \frac{L}{2} - 5$, $x > \frac{L}{2} + 5$ ise,

$$\frac{\partial \theta(x,0,t)}{\partial y} = 0$$

$\frac{L}{2} - 5 < x < \frac{L}{2} + 5$ ise v = kesici takımın ilerleme hızı olacak şekilde,

$$-k \frac{\partial \theta(x,vt,t)}{\partial y} = q''(y,t) \qquad \textbf{(3.2)}$$

Ayrıca kesilen bölümlerin yan yüzeylerinde de yalıtım şartı vardır,

$$\frac{\partial \theta(\frac{L}{2} - 5, y, t)}{\partial x} = 0$$

$$\frac{\partial \theta(\frac{L}{2} + 5, y, t)}{\partial x} = 0$$

4. TERSİNE ISI GEÇİŞİ

Tersine ısı geçişi problemleri ısı mühendisliği problemlerin analizinde bilinmeyen özelliklerin sıcaklık veya ısı akısı ölçümlerine dayanılarak tahmin edilmesine dayanır. Bilinmeyen bir ısı akısının sıcaklık ölçümleriyle tahmin edilmesi / bulunması bir tersine ısı geçişi problemidir. Klasik ısı geçişi problemlerinde bir bölgeye uygulanan ısı akısı, o bölgedeki sıcaklık değişiminin sebebidir. Bu problemlerde ısı akısı bilinir durumdadır ve oluşan sıcaklık değişimi bu bilinen ısı akısına göre belirlenir. Klasik ısı geçişi problemlerinin aksine tersine ısı geçişi problemlerinde sıcaklık değişimine sebep olan ısı akısı bilinmeyen durumdadır, bunun yerine ise sıcaklıklar bilinir durumdadır. Bilinen sıcaklıklardan faydalanarak ısı akısı bulunur. Bu durum şöyle de açıklanabilir. Klasik ısı geçişi problemlerinde sebepten sonuç elde edilirken, tersine ısı problemlerinde sonuçtan sebep bulunur. Sonuçtan sebebin bulunması sebebiyle de bu problemlerin ismi tersine ısı geçişi problemleridir.

Tersine ısı geçişi problemleri ile makine, uzay, kimya, nükleer mühendisliği gibi çok farklı disiplinlerde farklı uygulamalarda karşılaşılmaktadır. Buna rağmen özellikle uzay programının başlangıcına kadar bu alanda gözle görülebilir bir ilerleme görülmemiştir. Ancak uzay programı sırasında ve sonrasında tersine ısı geçişi problemleri çözümlenmeye başlamıştır. Uzay mekiklerinin dönüşlerinde atmosfere girmesi sırasında yüzeylerinde oluşan sıcaklıkların herhangi bir ölçüm yöntemiyle ölçülememektedir. Bu sebepten yüzeye yakın yerlerde yapılan sıcaklık ölçümleri ile tersine analiz yapılarak yüzey sıcaklığı bulunmuştur. Ayrıca bu problemin çözümü sırasında malzemenin yüksek sıcaklıklardaki termofiziksel özellikleri de tahmin edilmiştir. Bu problemin çözümü sırasında ve sonrasında tersine ısı geçişi problemlerinin çözüm tekniklerinde büyük ilerleme gözlemlenmiştir. Tersine ısı geçişi metodu özellikle bazı durumlar çok faydalı bir metot olsa bile, bu metodun bazı eksiklikleri bulunmaktadır. Bunlardan ilki tersine ısı geçişi problemlerinin matematiksel olarak ill-posed olarak kabul edilmesidir. Bir problemin well-posed olarak kabul edilmesi için o problemin 3 farklı şartı sağlaması gerekmektedir. Bu şartlar şöyle sıralanabilir,

- Çözüm var olmalı.
- Çözüm tek olmalı
- Çözüm giriş verisinde yapılan değişiklere karşısında kararlı davranmalı

Tersine problemlerin çözümü bulunmaktadır. Bu sebepten tersine problemler ilk şartı sağlamaktadır. Bununla beraber tersine problemlerin çözümleri her zaman tek olmaz, bu şartı sağlayan çok az tersine problem vardır. Ayrıca tersine problemler giriş verilerindeki rastgele hatalara karşı çok hassastırlar, bu yüzden kararlılığı sağlamak için bazı özel teknikler bulunmaktadır. Tersine problemlerin ill-posed olmasından dolayı uzun bir süre boyunca bu problemlerin çözülemez olduğu veya çözülmesi durumunda bile ortaya çıkan sonuçların anlamsız olduğu sanıldı. Ancak özellikle bilgisayar teknolojisinin gelişmesiyle, nümerik çözümlerin kapasitelerinin artması ve buna bağlı olarak nümerik çözüm yöntemlerinin gelişmesiyle tersine ısı geçişi metodu ciddiye alınan bir metot olabilmiş ve ill-posed olmasından kaynaklanan bu sıkıntılar belirli kısıtlamalar söz konusu olacak şekilde giderilebilmiştir. [43]

Tersine ısı geçişi L kalınlığında bir levha içerisinde zamana bağlı bir boyutlu ısı geçişi için şöyle tanımlanabilir. Levha üzerindeki sıcaklık dağılımı başlangıçta F(x) olsun. Herhangi bir t anında x = 0 kenarına f(t) büyüklüğünde bir ısı akısı verilsin. Bu sırada diğer kenarda da sabit sıcaklık (T_L) sınır şartı olduğu kabul edilsin. Bu problemin matematiksel gösterimi şu şekildedir.

$$0 < x < L \text{ ve } t > 0 \text{ için,} \qquad \frac{\partial}{\partial x}\left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) = \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} \qquad \textbf{(4.1)}$$

$$x = 0 \text{ ve } t > 0 \text{ için,} \qquad -k \frac{\partial T}{\partial x} = f\left(t\right)$$

$$x = L \text{ ve } t > 0 \text{ için,} \qquad T = T_L$$

$$0 < x < L \text{ ve } t > 0 \text{ için,} \qquad T = F(x)$$

Bu problem için f(t) ve T_L sınır şartları, F(x) başlangıç koşuludur. Ayrıca yoğunluk, özgül ısı ve ısıl iletkenlik katsayısı belirlidir. Bütün şartlar ve özellikler bilinmektedir. Bu problemin sonucu levha üzerindeki zamana ve yere bağlı olan sıcaklık dağılımını belirlemektir. T(x,t)'nin belirlenmesi durumunda bu problem çözülmüştür. Bu

problem matematiksel olarak well-posed bir problemdir ve klasik yöntemlerle analitik veya nümerik olarak çözülebilmektedir. Tersine ısı geçişi metodunda bu probleme doğrudan problem (direct problem) denilmektedir.

Bu problem de sınır şartı olarak verilen f(t)'in bilinmediği ancak bunun dışında TL, F(x), ρ, Cp ve k'nın bir problem düşünüldüğünde bilgi eksikliğinden kaynaklı bu problemin çözülemediği görülebilmektedir. Bilinmeyen sınır şartı yerine, levhanın belirli noktalarında ve zamanlarda sıcaklıkların bilindiği kabul edilsin. Bu durumda bu problem bir tersine problem halini alacaktır. Tersine ısı geçişi problemleri sırasında söz konusu alandaki sıcaklıklar ölçümle bilinir ve bu ölçümler ne kadar hassas yapılırsa yapılsın her zaman bir hata payı içermektedirler. Bu sebepten tersine analiz ile belirlenecek olan büyüklük tam doğru değildir ve ancak ölçüm hatalarıyla beraber tahmin edilebilir. Tersine problemin matematiksel gösterimi şu şekildedir.

$$x = 0 \text{ ve } 0 < t < t_f \text{ için}, \qquad -k\frac{\partial T}{\partial x} = bilinmiyor \tag{4.2}$$

$$x = L \text{ ve } 0 < t < t_f \text{ için}, \qquad T = T_L$$

$$t = 0 \text{ ve } 0 < t < t_f \text{ için}, \qquad T = F(x)$$

Doğrudan problemin amacı problemle ilgili sınır ve başlangıç koşulları ile parçaların termo-fiziksel özellikleri belirli iken levha içinde sıcaklık dağılımı elde etmektir. Bunun yanında tersine problemin amacı sıcaklık dağılımını bilirken, bilinmeyen başka bir özelliği tahmin etmektir. Bu bilinmeyen özellik bir sınır veya başlangıç koşulu olabileceği gibi, bir termo-fiziksel özellik de olabilir. Tersine ısı geçişi problemi bu problemde görüldüğü gibi sadece bir iletim problemi olacağı gibi taşınımın veya ışınım tek tek içerisinde olduğu veya iletim, taşınım ve ışınımın beraber yer aldığı bir problem halini de alabilir. [44]

Bu çalışmada tersine ısı geçişi yöntemi iş parçasına gelen ısı akısını bulmak için kullanılmıştır. Tersine ısı geçişi yöntemi, ölçüm metotlarının yetersiz kaldığı durumlarda kullanılan bir yöntemdir, burada da ölçüm teknikleri kesme yüzeyinden sıcaklık ölçümü konusunda yetersiz kalmaktadır. Diğer yöntemlerin aksine tersine ısı geçişi yöntemiyle kesme yüzeyinde olmayan noktalardan alınacak sıcaklık değerleriyle, kesme yüzeyindeki sıcaklık değerlerini tahmin etmemize olanak sağlamaktadır. Tersine ısı geçişi yöntemi için öncelikli olarak doğrudan problem sanki

ısı akısı biliniyormuşçasına çözülür. Bu aşamadan sonra elde edilen sonuçlarla, deneysel sıcaklık değerleri karşılaştırılır ve yeni bir ısı akısı tahmin edilir. Gelen sonuçlar tekrar, deneysel verilerle karşılaştırılır ve deneysel sonuçlarla, çözümden elde edilen sonuçlar arasındaki fark minimuma inene kadar bu prosedür böyle devam eder. Burada iki sıcaklık değerleri arasındaki farkın minimuma indirilmesi ayrıca bir optimizasyon problemidir.

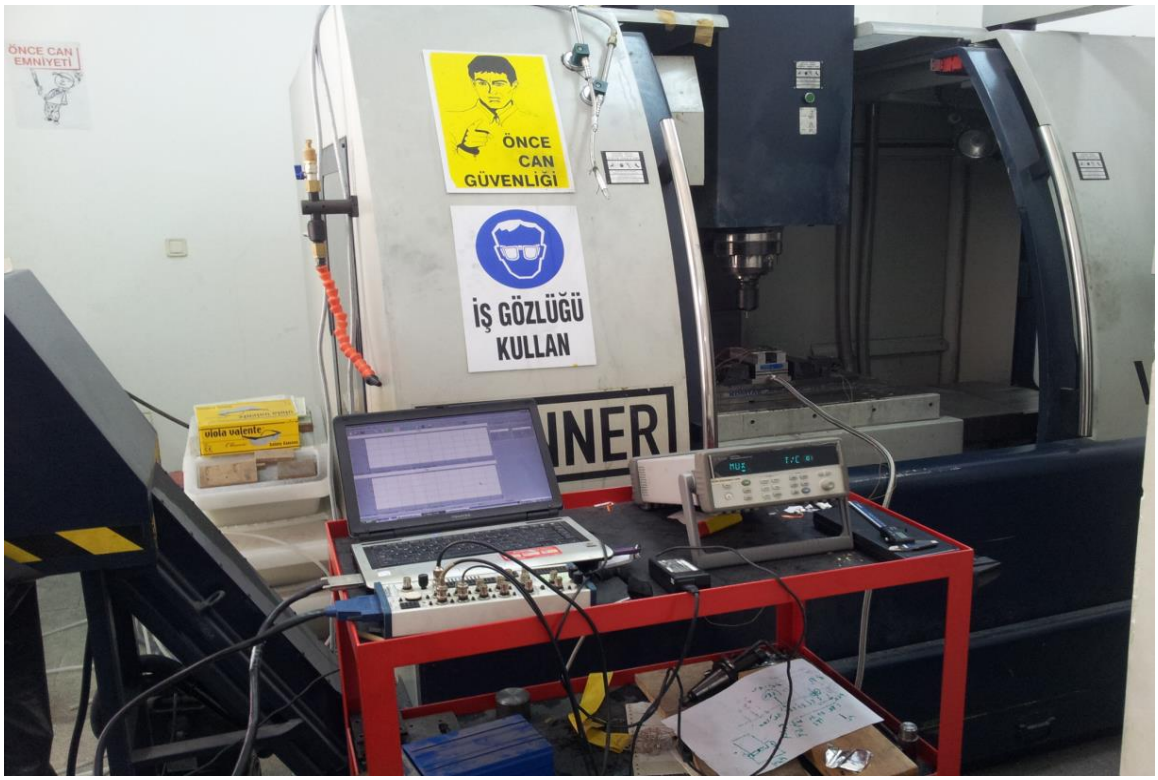
Tersine ısı geçişi yönteminin daha iyi açıklanması bu yöntemin en çok kullanıldığı alanlardan birisi olan malzemelerin sıcaklığa bağlı olarak değişen termo-fiziksel özelliklerinin tayini verilebilir. Özellikle belirli bir uygulamada kullanılmak için tasarlanan yeni malzeme türlerinin termo-fiziksel özellikleri bilinmemektedir. Normal koşullarda geleneksel yöntemler kullanılarak bu özellikler tayin edilse bile, yüksek sıcaklıklara çıkıldığı zaman bu geleneksel yöntemler kullanılamamaktadır. Basit bir örnek olması için sıcaklığı 1500 ^{0}C'ye kadar bir fırının duvarı ele alınsın. Bu fırın duvarının termo-fiziksel özelliklerinin önemli olduğu bir uygulamada kullanılacağı zaman, bu özelliklerin sıcaklığa bağlı olarak tayin edilmesi gerekmektedir. Geleneksel yöntemlerin kullanılamadığı bu durumda, tersine ısı geçişi yöntemi kullanılır. İlk fırın duvarının bilinmek istenilen termo-fiziksel özelliği tahmin edilir ve bu durum için duvarın sıcaklık dağılımı elde edilir. Sonrasında fırın duvarının ölçüm alınabilen yerlerinden sıcaklık ölçümleri alınır. Bu sıcaklık ölçümleri ile daha önce hazırlanmış çözümün sonuçları karşılaştırılır. Bu karşılaştırmaya göre duvarın öğrenilmek istenen özelliği tekrar tahmin edilir ve elde edilen sıcaklık dağılımı ile deneysel sonuçlar tekrar karşılaştırılır. Bu durum deneysel sonuçlar ile tahmin edilen termo-fiziksel özellik ile elde edilmiş sıcaklık dağılımı arasındaki fark minimum olana kadar devam eder. Bu iki sonuç arasındaki fark, yeteri kadar küçük olursa duvarın termo-fiziksel özelliği belirli bir hata ile bulunmuş olunur. Tersine ısı geçişi yöntemi ile bu örnekteki gibi çeşitli kısıtlamalar yüzünden ölçülemeyen termo-fiziksel özellik veya ısı akısı gibi bilinmeyenlerin tayini için kullanılmaktadır.

5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Bu çalışma kapsamında levha şeklinde olan bir iş parçası üç eksenli bir CNC tezgahı kullanılarak frezeleme yöntemi ile iki parçaya ayrılmıştır ve frezeleme işlemi sırasında iş parçasından sıcaklık ölçümü yapılmıştır.

5.1 Deney Düzeneği

Freze deneyleri İTÜ Makina Fakültesi bünyesinde bulunan CNC tezgahında gerçekleştirilmiştir. Frezeleme sırasında hem sıcaklık hem de kuvvet ölçümleri alınmıştır. Sıcaklık ölçümleri termoelemanlar iş parçasının içinde iki farklı noktadan alınmıştır, kuvvet ölçümleri ise dinanometre ile üç eksende olacak şekilde toplanılmıtşr. Ölçümler için iki farklı dizüstü bilgisayar ve iki farklı datalogger kullanılmıştır.



Şekil 5.1 Deney düzeneği genel

5.2 Deneyin Yapılışı

Frezeleme işleminin yapıldığı iş parçası için AISI 1020 çeliği seçilmiştir. İş parçası 100 milimetre x 100 milimetre boyutlarında ve kalınlığı 2 milimetre olan bir kare bir levhadır. Freze işleminde kaplamasız, karbürden bir parmak freze kesici takım olarak kullanılmıştır. Kesici takımın çapı 10 milimetre olup, kesici takım 00 helis, 200 rake ve 60clearence açısına sahiptir. AISI 1020 çeliğinin malzeme özellikleri tabloda verilmiştir.

Çizelge 5.1 AISI 1020 Çeliğinin Malzeme Özellikleri

Yoğunluk [kg/m3]	7800
Isı İletkenlik Katsayısı [W / m K]	51,9
Isıl kapasite [J / kg K]	486

Deney sırasında 0,127 milimetre çapı olan üç tane K tipi termoeleman kullanılmıştır. Bu üç termoelemanın, iki tanesi ile frezeleme işlemi sırasında sıcaklık ölçümü yapılmıştır, diğer termoeleman ile kesici takımın iş parçasına temas ettiği anı belirlenmiştir. Sıcaklık ölçümü yapacak olan iki termoeleman iş parçasında açılan 1 milimetre çapındaki deliklerin içine yerleştirilmiştir. Bu iki termoeleman, kenar etkilerinden uzakta olmasından dolayı sıcaklıkların yersel olarak daha az değiştiği iş parçasının orta bölgesine, ön yüzeyden 45 ve 55 milimetre uzaklığa, konulmuştur. Bu sayede sıcaklık ölçümlerinin birbirini doğrulayarak ölçümlerin güvenilirliğinin arttırılması planlanmıştır. Termoelemanların kesici yan yüzeylere çok yakın konulması durumunda, kesme yüzeylerinin çok yüksek sıcaklık değerlerine çıkması yüzünden sıcaklık ölçümlerinde hata oluşabileceğinden termoelemanlar kesme yüzeylerine iki milimetre uzaklığa yerleştirilmiştir. Termoelemanların yerleşimi şekil 6.2'de gösterilmiştir. Termoelemanların yerleştirildiği delikler 1 milimetre derinliğindedir, böylece termoelemanlar iş parçasının tam olarak orta yüzeyine yerleştirilmiştir. Bunun haricinde üçüncü termoeleman iş parçasının ön yüzeyine sabitlenmiştir. Frezeleme işlemi için kesme parametreleri Çizelge 5.2'de gösterilmiştir.

Termoelemanlardan gelen sıcaklık ölçümleri 150 mikro saniyede bir alınmaktadır. Bu ölçümler Agilent marka bir datalogger ile toplanmıştır. Sıcaklık ölçümleri kesici takımın iş parçasına değmesi ile alınmaya başlamış ve kesme süresi olan 18,85 saniye bittikten sonra da iş parçasının soğuma rejiminin görülmesi için ölçüm alınmaya devam etmiştir. Deney sırasında 0,127 milimetre çapı olan üç tane K tipi termoeleman kullanılmıştır. Bu üç termoelemanın, iki tanesi ile frezeleme işlemi sırasında sıcaklık ölçümü yapılmıştır, diğer termoeleman ile kesici takımın iş parçasına temas ettiği anı belirlenmiştir. Sıcaklık ölçümü yapacak olan iki termoeleman iş parçasında açılan 1 milimetre çapındaki deliklerin içine yerleştirilmiştir. Bu iki termoeleman, kenar etkilerinden uzakta olmasından dolayı sıcaklıkların yersel olarak daha az değiştiği iş parçasının orta bölgesine, ön yüzeyden 45 ve 55 milimetre uzaklığa, konulmuştur. Bu sayede sıcaklık ölçümlerinin birbirini doğrulayarak ölçümlerin güvenilirliğinin arttırılması planlanmıştır. Termoelemanların kesici yan yüzeylere çok yakın konulması durumunda, kesme yüzeylerinin çok yüksek sıcaklık değerlerine çıkması yüzünden sıcaklık ölçümlerinde hata oluşabileceğinden termoelemanlar kesme yüzeylerine iki milimetre uzaklığa yerleştirilmiştir. Termoelemanların yerleşimi şekil 5.2'de gösterilmiştir. Termoelemanların yerleştirildiği delikler 1 milimetre derinliğindedir, böylece termoelemanlar iş parçasının tam olarak orta yüzeyine yerleştirilmiştir. Bunun haricinde üçüncü termoeleman iş parçasının ön yüzeyine sabitlenmiştir.

Çizelge 5.2'de gerekli kesme parametreleri ile olan kesme hızı, ilerleme, kesme mesafesi ve kesme süresi verilmiştir.

Çizelge 5.2 Kesme Parametreleri

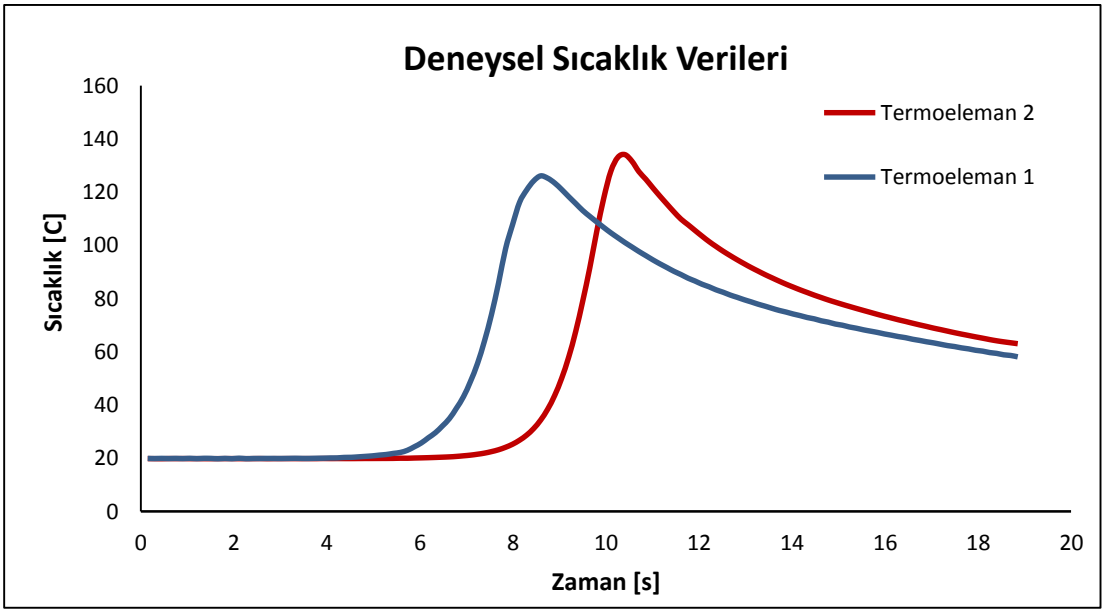
Kesme hızı (m/ dakika)	100
İlerleme (mm/ devir)	0,1
Kesme mesafesi (mm)	100
Kesme süresi (saniye)	18,85



Şekil 5.2 Deney öncesi görünüm

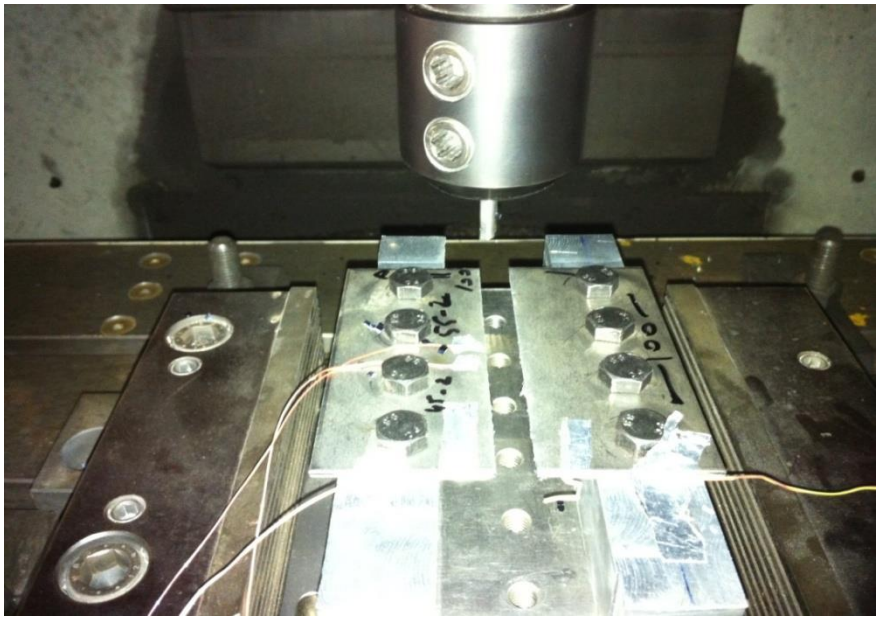
5.3 Sıcaklık Deneyleri ve Sonuçlar

Düzeneği ve parametreleri belirtilen deneyin sonucunda 2 termoelemandan da sıcaklık ölçümleri başarılı bir şekilde alınmıştır. Deneyden elde edilen veriler ekte verilmiştir. Sıcaklık verilerinin zamana göre değişimi şekil 5.3'de gösterilmiştir.

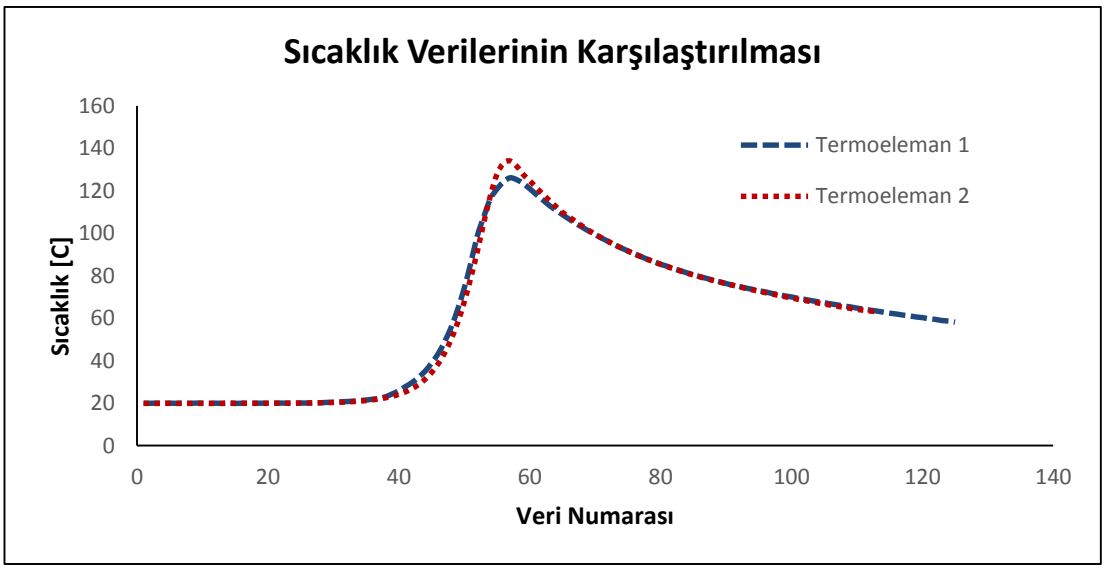


Şekil 5.3 Sıcaklıkların zamana göre değişimi

Grafikte mavi renkle gösterilen termoeleman iş parçasının ön yüzüne 45 milimetre, kırmızı renkle gösterilen termoeleman ise iş parçasının ön yüzüne 55 milimetre yakınlıktadır.



Şekil 5.4 Deney sonrası görünüm



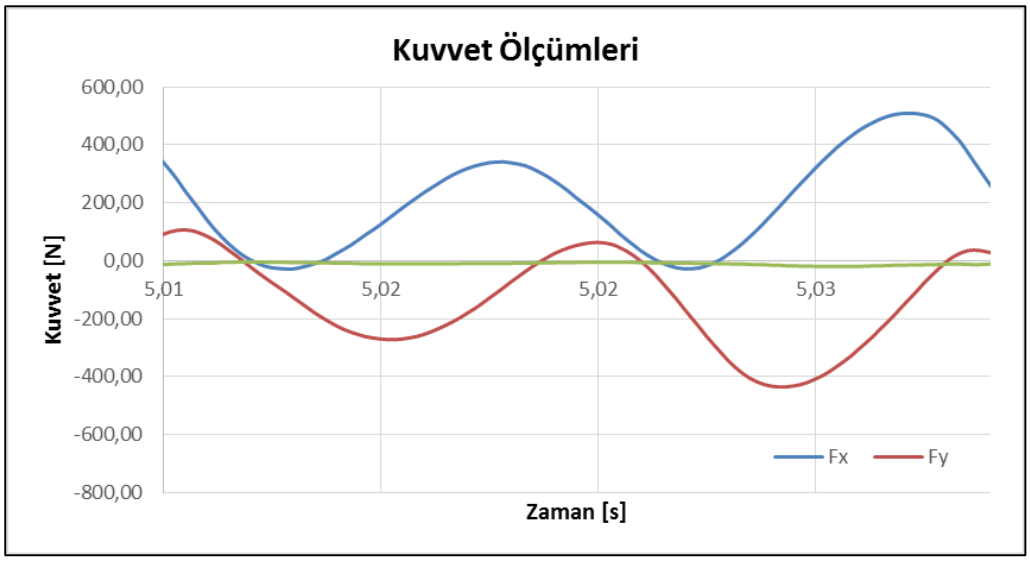
Şekil 5.5 Sıcaklık verilerinin karşılaştırılması

İki termoelemanın en yüksek sıcaklıkları ve zamana göre değişimleri beklenildiği gibi benzer çıkmıştır. Şekil 5.5'te verilen grafikte iki termoelemanın aynı noktada yer alması durumunda aradaki fark gösterilmiştir. İkinci termoelemanın ilk termoelemana göre görece az bir farkla daha çok yüksek sıcaklıklara çıktığı görülmektedir. Frezeleme

işlemi devam ettiği sürece iş parçasının daha fazla ısınması beklendiğinden bu sonucun alınması normaldir.

5.4 Kuvvet Deneyleri ve Sonuçları

Frezeleme işlemi sırasında uygulanan kuvvetler ölçülmüştür. Bu sayede frezeleme işlemi sırasında ne kadar güç harcandığı ve bu gücün ne kadarının iş parçasına geldiği bulunur. İş parçasına gelen kuvvetlerin elde edilmesi için Dynamometer Kistler 97257BA isimli dinamometre ve Data Aquistion sistemi kullanılmıştır. Ölçümler sırasında 3 eksenli kuvvet ölçümü yapılmıştır. Yaklaşık olarak 115,000 kuvvet ölçümü alınmıştır.



Şekil 5.6 Üç Eksenli Kuvvet Ölçümleri

Frezeleme işlemi sırasında harcanan toplam güç için normal kuvvetinin ve sürtünme kuvvetinin ne kadar iş yapığının bulunması gerekmektedir. Bu sebepten üç boyutlu kuvvet ölçümlerinden sonra ilgili formülden kesme kuvvetler ve sürtünme kuvvetleri elde edilir. Bu kuvvetlerin elde edilmesi için öncelikle sonuç kuvveti (*resultant force*) bulunur.

$$F = \sqrt{F_x^2 + F_y^2} \tag{5.1}$$

Sonuç kuvvetinden sonra kesme kuvveti şu formül ile elde edilir.

$$F_s = F\cos(\phi_c + \beta_a - \alpha_r) \tag{5.2}$$

Bu formülde,

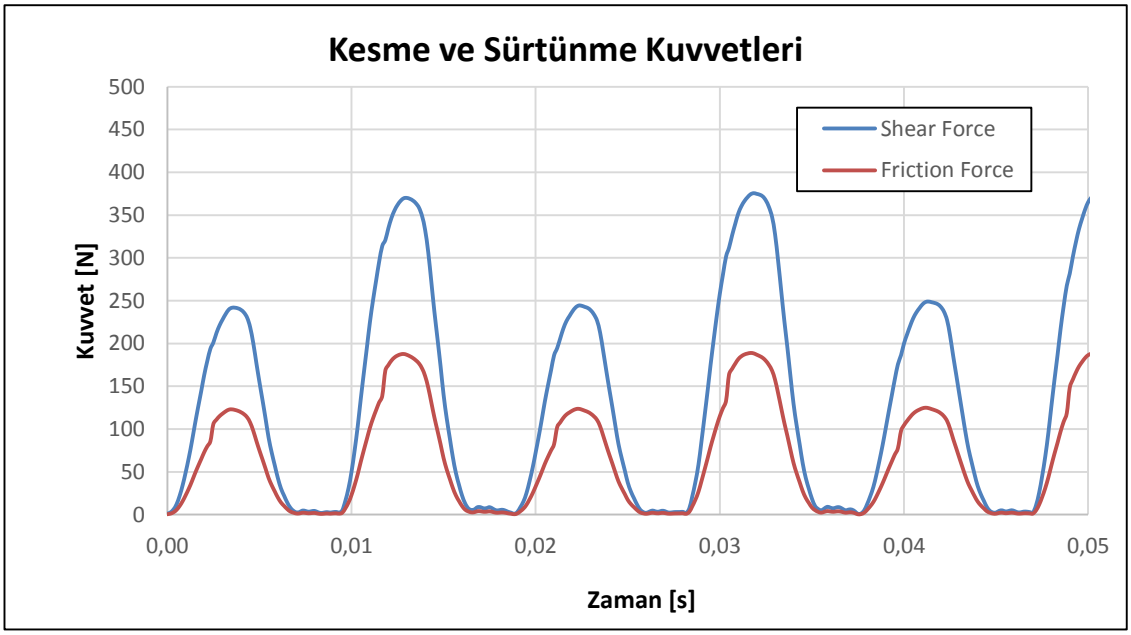
α_r = Kesici takımın rake açısı

β_a = Sürtünme açısı

ϕ_c = Kesme açısıdır.

Sürtünme kuvveti ise şu formülle bulunur,

$$F_u = F \sin \beta_a \tag{5.3}$$

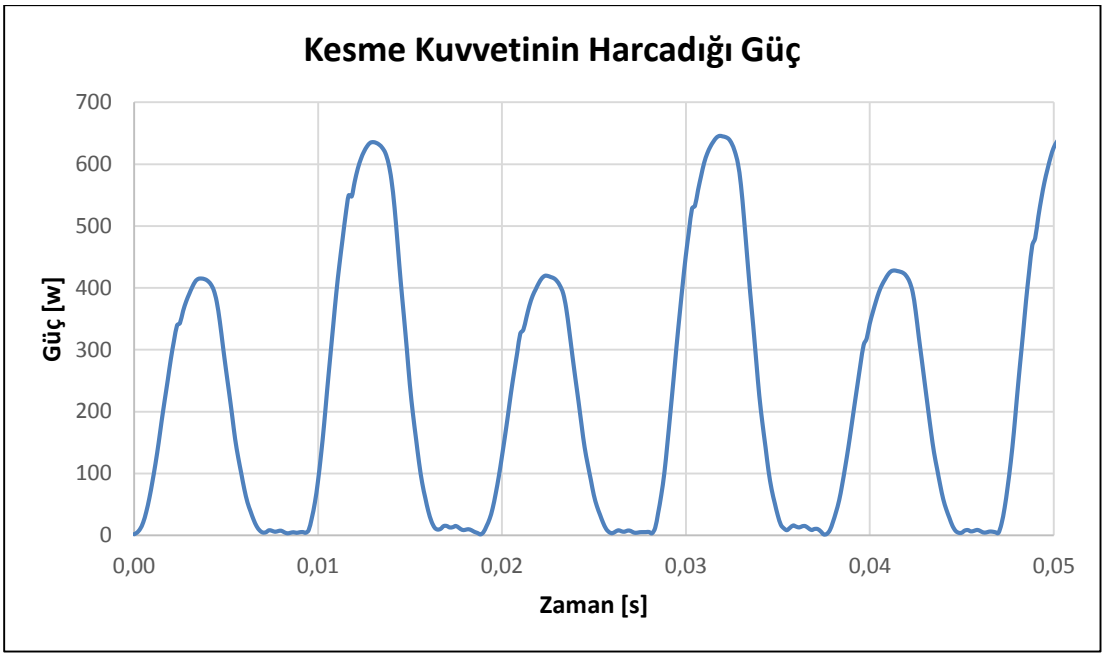


Şekil 5.7 Kesme ve sürtünme kuvvetleri

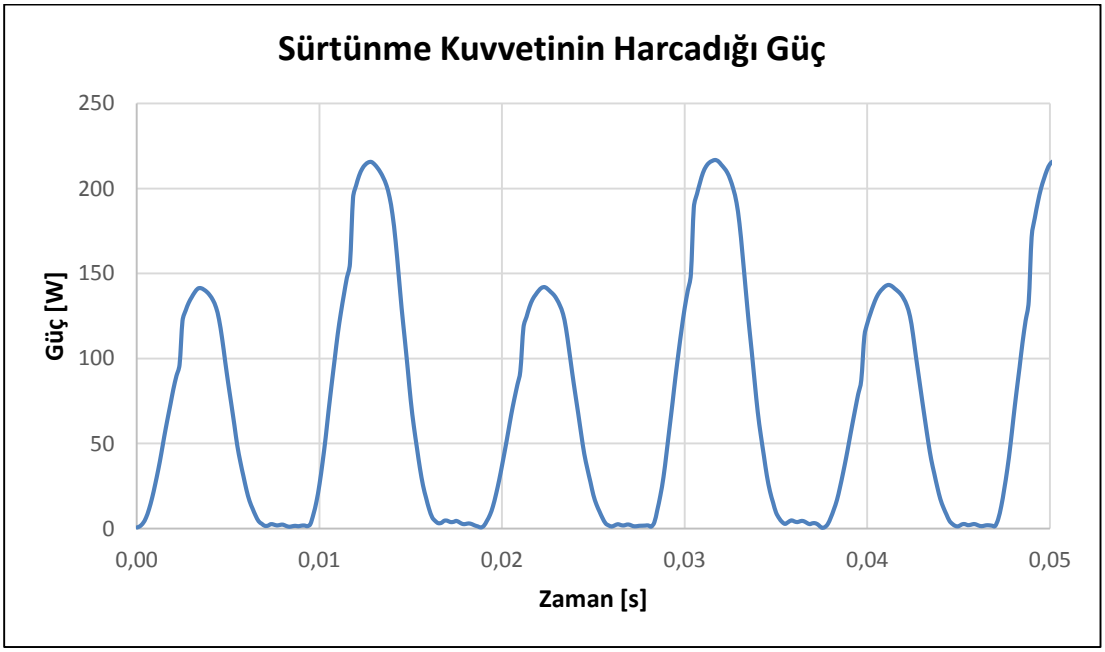
Kesme ve sürtünme kuvvetlerinin eldesinden sonra bu kuvvetlerin harcadığı güç elde edilir.

Kesme ve sürtünme kuvvetleri elde edildikten sonra bu kuvvetlerin harcadığı güç elde edilir. Kesme kuvvetinin harcadığı güç kesme kuvvetiyle kesme hızının çarpımı sonucu olarak elde edilir. Sürtünme kuvvetinin harcadığı güç ise sürtünme kuvvetiyle, talaş hızının çarpımıyla elde edilir.

Sürtünme kuvvetinin harcadığı güç ise talaş hızıyla normal kuvvetin çarpımı ile elde edilir.



Şekil 5.8 Kesme Kuvvetinin Harcadığı Güç

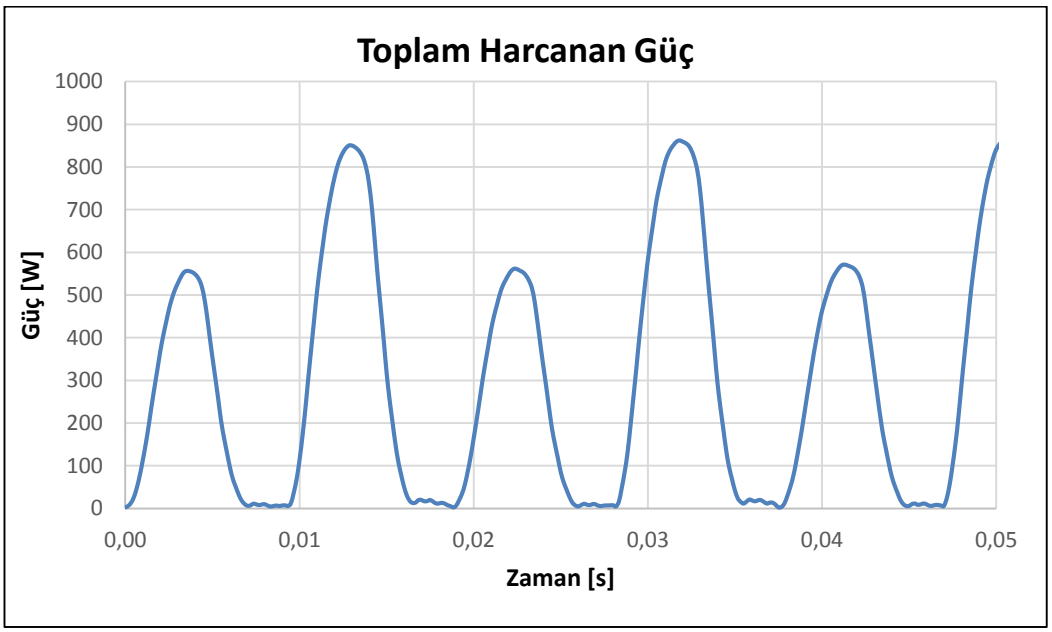


Şekil 5.9 Sürtünme kuvvetinin harcadığı güç

Sürtünme kuvvetinin harcadığı güç ile normal kuvvetinin harcadığı güç toplanarak toplam harcanan güç bulunur.

Güç ve kuvvet testlerinde çok fazla veri olduğu için belirli bir veri aralığındaki sonuçlar burada gösterilmiştir. Bununla beraber veriler belirli bir patern içerisinde devam etmektedir ve zamana bağlı olarak bu patern bozulmamaktadır. Grafikte görüldüğü gibi periyodik olarak değişen bir güç vardır, bu değişim frezenin kesme

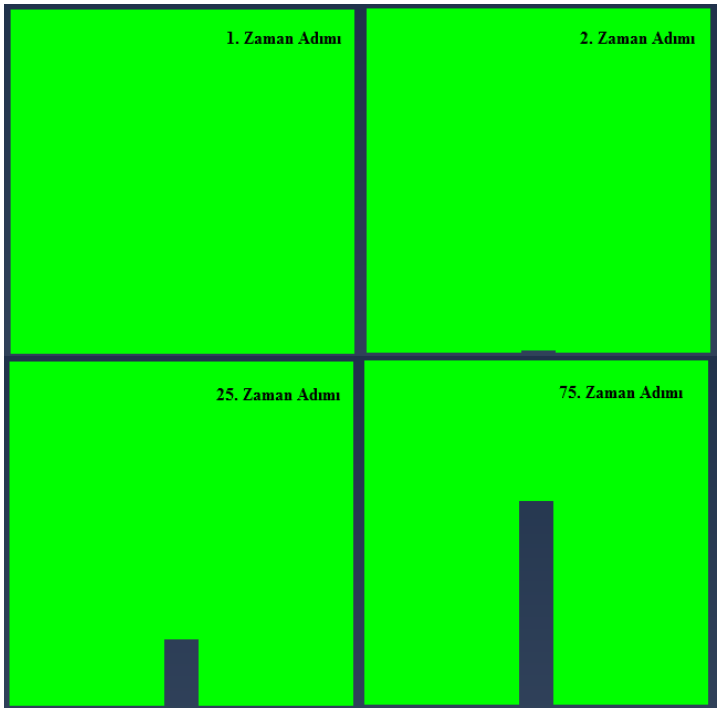
uçlarından kaynaklanmaktadır. Bunun haricinde görülebileceği gibi iki kesme ucu farklı kuvvetlere maruz kalmaktadır. Bunun da sebebi eksen kaçıklığıdır ve kesmenin yapıldığı CNC cihazından kaynaklanan bir problemdir. İş parçasını kesmek için harcanan güç toplam gücün ortalama değeridir. Bunun için toplam verinin ortalaması hesaplanır ve bu değer 440 Watt olarak hesaplanmıştır. Bu veriler sonuçlar bölümünde kullanılacaktır.



Şekil 5.10 Toplam Güç

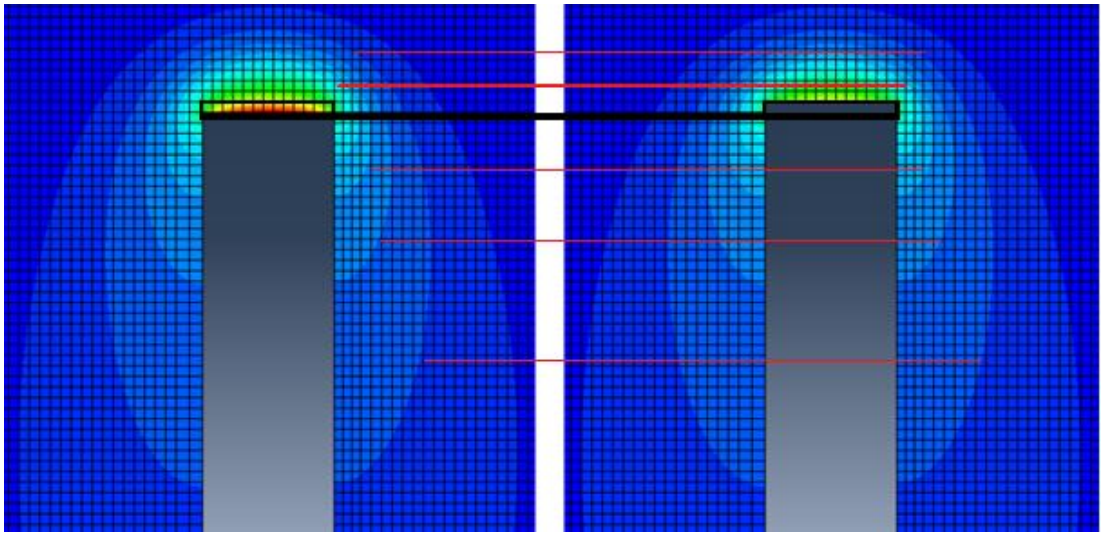
6. SAYISAL MODEL VE OPTİMİZASYON

Frezeleme işlemi bir levha üzerinde sabit hızda ilerleyen bir ısı kaynağı olarak tanımlanabilir. Bu sebepten sayısal modelde de ısı kaynağının hareketinin modellenebilmesi gerekmektedir. Bu hareketi modelin içine yerleştirilmek için sayısal model 125 zaman adımı olarak hazırlanmıştır. Her zaman adımı 0,1508 saniye sürmektedir ve her zaman adımında ısı kaynağı 0,0008 milimetre ileri gitmektedir. Bu yüzden düzenli olarak hareket eden bir ısı kaynağı yerine, her 0,1508 saniyede, 0,0008 milimetre ileri giden bir ısı kaynağından söz etmek daha mantıklı olacaktır. Isı kaynağını parçalı olarak ileriye götürmek yerine, sabit hızda ilerlemesi hem analitik olarak çözülebilen hem de farklı şekillerde sayısal olarak çözülebilen bir durumdur. Bununla beraber özellikle talaş kaldırma işleminin sayısal modele dâhil olması gerektiği için, bu parçalı ilerleme yöntemi tercih edilmiştir. Şekilde 6.1.de hareket eden ısı kaynağının farklı zaman adımları içerisinde modellenmesi görülmektedir.



Şekil 6.1 Zaman Adımları

Bu problemin en önemli özelliği talaş kaldırma işleminin sayısal modele aktarılmasıdır. Frezeleme işlemi sırasında kesilen metaller iş parçasından takımın hareketi, soğutucu akışkan veya yerçekiminin etkisi ile uzaklaştırılır. Bunun modellenebilmesi için ısı kaynağının her zaman adımından sonra ısı kaynağının geçtiği bölgedeki elemanlar analizden çıkartılmıştır. Analizdeki 125 zaman adımı ayrı bir analiz olarak çözülmektedir. Her bir zaman adımının çıktısı diğer zaman adımının başlangıç şartı olarak modellenmiştir ve böylece analizin devamlılığı sağlanmıştır. Bu durum şekil 6.2'de gösterilmiştir.



Şekil 6.2 Isı kaynağının hareketi

Şekil 6.2'de görüldüğü gibi bir sonraki zaman adımında ısı kaynağı ilerlediği zaman, ısı kaynağının ilerlediği bölümde elemanlar analizden çıkarılmıştır ve kırmızı çizgilerle gösterildiği gibi iş parçasının bir önceki zaman adımındaki sıcaklık dağılımı, bir sonraki zaman adımı için başlangıç koşulu olarak uygulanmıştır. Takımın, yani ısı kaynağının ilerlemesi düz bir ilerleme olarak değil, parçalı bir hareket olarak modellenmiştir.

Termal analizlerin yapıldığı Abaqus programında ısı kaynağının hareketi lineer olarak da modellenebilirdi, bunun için farklı *subroutine*'ler bulunmaktadır. Bununla beraber talaş kaldırma işleminin modellenebilmesi için gerekli olan parçaların atılmasının modellenebilmesi, yukarıda bahsedilen *subroutine*'ler ile mümkün olmamaktadır. Bu sebepten, parçalı ilerleme yolu tercih edilmiştir.

Isı kaynağının hareketli olarak modellenebilmesi için yukarıda anlatıldığı gibi zaman adımı sayısı kadar çözüm yapılmaldırı. Bu durumda 125 tane sayısal analizin Abaqus programında hazırlanması gerekmektedir ve ayrıca bu analizin optimizasyona

sokulması durumunda her bir iterasyon için 125 tane analizin çözülmesi gerekecektir ki bu analizlerin hepsini elle hazırlayıp, ilgili verilerin tutulması bir hayli zor olacaktır. Bu sebepten analizleri otomatikleştirmek için Matlab programının kullanılmasına karar verilmiştir.

Abaqus programı diğer sayısal analiz programları gibi arayüzden yapılan her işlemi bir text dosyasına kaydeder ve daha sonra hazırlanan bu text dosyası üzerinden problemi çözümünü yapar ve istenilen değerleri sonuç olarak kaydeder. Talaşların atılması işleminin modellenebilmesi için yapılması gereken meshlerin analizden çıkarılması tek bir analiz için Abaqus programının hazır araçlarıyla yapılabilmektedir. Buna rağmen yukarıda detaylı bir şekilde anlatılan meshlerin düzenli olarak çıkarılması ve buna uygun olarak ısı kaynağının yerinin değiştirilmesi hazır araçlarla yapılamamaktadır. Bu sebepten dolayı ilk olarak Abaqus programın tek bir sıra meshin çıkarıldığı bir analiz hazırlanmış ve text dosyası incelenmiştir. İlk anda analizden çıkarılan meshler ve daha sonra atılacak olan meshlerin eleman numaraları kaydedilmiştir. Programda eleman numarlarının belirli bir kurala göre isimlendirilmesi, hazırlanan analizi kolaylaştırmıştır. İlk anda yazılan text doyası incelenmiş ve bu text dosyasını hazırlayacak bir Matlab kodu yazılmıştır. Sonrasında bu Matlab koduna eklenen bir *for* döngüsü ile ilgili kod 125 tane farklı analiz için sırasıyla yeni bir text dosyası hazırlayacak bir koda dönüştürüldü. Yeni hazırlanan kod ile bir önceki analizin sıcaklık durumları yeni analiz için başlangıç şartı haline getirilmiş, her bir adım için ilgili meshler çıkartılmış ve ısı akısının uygulandığı durumlar değiştirilmiştir. Bu sayede bütün işlem Matlab üzerinden kontrol edilerek Abaqus üzerinden çalıştırılmıştır.

Frezeleme işlemi sırasında iki dişli bir frezeleme çakısı kullanışmıştır. Bu sebepten ısı akısı parçaya yere ve zamana bağlı sürekli olarak değişecek bir şekilde periyodik olarak uygulanmaktadır. Bununla beraber freze çakısının dönme hızı çok yüksektir ve ilerleme hızı yüksektir. Frezenin dönme hızının çok yüksek olmasından dolayı ısı akısının yere ve zamana bağlı değişimi ihmal edilmiş ve sabit olarak verilmiştir. Yine frezenin ilerleme hızı da yüksektir. Freze çakısının tam şekline yakın olacak bir şekilde yuvarlaştırılmış bir şekilde analizin çözülmesi durumunda hem analiz süreleri uzamasından hem de meshlerin atılması durumunda ortaya çıkacak olan problemlerin önüne geçmek için freze ağzı yani ısı akısının uygulandığı bölüm düz olarak kabul edilmiştir.

İş parçası üç boyutlu olmasına rağmen kalınlığı, parçanın boyu ve enine göre çok küçük olduğundan z eksenindeki sıcaklık değişimleri ihmal edilmiştir. İş parçasının ısı akısına maruz kalan bölümü dışındaki bütün yüzeylerden taşınıma ısı geçişi olmaktadır.

Özet olarak bakıldığı zaman bu problem ısı akısının ve geometrinin, talaş kaldırma işlemini ve bu işlem sırasında oluşan ısı akısını modelleyecek şekilde değiştiği 125 farklı zamana bağlı ısı geçişi probleminin çözümünün birleştirilmesi ile çözülmüştür.

Tersine ısı geçişi bölümünde de anlatıldığı gibi, tersine ısı geçişi yöntemi aslında temelde bir optimizasyon probleminin çözülmesidir. Bu optimizasyon probleminde N numaralı formülde verilen amaç fonksiyonu minimuma indirilmeye çalışılmaktadır.

$$X_{amaç} = \sum_{n=1}^{125} \left[\left| T_{deneysel,n,1} - T_{sayısal,n,1} \right| + \left| T_{deneysel,n,2} - T_{sayısal,n,2} \right| \right] / 125 \qquad \textbf{(6.1)}$$

Burada $T_{deneysel}$ deneyler sonucunda elde edilen sıcaklık verilerini, $T_{sayısal}$ sayısal çözümlerin sonucunda elde edilen sıcaklık değerlerini gösterir. 1 ve 2 alt indisleri termoelemanların bağlandıkları noktaları göstermektedir. Amaç fonksiyonu iki noktadan alınan deneysel sıcaklık değerleri ile o noktanın sayısal çözümdeki sıcaklık değerlerinin toplamıdır.

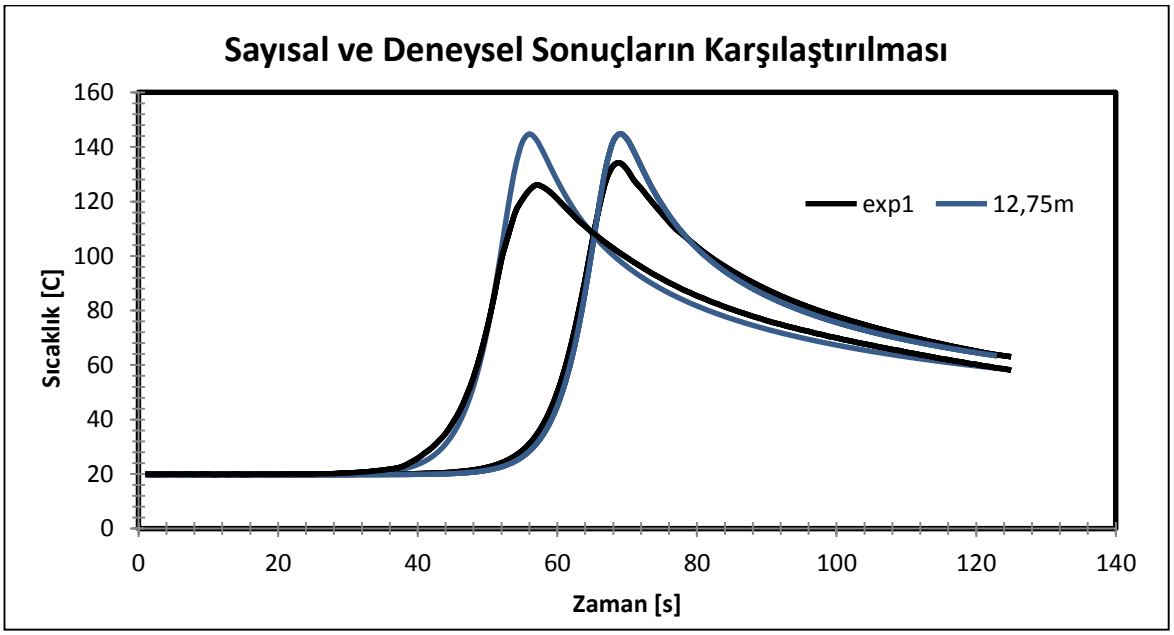
Tersine ısı transferi yönteminde ilk olarak rastgele bir ısı akısı tahmin edilir. Bu ısı akısı 0 W / m^2 olabileceği gibi ısı akısının daha yakın olduğu tahmin edilen daha yüksek bir değer de (örneğin 10 MW / m^2) tercih edilebilir. Bu tahmin edilen ısı akısına göre sayısal çözümün sonuçları ve deneysel veriler karşılatırılır ve eğer amaç fonksiyonu istenilen değere düşmezse yeni bir ısı akısı tahmin edilir ve bu işlem amaç fonksiyonu istenilen değere getirilene kadar devam ettirilir.

Optimzasyon probleminin çözümü için literatürde farklı optimzasyon yöntemleri bulunmaktadır. Bu çalışmada simplex yöntemi tercih edilmiştir. Optimizasyon için Matlab Optimizasyon Toolbox üzerinden simplex metodunu kullanan fminsearch komutu kullanılmıştır. Optimizasyon sırasında sayısal çözümdeki ısı akısı değişken olarak verilmiş ve herhangi bir sınır kullanılmamıştır. Optimizasyon işlemi sırasında ısı akısı her iterasyonda değiştirilmiş ve amaç fonksiyonu hesaplanmıştır. Termal analizlerin de Matlab üzerinden yapılması sayesinde bütün işlem Matlab üzerinden yapılmış ve bu problemin çözümünü hızlandırılmıştır.

7. YORUMLAR VE TARTIŞMA

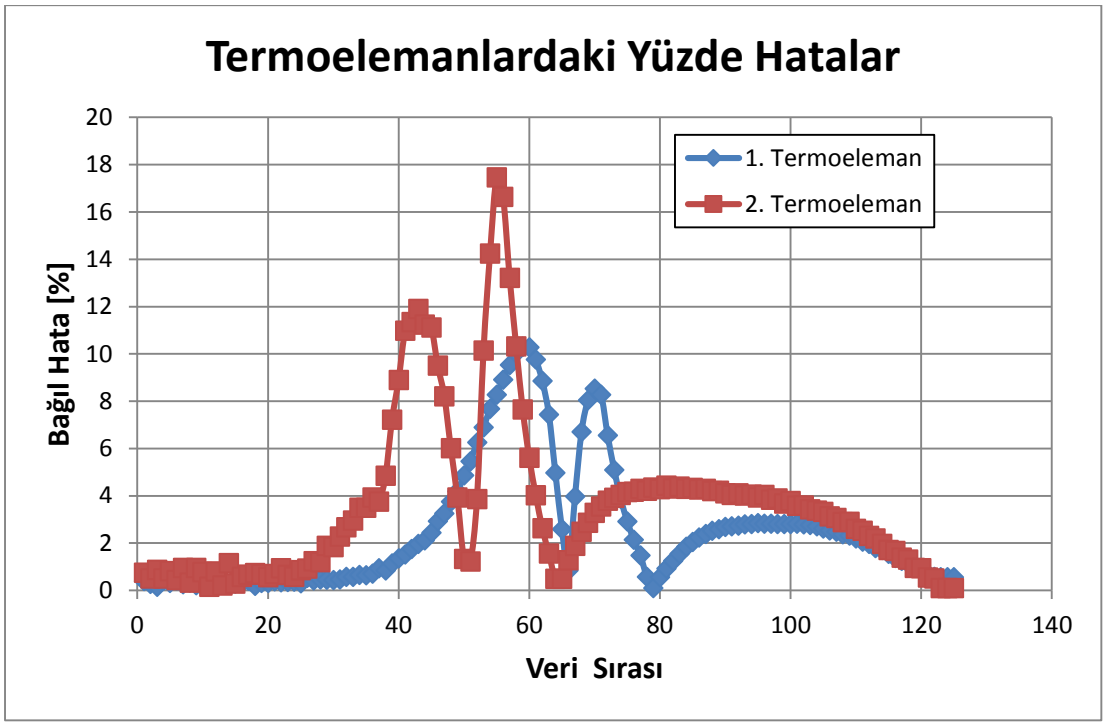
7.1 Hata Analizi

Bölüm 4'te de anlatıldığı gibi tersine ısı geçişi yöntemi matematiksel olarak sorunlu (*ill-posed*) bir matematiksel yöntemdir. Bu sebepten problemin çözümü, çözümün ilk giriş verisi olan deneysel sonuçlardaki hatalara karşı çok hassastır. Tersine ısı geçişi problemlerinin sonucu tamamen deneysel verilere bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Bu yüzden deneysel verilerin doğruluğu büyük önem taşımaktadır. Tersine ısı geçişi işleminin sonucu olarak iş parçasına gelen ısı akısı 1,275,000 W/m2 ve 255 Watt olarak bulunmuştur. Bu problemin sonucu olarak bir sıcaklık dağılımı ve elde edilmiş deneysel verilerdeki sıcaklık değerleri ile sayısal çözümde elde edilen sıcaklık değerleri karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırma şekilde görülmektedir.



Şekil 7.1 Deney ve Sayısal Çözüm Sonuçları

İki sonuç arasındaki karşılaştırma ile bağıl hatalar grafikte görüldüğü gibi ilerlemektedir.



Şekil 7.2 Bağıl Hatalar

Burada her iki termoelemandan alınan her bir verilerin sayısal çözümden gelen sonuçlarla arasındaki bağıl hataları gösterilmiştir. Deney sırasında 125 tane veri olduğu için veri sayısına göre karşılaştırma yapılmıştır. Hatalar şu şekilde hesaplanmıştır.

$$Hata = \frac{\left|T_{deneysel,n,i} - T_{sayısal,n,i}\right|}{T_{deneysel,n,i}} \times 100 \qquad \textbf{(7.1)}$$

Grafikten de görülebileceği gibi özellikle 2. Termoelemanda bazı noktalarda %18'e varan hatalar görülse bile hatalar yaklaşık olarak %5 ile %10 arasında seyretmektedir. Bunun haricinde her bir termoeleman için toplam bağıl hatalar da ilgili formülle hesaplanmıştır.

$$Hata_{toplam} = 100 \times \left(\sum_{n=1}^{m} \frac{\left|T_{deneysel,n,1} - T_{sayısal,n,1}\right|}{T_{deneysel,n,1}} \right) \Big/ 125 \qquad \textbf{(7.2)}$$

Bunun sonucu olarak her bir termoelemandaki toplam bağıl hata hesaplanmıştır.

Toplam bağıl hatalar Çizelge 7.1'de hesaplanmıştır.

Çizelge 7.1 Yüzde Bağıl Hatalar

	Yüzde Bağıl Hata
Birinci Termoeleman	% 3,5
İkinci Termoeleman	% 4,5

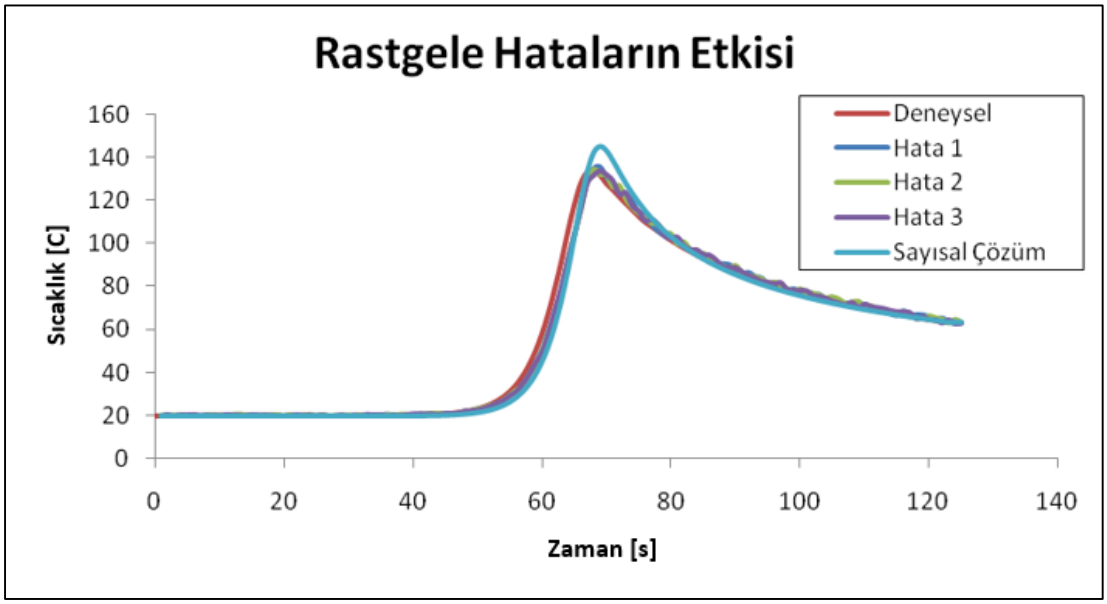
Toplam bağıl hatalar hesaplanırken 125 verinin hepsi kullanılmamıştır. Özellikle şekil 7.1'den görülebileceği gibi frezeleme işleminin başlangıcında deneysel verilerle sayısal çözümün sıcaklıkları aynıdır. Sıcaklık değişimi görülmeden hesaplanan hatalar toplam hata oranını düşürecek ve bir yanılsamaya yol açacaktır. Bu sebepten toplam hataların hesaplanması sırasında sıcaklıkların 50 ^{0}C üstüne çıktığı sonuçlar dikkate alınmıştır. Bu sayede daha gerçekçi sonuçlar elde edilmiştir. İki bağıl hata incelendiği zaman, toplam bağıl hata oranlarının uygun sınırlar içinde olduğu ve problemin deney sonuçlarına başarılı bir şekilde uygulandığı söylenebilir.

Tersine ısı geçişi yönteminde rasgele hataların önemi de büyüktür. Rasgele hatalar genel olarak çok farklı sebeplerden kaynaklanabilmektedir ve asla tam olarak sıfırlanamazlar. Bu hataların sebep olacağı belirsizlik kontrol edilmiştir. Deneylerde kullanılan termoelemanlarda %1,5 mertebesinde bir hata payı vardır. Bu sebepten deneysel sonuçlara bu % 1,5 hata rasgele olarak atanmıştır.

$$T_{hata} = T_{kesin} + w \times T_{kesin} \qquad \textbf{(7.3)}$$

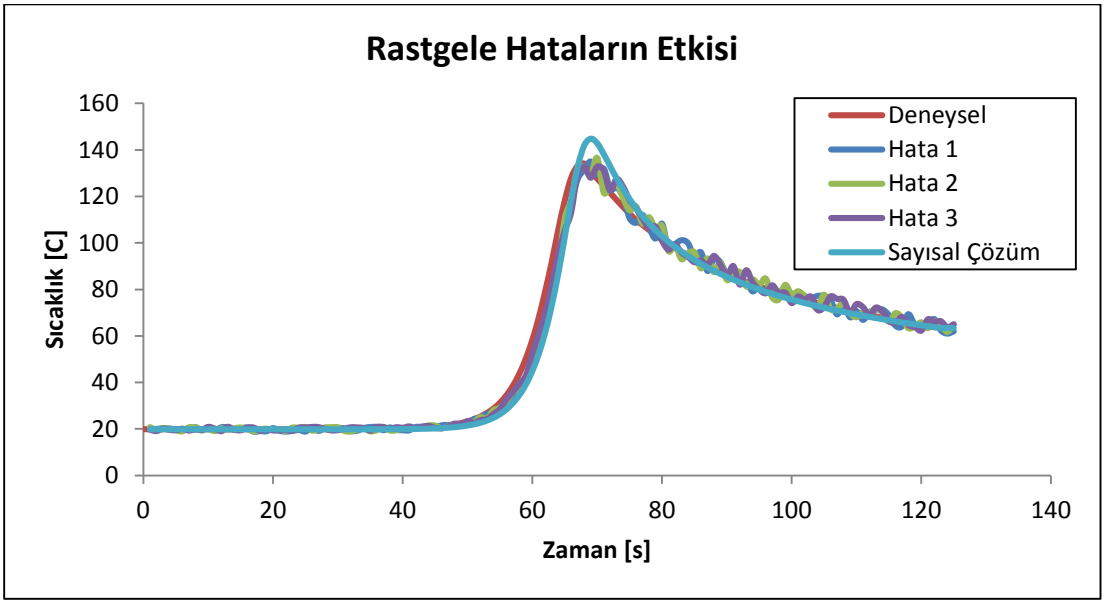
Bu formülde w - % 1,5 ile + % 1,5 arasında rastgele bir sayı değeri olarak seçilmiştir. Bu sayede ölçümlerdeki rastgele hataların sonuca etkisi görülecektir.

Şekil 7,3'te de görülebileceği gibi rastgele hataların etkisi, bu hataların deney sonuçlarına eklendiği 3 farklı *hatalı deney sonucu* sadece birinci termoeleman için incelenmiştir. Burada da görülebileceği gibi hataların etkisi oldukça düşük kalmaktadır ve hatta problemin çözümü sonucu ortaya çıkan ısı akısına elde edilen sayısal sonuç çözümlerinin hata aralığını dahi geçmemektedir.



Şekil 7.3 Rastgele Hataların Etkisi - %1,5

Ayrıca bir termoelemandan alınan hata %5 olarak kabul kabul edilip, yeni *hatalı deney sonuçları* elde edilmiştir. Elde edilen bu deney sonuçları ile deneysel veriler ve sayısal çözüm karşılaştırıldığında, bu hataların sonuca etkilemediği ve hatta sonuç olarak elde edilen ısı akısıyla çözülen doğrudan problemdeki sayısal çözümlerin hata payı içerisinde olduğu görülmüştür. Buradan hareketle bu problem için rastgele hataların önemi yoktur denilebilir.



Şekil 7.4 Rastgele Hataların Etkisi - %5

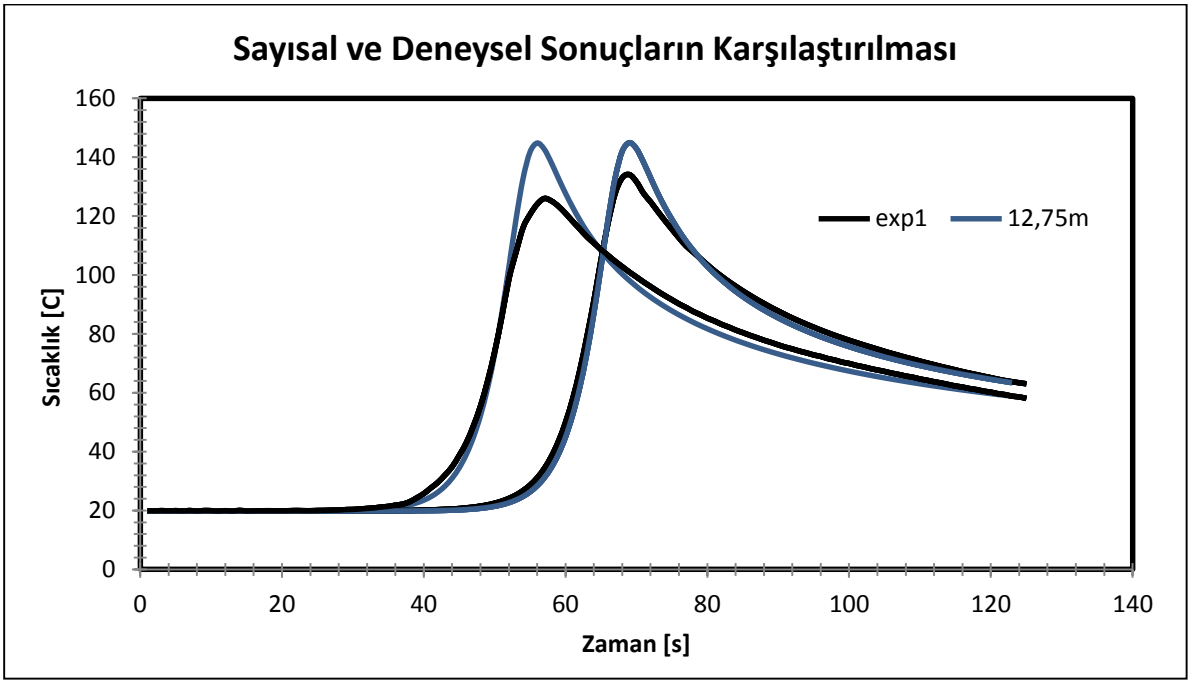
Rastgele hataların dışında ölçüm tekniğinden kaynaklanan bazı hataların varlığı olabilir. Kuvvet testleri için herhangi bir çalışma gerek duyulmamaktadır, sistem sabir bir sistem olup, son kullanıcıya herhangi bir değişiklik yapma şansı vermediği için kullanıcı hatalarını sıfırlamaktadır. Termoelemanlar kullanılmadan önce tepki süreleri ve ölçümleri sıcaklıkları bilinen ortamlarda test edilmiştir ve hem tepki süreleri hem de ölçüm doğruluğu konusunda bir probleme rastlanmamıştır. Termoelemanlar iş parçasının içine 1 milimetrelik delikler açılarak yerleştirilmiştir. Delikler CNC tezgahında açılmıştır. CNC tezgahlarının hassasiyetleri çok yüksektir, bunun haricinde delik uzunlukları mikroskopla ölçülmüştür ve deliklerin toleransları sağladıkları görülmüştür. Termoelemanlar deliklerin içine yerleştirilmiş ve sıcaklık ölçümünde kullanılan ısı iletkenlik katsayısı arttırıcı jel ile deliklerin içine yerleştirilmiştir. Deliklerde havanın da bulunduğu göz önüne alınarak, termoelemanların deliklerin içinde iş parçasına temas etmeleri sağlanmıştır. Deliklerin boyutlarının da çok küçük olması iş parçasının termal davranışını değiştirmemiştir. Termoelemanların üstüne düşen talaşların gelerek ölçümleri etkilememesi için deliklerin üstü kapatılmıştır. İş parçası tutucuları da yine aynı şekilde ölçümleri etkilememesi için dar olarak tasarlanmıştır. Ölçümler sırasında olası bütün hatalar göz önüne alınmış ve bu hatalara karşı önlemler alınmıştır. İki termoelemandan alınan sıcaklık ölçümlerinin benzer olması ve farklı sebeplerden dolayı başarısız olan başka deneylerdeki ölçümler göz önüne alındığında, sıcaklık ölçümlerinde sistematik bir hatanın da olmadığına karar verilmiştir.

7.2 İş Parçasındaki Sıcaklık Dağılımları

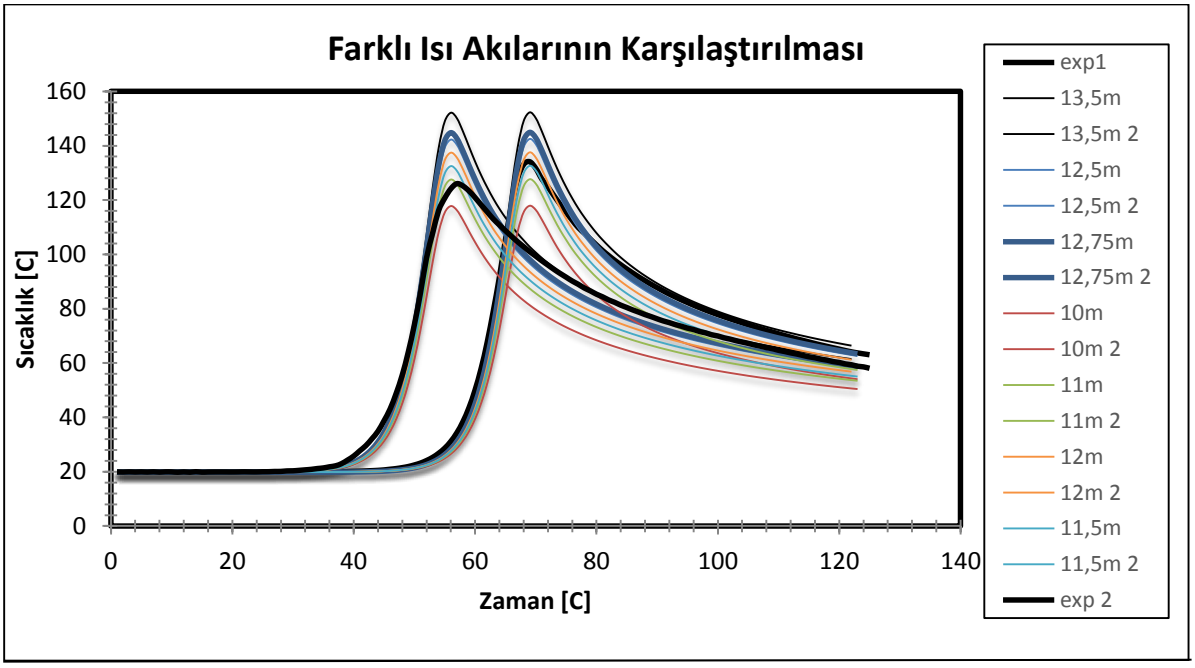
Tersine ısı geçişi işleminin sonucu olarak iş parçasına gelen ısı akısı 1,275,000 W/m2 ve 255 Watt olarak bulunmuştur. Bulunan ısı akısı ve termoelemanlar ile elde edilen deneysel sıcaklık verileri ile karşılaştırıldığı zaman 8.1 nolu şekildeki grafik elde edilir.Bu grafikte görüldüğü üzere iş parçasındaki ısınma ve soğuma eğilimleri sayısal çözümde başarılı bir şekilde modellenmiştir. Bununla beraber en yüksek sıcaklığın görüldüğü noktalarda hatalar görülmüştür.

Şekil 7.5'teki grafikte de farklı ısı akıları için elde edilen sıcaklıklar görülmektedir. Grafiklerden de görülen sonuçlara göre ısı akısının 11,000,000 W / m^2 olduğu zaman, özellikle sıcaklıkların pik yaptığı noktalarda daha iyi bir uyuşma olmaktadır. Burada

12.750.000 W / m^2 ısı akısı toplamda daha az hata getireceği için üretilen ısı akısı olarak alınmıştır.

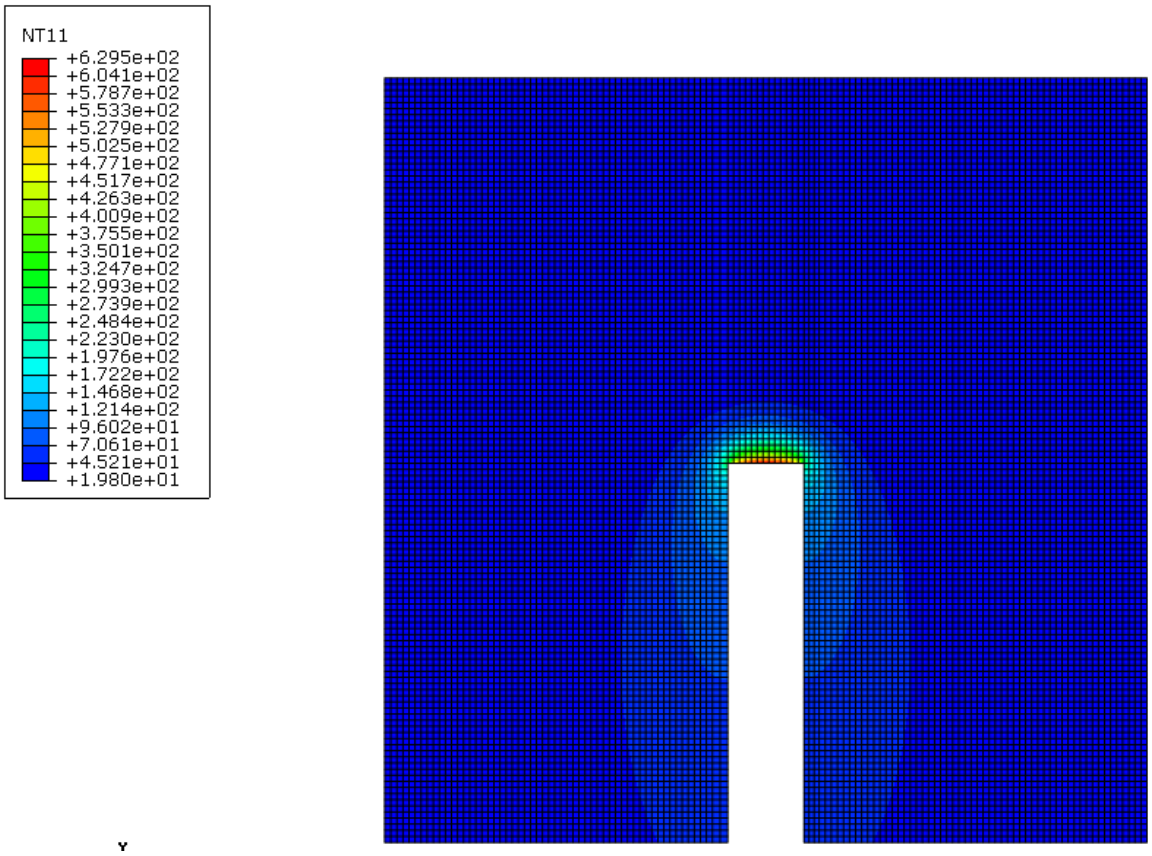


Şekil 7.5 Sıcaklık verileri



Şekil 7.6 Farklı ısı akıları için sonuçlar

Bu ısı akısına göre iş parçasındaki sıcaklıklar freze iş parçasının ortasında olduğu anda sıcaklıklar Şekil 7.6'teki gibi olacaktır.

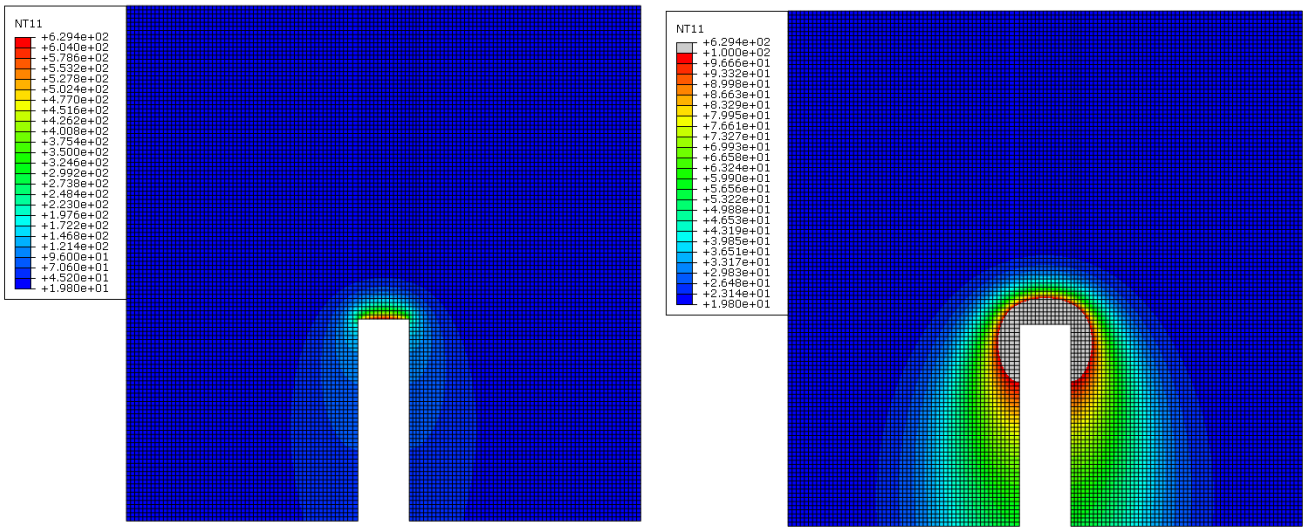


Şekil 7.7 İş parçasının sıcaklık dağılımı

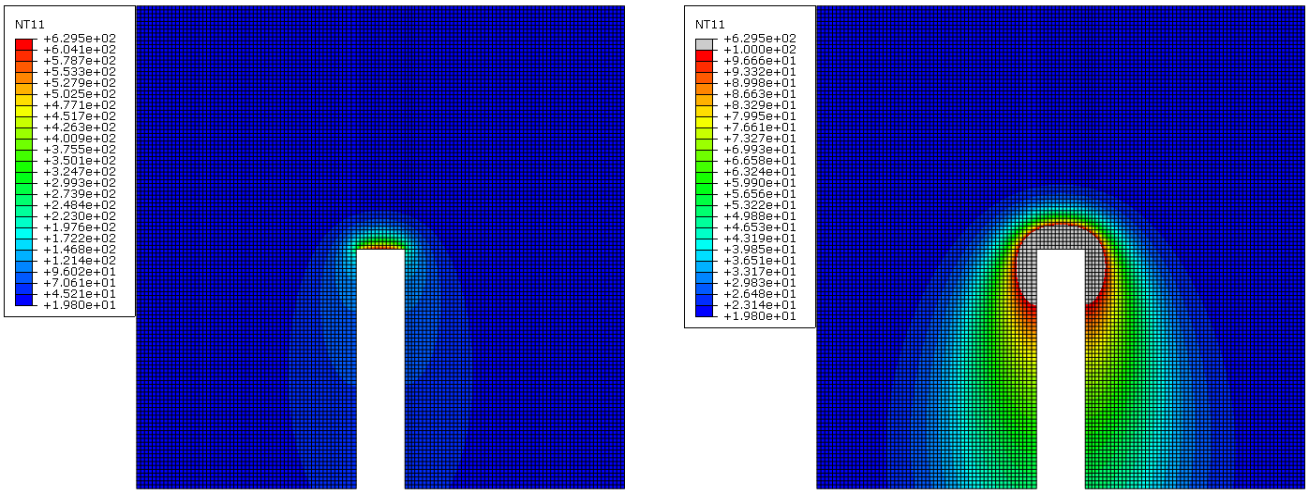
Parça üzerindeki sıcaklık dağılımı çok geniş bir aralıkta olduğu için tek bir resimde bütün sıcaklık dağılımı açık bir şekilde gösterilememektedir. Yan yana konulan iki görselde de aynı sıcaklık dağılımları farklı renk paletleriyle gösterilmiştir. İlk görselde renk paletinde herhangi bir sınır bulunmamaktadır, ikinci görselde ise en yüksek sıcaklık 100 C olarak kısıtlanmıştır. Bu şekilde iş parçasındaki görece düşük sıcaklık bölgelerindeki sıcaklık dağılımının daha iyi gösterilmesi amaçlanmıştır.

Şekil 7.7,8,9,10 ve 11'de farklı zaman adımlarında parçadaki sıcaklık dağılımı görülebilir. Buradaki şekildekilerden görülebileceği üzere ısı akısının uygulandığı alan ve çevresindeki sınırlı bölge dışında iş parçası üzerindeki sıcaklıklar 40 C ile 100 C arasında gezinmektedir. Bu sıcaklıkların parça üzerinde herhangi bir kalıcı etkisi bulunmamaktadır.

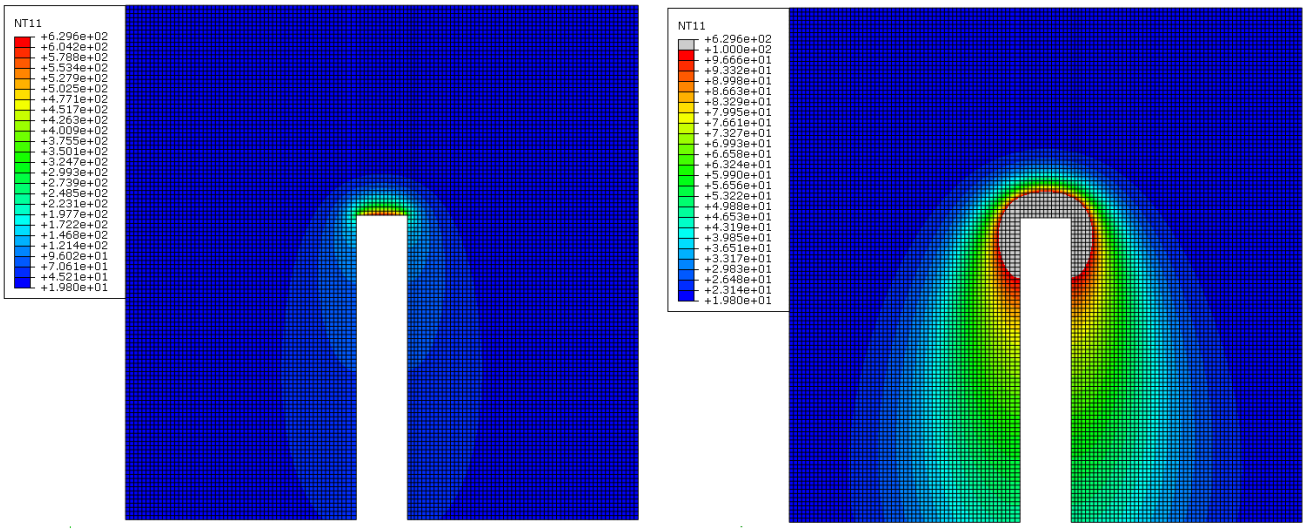
Sınırlı kesme bölümü arasında olan yüksek sıcaklıklar ise önem taşımaktadır. Bu sınırlı bölüm her ne kadar çok dar bir alanı kapsasa dahi hem iş parçası hem de takım için önemli bir bölümdür.



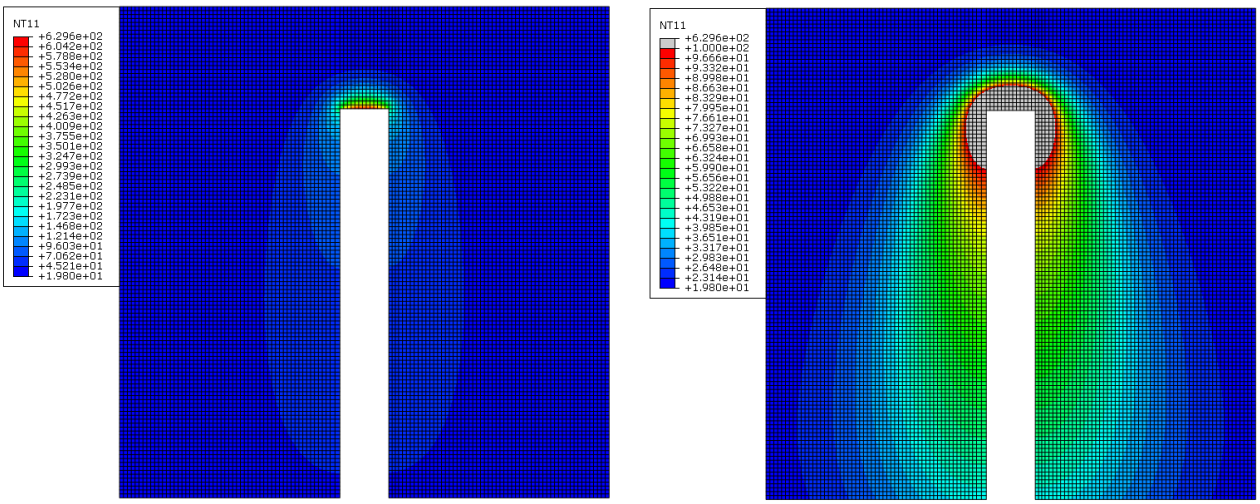
Şekil 7.8 Sıcaklık dağılımları



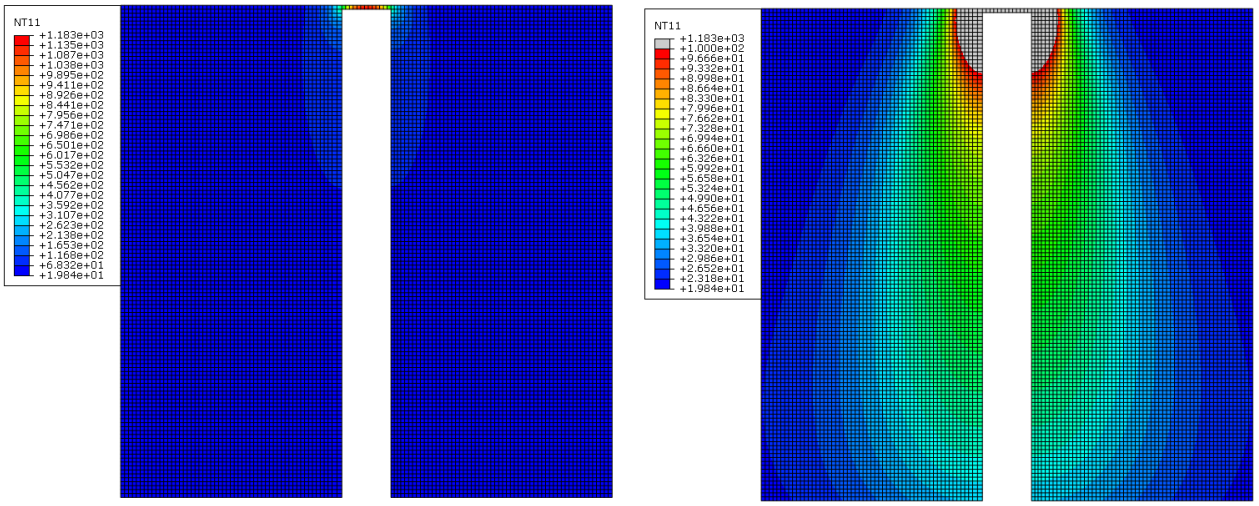
Şekil 7.9 Sıcaklık dağılımları



Şekil 7.10 Sıcaklık dağılımları



Şekil 7.11 Sıcaklık dağılımları



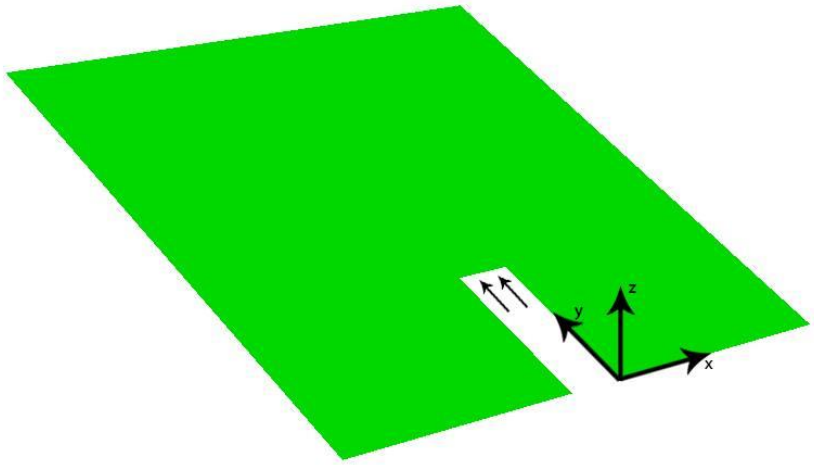
Şekil 7.12 Sıcaklık dağılımları

Yan kesme yüzeylerinde sıcaklıkların kesme işleminin çok büyük bir kısmında 300 C civarında gezdiği görülmektedir, bununla beraber kesme işleminin son adımlarında bu sıcaklıkların 600 C'ye kadar çıktığı görülmektedir. Isı akısının direk olarak etki ettiği ve bir sonraki adımda talaş olarak atılacak olan ön yüzeylerdeki sıcaklıkların 600 C mertebesinde gezdiği ve yine kesme işleminin son adımlarında bu sıcaklıkların 1000 C mertebesine kadar çıktığı görülmektedir.

Burada talaş olarak atılacak olan ön yüzeylerin sıcaklılığı ortalama talaş sıcaklığını vereceği için önem taşımaktadır. Öte yandan yan yüzeylerde geride kalan iş parçasını oluşturmaktadır, bu sebepten de yan yüzeylerin iş parçası, ön yüzeyin kesici takım için önemli olduğu sonucuna varılabilir.

7.3 Zamana ve Yere Bağlı Noktasal Sıcaklık Değişimleri

Aşağıda görülen grafiklerde belirli noktaların zamana ve yere bağlı olan sıcaklık değişimleri verilmiştir. Bu grafikler için gerekli olan koordinat ekseni Şekil 7.12.'daki koordinat ekseni kullanılmıştır.

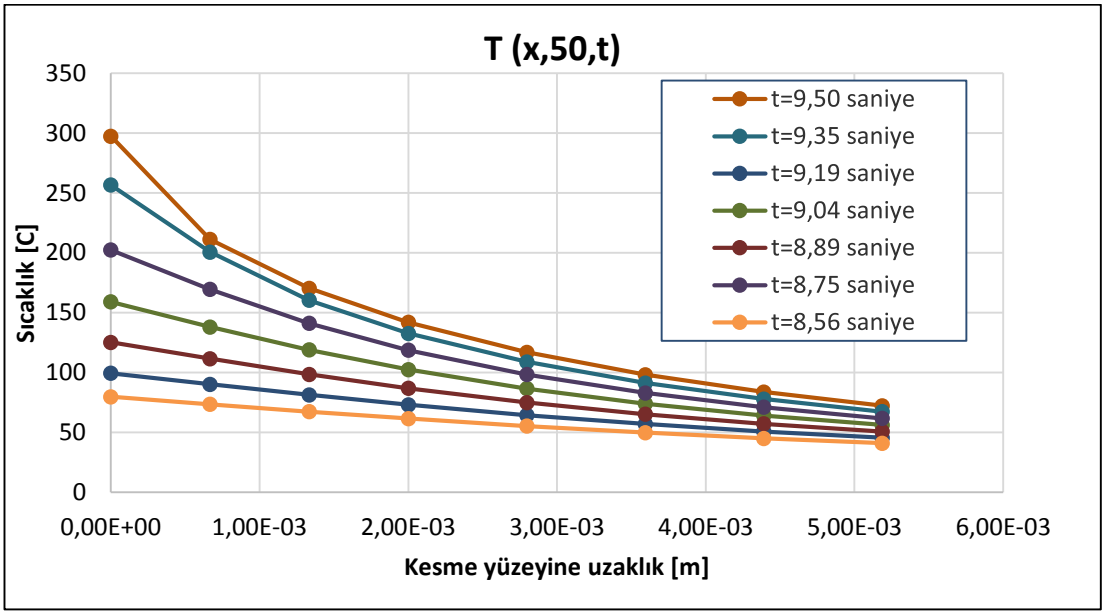


Şekil 7.13 Koordinat Eksenin Yerleştirilmesi

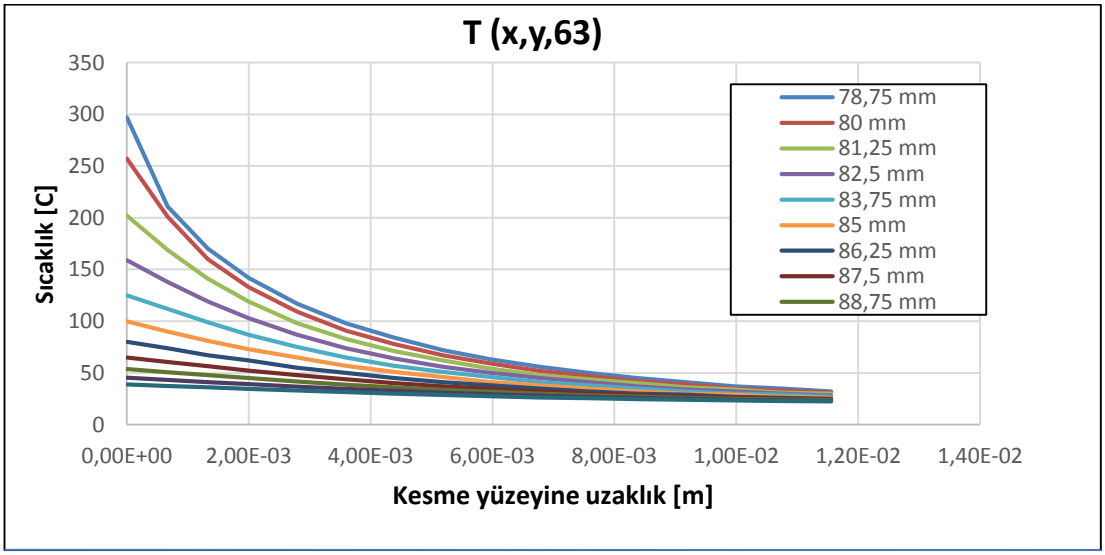
Şekil 7.14'da parçanın ön yüzeyinden 50 milimetre uzaklığındaki (y=50 mm) sıcaklıkların kesme yüzeyine uzaklığına ve zamana bağlı değişimleri görülmektedir. Kesilen yüzeylerdeki sıcaklıkların yaklaşık 1 saniye içinde 80 C mertebesinden 300 C'ye kadar çıktığı görülmektedir. Ayrıca yüksek sıcaklıkların sadece kesme bölgesine çok yakın bölümlerde görüldüğü de gözlemlenmektedir. Kesme yüzeyinin en yüksek olduğu anda bile kesme yüzeyine 5 milimetre uzaklıkta sıcaklığın zamanla, kesme yüzeyine oranla çok az değiştiği ve en yüksek sıcaklıkların 75 C mertebesinde kaldığı görülmektedir.

Şekil 7.14'de 63. zaman adımı yani kesme işlemi başladıktan 9,34 saniye sonrasında, sıcaklığın farklı y değerlerindeki kesme yüzeyine uzaklık ile değişimi gösterilmektedir. Buradan da görülebileceği gibi sıcaklık dağılımı zaman içerisinde yersel olarak çok az fark göstermektedir. Sıcaklıklar yine Şekil 7.15'den de görülebileceği gibi yaklaşık olarak aralarında ısı kaynağının 1 saniyede yer alacağı mesafe varken 80 C'den 300 C'ye kadar çıkmaktadır. Kesme yüzeyinden 5 milimetre uzakta sıcaklıklar 50 C mertebesine gelirken, kesme yüzeyinen 10 milimetre uzakte sıcaklıklar başlangıç koşullarına çok yakın değerlere kadar düşmektedir. Kesme

yüzeyinden uzaklaştıkça sıcaklığın zamana ve yere bağlı olarak değişimi de yine aynı şekilde azalmaktadır.



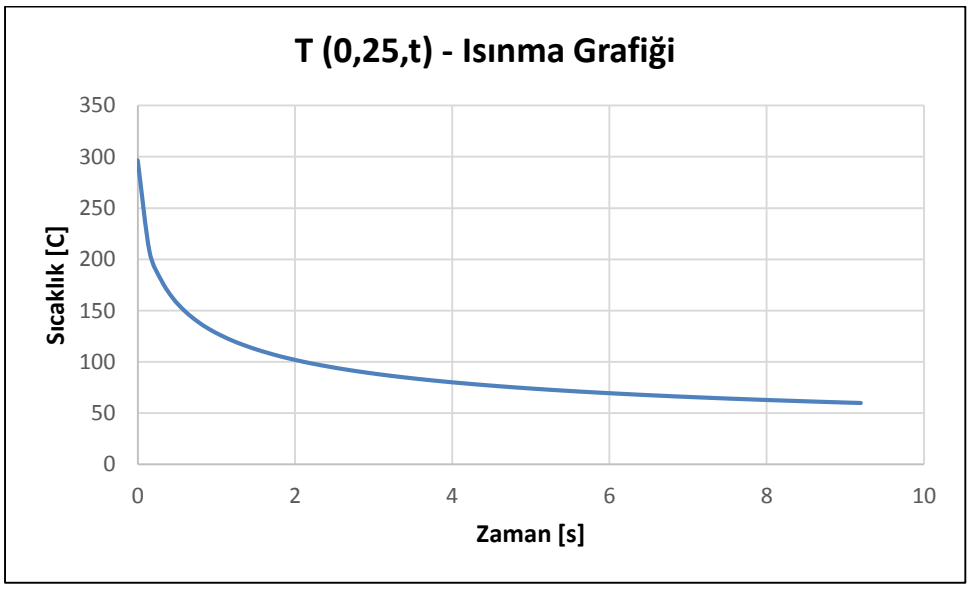
Şekil 7.14 Sıcaklık değişimleri



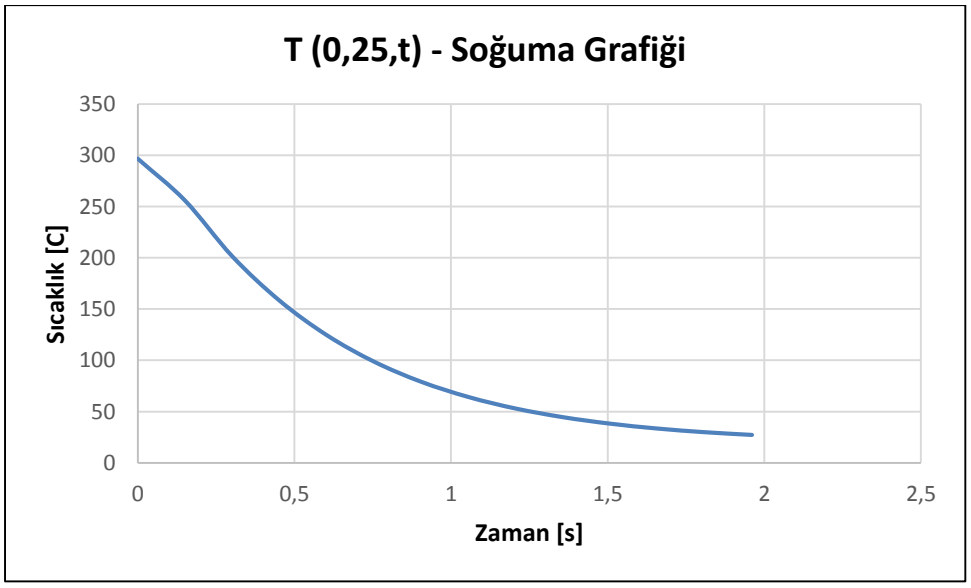
Şekil 7.15 Sıcaklık değişimleri

Şekil 7.16 ve şekil 7.17'de ön yüzeyden 25 milimetre uzaklıkta kesme yüzeyinin ısınma ve soğuma grafiği verilmiştir. Burada da görüleceği gibi iş parçasının kesme yüzeyinin sıcaklığı yaklaşık 2 saniyede 20 C mertebesinden 300 C'ye kadar çıkmaktadır. 300 C'den sonra yaklaşık 10 saniye içersinden kesme yüzeyi 50 C'ye kadar soğumaktadır. Burada iş parçasına gelen ısı akısının bir kısmı taşınım yoluyla havaya aktarılırken, büyük bir kısmı iletim yoluyla iş parçasının içerisine

dağılmaktadır. Diğer bir deyişle iş parçası ısı kuyusu gibi davranmakta ve kesme bölgesinin soğumasını sağlamaktadır. Bunun haricinde iş parçasına gelen ısı akısının büyük bir kısmı da talaşla iş parçasından uzaklaştırılmaktadır.



Şekil 7.16 Isınma Grafiği

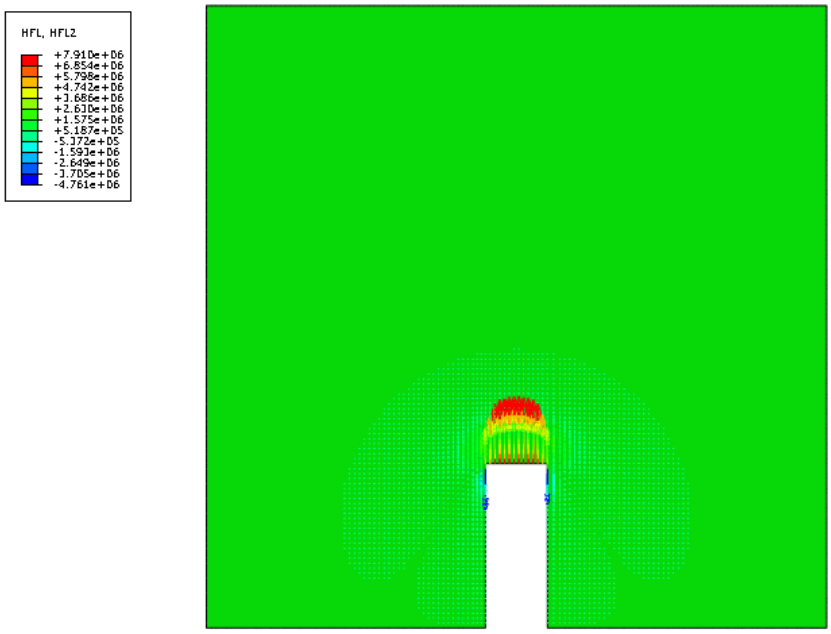


Şekil 7.17 Soğuma Grafiği

7.4 Isı Akıları

Şekil 7.18 ve 7.19'de yatay ve dikey düzlemdeki ısı akıları görülmektedir. Isı kaynağının ilerlemesi yönünde ortalama olarak 5 x 10^6 ile 7 x 10^6 W / m^2 arasında değişen bir ısı akısı görülmektedir. Buna karşılık ısı kaynağının ilerlemesinin tersi

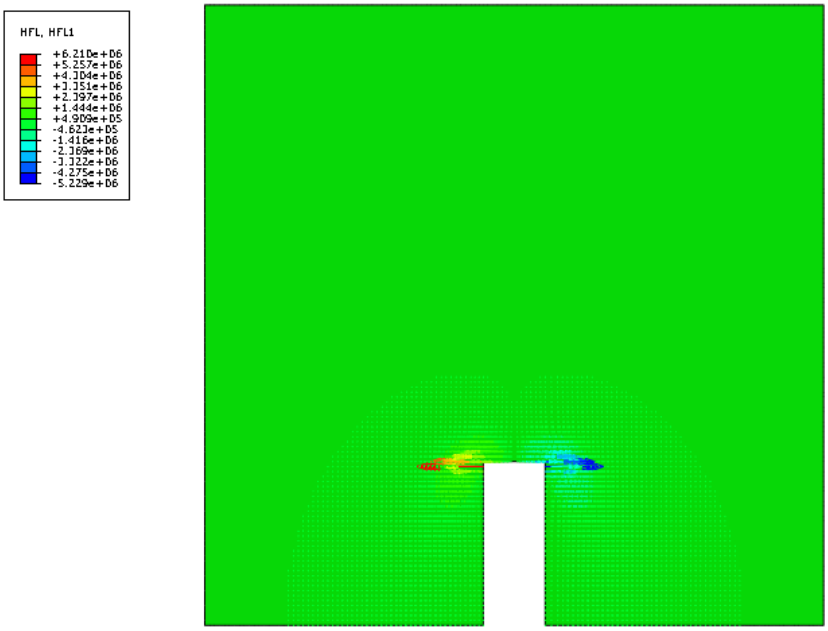
yönünde daha küçük bir alanda 4 x 10^6 W / m^2 mertebesinde bir ısı akısı görülmektedir. Isı kaynağının ilerlemesi yönündeki ısı akısı, ısı kaynağından kaynaklanan ısı akısıdır, öte yandan diğer ısı akısı da daha önce irdelenen sıcaklık farkından kaynaklanan ve ısının parça içerisinde dağılmasını sağlayan ısı akısıdır. Şekil 18'de de yine daha dar bir bölgede 5 x 10^6 W / m^2 mertebesinde bir ısı akısı görülmektedir. Bu ısı akısı da yine kesme bölgesindeki yüksek sıcaklıklar ile kesme bölgesinden uzaktaki düşük sıcaklıklar arasındaki farktan kaynaklanmaktadır. Bu ısı akısının düşey eksendeki ısı akısıyla aralarında büyük bir fark yoktur, buna rağmen düşey eksendeki ısı akısı çok daha geniş bir bölgeye uygulanmaktadır. Bu sebepten iş parçasına uygulanan toplam ısı akısının büyük bir kısmının talaş olarak sistemden uzaklaştırıldığı, küçük bir kısmının ise iş parçasının içine iletim yoluyla dağıldığı kabulünü yapabiliriz. Bu konu sonuçların irdelenmesi sırasında tekrar incelenecektir. Bu iki şekilde de ısı akılarının maksimum olduğu, talaşların atılmasından hemen önceki anlardan alınmıştır.



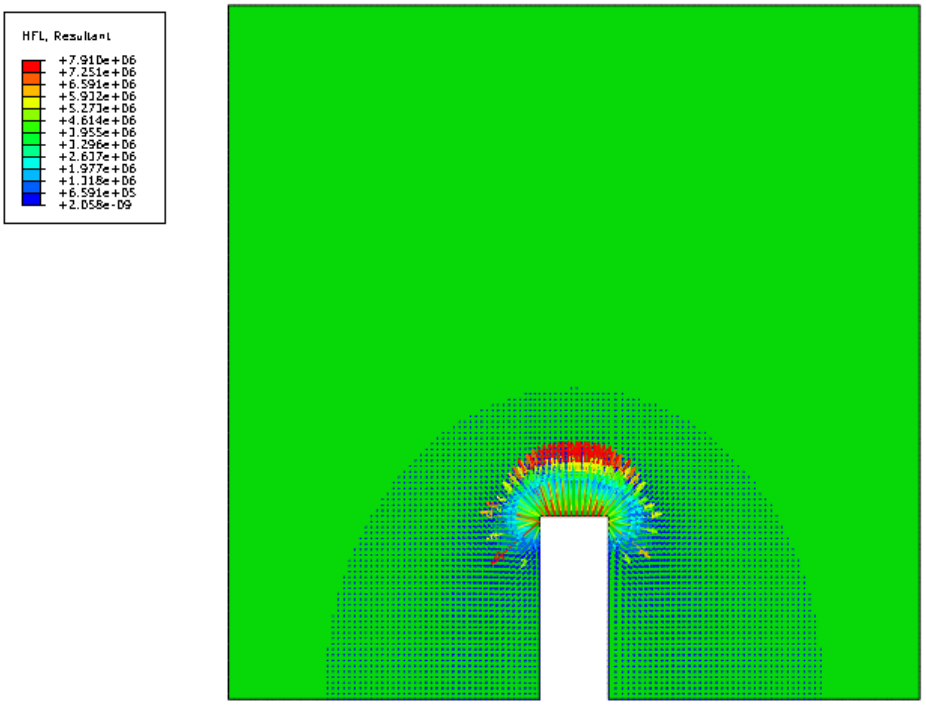
Şekil 7.18 Dikeydeki ısı akıları

Şekil 7.20 ve 21'de de düşey ve yatay ısı akıları birleşik olarak verilmiştir. Burada iki farklı şekil olmasının sebebi her zaman adımının başında ve sonunda iki farklı sıcaklık dağılımı olmasıdır. Zaman adımının başındaki sıcaklık dağılımı Şekil 7.16'da görülmektedir. Burada kesme bölgesinde sıcaklığı en yüksek olan, yani ısı akısının doğrudan uygulandığı bölgeler çıkartılmıştır. Bu sebepten iletimle ısı akısı daha düşüktür. Şekil 20'de ise zaman adımının en sonundan bir görüntü vardır, burada zaman adımı boyunca ısı akısı uygulanmış ve atılacak olan talaşları temsil eden

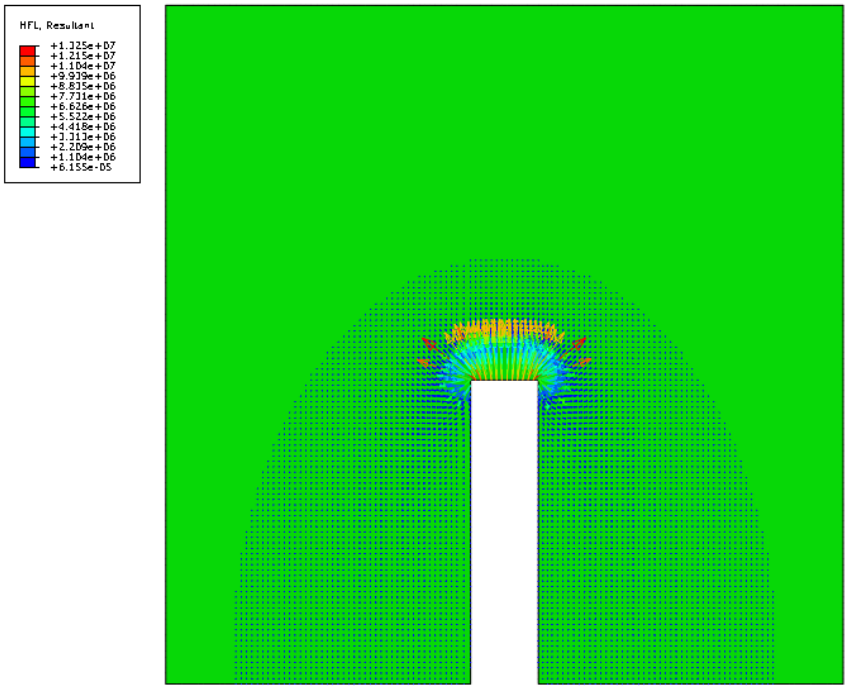
bölgedeki sıcaklıklar yükselmiştir. Bu sebepten uygulanan ısı akısına ek olarak, sıcaklık farkından kaynaklanan bir ısı akısı da oluşmaktadır.



Şekil 7.19 Yataydaki ısı akıları



Şekil 7.20 Toplam ısı akısı



Şekil 7.21 Toplam ısı akısı

7.5 Isının Dağılma Oranları

Frezeleme işlemi sırasında iş parçasına gelen ısı akısının değeri tersine ısı geçişi transferi yöntemi kullanılarak bulması anlatılmıştır. İş parçasına gelen ısı akısının değeri 255 Watt olarak hesaplanmıştır. Bu ısı birinci ve üçüncü bölgede oluşan ısı akısından kaynaklanmaktadır. Bu iş parçasına gelen ısı iş parçasına gelen ve iş parçasında sıcaklık olarak kalan ısı enerjisinin, taşınım sayesinde havaya giden ısıyı ve ısınan talaşla uzaklaştırılan ısıyı göstermektedir. İlk olarak iş parçasına gelen bu ısı akısının hangi yüzdeyle nereye gittiği bulunacaktır. Bunun için iş parçasına gelen ısının ne kadarının iş parçasında kaldığı, ne kadarının taşınımla havaya gittiği ve ne kadarının talaşla uzaklaştırıldığı bulunmalıdır. İlk olarak işlem bittiğinde iş parçasında ne kadar enerji depolandığı bulunmuştur. Bunun için 125. Zaman adımı sonrasında iş parçasında depolanan enerji miktarı şu formülle elde edilmiştir.

$$Q = m \times C_p \times (T_{eleman,ortalama} - 19,8) \tag{7.4}$$

Sayısal modeldeki her bir elemanın ortalama sıcaklığı modelden alınmış ve bu formüle dahil edilmiştir. Bu işlem sayısal model üzerinden yapılmıştır. Parçadaki toplam enerji değil sadece parçaya ısı akısı ile gelen enerjiyi elde etmek için her bir elemanın ortalama sıcaklığı başlangıç sıcaklığı olan 19,8 ^{0}C'den çıkarılmıştır.

Sonrasında her bir elemana gelen enerjiler toplanarak toplam enerji elde edilmiştir. İş parçasında 10,000'den fazla eleman olduğu için işlemler tez dahilinde gösterilmemiştir. Verilere CD üzerinden ulaşılabilir. Bu işlem sonucunda iş parçasında depolanan sıcaklık,

$$Q_{depolanan} = 1495 \text{ Joule}$$

olarak hesaplanmıştır.Bu işlemden sonra havaya taşınımla giden enerji hesaplanacaktır. Taşınımla havaya giden enerji iş parçasında toplanan enerji gibi sadece son adımdaki sıcaklıkların elde edilmesiyle hesaplanamamaktadır. Bu sebepten öncelikle her bir adımdaki sıcaklıklar sayısal modelden elde edilmiştir. Sonrasında taşınımla giden ısı akısı şu formülle hesaplanmıştır.

$$q = h \times A \times (T_{eleman,ortalama} - 19,8)$$

Bu formülde h doğal taşınımdan kaynaklanan ısı transferi katsayısını, A parça alanını ve T ise elemanların ortalama sıcaklığını göstermektedir. Yine iş parçasında depolanan enerjinin hesaplanmasından yapıldığı gibi bu işlemde de sıcaklık değerleri için sayısal modeldeki elemanların ortalama sıcaklık değerleri kullanılmıştır. Her bir zaman adımı için taşınımla giden ısı akısı hesaplandıktan sonra ilgili formülle bir zaman adımında enerji hesaplanır.

$$Q = q \times t$$

Burada t bir zaman adımının süresi olan 0,1508 saniyedir. Her bir zaman adımı için bu işlem tek tek yapılıp, 125 zaman adımının taşınımla giden ısı enerjileri toplanırsa,

$$Q_{taşınım} = 79,4 \text{ Joule}$$

olarak hesaplanır. En son olarak da talaşla iş parçasından atılan enerjinin miktarı bulunacaktır. Bunun için iş parçasına verilen toplam enerjiden, taşınımla giden ve iş parçasında depolanan enerji çıkarılır. İş parçasına gelen toplam enerji

$$Q_{toplam} = 255x18,85 = 4806,7 \text{ Joule}$$

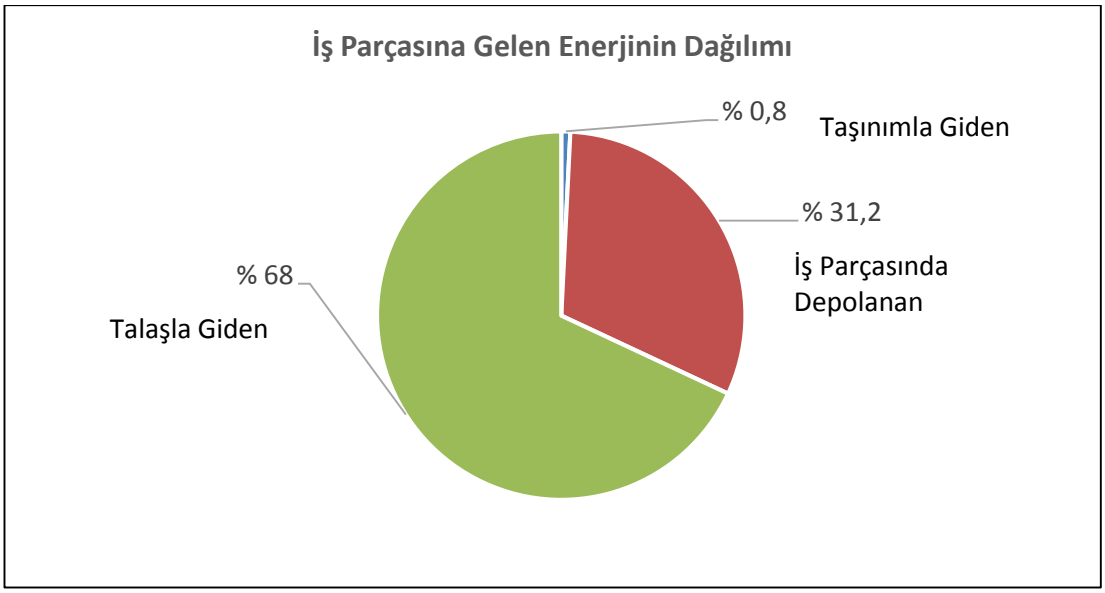
Buradan çıkartma işlemi yapılırsa,

$$Q_{talaş} = Q_{toplam} - Q_{taşınım} - Q_{depolanan} \quad \textbf{(7.5)}$$

$$Q_{talaş} = 4806,7 - 1498,7 - 79,4$$

$$Q_{talaş} = 3228,6 \text{ Joule}$$

Olarak hesaplanır. Bu dağılma oranını grafikte gösterirsek,



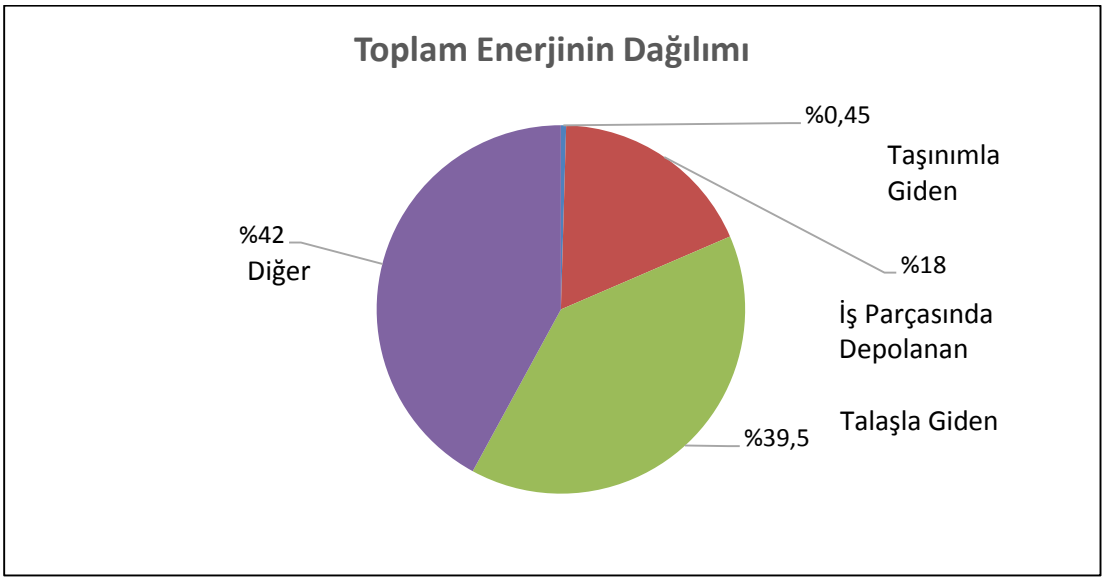
Şekil 7.22 Enerjinin dağılımı

Grafikten de görülebileceği gibi taşınımla parçadan uzaklaştırılan ısı ihmal edilebilir derecede azdır. İş parçasına gelen ısı akısının büyük bir kısmı talaşla iş parçasından atılmaktadır, öte yandan yaklaşık olarak %30'luk bir kısmı da iş parçasının içine iletimle dağılmaktadır. Tabii ki bu dağılım sadece işlem sürerken mevzut olan dağılımdır. İşlem bittikten sonra iş parçasındaki ısı da taşınıma parçadan havaya atılacaktır.

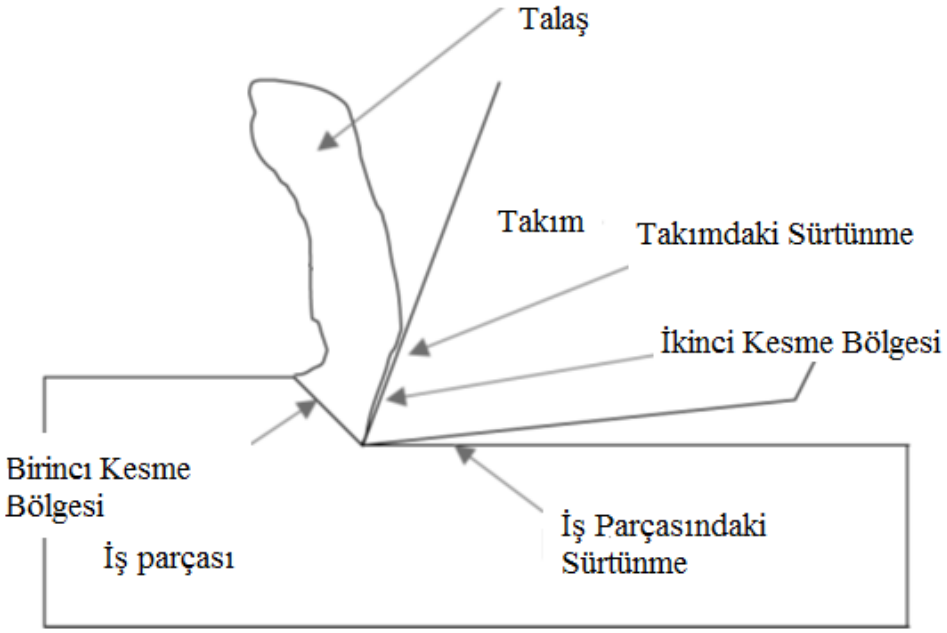
Yukarıda bahsedilen dağılım iş parçasına gelen ısı akısıyla gelen enerjinin dağılımıdır. Bunun yanında frezeleme işlemi için harcanan toplam gücün dağılımı daha büyük önem taşımaktadır. Kuvvet testleri bölümünde harcanan ortalam güç 440 Watt olarak elde edilmiştir. Frezeleme işlemi boyunca yapılan toplam iş 8272 Joule olarak hesaplanır.

Şekilde toplam enerjinin dağılımı verilmiştir. Burada diğer ile ilgili gösterilen kısım iş parçasına gelmeden doğrudan talaşa veya kesici takıma dağılan enerjidir. Giriş bölümünde verilen grafik üzerinden bu durum tekrar incelenirse 1. ve 3. bölgede oluşan enerjinin bir kısmının bulunduğu görülür. Bu bölgelerde oluşan ısı iş parçasına, talaşa ve kesici takıma gitmektedir. Bu durumda 3. Bölgede oluşan ısının bir kısmını iş parçasına iletilebilmesi için 2. ve 3. bölgede oluşup talaşla dışarıya gönderilen ısıdan yüksek bir ısı üretilmesi gerekmektedir. Bunun yanında sıcaklık değerlerinin çok yüksek olduğu düşünülürse, farkedilebilecek seviyede ısı enerjisinin iş parçasına iletilebilmesi için oluşması gereken sıcaklık gradyenleri için gerekli sıcaklıkları çok

yüksek olacağı görülecektir. Bu sebeplerden hesaplanan ısı akısının 2. ve 3. bölgede oluşan ısı akısı olduğu kabülü yapılabilir.



Şekil 7.23 Toplam enerjinin dağılımı



Şekil 7.24 Isı üretim bölgeleri

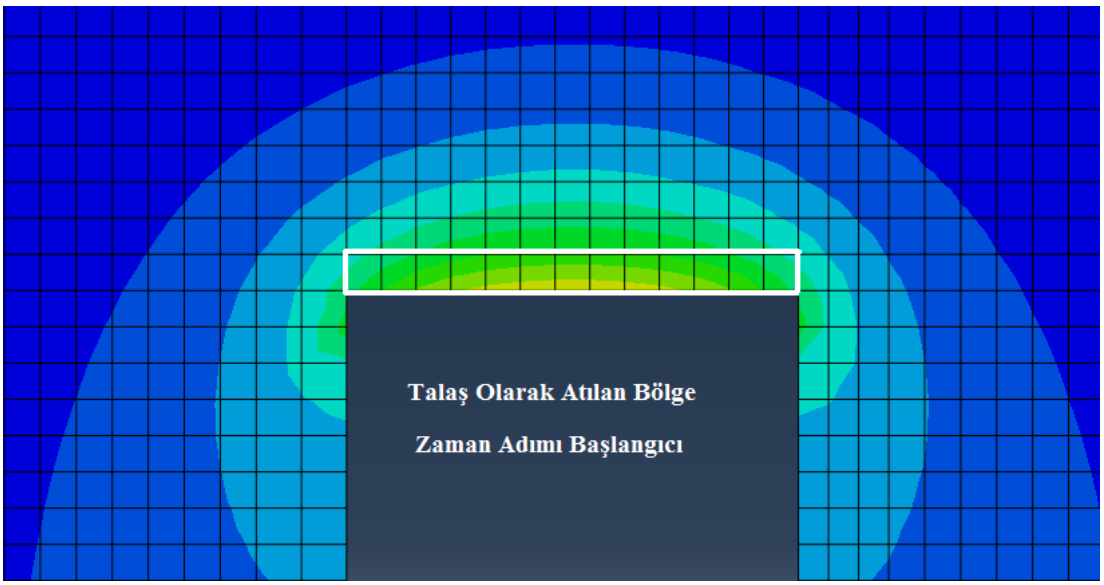
Şekilde toplam enerjinin dağılımı verilmiştir. Burada diğer ile ilgili gösterilen kısım iş parçasına gelmeden doğrudan talaşa veya kesici takıma dağılan enerjidir. Giriş bölümünde verilen grafik üzerinden bu durum tekrar incelenirse 1. ve 3. bölgede oluşan enerjinin bir kısmının bulunduğu görülür. Bu bölgelerde oluşan ısı iş parçasına, talaşa ve kesici takıma gitmektedir. Bu durumda 3. Bölgede oluşan ısının bir kısmını iş parçasına iletilebilmesi için 2. ve 3. bölgede oluşup talaşla dışarıya gönderilen ısıdan

yüksek bir ısı üretilmesi gerekmektedir. Bunun yanında sıcaklık değerlerinin çok yüksek olduğu düşünülürse, farkedilebilecek seviyede ısı enerjisinin iş parçasına iletilebilmesi için oluşması gereken sıcaklık gradyenleri için gerekli sıcaklıkları çok yüksek olacağı görülecektir. Bu sebeplerden hesaplanan ısı akısının 2. ve 3. bölgede oluşan ısı akısı olduğu kabülü yapılabilir.

Isı dağılım oranları ile ilgili olarak literatürdeki değerler Çizelge 2.1'de verilmiştir. Bu değerler büyük oranlarda kabüllere dayanarak yapılmış olup, talaş kaldırma işleminde her bir işlemin önemli parametreleri olduğu unutulmamalıdır. Bu sebepten söylenebilir ki bulunan %18 değeri mertebe olarak literatürdeki değerlere uyuşmaktadır.

7.6 Ortalama Talaş Sıcaklıkları

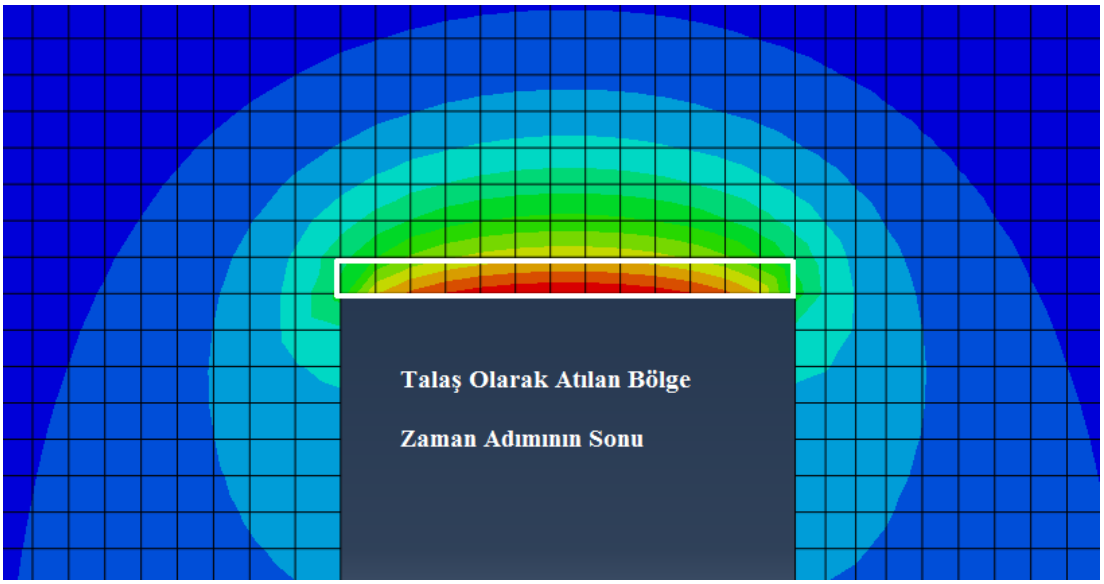
Talaşların iş parçasından ayrıldıktan hemen sonraki ortalama sıcaklıkları elde edilmiştir. Bunun için sayısal modeldeki veriler kullanılmıştır. Sayısal modelde anlatıldığı gibi her bir zaman adımının sonunda talaş olarak belirli bir bölge atılmaktadır, ancak kesikli ilerleme yüzünden bu bölgedeki sıcaklıklar aslında uygun olmayan bir şekilde görüntülenmektedir. Bunun için zaman adımının ilk ve sonunındaki sıcaklıklarının bir ortalaması alınarak ortalama talaş sıcaklığı elde edilmiştir.



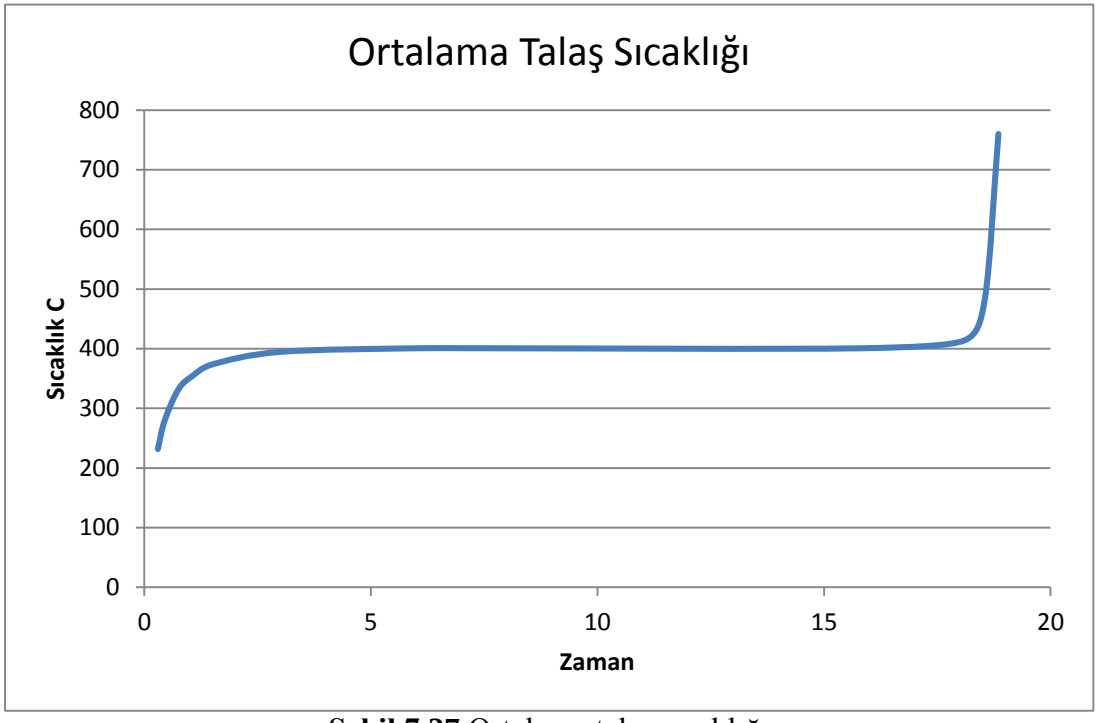
Şekil 7.25 Meshlerin çıkarımı

Şekilde beyaz çizgilerle gösterilmiş bölge aslında o zaman adımı içinde düzenli olarak talaş şeklinde dışarı atılması gereken bölgedir. Ancak böyle bir veriye elde edilemediği için ortalama bir talaş sıcaklığı tanımı yapılarak, o bölgenin bir zaman adımı

boyuncaki sıcaklıklarının ortalaması alınarak tek bir sıcaklık elde edilmiştir. Grafikte bu sıcaklıklar görülebilir.



Şekil 7.26 Meshlerin çıkarımı



Şekil 7.27 Ortalama talaş sıcaklığı

İşlemin büyük bir kısmında ortalama talaş sıcaklığının 400 C olduğu görülmektedir. Burada dikkat edilmesi gereken nokta bu talaş sıcaklıklarının hemen iş parçası çıkışındaki talaş sıcaklıkları olmasıdır. 2. bölgede bu sıcaklıklar orada sürtünmeden kaynaklanan ısı üretimi ile daha da yükselecektir.

8. YORUMLAR

Bu çalışmada frezeleme işlemi sırasında oluşan ve iş parçasına uygulanan ısı akısı tersine ısı geçişi yöntemiyle bulunmuştur. Bunun için Matlab ve Abaqus programlarının beraber kullanılarak hazırlanan bir sayısal çözüm, frezeleme işlemi sırasında iş parçasından alınan sıcaklık verileri ve optimizasyon için yine Matlab programı kullanılmıştır.

Tersine ısı geçişi probleminin çözümü sonucunda 12,750,000 W /m^2 ısı akısı değeri bulunmuştur. Yani iş parçasına gelen ısı akısı 255 Watt olarak hesaplanmıştır.

Kuvvet deneyleri ile işlem boyunca harcanan toplam güç bulunmuş ve toplam gücün %18'lik bölümünün iş parçasına gittiği yani üretilen toplam ısı akısının %18'lik bölümü iş parçasına aktığı bulunmuştur.

İş parçasından çıkan talaşların ortalama sıcaklığı 400 ^{0}C mertebesinde olduğu ve işlem süresince iş parçasının yan yüzeylerinin ortalama 300 ^{c}C mertebesinde olduğu görülmüştür. Bunun yanında farklı noktaların ısınma ve soğuma grafikleri elde edilmiş ve iş parçasının tamamının sıcaklık dağılımı bulunmuştur.

KAYNAKLAR

[1] **Trigger, K.J. ve Chao B.T.** (1951). An analytical evaluation of metal cutting temperature.*Transactions of ASME, 73*, 57-68

[2] **Chao, B.T. ve Trigger, K.J. (**2000). Temperature Distribution at the Tool-chip Interface in Metal Cutting.*Transactions of ASME, 77*, 1107-1121

[3**] Loewen, E. G. ve Shaw, M.C. (**1954). On The Analysis Of Cutting Tool Temperatures. *Transactions of ASME, 71*, 217-231

[4] **Stephenson, D.A. ve Stevenson, R.** (1995). The Mechanical Behavior of Zinc During Machining.*Journal of Engineering Material Technology, 117,* 172-178

[5] **Weiner, J.H.** (1954). Shear-Plane Temperature Distribution İn Orthogonal Cutting.*Transactions of ASME, 76*, 1331-1341

[6] **Young, H.T. ve Liou, H.Y**. (1994). On The Analysis Of Chip Temperature Distrubution İn Orthogonal Machining.*International Journal of Machine Tools and Manufacturing, 31*, 73-84

[7] **Young, H.T. ve Liou, H.Y**. (1994). On The Analysis Of Chip Temperature Distrubution in Orthogonal Machining.*International Journal of Machine Tools and Manufacturing, 31*, 73-84

[8] **Shaik, A.R., Raman S., Civan, S., ve Cohen, P.H.** (1995). A New Forward Temperature Estimator for Remote Thermocouple sensing in Machining.*International Journal of Mechanical Sciences, 37-5,* 511-526

[9] **Subramani, G., Whitmore, M. C., Kapoor, S.G.,ve DeVor**, **R.E.** (1995). Temperature Distribution in a Hollow Cylindrical Workpiece During Machining: Theoretical Model and Experimental Results.*Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 113-4, 373-380

[10] **Tay, A.O., Stevenson, M.G., Vahl, D.G.** (1974). Using the finite element method to determine temperature distributions in orthogonal machining. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, (London)*

[11] **Muraka, P.D., Barrow, G., ve Hinduja, S.** (1979). Influence of the Process Variables on the Temperature Distribution in Orthogonal Machining Using the Finite Element Method. *International Journal of Mechanical Sciences, 21*, 445-456

[12] **Usui, E. ve Shirakashi, T**. (1982). Mechanics of Machining from Deceptive to Predictive Theory. *On the Art of Cutting Metals – 75 years later, ASME PED, 7*, 13-35

[13] **Oxley, P.L.B.** (1989). The Mechanichs of Machining, Ellis Horwood, Ceicester

[14] **Lazoglu, I. ve Altintas, Y.** (2002). Prediction of Tool and Chip Temperature in Continuous and Interrupted Machining. *International Journal of Machine Tools and Manufacture, 42-9,* 1011-1022

[15] **Smith,A.J.R. ve Armarego, J.A.** (1981). Temperature prediction in orthogonal cutting with a finite difference approach, *Annals of CIRP*

[16] **Chan, C.L ve Chandra, A.** (1991). A Boundary Element Analysis Of Temperature Distributions İn Metal Cutting. *ASME Journal of Engineering Industry, 113,* 311–319.

[17] **Da Silva, M.B. & Wallbank, J.**(1997). Temperature Measurements in Machining Using Infrared Sensor, *Procedings of 13th Congressso Brasileiro de Engenharia Mecânica,*8-12th Decemver,Bauru/SP, Brazil.

[18] **J.M. Longbottom, J.M.ve Lanham, J.D.** (2005). Cutting temperature measurement while machining – a review.*Aircraft Engineering and Aerospace Technology, 77-2,* 122 – 130

[19] **Abukhshim, N.A, Mativenga, P.T. ve Sheikh, M.A** (2006). Heat generation and temperature prediction in metal cutting: A review and implications for high speed machining. *International Journal of Machine Tools and Manufacture. Vol 46, Issue 7-8, pp. 782-800*

[20] **Beck, L.V., Blackwell, B. ve St. Clair, Jr B.K.**(1985).Inverse Heat Conduction. Wiley, New York

[21] **Ozisik, M. N.** (2000). Inverse heat transfer: fundamentals and applications. CRC Press.

[22] **Alifanov, M.ve Egerov, Y.V.**(2006).Algorithm and results of solving inverse heat-conduction boundary problems in a two-dimensional formulation. *Journal of Engineering Physics. 53-5,* 1335-1342

[23] **Beck, L.V., Blackwell, B. ve St. Clair, Jr B.K.**(1985).Inverse Heat Conduction. Wiley, New York

[24] **Jarny, Y., Özışık, N. ve Bardon, J.P.** (1991).A general optimization method using adjoint equation for solving multidimensional inverse heat conduction. *International Journal of Heat and Mass Transfer. 34-11,* 2911-2919

[25] **Lima, A.E., Bruno, A.C. ve Szczupak, J.** (1999).Two-dimensional spatial frequency response of SQUID planar gradiometers. *Superconducter Science and Technology. 12-11,* 949

[26] **Palazzo, G. ve Pasquino, R.** (2002)**.** Temperature fields in machining processes and heat transfer models. *Mathematical and Computer Modelling: An International Journal. 35-1,* 101-109

[27] **Kusiaka, A. Ve Jean-Luc Battaglia, J.** (2005). Tool coatings influence on the heat transfer in the tool during machining. *Surface and Coatings Technology. 195,* 29-40

[28] **Shaw, M. C., Pigott, J. D. ve Richardson, L. P.**(1951). Effect of Cutting Fluid upon Chip-Tool Interface Temperature, *Transactions of ASME, 71,* 45-56.

[29] **Carvalho, S.R., Lima e Silva, S.M.M., Machadoa, A.R. ve Guimaraes, G.** (2006). Temperature determination at the chip–tool interface using an inverse thermal model considering the tool and tool holder. *Journal of Materials Processing Technology, 179*, 97-104

[30] **Huang, C. H., Jan, C. J., Li, R. ve Shih A. J.,** (2007). A Three-Dimensional Inverse Problem in Estimating The Applied Heat Flux of a Titanium Drilling – Theoretical and Experimental Studies.*International Journal of Heat and Mass Transfer, 50,* 3265 – 3277.

[31] **Gostimirović, M., Sekulić, M., Kopač, J. ve Kovač, P.**(2011). Optimal control of workpiece thermal state in creep-feed grinding using inverse heat conduction analysis.*Strojniški vestnik-Journal of Mechanical Engineering, 57-10,* 730-738

[32] **Gostimirović, M., Sekulić, M., Kopač, J. ve Kovač, P.**(2011). Optimal control of workpiece thermal state in creep-feed grinding using inverse heat conduction analysis. *Strojniški vestnik - Journal of Mechanical Engineering, 57-10,* 730-738

[33] **Shaw, M.C.**(1984) Metal cutting principles. Oxford UniversityPress, Oxford

[34] **Shaw, M.C.** (1984) Metal cutting principles. Oxford UniversityPress, Oxford

[35] **J.M. Longbottom, J.M.ve Lanham, J.D.** (2005).Cutting temperature measurement while machining – a review.*Aircraft Engineering and Aerospace Technology, 77-2,* 122 – 130

[36] **Altıntaş, Y.** (2012) Manufacturing Automation. Cambridge University Press

[37-41] **J.M. Longbottom, J.M.ve Lanham, J.D.** (2005). Cutting temperature measurement while machining – a review.*Aircraft Engineering and Aerospace Technology, 77-2,* 122 – 130

[42] **Altıntaş, Y.** (2012) Manufacturing Automation. Cambridge University Press

[43-44] **Ozisik, M. N.** (2000). Inverse heat transfer: fundamentals and applications. CRC Press.

ÖZGEÇMİŞ



Ad-Soyad : Taygun Recep Güngör

Doğum Tarihi ve Yeri: Balıkesir, 1989

E-posta : taygungungor@gmail.com

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans :**2011, İTÜ, Makina Fakültesi, Makina Mühendisliği
- **Yükseklisans :**2014, İTÜ, Makina Mühendisliği, Isı – Akışkan YL Programı

Mesleki Deneyim

İTÜ Isı ve Kütle Geçişi Laboratuvarı : Ekim 2013 – Ocak 2014

NLSS Mühendislik : Ocak 2014 - Halen

TEZDEN TÜRETİLEN YAYINLAR, SUNUMLAR VE PATENTLER:

- Güngör, T.R., Kuzu, A.T., Bakkal, M. Ve Özdemir, M. 2013. WorkPieceTemperature Distribution Analysis withInverseHeat Transfer MethodInMilling, *Proceedings of the 13th UK Heat Transfer Conference*, September2-3, 2013, London, England