



**T.C.
İSKENDERUN TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
MÜHENDİSLİK VE FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**JOMİNY TESTİNİN SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİYLE
MODELLENMESİ**

**HATAY
NİSAN-2018**

**T.C.
İSKENDERUN TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
MÜHENDİSLİK VE FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**JOMİNY TESTİNİN SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİYLE
MODELLENMESİ**

SONER YÜRÜK

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**HATAY
NİSAN-2018**

KOD: 81

**T.C İSKENDERUN TEKNİK ÜNİVERSİTESİ MÜHENDİSLİK VE FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ MAKİNE
MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI 2018**



T.C.
İSKENDERUN TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
MÜHENDİSLİK VE FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Tezin Adı: Jominy Testinin Sonlu Elemanlar Yöntemiyle Modellenmesi

Öğrencinin, Adı Soyadı: Soner Yürük

Tez Savunma Tarihi: 06.04.2018

Kod No:81

Enstitü Onayı:

Doç. Dr. Tolga DEPCI
Enstitü Müdürü V.

Bu tezin Yüksek Lisans olarak gerekli şartları sağladığımı onaylarım.

Prof. Dr. Ahmet YAPICI
Enstitü ABD Başkanı

Bu tez tarafımızca okunmuş, kapsamı ve niteliği açısından bir Yüksek Lisans olarak kabul edilmiştir.

Dr. Öğr. Üyesi Ali GÜNEN
İkinci Tez Danışmanı

Dr. Öğr. Üyesi Erdoğan KANCA
Tez Danışmanı

Bu tez tarafımızca okunmuş, kapsam ve niteliği açısından bir Yüksek Lisans olarak oy birliği/oy çokluğu ile kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri (Unvanı, ADI ve SOYADI):

İmzası

Dr. Öğr. Üyesi M. Veysel ÇAKIR

.....

Dr. Öğr. Üyesi Emin Taner ELMAS

.....

Dr. Öğr. Üyesi Erdoğan KANCA

.....

Not: Bu tezde kullanılan özgün ve başka kaynaktan yapılan bildirişlerin, çizelge, şekil ve fotoğrafların kaynak gösterilmeden kullanımı, 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunundaki hükümlere tabidir.

06.04.2018

TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını ve tez üzerinde Yükseköğretim Kurulu tarafından hiçbir değişiklik yapılamayacağı için tezin bilgisayar ekranında görüntülediğinde asıl nüsha ile aynı olması sorumluluğunun tarafıma ait olduğunu beyan ederim.

İmza
Soner Yürük

ÖZET

JOMİNY TESTİNİN SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİYLE MODELLENMESİ

Malzemelere uygulanan ısı işlemlerin modellenebilmesi günümüzde ticari yazılımlarla yapılmaktadır. Bu modellemeleri yapan ticari programlar, iş parçasının ısı işlem sonrasındaki mekanik özellikleri ve tane yapıları hakkında kapsamlı bilgiyi yüksek oranda doğrulukla kullanıcılarına sunmaktadır. Malzeme ile soğutucu sıvı arasındaki ısı taşınım miktarını sembolize eden ısı taşınım katsayısının değerinin doğru tespit edilmesi ısı işlem modellemelerinin doğruluk oranını yükseltecektir. Soğutucu sıvının debisi, sıcaklığı ve türü konveksiyon değerini etkilediği gibi test numunesinin de yüzey pürüzlülüğü ve malzeme türü de aynı şekilde etkili olacaktır. Bu bağlamda, yeniden tasarlanıp imal edilen Jominy test cihazı, ısı işleme etki eden değişkenleri (soğutucu sıvı türü, sıcaklığı ve uygulama hızı) kontrollü ve ölçülebilir şekilde test numunesine uygulayabilmektedir.

Bu çalışma, ısı işlemde bilinmesi zaruri olan, konveksiyon katsayısının bulunmasında yeni bir yaklaşım sunmaktadır. Sunulan yaklaşım ile ticari yazılım “sonlu elemanlar yöntemiyle modelleme” ve test cihazı kullanılarak elde edilen zaman-soğuma eğrileri kıyaslanıp, grafiklerin örtüşmesi beklendi. Örtüşme olana kadar ticari yazılımda, rastgele konveksiyon katsayısı değiştirildi. Örtüşme olduğu durumdaki ticari yazılıma verilen konveksiyon katsayısı, o anki değişkenlerden (soğutucu sıvının debisi, sıcaklığı ve türü, test numunesinin yüzey pürüzlülüğü ve malzeme türü) kaynaklanan gerçek konveksiyon katsayısı olarak tespit edildi.

Bu bağlamda, SAE/AISI 1050 çeliğinin Jominy alından su verme deneyi ve sonlu elemanlar modellemesi tasarlandı. AISI 1050 çeliği için jominy deneyi yapıldı. Aynı malzeme için ticari yazılım olan ABAQUS’de soğuma koşulları modellendi. Modelleme esnasında rastgele verilen konveksiyon katsayısına göre grafikler elde edildi. Bu grafikler arasından uygulama ile en iyi örtüşen sonuç grafiği elde edildi. Deneysel ve modelleme sonucu elde edilen eğrilerin yaklaşık olarak örtüşmesi, jominy deney koşullarındaki soğutma parametrelerine (kullanılan soğutma sıvısı ve sıcaklığı, soğutma sıvı debisi, malzeme türü ve yüzey özellikleri gibi) ait konveksiyon katsayısının $15000 \text{ W/m}^2\text{K}$ olduğu tespit edildi.

Konveksiyon katsayılarının (h) tespiti ileriye dönük termodinamik ve enerji transferini ilgilendiren çalışmalar için de bir veri tabanı oluşturacaktır. Günümüzde enerji sistemlerini ihtiva eden makine cihaz ve ekipmanlarının termal dizaynındaki en büyük problem konveksiyon katsayılarının (h) hesaplanmasındaki zorluklardır. Bu tez çalışması ile konveksiyon katsayılarının (h) tespitine yardımcı olacak bilimsel bulgular ortaya konmuş olacaktır.

2018, 81 sayfa

Anahtar Kelimeler: Jominy testi, Isıl işlem, Sonlu Elemanlar Yöntemi (FEM), Isı Taşınım Katsayısı

ABSTRACT

MODELING OF THE JOMINY TEST BY THE FINITE ELEMENT METHOD

Modeling of heat treatments applied to materials is now done with commercial software. The commercial programs that make these models present their users with a high level of accuracy in their knowledge of the mechanical properties of the workpiece after heat treatment and grain composition. Accurate determination of the value of the convection coefficient, which symbolizes the amount of heat transfer between the material and the coolant liquid, will increase the accuracy of the heat treatment models. The surface roughness and material type of the test sample will be equally effective as well as the temperature of the coolant liquid, temperature and type of convection. In this context, the redesigned Jominy tester is able to apply heat treatment variable (coolant type, temperature and application speed) to the test sample in a controlled and measurable manner.

This study presents a new approach to finding the convection coefficient, which is essential to know the heat treatment. It is expected that the time-cooling curves obtained by using the commercial approach "modeling with finite element method" and the test instrument are compared with the presented approach and the graphs overlap. The convection coefficient given at random is changed in the commercial software until the overlap occurs. The convection coefficient given in the commercial case where overlap is determined as the actual convection coefficient resulting from the variables (flow temperature, coolant temperature and type, surface roughness of the test sample and material type).

In this context, Jominy quenching experiment and finite element modeling of SAE/AISI 1050 steel were done. A jominy test was conducted for the AISI 1050 steel. Cooling conditions were also modeled for commercial material ABAQUS for the same material. Graphs were obtained according to the convection coefficient given at random during modeling. Among these graphs, the best matching result graph was obtained. The approximate overlap of the curves obtained from the experimental and modeling results was determined to be 15000 W/m²K of the convection coefficient for the cooling parameters in the jominy test conditions (such as cooling fluid and temperature used, cooling fluid flow, material type and surface properties).

The determination of the convection coefficients (h) will also form a database for studies involving prospective thermodynamics and energy transfer. The biggest problem in the thermal design of machine tools and equipments nowadays containing energy systems is the difficulty in calculating the convection catheters (h). This thesis study will reveal scientific findings that will aid in the identification of convection cathedrals (h)

2018, 81 pages

Key Words: Jominy test, heat treatment, finite element method (FEM), convection coefficient

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans tez konusunun belirlenmesinde, araştırılması ve yazımı sırasında sahip olduğu bilgi birikimi ve tecrübesi ile çalışmayı yönlendiren ve her türlü yardımı esirgemeyen saygıdeğer danışman hocam Yrd. Doç. Dr. Erdoğan KANCA'ya sonsuz saygı ve teşekkürlerimi sunarım.

Tez konusunun belirlenmesi ve çalışmaların takip edilmesinde her türlü yardımı esirgemeyen Yrd. Doç. Dr. Erdoğan KANCA'ya, Yrd. Doç. Dr. Ali GÜNEN'e, Yrd. Doç. Dr. M. Tülin YILDIRIM'a ve Arş. Gör. Mehmet DEMİR'e tez çalışmaları sırasında tüm bölüm olanaklarından yararlanmamı sağlayan İskenderun Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi Makine Mühendisliği Bölüm Başkanlığı'na, maddi ve manevi destek veren ve isimlerini burada zikredemediğim ama yardımlarını esirgememiş herkese içten teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmalarım sırasında desteklerini esirgemeyen eşim Zübeyde YÜRÜK ile çocuklarım Ali Efe ve Duru Ceren'e çok teşekkür ederim.

Ayrıca bu günlere gelmemde hayatımın tüm evrelerinde beni destekleyen annem Fatma YÜRÜK ve babam İsmet YÜRÜK'e teşekkürlerimi bir borç bilirim.

Bu çalışmamın gerçekleşmesinde sağladıkları maddi kaynaklardan dolayı MKÜ bilimsel araştırma projeleri (13907) komisyonuna teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

ÖZET	I
ABSTRACT	II
İÇİNDEKİLER.....	IV
ŞEKİLLER DİZİNİ	V
ÇİZELGELER DİZİNİ	VII
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	VIII
1. GİRİŞ	1
1.1 Tavlama.....	3
1.2 Çelikte Martenzit Oluşumu.....	4
1.2.1 Zaman Sıcaklık Dönüşüm Eğrisi.....	4
1.2.2 Isıl İşlemler.....	7
1.3 Isı Transfer Çeşitleri	9
1.4 Sertleşebilirlik	13
1.5 Grossman Sertleşebilirlik Testi:	14
1.6 Jominy Sertleşebilirlik Testi	15
2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR.....	16
3. MATERYAL ve YÖNTEM.....	32
3.1 Materyal	32
3.1.1 SAE 1050 Çeliği.....	32
3.1.2 Isıtma Fırını	33
3.1.3 InfraRed Termometre	34
3.1.4 Termal Kamera.....	35
3.1.5 Sonlu Elemanlar Yöntemi.....	37
3.2 Yöntem.....	39
4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA.....	41
4.1 Jominy Test Cihazının Yeniden Tasarlanıp İmal Edilmesi	41
4.2 Jominy Deney Teorik Hesaplanması	47
4.3 Jominy Test Sonuçları	53
5. SONUÇ ve ÖNERİLER.....	74
5.1 Sonuçlar	74
5.2 Öneriler	75
KAYNAKLAR.....	76
ÖZGEÇMİŞ.....	81

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1 ZSD Eğrisi, %0.8 C'lu çelik için zaman ve sıcaklığın fonksiyonu olarak ostenitin dönüşümünü göstermektedir (Groover 2016).	5
Şekil 1.2 Sade karbonlu çelikte , (sertleştirilmiş) martenzit ve (tavlanmış) perlit içerisindeki karbon içeriğinin fonksiyonu olarak sertlik dağılımı göstermektedir (Groover 2016).	7
Şekil 1.3 Çeliğin tipik ısıl işlemleri: Östenitleme, su verme, temperleme (Groover, 2016).	9
Şekil 1.4 İletim ile Isı Transferi.....	10
Şekil 1.5 Taşınım ile ısı transferi.....	11
Şekil 1.6 Işınmım ile ısı transferi.....	12
Şekil 3.1 Standart jominy test numunesinin görünümü	33
Şekil 3.2 Isıl işlem fırını.....	34
Şekil 3.3 İnfrared Termometre.....	35
Şekil 3.4 Termal kamera.....	36
Şekil 3.5 Çeşitli bir boyutlu parçaların elemanlara bölünmüş hali (A. Topcu 2015)	37
Şekil 3.6 Jominy test numunesi sıcaklık-zaman eğrisi	40
Şekil 3.7 Ticari yazılım kullanılarak jominy testi koşulları simüle edilmesi.....	40
Şekil 4.1 Tasarlanıp imalatı yapılan jominy test cihazının görünümü.....	42
Şekil 4.2 Farklı 9 noktadan termokupl ile sıcaklık ölçüm yapımı ve test numunesi.....	43
Şekil 4.3 Tasarlanıp imalatı yapılan jominy test cihazının temsili görünümü	45
Şekil 4.4 Jominy test cihazının soğutma kabini	46
Şekil 4.5 Jominy test cihazının soğutma sıvısı sirkülasyon sistemi	46
Şekil 4.6 Bir boyutlu jominy numunesinin ısı transfer modeli	48
Şekil 4.7 Teorik hesaplamalara göre AISI 1050 çeliğinin zaman soğutma grafiği.....	52
Şekil 4.8 İnfrared termometre ile numune sıcaklıklarının okunması.....	53
Şekil 4.9 Jominy testi yapılırken çekilen termal kamera görüntüleri	54
Şekil 4.10 Jominy deney cihazında AISI 1050 çeliği test numunesi üzerinden elde edilen soğuma eğrisi	55
Şekil 4.11 ABAQUS sonlu elemanlar yazılımı kullanılarak jominy testi	55
Şekil 4.12 ABAQUS sonlu elemanlar yazılımı kullanılarak oluşturulan	56
Şekil 4.13 ABAQUS sonlu elemanlar yazılımında iletkenlik bilgi girişi.....	57
Şekil 4.14 ABAQUS sonlu elemanlar yazılımında yoğunluk bilgi girişi.....	58
Şekil 4.15 ABAQUS sonlu elemanlar yazılımında özgül ısı bilgi girişi	59

Şekil 4.16 Modelleme sonrası jominy test numunesi boyut standartları ve soğuma eğrisi.....	60
Şekil 4.17 $h= 1 \text{ kW/m}^2\text{K}$ için ABAQUS sonlu elemanlar yazılım modellemesi	60
Şekil 4.18 Modelleme sonrası jominy test numunesi boyut standartları ve soğuma eğrisi.....	61
Şekil 4.19 $h= 2 \text{ kW/m}^2\text{K}$ için ABAQUS sonlu elemanlar yazılım modellemesi	61
Şekil 4.20 Modelleme sonrası jominy test numunesi boyut standartları ve soğuma eğrisi.....	62
Şekil 4.21 $h= 3 \text{ kW/m}^2\text{K}$ için ABAQUS sonlu elemanlar yazılım modellemesi	62
Şekil 4.22 Modelleme sonrası jominy test numunesi boyut standartları ve soğuma eğrisi.....	63
Şekil 4.23 $h= 4 \text{ kW/m}^2\text{K}$ için ABAQUS sonlu elemanlar yazılım modellemesi	63
Şekil 4.24 Modelleme sonrası jominy test numunesi boyut standartları ve soğuma eğrisi.....	64
Şekil 4.25 $h= 5 \text{ kW/m}^2\text{K}$ için ABAQUS sonlu elemanlar yazılım modellemesi	64
Şekil 4.26 Modelleme sonrası jominy test numunesi boyut standartları ve soğuma eğrisi.....	65
Şekil 4.27 $h= 7.5 \text{ kW/m}^2\text{K}$ için ABAQUS sonlu elemanlar yazılım modellemesi	65
Şekil 4.28 Modelleme sonrası jominy test numunesi boyut standartları ve soğuma eğrisi.....	66
Şekil 4.29 $h= 10 \text{ kW/m}^2\text{K}$ için ABAQUS sonlu elemanlar yazılım modellemesi	66
Şekil 4.30 Modelleme sonrası jominy test numunesi boyut standartları ve soğuma eğrisi.....	67
Şekil 4.31 $h= 15 \text{ kW/m}^2\text{K}$ için ABAQUS sonlu elemanlar yazılım modellemesi	67
Şekil 4.32 Modelleme sonrası jominy test numunesi boyut standartları ve soğuma eğrisi.....	68
Şekil 4.33 $h= 20 \text{ kW/m}^2\text{K}$ için ABAQUS sonlu elemanlar yazılım modellemesi	68
Şekil 4.34 Modelleme sonrası jominy test numunesi boyut standartları ve soğuma eğrisi.....	69
Şekil 4.35 $h= 25 \text{ kW/m}^2\text{K}$ için ABAQUS sonlu elemanlar yazılım modellemesi	69
Şekil 4.36 $h; 15 \text{ kW/m}^2\text{K}$ için ABAQUS sonlu elemanlar yazılım modellemesi ile test grafiğinin 5 mm ile 10 mm noktalarında karşılaştırılması.....	71
Şekil 4.37 $h; 15 \text{ kW/m}^2\text{K}$ için ABAQUS sonlu elemanlar yazılım modellemesi ile test grafiğinin 15 mm ile 20 mm noktalarında karşılaştırılması.....	71
Şekil 4.38 $h; 15 \text{ kW/m}^2\text{K}$ için ABAQUS sonlu elemanlar yazılım modellemesi ile test grafiğinin 25 mm ile 30 mm noktalarında karşılaştırılması.....	72
Şekil 4.39 $h; 15 \text{ kW/m}^2\text{K}$ için ABAQUS sonlu elemanlar yazılım modellemesi ile test grafiğinin 35 mm ile 40 mm noktalarında karşılaştırılması.....	73

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 1.1 Konveksiyon ısı transfer katsayısının tipik değerleri.....	13
Çizelge 1.2 Su verme ortamlarının şiddetleri (Prabhudev, 2008).....	15
Çizelge 3.1 AISI 1050 çeliğinin kimyasal özellikleri.....	32
Çizelge 3.2 AISI 1050 çeliği ısıtılma işlem özellikleri.....	32
Çizelge 3.3 Protherm fırını PLF 120/15 serisi fırını teknik özellikleri.....	33
Çizelge 3.4 InfraRed Termometre Özellikleri (Extech 42570).....	35
Çizelge 3.5 Ölçümlerde kullanılan termal kamera özellikleri (Testo 881).....	36
Çizelge 4.1 AISI 1050 çeliğinin gerekli fiziksel özellikleri.....	50
Çizelge 4.2 Teorik hesaplamalarda sıcaklık zaman grafiği çizelgesi.....	51

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Fe	: Demir
C	: Karbon
Fe ₃ C	: Demir Karbür (sementit)
SAE	: Society of Automotive Engineers
TTT	: Time-Temperature-Transformation
CCT	: Continuous Cooling Transformation
R _c	: Rockwell sertlik
Mn	: Mangan
Si	: Silisyum
Cr	: Krom
Mo	: Molipten
Ni	: Nikel
Al	: Alüminyum
D _c	: Kritik çap
D _{ic}	: İdeal Kritik Çap
h	: Konveksiyon katsayısı
TTP	: Time Temperature Precipitation
M _s	: Martenzit başlangıç sıcaklığı
M _f	: Martenzit bitiş sıcaklığı
h	: Konveksiyon Katsayısı
B	: Beynit
k	: ısı iletim katsayısı
T _s	: Yüzey sıcaklığı (K)
T _f	: Akışkan sıcaklığı (K)
ΔT	: Sıcaklık farkı (K)
Δx	: Kalınlık (m)
T	: Sıcaklık (°C)
ρ	: Özgül Kütle (kg/m ³)
c _p	: Özgül Isı (J/kg.K)
α	: Isıl Yayınım Katsayısı (α, m ² /s ²)
μ	: Dinamik Viskozite (μ, kg/m.s)
ν	: Kinematik Viskozite (m ² /s)
Bi	: Biot Sayısı
Fo	: Fourer Sayısı

1. GİRİŞ

Makine yapımında ve makine parça imalatında günümüzde en çok tercih edilen ve bu alanda önemli yere sahip olan malzemenin çelik olduğu bilinmektedir. Tasarlanacak ve imalatı yapılacak makine elemanları için kullanım yerine ve çalışma şartlarına göre çelik tipi belirlenmektedir. Çelik tipi seçiminde kullanılacak olan çeliğin fiziki ve mekanik özellikleri belirlenmekte, makine üzerinde görevini yapıp yapamayacağının tespiti yapılmaktadır. Tercih edilen çeliğin kimyasal kompozisyonu buna bağlı fiziksel ve mekanik parametrelerinin istenilen özelliklerde olmasının yanında fiyatının uygun olması maliyetler açısından karşımıza çıkan önemli hususlardan birisidir. Çelik seçiminde dikkat edilmesi ve bilinmesi gereken önemli özelliklerden birisi de çeliğin sertleşebilme kabiliyetidir. Çeliklerin sertleşebilme kabiliyeti bilinerek yapılması malzeme seçiminde doğru tercihi yapmamızda yardımcı olacaktır. Çeliklerin sertleşebilme kabiliyetlerinin belirlenmesinde kullanılan yöntemlerden en önemlisi Jominy alından su verme deney yöntemidir.

Çeliklerin sertleşebilirlik deneylerinin yapıldığı Jominy testi ve ekipmanları ile ilgili bilgiler EN ISO642:1999 standartlarından dilimize çevrilip, 11.08.2001 tarihinde yayına verilerek TS1381: EN ISO 642 normu adı ile kabul edilmiştir. Halen yürürlükte olan bu standardın uluslararası standartlardaki karşılığı ISO 642:1999 -EQV; EN ISO 642:1999-EQV; BS EN ISO 642-EQV; DIN EN ISO 642-EQV; NF EN ISO 642-EQV şeklindedir.

Malzemelerin, belirli sıcaklıklara kadar ısıtılıp bekletilmesi takiben soğutma sıvıları ile soğutulması mikroyapılarında görülen farklılaşma ve iyileşme işlemlerinin tümüne ısı işlem denmektedir. Bu işlemler yapılırken malzemeyi Fe-C faz diyagramından da faydalanılarak östenitleme sıcaklığına kadar fırınlarda ısıtılıp, östenitleme sıcaklığında takribi 30 dakika bekletilir. Fırından hızlıca alınıp test cihazında konularak soğutma sıvıları aracılığıyla, oda sıcaklığına soğutma işlemidir (Çavdar, 2007).

Isıl işlem yapılan Fe-C alaşımlarında ulaşılabilecek hedef malzeme üzerinde ve derinliğinde istenilen sertliğe ulaşmaktır. Görüldüğü üzere ısı işlem uygulamalarındaki en önemli parametre sertleşebilirlik özelliğine sahip çelik seçimidir (Lyman, 1971; Thelning, 1984; Zhang ve ark., 2014). Malzemenin iki önemli özelliği olan sertlik ve sertleşebilirlik sırası ile çeliğin fiziksel sertliğinin gerçek ölçüsü (Krauss, 1990) ve Fe-C

alaşımının malzeme yüzeyinden merkezine doğru martenzite dönüştüğü en yavaş soğuma hızının bir ölçüsü anlamına gelmektedir (Köse, 2008).

Çeliklerde kimyasal kompozisyona bağlı değişik özellikteki malzemeler vardır. Farklı özellikteki malzemelerin, maksimum sertliğe ulaşacağı belirli bir soğuma hızı (kritik soğuma hızı) vardır ki, bu hızda en yüksek martenzitik sertlik elde edilir.

Kesitin yüzeyinde başladığı soğutma hızına merkezinde de yeterince ulaşmış ise, maksimum sertliğe bir diğer ifade ile martenzitik yapıya bütün kesit boyunca ulaştığı görülmüştür. Daha düşük soğutma hızlarında ise yüzey ile merkez sertliğinde farklılaşma görülecek bu da merkez sertliğinde bir düşüşe sebep olacaktır.

Soğutucu sıvı sıcak test malzemesinin sıcaklığını düşürebilmesi için temas bölgesinden konveksiyon katsayısı doğrultusunda ısı soğurarak numunenin hızlı veya yavaş soğumasını sağlayacaktır. Konveksiyon katsayısı (h) ise test numunesinden ısı “ $Q_{\text{konveksiyon}}$ ” soğurulmasındaki en büyük belirsiz değişkendir (Nunura, Dos Santos, ve Spim 2015).

$$Q_{\text{konveksiyon}} = h A (T_s - T_f) \quad 1.1$$

Yukarıdaki formülde, ısı taşınım (konveksiyon) katsayısı h'nin birimi $W/m^2.K$ veya $Btu/s.in^2.^{\circ}F$ 'dir. Formüldeki h termodinamik bir özellik olarak görülmez. Sıvı haline ve akış koşullarına yönelik basitleştirilmiş bir korelasyondur. Çoğunlukla akış tipi olarak adlandırılır. Konveksiyon, hareketsiz moleküllerle sınır komşusu olduğu düşünülen bir alan ile yakın çevredeki sıvı akışı arasındaki ince geçiş aralığı olan bir sınır katmanı kavramına bağlanmıştır.

Bu çalışmada, SAE/AISI 1050 çeliğinin Jominy alından su verme yöntemi ile sertleştirilmesi sürecinin sonlu elemanlar yöntemiyle modellenmesi, deneysel ve modelleme sonucu elde edilen zaman-soğuma eğrilerinin karşılaştırılarak soğumaya etki eden konveksiyon parametrelerinin örtüşmesinin sağlanması hedeflenmektedir. Malzeme türü ve yüzey pürüzlülüğü sabit tutularak soğutucu sıvının debisi, sıcaklığı ve türünün konveksiyon katsayısına etkisi incelenmiştir.

Soğutucu sıvının debisi, sıcaklığı ve soğutucu sıvının türü, konveksiyon katsayısının değerini etkilediği gibi test numunesinin yüzey pürüzlülüğü ve malzeme türü aynı şekilde bu parametreyi etkileyecektir. Bahsi geçen değişkenlerin konveksiyon katsayısına etkileri tam anlamıyla bilinmemektedir. Teorik hesaplamalardaki ihmal veya kabuller gerçek sonuçları oldukça değiştirmektedir. Bu durumu aşmak için konveksiyon

katsayısına etki eden parametrelerden biri üzerinde değişiklik yaparken diğerleri sabit tutulur ve değeri değiştirilen parametrenin sonuca etkisi irdelenir. Ticari yazılım “sonlu elemanlar yöntemiyle modelleme” ve test cihazı kullanılarak elde edilen zaman-soğuma eğrileri kıyaslanıp, grafiklerin örtüşmesi beklenir. Örtüşme olana kadar ticari yazılımda rastgele verilen konveksiyon katsayısı değiştirilir. Örtüşme olduğu durumdaki ticari yazılıma verilen konveksiyon katsayısı, o anki değişkenlerden (soğutucu sıvının debisi, sıcaklığı ve türü, test numunesinin yüzey pürüzlülüğü ve malzeme türü) kaynaklanan gerçek konveksiyon katsayısı olarak tespit edilir.

Dolayısıyla çalışma, ticari yazılımların ısıl işlem modellemesinde ihtiyaç duydukları o anki duruma uygun (soğutucu sıvının debisi, sıcaklığı ve türü, test numunesinin yüzey pürüzlülüğü ve malzeme türü) konveksiyon katsayısını tespit edilmesini sağlamıştır. Bu değerlerin bilinmesi ısıl işlem yapmadan yaklaşık değerleri bizlere verebilen sonlu elemanlar metodu kullanılarak yapılan modellemelerin sıhhatli kullanım alanlarını genişletecektir.

1.1 Tavlama

Özellik arttırma işlemleri, iş malzemesinin mekanik veya fiziksel özelliklerini iyileştirmek için yapılır. Bu işlemler parça geometrisini değiştirmez, değiştirme amaçlı yapılmazlar. En önemli mekanik özellik arttırma işlemi, ısıl işlemlerdir. Isıl işlem, malzemeye çeşitli ısıtma ve soğutma işlemleri uygulayarak malzemenin mikroyapısında değişikliklere sebep olan dolayısıyla mekanik özellikleri değiştiren işlemlerdir.

Isıl işlem uygulamalarına imalatın çeşitli aşamalarında ihtiyaç duyulmaktadır. Isıl işlem, nihai iş parçasına, şekillendirme işlemleri sonrasında sertlik kazandırmasına karşın zor şekillenen iş parçalarına şekillendirme öncesi de uygulanarak işlenebilirliği kolaylaştırmaktadır. Diğer durumlarda şekillendirme esnasında ortaya çıkan pekleşmenin etkisini azaltmak için yapılır ve malzemenin daha fazla deformasyona uğramasını kolaylaştırır. Temel ısıl işlemler: tavlama, çelikte martenzit oluşumu, çökelme sertleştirilmesi ve yüzey sertleştirmedir (Groover, 2016).

Metallerdeki sertlik ve gevrekliği azaltmak için uygulanan tavlama, metalin uygun bir sıcaklığa ısıtılması, bu sıcaklıkta belirli bir süre bekletilmesi ve ardından yavaşça soğutulması işlemlerini içerir. Tavlama, mikroyapının değişimi, malzemenin katı halden elastik hale getirilerek şekillendirilmesinin kolaylaştırılması, soğuk

şekillendirme sonucu pekleşen malzemenin yeniden kristalleşmesi ve şekillendirilen iş parçasının mekanik zorlamalardan dolayı üzerindeki kalıntı gerilmelerinin giderilmesinde kullanılır.

Alaşımı östenit bölgesine kadar ısıtmak ve kaba ferrit elde etmek için fırın içerisinde düşük hızda soğutulmasıyla tam tavlama diğer bir adıyla yumuşatma tava yapılmış olur. Soğuma hızını daha yüksek seçerek ısıtma ve bekleme çevirimleri uygulandığında normalleştirme tava, oluşmuş olur. İş parçaları soğuk şekillendirildiklerinde pekleşme oluşur. Pekleşmenin etkisini azaltmak ve sünekliliği arttırmak amacıyla tavlama, ısıtma işlemi uygulanır.

Sıcaklığın yüksek seçilmesi, daha uzun bekleme (demlenme) süresi ve daha yavaş soğuma hızları yeniden kristalleşmeye yardımcı olurlar. Eğer tavlama işlemi sadece tane yapısının orijinal haline kısmi geri dönüşmesini sağlıyorsa toparlanma olarak adlandırılır. Gerilim giderme tava, metalin soğuk şekillendirilmesiyle oluşan pekleşmenin, büyük oranda korunmasını sağlarken parçanın tokluğunu iyileştirir (Groover, 2016).

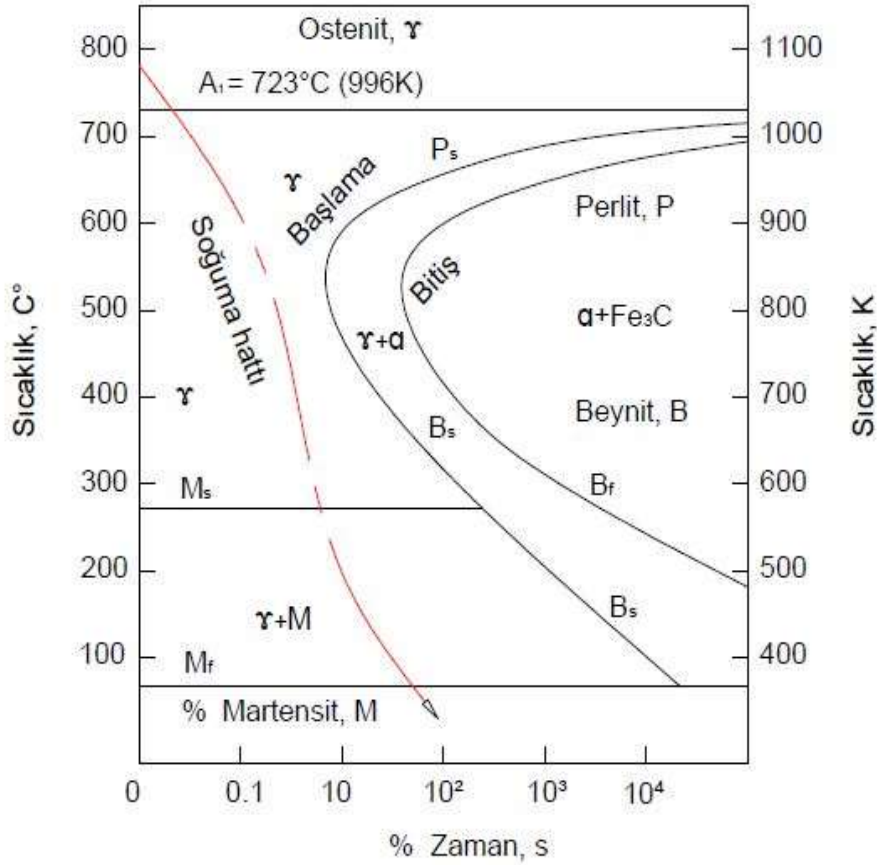
1.2 Çelikte Martenzit Oluşumu

Demir-karbon denge (faz) diyagramı, denge koşulları altında mevcut demir ve demir karbür (sementit) fazlarını göstermektedir. Bu diyagram, yüksek sıcaklıktan oda sıcaklığına soğumanın yeterince yavaş olduğu varsayımı ile çizilmiştir. Soğuma ostenitinden ferrit ve sementit (Fe_3C) fazlarının oluşmasına müsaade edecek kadar yavaştır. Bu ayrışma reaksiyonu, difüzyonu ve metalin tercih edilen nihai şekline dönüşmesi için sıcaklık ve zamana bağlı olan diğer işlemleri gerektirir. Oysaki hızlı soğutma koşulları altında, denge reaksiyonu oluşmaz ve ostenit fazı, martenzit olarak adlandırılan denge dışı bir faza dönüşür. Martenzit, çeliğe çok yüksek seviyelerde direnç gösterme kabiliyeti veren sert, kırılğan bir fazdır.

1.2.1 Zaman Sıcaklık Dönüşüm Eğrisi

Şekil 1.1 de ötektoid çelik için Zaman Sıcaklık Dönüşüm (ZSD) eğrisini görülmektedir. ZSD eğrisi, soğutma hızının, ostenitin çeşitli fazlara dönüşümüne nasıl etki ettiğini açıkça göstermektedir. Fazlar ferrit, sementit ve martenzitin değişik

şekillerinden oluşabilir. Bu eğride, yatay eksen logaritmik olarak zaman, dikey eksen sıcaklık bilgileriyle ölçeklendirilmiştir. Eğri; ostenit bölgesinde zamanın sıfır olduğu (işlemin başladığı) yerden ilerlemeye başlar (bazen verilen bileşime göre A1 sıcaklık hattının üzerinden de başlayabilir) ve zamanın fonksiyonu olarak metalin nasıl soğutulduğunu gösteren aşağıya ve sağa doğru bir hat boyunca ilerler. Şekil 1.1'deki ZSD eğrisi %0.80 karbon çeliğine aittir.



Şekil 1.1 ZSD Eğrisi, %0.8 C'lu çelik için zaman ve sıcaklığın fonksiyonu olarak ostenitin dönüşümünü göstermektedir (Groover 2016).

Soğuma hızı yavaş olduğunda, soğuma hattı perlit ve beynite (ferrit-karbür karışımının alternatif formları) dönüşümü sınırlayan bölgeye doğru ilerler. Bu dönüşümler zamana ihtiyaç duyan dönüşümler olduğundan, ZSD diyagramı zamana göre dönüşümün başladığı ve bittiği iki hattı sırayla **s** ve **f** alt indisleriyle farklı faz bölgeleri şeklinde gösterir. Perlit, ince paralel düzlemsel formdaki ferrit ve karbür fazlarının bir karışımıdır. Östenitten yavaş soğuma ile elde edilir. Bu yapı, soğuma

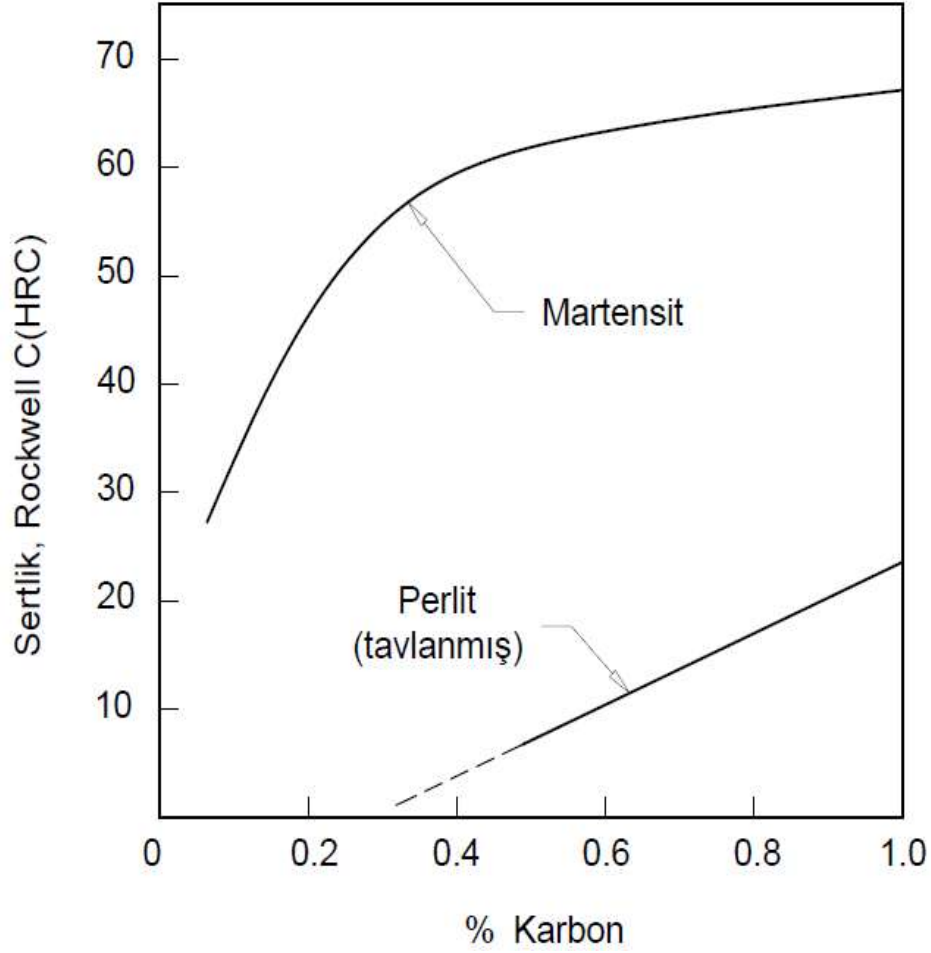
hattının, ZSD eğrisinin “burnunun” yukarısındaki P_s eğrisinin içinden geçmesiyle oluşur.

Beynit; aynı faz karışımının bir alternatifidir. Başlangıçta M_s (Martenzit başlangıç sıcaklığı) hattının hemen üzerindeki bir sıcaklığa çok hızlı bir şekilde soğutmayı (ZSD eğrisinin burnundan uzak durmak için) ve sonrasında çok daha yavaş soğumayla B (Beynit) hattının içerisinden geçerek ferrit-karbür bölgesine girilmesiyle elde edilir. Beynit, ince karbür bölgeleri içeren iğne benzeri yapıya sahiptir.

Şekil 1.1 de kesitli bir çizgi olarak gösterildiği gibi yeterince yüksek bir hızda soğuma sağlanırsa ostenit, martenzite dönüşür. Martenzit, dönüştürüldüğü ostenitle aynı bileşime sahip demir-karbon çözeltilisi içeren tek bir fazdır. Ostenitin yüzey merkezli kübik yapısı martenzitin hacim merkezli tetragonal yapısına, yapıda bulunan ferrit ve demir karbürün ayrılması için gereken difüzyon işlemi olmaksızın neredeyse aniden dönüşür.

Soğuma sırasında ZSD diyagramında görüldüğü gibi martenzit dönüşümü belirli bir M_s martenzit başlangıç sıcaklığında başlar ve M_f martenzit bitiş sıcaklığından daha az bir sıcaklıkta tamamlanır. Bu iki seviye arasındaki noktalarda çelik, ostenit ve martenzit karışımıdır. Eğer soğuma M_s ve M_f arasındaki bir sıcaklıkta durdurulursa zaman sıcaklık hattı B eşiğini geçerek ostenit beynite dönüşür. M_s hattının seviyesi karbon ve diğer alaşımlama elementleri tarafından etkilenir. Bazı durumlarda M_s hattı oda sıcaklığının altına çekilerek bu tür çeliklerin geleneksel ısıl işlem metotlarıyla martenzite dönüştürülmesi imkânsızlaştırılır.

Martenzitin çok yüksek sertliği, hacim merkezli tetragonal yapı içerisine hapsedilen karbon atomlarının mevcut yapıdaki kafeslerin şeklini değiştirmiş olmasından kaynaklanmaktadır ve bu durum, kaymaya karşı bir engel oluşturur. Şekil 1.2 karbon içeriğinin arttırılmasıyla martenzit dönüşümünün çeliğin sertliği üzerine sahip olduğu büyük etkiyi göstermektedir.



Şekil 1.2 Sade karbonlu çelikte , (sertleştirilmiş) martenzit ve (tavlanmış) perlit içerisindeki karbon içeriğinin fonksiyonu olarak sertlik dağılımı göstermektedir (Groover 2016).

1.2.2 Isıl İşlemler

Martenzit oluşumu iki basamaklı bir ısıl işlemdir. Bunlar östenitleme ve su verme işlemidir. Bu işlemlerden sonra çoğunlukla temperlenmiş martenzit üretmek için menevişleme (temperleme) yapılır. **Östenitleme** çeliği tamamen veya kısmen ostenit fazına getirmek için yeterince yüksek sıcaklığa ısıtma işlemidir. Bu sıcaklık belirli bir alaşım bileşimi için faz diyagramlarından belirlenebilir. Ostenite dönüşme, sıcaklık kadar zaman da gerektiren bir faz dönüşümüdür. Müteakiben çelik, bileşimin gerekli homojenliği ve yeni fazın oluşumuna yetecek bir süre kadar yüksek sıcaklıklarda tutulmak zorundadır.

Su verme Şekil 1.1'deki soğuma hattında gösterildiği gibi ZSD eğrisinin burnundan geçmemek için ostenitin yeterince hızlı bir şekilde soğutulmasını gerektirir. Soğutma hızı çelik iş parçasının kendi ısı transfer hızına ve soğutma ortamına bağlıdır. Ticari ısıtma uygulamalarında aşağıda belirtildiği gibi çeşitli su verme ortamları kullanılır;

1. Tuzlu su, genellikle karıştırılmış
2. Tatlı su-durgun, karıştırılmamış
3. Yağ
4. Hava.

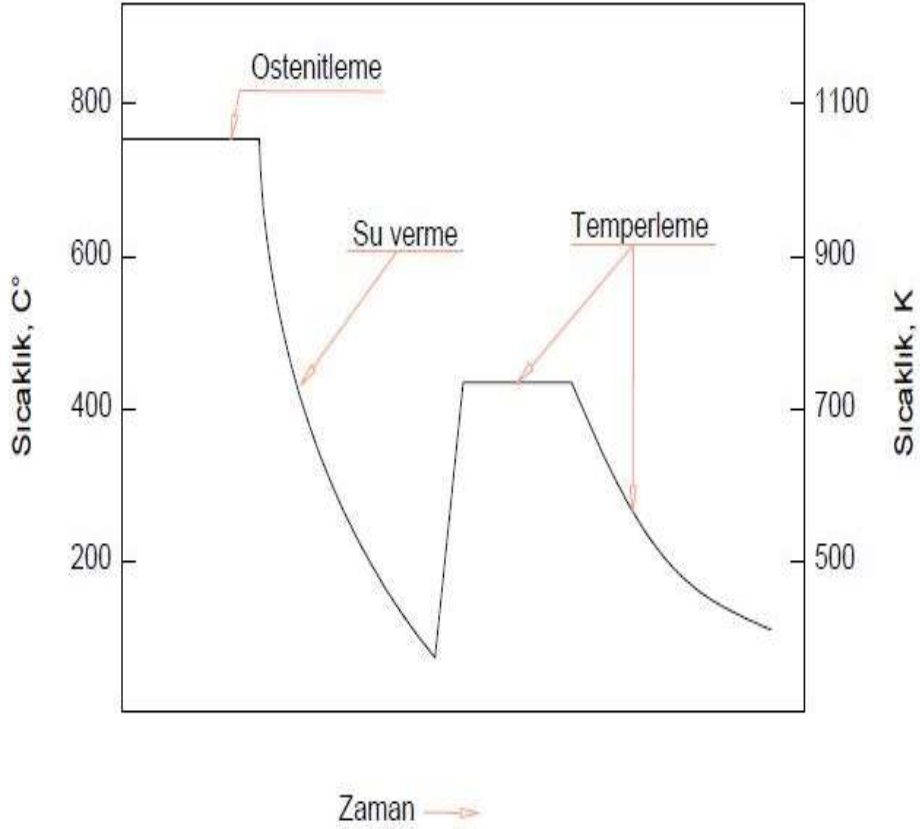
Karıştırılmış tuzlu su ısıtılmış parça yüzeyinde en hızlı soğumayı sağlarken havada soğuma en yavaş olanıdır. Burada sıkıntı şudur; su verme ortamı soğutmada ne kadar etkiliyse aynı zamanda da malzemede iç gerilmelere, çatlaklara ve çarpılmalara o kadar çok sebebiyet verebilir.

Parça içerisindeki ısı transfer hızı büyük oranda iş parçasının kütlesine ve geometrisine bağlıdır. Büyük bir kübik şekil, küçük ince bir sacdan çok daha yavaş soğuyacaktır. Belirli bir bileşimin ısı iletim katsayısı (k) ayrıca metaldeki ısı akışında da bir faktördür. Farklı çelik türleri için ısı iletim katsayıları (k) arasında büyük oranda değişim mevcuttur, örneğin sade ve düşük karbonlu çelik için k değeri $0,046 \text{ J/s-mm}^2\text{°C}$ iken yüksek alaşımli çelik bu değer üçte birine eşittir.

Martenzit sert ve gevrek bir yapıdır. Temperleme; martenzit yapıdaki malzemenin gevrekliğini azaltmak, sünekliğini ve tokluğunu arttırmak, martenzitik yapı içerisindeki gerilmeleri gidermek için sertleştirilmiş çeliğe uygulanan bir ısıtma işlemidir. İşlem östenitleme seviyesinin altındaki bir sıcaklığa kadar ısıtma ve bu sıcaklıkta bir saat süre ile bekleme ve sonrasında da yavaş bir soğumadan ibarettir.

Bu işlemde, martenzitik demir karbon çözeltilisinden çok ince karbür partiküllerinin çökmesiyle oluşur ve kristal yapı kademeli olarak hacim merkezli tetragonal yapıdan, hacim merkezli kübik yapıya dönüşür. Bu yeni yapı **temperlenmiş martenzit** olarak adlandırılır. Mukavemet ve sertlikte çok hafif azalma olurken süneklik ve tokluk özelliklerinde iyileşme meydana gelir. Temperleme işleminde sıcaklık ve süre, sertleştirilmiş çelikteki yumuşamanın miktarını kontrol eder. Çünkü martenzitten temperlenmiş martenzite değişim difüzyonu gerektirir.

Birlikte değerlendirildiğinde, temperlenmiş martenzit oluşturmak için çeliğin ısıtma işlemindeki üç adım Şekil 1.3'teki gibi gösterilebilir. İkişer adet ısıtma ve soğutma döngüsü mevcuttur. İlki martenzit oluşturmak için ikincisi de martenziti temperlemek içindir.



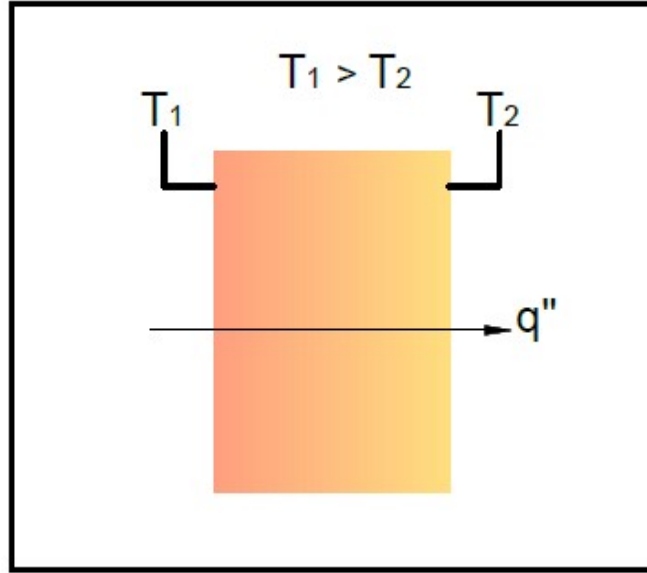
Şekil 1.3 Çeliğin tipik ısıtma işlemi: Östenitleme, su verme, temperleme (Groover, 2016).

1.3 Isı Transfer Çeşitleri

Isı transferi, herhangi iki yüzey veya nokta arasındaki sıcaklık farkından dolayı oluşan enerji alışverişidir. Bir ortam içerisinde veya farklı sıcaklıktaki ortamlar arasında, sıcaklık aktarımı oluşmaktadır. Isı bir enerji türüdür. Isı transferi iletim, taşınım, ışınım olmak üzere üç farklı şekilde gerçekleşir (Çengel 2011).

İletim: Katı bir malzeme veya durağan akışkan (sıvı, gaz) içerisinde, sıcaklık farkı var ise, sıcaklık aktarımı iletim ile gerçekleşir. İletim, bir maddenin daha yüksek

enerjili parçacıklarından temas halindeki daha düşük enerjili parçacıklara, etkileşimi sonucunda enerji aktarımıdır. İletim ile sıcaklık aktarımı bütün fazlarda (katı, sıvı, gaz) oluşabilmektedir. İletim ile sıcaklık aktarımı atomik ve moleküler düzeyde hareketler ile meydana gelmektedir. Katılarda iletim titreşimle oluşurken, sıvı ve gazlarda moleküllerin gayri nizami davranışlarla birbirlerine teması sonucu gerçekleşir. Şekil 1.4 de iletim ile ısı transferi gösterilmiştir (Çengel 2011).



Şekil 1.4 İletim ile Isı Transferi (Çengel 2011).

Belirlenmiş zaman aralığında iletim ile yer değiştiren ısı transferinin hesabı için **Fourier** denklemi kullanılır. Denklem ile ilgili açıklayıcı formülasyon aşağıdaki gibidir.

$$Q = -k \times A \times \Delta T / \Delta x \text{ (W)} \text{ (Fourier ısı iletim denklemi)} \quad 1.2$$

Q: Fourier ısı iletim denklemi

k: Isı iletim katsayısı (W/mK)

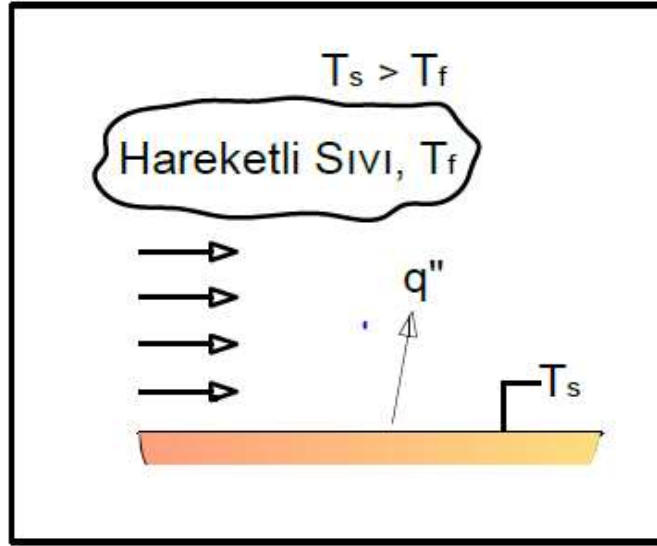
A : (Isı geçişine dik) Yüzey alanı (m²)

ΔT : Sıcaklık farkı (K)

Δx : Kalınlık (m)

Taşınım: Belirli bir alan içeren yüzey ile hareketli olan akışkan farklı sıcaklıklarda ise, düşük olan sıcaklık ile yüksek sıcaklığın birbirinden etkileşimi sonucu oluşan sıcaklık aktarımına taşınım denir. Taşınım, katı bir yüzey alanı ile ona temas

eden hareketli akışkan (sıvı ya da gaz) arasında sıcaklık aktarımı çeşididir. Taşınım ile ısı transferi, nizami olmayan moleküler hareket (yayılm/konveksiyon) ile akışkanın kitlesel hareketi (adveksiyon) olarak iki şekilde oluşur. Akışkan hareketinin hızlı veya yavaş oluşuna paralel taşınım ile sıcaklık aktarımı da o kadar büyük ya da küçük olur. Kitlesel akışkan hareketinin ortadan kalkması halinde, katı yüzeyle temas halindeki akışkan arasında ısı transferi yalnızca moleküllerin gayrinizamî hareketi yani iletim ile oluşmaktadır. Şekil.1.5 de taşınım ile ısı transferi gösterilmiştir (Çengel 2011).



Şekil 1.5 Taşınım ile ısı transferi (Çengel 2011).

Taşınım ile belirli bir zaman aralığında transfer edilen ısı miktarını hesaplamak için Newton soğuma kanunu kullanılır.

$$Q = h \times A_s \times (T_s - T_\infty) \quad (W) \quad (\text{Newton soğuma kanunu}) \quad 1.3$$

Q: Newton soğuma kanunu

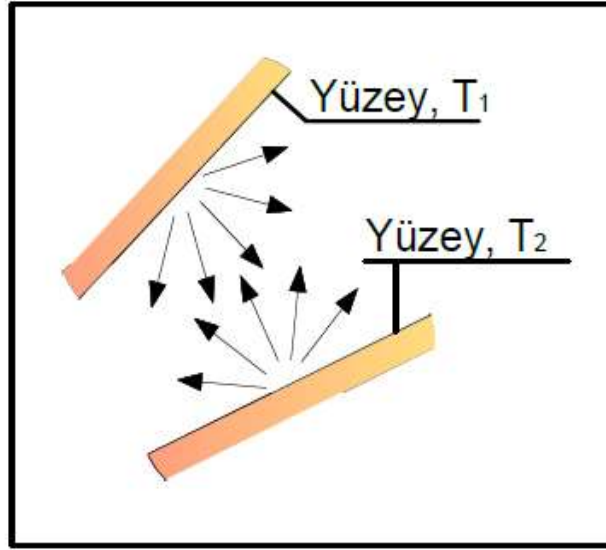
h: Isı taşınım katsayısı

A_s: Akışkanın temas ettiği yüzey alanı (m²)

T_s: Yüzey sıcaklığı (K)

T_∞ : Akışkan sıcaklığı (K)

Işınım: Birbirinden farklı sıcaklıklardaki iki yüzey arasında ısı transferi ışınım ile gerçekleşir. Işınım, sonlu sıcaklığa sahip bir cismin elektromanyetik dalgalar şeklinde yaydığı enerjidir. Mutlak sıfır ($0 \text{ K} = -273 \text{ }^\circ\text{C}$) üzerindeki ısıda bütün maddeler sıcaklık verirler. İletim ve taşınım dan farklı olarak, ışınım ile sıcaklık aktarımı için bir ortam (alan) gerekli değildir. Hatta ışınım ile ısı transferi boşlukta daha etkin olarak gerçekleşir. Bütün maddeler ışınımı farklı seviyelerde yayar, soğurur veya geçirirler. Şekil 1.6'da ışınım ile ısı transferi gösterilmiştir (Çengel 2011).



Şekil 1.6 Işınım ile ısı transferi (Çengel 2011).

Yaptığımız çalışmada, numune parçamızın alt yüzeyi ile parçayı soğutan akışkan sıvı arasındaki ısı transferini incelediğimizden dolayı, bu çalışmada ısı transferinin **taşınım** safhası ile ilgilenilmiştir. Çalışmamızın bu bölümünde taşınım ile ilgili kısa bir bilgi vermek istiyoruz. Taşınım, sıcaklıkları farklı katı yüzey ile ona bitişik, hareketli akışkan (sıvı ya da gaz) arasında sıcaklık aktarım çeşididir. Taşınım ile sıcaklık aktarımı, gayrinizami moleküler hareket (yayılm/konveksiyon) ile akışkanın kitlesel hareketi (adveksiyon) olacak şekilde iki farklı modelde oluşur. Akışkan hareketinin hızlı veya yavaş oluşuna paralel taşınım ile sıcaklık aktarımı da o kadar büyük ya da küçük olur. Kitlesel akışkan hareketinin ortadan kalkması halinde, katı yüzeyle temas halindeki akışkan arasında ısı transferi yalnızca moleküllerin gayrinizamî hareketi yani iletim ile oluşmaktadır. Taşınım ile sıcaklık aktarımı, aktarımın doğal ya da bir mekanizma ile oluşuna göre zorlanmış ve doğal taşınım olarak iki çeşide ayrılır.

Zorlanmış taşınım; akışkan hareketi dış etkilere bağlı oluşan taşınım türüdür. Örnek vermek gerekir ise fan, pompa veya rüzgâr bu dış etkenlerden birkaçıdır. Doğal taşınım; herhangi bir dış etki olmadan oluşan akışkan türüdür. Akışkan, aldığı sıcaklığa bağlı ısınan su veya havanın yoğunluk değişiminden yukarı doğru doğal hareketi ile oluşur. Taşınım ile belirli bir zaman aralığında aktarılan ısı miktarını hesaplamak için Newton soğuma kanunu kullanılır.

$$Q = h \times A \times (T_s - T_f) \quad (W) \quad 1.4$$

h: Isı taşınım katsayısı (W/m²K)

A: Akışkanın temas ettiği yüzey alanı (m²)

T_s: Yüzey sıcaklığı (K)

T_f: Akışkan sıcaklığı (K)

Isı taşınım katsayısı (h) akışkanın türü ile doğal veya zorlanmış temasına göre de farklılık göstermektedir. Bunu durum Çizelge 1.1 verilmektedir.

Çizelge 1.1 Konveksiyon ısı transfer katsayısının tipik değerleri (Çengel 2011).

Konveksiyon Tipi	h (W/m ² K)
Doğal gaz taşınımı	2 - 25
Doğal likit taşınımı	10 - 1000
Zorlanmış gaz taşınımı	25 - 250
Zorlanmış likit taşınımı	50 - 20.000
Kaynama ve yoğunlaşma	2500 - 100.000

1.4 Sertleşebilirlik

Sertleşebilirlik, Fe-C bileşenlerinin mikroyapılarının yüzdelik olarak yarıdan fazla martenzit karakterde olmasına sertleşebilme kabiliyeti denir. Sertlik malzemenin kimyasal kompozisyonu ile alakalıdır. Sertleşebilirlik ile sertlik aynı değildir. Sertleşebilirlik Fe-C bileşenlerinin su verme işlemiyle oluşan çelik malzemenin yüzeyinde oluşan sertliğin merkezine doğru ilerleyebilme kabiliyetidir. Sertleşebilirlik su verilen malzemenin sertliğinin ulaştığı derinliği belirler. Derinlik sertleşebilirlikle doğru orantılıdır. Numune parçanın yüzeyinde oluşan martenzitin merkeze doğru

ilerledikçe yarıya düşmesine veya en az %50 martenzitin oluştuğu mesafe malzemenin sertleşebilirlik derinliğidir.

Numune parçalar ısıtılma tabii tutulduğu, akabinde soğutma sıvıları verildiği (su, yağ ve tuzlu su) sırada parçanın yüzeyinden merkeze doğru birbirinden farklı soğuma hızları görülmüştür. Buna şu şekilde bir yorum getirmek gerekir ise soğuma hızı ısıtılma tabii olan parçada merkezden yüzeye doğru bir artış göstermektedir. İş parçasının yüzeyi ile merkezi arasındaki ısıtılma farklılıklar parça dış yüzeyi %100 martenzitten oluşur iken parça kesitinin iç bölümlerine gidildikçe sırası ile alt beynit, üst beynit ve merkezinde %100 perlitten oluşan birçok mikroyapı içerir. ısıtılma farklılıklar parça kesiti incelendiğinde homojen olmayan mikroyapı değişikliklerini gösterir. Parça kesitlerindeki soğutma hızındaki değişimler sertleşebilirlik özelliğini de etkilemektedir. Sertleşebilirlik özelliğini yeterince taşıyan malzemeleri tanımlamak gerekir ise verilen parça kalınlığı boyunca en az %50 martenzitik mikroyapıya sahip olmalıdır. Su verilen ve temperlenen çeliklerin seçiminde sertleşebilme kabiliyetleri göz önünde tutulmaktadır. (Köse, 2008).

Bir çelik numunenin sertleşebilme kabiliyetini etkileyen en önemli iki parametre malzemenin kimyasal kompozisyonundaki karbon miktarı ile soğuma hızıdır. Ayrıca etkileyen parametreleri de sıralar isek: Sertleşebilirlik önemli ölçüde kimyasal kompozisyonundaki birleşenlerin miktarına, ulaştığı sıcaklıktaki (ostenit sıcaklığı) tane boyutuna ve zamanına da bağlıdır. Çeliğin sertleşme derinliği tayininde Grossman (Direk sonuç, fakat gerçekleştirilmesi pahalıdır) ve Jominy (Dolaylı sonuç, fakat endüstride yaygın) yöntemleri kullanılmaktadır.

1.5 Grossman Sertleşebilirlik Testi:

Bu deneyde sertleşebilirliğin tespiti için belli bir ölçü aralığındaki ($\text{Ø}1/2'' - \text{Ø}2 1/2''$) birçok numune parça daha önceden belirlenmiş soğutma sıvıları ile sertleştirilir. Metalografik inceleme sonucu malzemenin merkezinde martenzit yapısı %50'ye denk gelen parça örnek olarak alınır. Örneğin a çaptaki malzeme su ile soğutulmuş ve merkezinde %50 martenzit ihtiva ediyorsa (tam sertleştirilmiş) bu a çapı bizim maksimum çap diye belirttiğimiz (Kritik Çap) D_c olarak adlandırılır. Kritik çapın üzerinde bir çapa sahip numunelerin merkezinde tam sertlik oluşmaz. Dolayısıyla malzemenin merkezinde martenzit miktarı %50'den daha düşüktür. Kritik çap akışkan cinsine göre değişkenlik gösterir.

Çeliklerin sertleşebilmesi alaşım elementlerinin eklenmesiyle yükselir. Dolayısıyla D_c de (kritik çap) artış olur. Grossman yöntemi ile düşük ve orta alaşımlı çelik numunelerin kimyasal kompozisyonundaki bileşenlerden D_{ic} (ideal çap) hesaplanır. Bu sebeple, bütün elementlerin östenitleme sıcaklığında, katı eriyik içerisindeki yüzdelik oranı ve aynı süreçte o sıcaklıktaki tane boyutu dikkate alınması gereklidir. Çeliklerin mikroyapılarındaki tane boyutunun ufak olduğu durumlar da sertleşebilirlik de az olur. Bu olayın nedeni tane boyutlarının küçülmesine paralel tane sınırlarının kübik yapı içerisindeki toplam yüzeyinin artması, bununla birlikte soğuma sırasında perlit oluşumu için başlangıç yeri olan çok fazla çekirdeğin oluşmasıdır (Prabhudev 2008). Çizelge 1.2 de ısıtma işlem sıvısı ve ortam karıştırma hızlarının su verme şiddetine etkisi görülmektedir.

Çizelge 1.2 Su verme ortamlarının şiddetleri (Prabhudev, 2008)

Karıştırma	Su	Yağ
Yok	0,9–1,0	0,25–0,30
Yumuşak	1,0–1,1	0,30–0,35
Orta	1,2–1,3	0,35–0,40
İyi	1,4–1,5	0,40–0,50
Kuvvetli	1,6–2,0	0,50–0,80
Şiddetli	4,0	0,80–1,1

1.6 Jominy Sertleşebilirlik Testi

Laboratuvar şartlarında yapılması kolay ve ekonomik olduğundan Jominy en yaygın kullanılan sertleşebilirlik belirleme yöntemidir.

Mevcut yöntemde Ø1" çapında 4" uzunluğunda silindirik çelik numuneler kullanılır. Bu numunelere alttan 12.5mm mesafede olacak şekilde soğutucu sıvı verilmek için bir tesisat çekilir. Bu hattan başka çalışmalarda değişik sıcaklıklarda ve farklı tipte akışkanlarla (örneğin: su, tuzlu su, yağ gibi) numuneler soğutulmaktadır.

Numune sertleştirme (ostenit) sıcaklığına ulaşıncaya kadar, (çalışmamızda numune 1100°C'ye kadar ısıtılmıştır.) sıcaklık girişi yapılır. Numune ostenit sıcaklığında normalize oluncaya kadar fırında bekletilir. Bekletilen numune vakit kaybetmeden jominy deney düzeneğine yerleştirilir, numunenin alt ucundan soğutucu sıvı verilerek soğuması sağlanır. Bir ucundan soğutulması nedeniyle numune boyunca soğutma hızları kademeli olarak değişir.

2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Literatürde alın su verme Jominy deneyi kullanılarak yapılan pek çok çalışma bulunmaktadır. Bu çalışmalar Jominy deney ile sertleştirilen malzemelerin imalat sektöründeki kullanım alanları üzerine çalışmalar olabildiği gibi malzemelerin farklı soğutma sıvılarına verdiği tepkilerin gözlemlenmesi gibi farklı alanlarda da olabilmektedir. Ayrıca bazı araştırmacılar, deneysel çalışmaları teorik çalışmalarla destekleyip yapay sinir ağlarını kullanarak deney sonuçlarını önceden tespit etmeye çalışmışlardır.

Crafts ve Lamont, (1949) çalışmalarında, sertleşmiş kabul gören çeliklerin hangi parametre ve sınır değerlere göre hangi sertlikte olmalıdır? Sorusunun cevabını aramış ve alaşımların sertleşebilirliğini saptamada kullanmışlardır. Alaşımların sertleşme oranlarının dış çeliğin yüzeyinden başlayan sertleşme işleminin derinliğe indikçe martenzit oranının belirlenmiş standardın üzerinde olmasıdır. Su verilen çeliklerde martenzit oranı % 50' den düşük olduğu durumda malzeme yeterli sertliğe ulaşmamış kabul edilir. Bu oran % 50' den fazla olduğu durumda ise çelik sertleşmiş kabul edilir. Ayrıca ekip bu çalışmalarında, Jominy alından su verme testinde orta seviyede sertleşebilen çelikler için faydalı ve rahat kullanılabilen test olarak kabul etmişlerdir, bütün çalışmalarında da bunu göstermişlerdir.

Trojan, (1992) yaptığı çalışmada, numune parçada kesit boyunca soğuma hızı varyasyonlarının oluştuğunu takip eden süreçte numune parçanın soğuma kesiti yönünde sertlikleri ölçülmek suretiyle östenitleme sıcaklığından başka soğuma hızları ile oluşan sertliklerin de mevcut olduğunu göstermişlerdir. Numune üzerinde verilen bir noktadaki sertliğin malzemeye ait olmadığını, dış etkilere bağlı bir soğuma hızından oluşan sertlik olduğunu ve yine Jominy deneyinde kullanılan numune parçasındaki alınan bir referans noktasının sertliği, eşit koşullardaki soğuma hızıyla su veya yağda soğutulmuş numune parçasındaki referans noktasının sertliğinin aynı olduğunu ifade etmişlerdir.

Hömberg, (1996) çalışmasında, Jominy testini simüle eden ve sürekli soğutma diyagramını oluşturan nümerik bir algoritma sunmaktadır. Benzer şekilde (Le Masson vd. 2002) yaptıkları çalışmada, hızlı metalürjik ısı işlem olan Jominy testi için konveksiyon ısı transfer katsayısının iki boyutlu tahmini için nümerik bir yöntem geliştirilmiştir.

Li ve arkadaşlarının, (1998) yaptığı çalışmada, çeliklerin ısıya maruz kaldığı esnada mikroyapısal değişiminin tahmini ve malzemenin sertliğinin hesaplanması için bir hesaplama modeli sunulmuştur. Bu çalışma, ısı işlem uygulanabilir çeliklerin, sertlik dağılımını Jominy deneyi yapmadan ön görmek için yapılmıştır. Çok bileşenli Fe-C-M sistemlerinde soğumanın hesaplanması, bir termodinamik sonlu eleman modeli (Jominy çubuklarının soğumasıyla indüklenen ısı transferini taklit eden) ve ostenit ayrışımı için bir reaksiyon kinetik modelini içermektedir. Kullandıkları model ile uygulanabilir kimyasal bileşim aralığını genişletmişler. Mevcut modelin verdiği tahminlerin deneysel ölçümlerle iyi uyum içinde olduğu ve Kirkaldy ve arkadaşları tarafından geliştirilen orijinal modele kıyasla belirgin bir iyileşme gösterdiği savunulmaktadır.

Astaf'ev ve Levitan, (1999) yaptıkları araştırmada, soğutulan malzemenin soğutma performansının artırılması için su yerine su ve havanın beraber soğutma yapmasının etkilerini incelemişlerdir. Bu işlemler için uygun soğutma tertibatı dizayn etmişlerdir. Su ve havanın beraber ve uygun oranlarda kullanılmasıyla daha hızlı soğutmanın yapılabileceğini göstermişlerdir.

Narazaki ve arkadaşlarının, (1999) yaptığı çalışmada, ısı transfer katsayılarının çelik soğutma işlemi üzerindeki etkileri sonlu elemanlar yöntemiyle simüle edilmiş ve sonuçların doğruluğu için deney sonuçlarıyla kıyaslanmıştır. Bazı yöntemlerle tahmin edilen çeşitli ısı transferi katsayıları için "HEARTS" sonlu eleman kodu kullanılarak yeniden hesaplamalar yapılmıştır. Çalışmalarında, ısı transfer katsayılarının doğruluğunun, çeliğin soğutma işlemi simülasyon sonuçlarının doğruluğunu sağlanması için önemli olduğunu ifade etmişlerdir.

Smoljan, (2002) yaptığı araştırmada, karışık şekilli silindirlerin, konilerin, kürelerin soğutulmasını simüle etmek için algoritma ve bilgisayar programı tasarlamışlardır. Çelikleri ısı işlemle soğutulmasının simülasyonu, mikroyapı ve sertlik dağılımının tahmininin yanında artık streslerin ve çarpıklıkların değerlendirilmesiyle uğraşan karmaşık bir problem olduğunu ifade etmişlerdir. Çalışmalarında geliştirdikleri bilgisayar programı ile, soğutma işleminin her anında, soğutulmuş numunedeki mekanik özellikler ve artık gerilmeler ve gerilme dağılımlarını verebileceklerini göstermişlerdir.

Kaya ve arkadaşlarının, (2002) çalışmalarında numune parçanın üzerinde matkap ile açtıkları şekillerin, parça üzerindeki sıcaklık değişimine bağlı oluşan gerilmelerinin

nasıl olacağını ANSYS sonlu elemanlar programı ile önceden inceleme fırsatı bulmuşlardır.

Küçük, (2002) çalışmalarında Alüminyum ve porselen destekli seramikle kaplanmış üst kaplama ile Alüminyum porselen ve seramik materyallerinin dış üzerindeki kalınlıklarını sırası ile değişimine bağlı olarak tasarlanan iki modelde, oluşan termal gerilmeler ile şekil değişimleri ANSYS 5.3 kullanılarak incelenmiştir.

Aslantaş ve Taşgetiren, (2002) Birlikte çalışan iki parçanı temas ettiği yüzey ve iç bölgelerinde gerilmeler oluşmaktadır. Bu gerilmeler temas yüzeylerinde başlayarak derinlerde çatlakların artmasına sebep olmaktadır. Bu çalışmada parçaların çalışma yüzeyine etkileyen çeşitli açılardaki yüklerden dolayı yüzey altında bulunan çatlakların nasıl bir yayılma eğilimi gösterdiği araştırılmıştır. Problemin çözümünde değişken olarak farklı çatlak boyları ve temas eden yüzeyler arasındaki farklı sürtünme katsayıları alınmıştır. Çatlak yüzeyindeki yer değişikliği değerlerinden faydalanılarak gerilme hesabı yapılmıştır.

Heming, Xieqing ve Jianbin, (2003) çalışmalarında, soğutma sırasında farklı çaplı silindirlerin yüzey sıcaklığı ve yüzey ısı transfer katsayısı arasındaki ilişkiler incelenmiştir. Yüzey ısı aktarım katsayısı, sıcaklık ile değişimi inceleme konusu olmuştur. Elde edilen sonuçlar, deneysel koşullardaki küçük varyasyonlar (değişkenler) sonuçları oldukça fazla etkileyebilmektedir. Dolayısıyla, termal gerilim ve gerginlik tayininde kullanılan gerçek deneysel koşulları kullanırken, sıcaklığın yüzey ısı aktarım katsayısı üzerindeki etkisini belirlemek gerektiğini savunmaktadırlar.

Narazaki ve arkadaşlarının, (2003) çeliklerde ısı işlem simülasyonunun doğruluğunun büyük oranda ısı iletim katsayısına ve malzeme özelliklerine bağlı olduğunu çalışmalarında incelemişlerdir. Çalışmalarında, Jominy numunesi olarak aynı ebatta (25mm çapı 100mm uzunluğunda) paslanmaz çeliklerden % 18Cr %8Ni ve JIS SUS 304 kullanılarak ısı iletim katsayıları hesaplanmıştır. Deneysel çalışmalarını FEM analizleriyle hesaplamışlardır. Hesaplanan eğriler, bir karbon çeliği silindirinin alın soğutma işleminde ölçülen soğuma eğrileri ile uyuşma gösterdiğini tespit etmişlerdir. Bu nedenle, paslanmaz çelik numunenin alın soğutma testinde, tahmini ısı aktarım katsayılarının hesaplamalarda kullanımı, Jominy uçtan su verme simülasyonu için yeterli doğruluğu olduğunu ifade etmişlerdir.

Alan ve arkadaşlarının, (2005) Araştırmacılar, mühendislik çalışmalarında önemli

bir yere sahip akışkanlar mekaniği sistemlerinde; yoğunluk, hız, ısı akışı, basınç ve sıcaklık analizleri ile ilgili çalışmalar yapılmıştır. Akışkanlar mekaniği; ısıtma sistemleri, soğutma sistemleri, baraj, gölet, kanal, petrol ve doğal gaz boru hatları, türbin kanatları gibi çok geniş bir kullanım yelpazesine sahip olduğu görülmektedir. İki ve üç boyutlu sistemler için önce malzeme seçimi ve geometrik boyutları belirlemesi ve daha sonra da dış yük olarak sıcaklık, basınç ve hız değerleri girilerek sistemdeki gerilme ile mekanik deformasyonlar bulunmuştur. Yapılan AR-GE çalışmalarında sonlu eleman yöntemlerinden birisi olan ANSYS kullanılmıştır. Önceden fikir sahibi olunacak sistemin ANSYS programına tanıtılması ve çözüme geçilmesi için üç aşamalı bir yol izlenmiştir. Sıralı olarak ön işlemler denilen birinci aşamadır. Bu aşamada ilgili çalışmanın yapısına uygun analiz türü seçilmekte malzeme özellikleri ve geometrik boyutları girilmekte, malzeme yapısı sisteme girişi yapılmaktadır. İkinci evrede ise çözüm aşamasında kullanılacak, sistemin dış yükleri (Basınç, sıcaklık, hız v.b.) belirlenmektedir. Sonuçlar elde edileceği son aşamada ise, düğüm noktaları ile elde edilen değerler yorumlanmaktadır. Mühendislik problemlerinin çözümünde kullanılan sonlu elemanlar yöntemi, bu programlardan olan ANSYS kullanılarak çok karmaşık ve yorucu olan klasik hesaplamalarla uzun zamanlar sürececek olan mühendislik hesaplamalarının çok kısa sürede çözüme kavuştuğu görülmüştür.

Yavuz, Ferhat ve Polat, (2005) Bu çalışmada, toz altı kaynak metodu ile kaynak yapılmış parçaların ana parça ile kaynak parçasının sıcaklık etkisine bağlı termal gerilmelerinin kaynak yapılmadan önce kaynak metali ile ısının etkisi altında kalan esas metal bölgesinin mekanik özelliklerini, çekme numuneleri kullanılarak sonuçların belirlenmesi amacıyla deneysel araştırma yapılmıştır. Çekme deneylerinden alınan bilgi kullanılarak toz altı kaynak işleminin sonlu eleman modeli oluşturulmuştur.

Smoljan, (2006) çalışmalarında, kompleks formdaki çelik iş parçasının soğutulmasının modellenmesi sonlu elemanlar yöntemine dayanır. Matematiksel modelde yer alan ısı iletim ve ısı iletkenlik katsayı değerleri kalibrasyon ile elde edilmiştir. Numune sertliğinin tahmini için oluşturulan algoritma Jominy test sonuçlarına dayanır. Örnek noktalarındaki sertlik dönüşümü için hesaplanan karakteristik soğuma süresinin sertliğe dönüştürülmesi ile hesaplanır. Mekanik özellikler, hesaplanan sertlik esas alınarak tahmin edilmektedir, Soğutulmuş çelikte hesaplanmış sertliğe dayanan faz değişimi tahmininin kalibrasyon yöntemi

oluşturulmuştur. Tasarlanan yöntem, çeliğin soğutulmuş numunelerindeki faz dönüşümü ve mekanik özelliklerin bilgisayar simülasyonunda kullanılmıştır.

Bekçi, Varol ve Taylan, (2006) çalışmalarında, endüstriyel robot kollarında yüksek güce ve hassasiyete sahip fırçasız servo motorlar kullanılır. Bu motorların sahip oldukları yüksek gücün kol hareketlerine dönüştürülmesinde karmaşık yük transfer elemanları kullanılmaktadır. Yüklerin farklılık göstermesi sebebi ile sistemde, yük taşıyan dişli ve kayış kaynak elemanlarında gerilmeler oluşabilmektedir. Bunun için yüksek gerilmelere ve değişken yüklere dayanıklı aktarma elemanlarının dizaynı gerekmektedir. Bu çalışmada, bir robot kolu aktarma organında kullanılması düşünülen planet dişlinin hangi malzemeden imal edileceğinin tespiti için sonlu elemanlar yöntemlerinden ANSYS ile gerilme analizi yapılmıştır.

Çavdar, (2007) çalışmasında, Jominy testi için 5 değişik özellikte çelik malzeme ısıtılıp işleme tabi tutulmuş ve sonrasında su verilen deney ortamında mikroyapı değişimleri ile sertlik değerlerindeki değişimler araştırılmış birbirleri ile mukayese edilerek ve incelenmiştir.

Fernandes ve Prabhu, (2007) çalışmalarında, $\text{Ø}28\text{mm} \times 56\text{mm}$ ölçülerindeki parçayı soğutma sırasında ısı akışı geçişlerini belirlemek için bir çalışma yapmışlardır. Ayrıca $\text{Ø}44\text{mm} \times 88\text{mm}$ ölçülerindeki AISI 1040 çelik numunesini de çalışmaya dâhil ederek her iki parça için su, palmiye yağı ve mineral yağda yanal soğutma sırasında ısı akışı geçici değerleri ve ısı iletiminin ters modellenmesi ile tahmin edilmiştir. Farklı soğutma ortamı için yüzey sıcaklığı ile ısı akışı geçişlerinin değişimi araştırmışlar. Sulu ortamda soğutma sırasında 28 mm çaplı numuneye 44 mm çaplı numuneye göre daha yüksek ısı geçişleri elde etmişlerdir. Bununla birlikte, yağ ile soğutma işleminde su soğutmaya göre zıt sonuçlar verdiğini tespit etmişlerdir.

Yazdi ve arkadaşlarının, (2008) çalışmalarında jominy testi kullanılarak çeliğin maksimum minimum sertliği ile soğutma faktör analizi (QFA) sonuçlarının farklı noktalardaki sertliklerinin arasındaki kıyaslama araştırılmaktadır. Jominy testi çeliklerin sertleşebilme karakteristiğini görmek için yapılan standart bir testtir. AISI 4130 çelik kullanılarak zaman sıcaklık eğrisi (ZSD) ile işlev eğrisi (BT) elde edilmiştir. Ayrıca simülasyon kullanılarak (QFA) elde edilir. Her iki yöntemle yapılan sertlik ölçümlerinde aynı noktalarda farklılıklar görülmüştür. Burada soğutma işleminde farklı noktalardan alınan sıcaklık bilgileri ile eğriler çizilmiş, bu eğrilere göre soğutma

oranları hesaplanmıştır. Ayrıca çalışmaları incelemek için numunelerdeki sıcaklık dağılım hatları belirlenmiştir.

Köse, (2008) çalışmasında, 'SAE/AISI 1040' – '2738' ve '304' numunelerin Jominy deneyine tabi tutularak sertleştirme çalışmaları yapılmış ayrıca bu çalışma neticesinde zaman sıcaklık grafikleri çizilmiştir, soğutulan malzemelerin mikroyapı fotoğrafları çekilerek sertleştirildikten sonraki mikroyapı değişiklikleri gözlenmiştir.

Ghrib ve arkadaşlarının, (2008) çalışmalarında, (C48.420Mo4 ve 35NiCrM016) çeliklerin jominy deneyine dayanarak termal özellikleri, belli bölgelerin Rockwell sertliği (HRC) ve mikroyapıları incelenmiştir. Bu çalışmada, ampirik bir matematiksel denklem geliştirilerek, her bir çeliğin ısı özellikleri sertlikle ilişkilendirmeye çalışmıştır.

Kobasko, (2008) çalışmalarında, çeliğin sertliğini ve yapısını belirlemek için bir yöntem önermiştir. Bu yöntem Jominy soğutma sıvısı ile sönümleme testidir. Bu testte standartlara göre çalışmalar sürdürülmekte, çeliğin yapısı ve sertliği malzemenin muhteviyatına göre değerlendirilmektedir. Malzemelerin sertliğinin belirlenmesi kolay olduğu kadar, içyapısının özelliğinin belirlenmesi de bir o kadar zordur. CCT-TTT diyagramlarında bilgisayar simülasyonlarından elde edilen bilgilere göre soğutma su debisi ayarlanılarak malzemenin içyapısı tahmin edileceğini ifade etmiştir.

Sugianto ve arkadaşlarının, (2009) çalışmalarında, ısı işlen ile sertleştirme yapılırken malzemelerin kimyasal kompozisyonundaki bozulmayı yaptıkları çalışmada tespit etmişlerdir. Soğutma işlem prosesini uygulamadan önce bozulmanın öngörülmesi gereklidir. DEFORM-HT 2D bilgisayar simülasyonu ile kimyasal bileşenlerin daha az bozulma olması için ısı transfer katsayısının ideal değerlerde olmasını sağlayacak soğutma tekniğini tahmin edileceğini ifade etmiştir.

Smoljan ve arkadaşlarının, (2009) çalışmalarında, yüksek sertleşme kabiliyeti olan çelikleri modifiyeli Jominy test (JMC®-testi) cihazındaki performansı araştırılmıştır. JMC®- numunesi ve silindirik numune yağ içinde soğutulmuş ve havada soğutulmuşsa bile benzer soğuma eğrilerine sahiptir. Araştırılan JMC®-testinin performanslarını, JMC®- örneğinin soğutma eğrilerinin ve farklı soğutucularda soğutulan silindirik soğutma eğrilerinin karşılaştırması ile tahmin edilmiştir. Hem soğutma süresi hem de incelenen iş parçalarının ve JMC® örneğinin soğuma eğrilerinin benzerliğine dayanarak, JMC®- testinin, soğutulmuş iş parçalarının sertliğini tahmin etmek için çok

yararlı bir test olarak kabul edilebilir olduğu sonucuna varmışlardır.

Aldaş, Palancıoğlu ve Şen, (2009) çalışmalarında, özel bağlantı elemanları ile birbirine bağlanmış ve iki kat birleştirilmiş bağlantı elemanlarındaki sıcaklık girişine bağlı gerilme hesabı yapılmıştır. Sabit sıcaklık girişi ile oluşan, termal gerilme dağılımı bilgisine ulaşılabilmesi için sonlu elemanlar yöntemi kullanılmıştır. Bu çalışmada ısı gerilme analizleri ANSYS sonlu elemanlar programı ile yapılmıştır. Isıl gerilmeler, iki farklı yapıda olan alüminyum ve çelik levhalar için hesaplanmıştır.

Özkan, Dündar ve Gümüş, (2009) çalışmalarında, araştırmacılar, makine imalatı tasarımlarında sürekli karşılaşılan helisel yayın çalışma şartlarının bilgi girişi ile bilgisayar ortamında tasarımını ve dayanabileceği maksimum yükü hesaplayabilen bir program tasarlanmıştır. Programda seçimi yapılacak helisel malzemenin malzeme seçimi, çalışacağı bölgeye bağlı hesabı ve üretici bilgisi gibi bir çok doneye ulaşılabilir. Ayrıca sonlu elemanlar yönteminden olan ANSYS programı ile helisel basma yayındaki deformasyon analizleri yapılmışlar, elde edilen yay sabiti değerleri ile nümerik yay denklemleri mukayese edilmiştir. Elde ettikleri bütün bilgileri tasarladıkları programa dâhil etmişlerdir.

Ergin ve Özçelik, (2009) çalışmalarında, dikdörtgen bir levhadaki ısı gerilmeler analitik olarak belirlenmiştir. Daha sonra bu levha ile sonlu elemanlar yönteminden olan ANSYS programında modellenerek çözümlü yapılmıştır. Her iki sonuç birbiri ile mukayese edilmiştir. 7000 DWT'luk bir tankere yüklenecek malzeme üç farklı şekilde yükleme durumuna göre gerilme analizi sonlu elemanlar yöntemi ile yapılmıştır. Bunlardan ilk yükleme şekli ısı yüklerinin, yani yüklenen kargo, deniz suyu ve havanın gemi karkası üzerinde oluşturduğu sıcaklık dağılımlarının gösterildiği bir yükleme şeklidir. Bu sebeple bu yükleme gerçeği yansıtmamaktadır. Sebebi ise bu modellemede gemi karkası üzerine gelen baskı, basınçlar ve kuvvetler (yapısal yükler) dikkate alınmamıştır. İlk yükleme, daha sonraki yüklemeler için tecrübe kazanmak amaçlı yapılmıştır. İkinci yükleme durumu ise ısı yüklerinin göz ardı edildiği bunun yerine sadece yapısal yüklerin (gemi yapı elemanları üzerindeki basınçlar ve kuvvetler) dikkate alındığı yükleme şeklidir. Yapılan çalışmada gerilme analizlerinde daha önceden belirlenmiş kargo sıcaklığına kadar, bu yükleme tipinde olduğu gibi ısı yükleri göz ardı edilir. Son yükleme durumu ise her iki yükleme tipinde dikkate alınan, (hem yapısal hem de ısı yüklerinin) yani gemi yapı elemanları üzerindeki bütün yüklerin olduğu bir

yükleme durumudur. Sonuç olarak, yapılan bu analizler karşılaştırılarak 90 °C kargo sıcaklığında yapı elemanları üzerinde oluşan ısıl gerilmelerin etkisi incelenmiştir.

Bourouga ve Gilles, (2010) çalışmalarında, temel amaç olarak, iş parçasının boyutuna göre soğutma hızını kontrol eden ısı aktarım mekanizmalarının geliştirilmişlerdir. Parçanın, soğutma sıvısının nüfuz ettiği yüzeyindeki sıcaklık ve yerel ısı akışı tahminini sağlayan özgün bir ölçüm cihazı geliştirmişlerdir. Soğutma işlemi sırasında partikül banyosu ara yüzünde sıcaklık ve yerel ısı akışı tahminine izin veren orijinal bir ölçüm cihazı geliştirmiştir.

Lee, Pavlina, ve Tyne, (2010) çalışmalarında, 1045 çelik için ostenit ayrışma kinetiği, Li ve arkadaşları (1998) tarafından önerilen dönüşüm denkleminin modifikasyonu kullanılarak modellenmişlerdir. Sürekli soğutma transformasyonunun kinetiği doğrudan bir izotermal dönüşüm diyagramından tespit edildi. Model için yapılan tahminleri doğrulamak için, geniş bir mikroyapı aralığı ürettiği bir soğutma testi kullanılmıştır. Soğutulmuş numunenin kinetik modeli tarafından öngörülen mikroyapılar, soğutma deneylerinde gözlenen mikroyapıların miktarı ile teyit edildi. Ayrıca, öngörülen sertlik profili, deneysel olarak ölçülen sertlik profiliyle iyi bir uyum içinde olduğu gözlemlendi. Literatürden mikroyapı- esaslı sertlik denklemi de değerlendirildi ve deneysel olarak ölçülen değerlerin üzerinde olan sertlik değerlerinin olduğunu öngördü. Önerilen model martenzitin hesaplanan mikroyapı ve deneysel sertlik değerlerine dayandığı için deneysel sertlik beyanı daha doğru bir çalışma olduğu beyan ettiler.

Köse ve Sakin, (2010) çalışmalarında, AISI-1040 ve AISI-P20 numunelerinin kimyasal kompozisyonları buna bağlı ısıl işleme tane yapılarındaki değişim ve mikroyapı hareketlerinin malzemelerin sertleşebilirliğini ne kadar etkilediğini incelemiştir. Yapılan araştırmada AISI-1040 ve AISI-P20 çelik numunelerinin kimyasal kompozisyonundaki karbon yüzdesi $C \approx 0.385$ olan numunelerin sertleşebilirliğini belirlemek için Jominy deneyi uygulanmıştır. Bu numunelerin sertlik değerinden yararlanılarak Jominy deneyinde sertleşebilirlik grafikleri çizmişlerdir. AISI-1040 ve AISI-P20 numunelerinin kimyasal kompozisyonlarında belirtilen özellikle karbon (C) olmak üzere Cr, Mo, Mn, Si, Ni ve V gibi alaşımların Jominy çalışmalarında sertleşme kabiliyetini de etkilediği görülmüştür. Sonuç olarak sertleşme derinliği 'Jominy derinliği' ile farklı bir hal alan martenzit miktarının sertleşme

kabiliyetini etkilediği gözlemlenmişlerdir.

Ucun, Aslantaş ve Apaydın, (2010) çalışmalarında, ortagonal kesme işleminde deney yoluyla belirlenemeyen veyahut deneysel olarak belirlenmesi çok güç olan bazı bilgiler (takım gerilmeleri, takım-talaş ara yüzey sıcaklığı, takımdeki sıcaklık dağılımı) sayısal olarak modellenmiştir. Bu sebeple talaşlı imalatta kullanılmak üzere TiCN+Al₂O₃+TiN kaplı kesici takım ucu kullanılmış ve işlenecek iş parçası olarak AISI 4340 çeliği tercih edilmiştir. Bu çalışmada yapılan deneysel olarak yapılan talaşlı imalat ile matematiksel modellemenin birbirini doğruladığı gözlemlenmiştir.

Soncu, Yavuz ve Ertan, (2010) çalışmalarında, günümüzde yaygın olarak kullanılan kaynaklı birleştirme metotlarından biri olan toz altı kaynak işleminin termal analizi sonlu elemanlar metodu kullanılarak etüt edilmiştir. Kaynağı yapılan malzeme St37 olup, toz altı kaynak yöntemi korniş pozisyonunda kaynağı yapılmıştır. İş parçası içerisindeki ısı dağılımı ANSYS paket programı kullanılarak iki boyutlu geometride etüt edilmiştir. İş parçasının kaynak bölgesi, ısının tesiri altında kalan bölge ve esas metal bölgesini kapsayan toplam altı farklı noktadaki zamana bağlı sıcaklık değişimini gösteren eğriler elde edilmiştir. Böylece korniş pozisyonunda toz altı kaynağı ile kaynak edilen St37 malzemesi bir parçanın içerisindeki termal dağılımı zamana bağlı olarak elde edilmiştir. Bu sebeple ısı girdisinden fazla etkilenen bölgelerde kaynak yapılan parçanın iç yapısında daha yüksek artık gerilmeler ile distorsiyonlar olacağı düşünülerek, bu bölgeler yapılan modelleme ile önceden tespit edilmiştir.

Şen ve Aldaş, (2010) çalışmalarında, farklı üniform sıcaklıklar altındaki özel bağlantı elemanları ile yapılandırılmış ayrıca bu ekipmana pim bağlantısı da yapılmış ve çoklu bağlantılarda sıcaklığın gerilmeye etkisi incelenmiştir. Çözümde, üç boyutlu modeller oluşturularak sonlu elemanlar yöntemi kullanılmıştır. Daha önceki birçok çalışmada, yapıstırıcı bağlantıları veya pim bağlantıları ayrı ayrı incelenmiş olmakla birlikte, bu çalışmada karma bir bağlantı analizi yapılmıştır. Karma bağlantıya, çekme yükü ve sırasıyla 40°C, 50°C, 60°C ve 70°C üniform sıcaklık yükleri birlikte tatbik edilmiştir. Uygulanan üniform sıcaklıktaki artış miktarına bağlı olarak, gerilmelerin ve şekil değiştirmelerin önemli oranda arttığı görülmüştür.

Sarıkavak ve Çoğun, (2010) çalışmalarında, elektro erozyon ile işlemede iş parçasının ne kadar aşınacağına tespitini önceden yapılabilmesi için sonlu elemanlar yöntemi ile modellemesi yapılmıştır. Isıl-elektriksel model, tek bir boşalım için

geliştirilmiştir. Geliştirilen model dielektrik sıvı içerisinde elektriksel boşalım sonucu meydana gelen enerjiyi, plazma kanalı genişliğini ve ortamda meydana gelen ısı transferlerini içermektedir. Daha önceki çalışmalarda yer alan deneysel çalışma parametreleri kullanılarak, plazma kanalında oluşan enerjinin iş parçası malzemesinde oluşturduğu sıcaklık dağılımı incelenmiştir. Ergime sıcaklığının üstüne çıkan iş parçası malzemesinin ergime kraterinden kaldırıldığı kabul edilmiştir. Çalışmada, sonlu elemanlar yöntemini kullanarak analiz yapan ANSYS Workbench v.11 programı kullanılmıştır. Elektro erozyon ile işleme tekniği zamana bağlı ısıl analiz yöntemi kullanılarak simüle edilmiştir. Başka işleme çalışmalarında ulaşılan teorik sonuçların deneysel sonuçlarla büyük ölçüde örtüştüğü görülmüştür.

Çakır ve Özsoy, (2011) çalışmalarında, Jominy testi ile farklı soğutma ortamlarını simüle ederek AISI 1050 çeliğinin sertleşme durumunu araştırılmıştır. Örnekler üzerine yerleştirilen termokupullarla sıcaklık değerleri kaydedilmiş, soğutma ortamı ve soğutma eğrisi, ısı akışı, sertlik, ısı konveksiyon katsayısı arasındaki ilişkiler grafiklerle gösterilmiştir. Termal özelliklerle sertlik arasındaki benzerlik araştırılmıştır. Jominy su basıncı azaltıldığında Jominy çubuktaki sertlik azalmıştır. Ancak su-hava karışımı soğutma ortamında su verilen çeliğin sertliğinin sürpriz bir şekilde arttığı gözlenmiştir. Sonuç olarak su-hava karışımı su verme işlemi, ısı transferini ivmelendirmiş ve Jominy test numunesi sertliğini artırdığını belirtmişlerdir. Daha sonradan (Çakır ve Özsoy, 2013) yaptıkları bir diğer çalışmada, teorik yapılan çalışma ile deney yoluyla yapılan çalışmaları karşılaştırmıştır. Jominy testinde sonucu etkileyen değişkenlerin farklı varyasyonları, numunenin; özgül ısısı, ısı taşınım katsayısı, yoğunluk, difüzyon katsayısı ve ısı iletim katsayısı, bu değişkenler dikkate alınarak yapılan çalışmalardan olan -matematiksel modelle- sertlik ve nüfuz ettiği derinlik bulunabilmektedir.

Pietrzyk ve Kuziak, (2011) çalışmalarında, sonlu elemanlar simülasyonu ve standart prosedüre göre su soğutması altındaki Jominy örneğinin hacimde faz dönüşümü kinetiğinin kestirimidir. Farklı kimyasal bileşime sahip iki beynitli çeliğin sertleşebilirliği karşılaştırılması çalışmanın ikinci amacıdır.

Gök, Ulu, ve Said, (2011) çalışmalarında, SAE/AISI 1030 çeliğinden dört adet Jominy deney numunesi ile tane boyutunun analizi için metalografik inceleme yapılacak numunelerde hazırlanmıştır. Jominy deney numuneleri 900,°C'den 1200,°C'ye kadar 100°C'e artacak şekilde dört farklı sıcaklıkta ısıtılmış ve bu sıcaklıkta sırası ile 25,26,

28 ve 30 dk. süre ile bekletilmiştir. Bu işlemde sırası ile Jominy deney numuneleri alından su verme işlemine tabi tutulurken, tane boyutu analizi yapılacak metalografik inceleme numuneleri de fırından alınarak hava ile soğutulmaya bırakılmıştır. Bu işlem ostenit bölgesinde elde edilen tane boyutlarının sonraki soğutma hızlarında değişme olsa da değişmeyeceği bilgisinin desteği ile yapılmıştır. Su verme işleminden sonra bütün numunelerin sertliği ölçülmüş ve metalografik inceleme akabinde içyapı analizleri yapılmıştır.

Aldaş ve Şen, (2011) çalışmalarında, karma bağlantı uygulanmış birbirinden değişik metal saclarda oluşan gerilmeler ile ilgili çalışma yapılmıştır. Karma bağlantı denildiğinde, pim bağlantısı ve yapıştırıcı bağlantısından meydana getirilmiştir. Birleştirilen saclardan alt levha alüminyum olarak sabit olurken, üst levha sırasıyla çelik, bakır, titanyum ve alüminyum olarak modellenmesi yapılmıştır. Bu çalışmada yapıştırıcı olarak epoksi tatbik edilmiştir. Sonuç olarak, üç boyutlu modeller oluşturularak, sonlu elemanlar metodu kullanılmıştır.

Şen ve Aldaş, (2011) çalışmalarında, metal-kompozit bağlantılarda farklı malzemelerden yapılmış metal plaka kullanımının, gerilmeler üzerine etkisinin incelenmesidir. Kompozit bir plaka metal plaka ile yapıştırıldığı ve pim bağlantısı yapılarak ayrıca bir bağlantı daha yapıldığı varsayılmıştır. Metal plakalar alüminyum, çelik, bakır ve titanyumdur. Gerçek yansıtan bir problem oluşturmak için üç boyutlu modeller oluşturulmuştur. Karma bağlantı üzerine hem çekme yükü hem de üniform sıcaklık yükü birlikte uygulanmıştır. Gerilme probleminin çözümü için sonlu elemanlar metodu (FEM) ile oluşturulmuştur.

Gök, Aydın ve Gök, (2012) çalışmalarında, çapa makinesi bıçağı üzerine uygulanan farklı yükler altında meydana gelen gerilme ve deformasyonları Ansys Workbench program uygulamaları ile incelenmiştir. Çapa makinesi bıçağı, bağlantı deliklerinden sabitlenirken, kesici uç yüzeyine 300–400–500–600 ve 700N olmak üzere 5 farklı kuvvet uygulanmıştır. Analizler sonucunda 700N'luk kuvvet altında çapa makinesi bıçağında oluşan gerilme değeri 555 MPa olarak hesaplanmıştır. Bu değer bıçak malzemesinin akma dayanımı geçmektedir. Bu çalışmada 555 MPa değerinden sonra malzeme kalıcı olarak deformasyonlar olacaktır.

Wang ve arkadaşlarının, (2012) çalışmalarında, numune parça sönümlenirken termal stres ile bozulabileceği matematiksel modelleme ile belirlenerek uygun çelik

parçalar seçildi. Difüzyon evresi JMAK modeli ve difüzyonsuz modellerin dönüşüm modeli Koistinen ve Marburger'in faz dönüşüm modeli (KM) modeli tanıtıldı. Bu programın sonuçları Jominy test sonuçları ile karşılaştırıldı.

Aldaş ve Şen, (2012) çalışmalarında, iki kompozit pakla hem pim ile bağlanarak hem de her iki plaka yapıştırılarak karma bağlantı uygulaması yapılmıştır. Birleştirilmiş iki kompozit plakada uygulanan farklı üniform sıcaklıklar etkisiyle meydana gelen gerilmeler analizi yapılmıştır. Karma bağlantı, pim ve yapıştırıcının birlikte kullanılması ile meydana getirilmiştir. Analizde sonlu elemanlar yöntemi (FEM) kullanılmıştır. Modelleme üç boyutlu olarak uygulanmıştır. Modelleme ve çözümde, sonlu elemanlar yazılımı olan ANSYS programından yararlanılmıştır. Oluşturulan modele hem çekme yükü hem de üniform sıcaklık yükü aynı anda uygulanmıştır. Sıcaklığın malzeme üzerindeki gerilme etkisini gözlemlemek için çekme yükü sabit tutulmuş fakat 50, 70, 90 ve 110 °C'lik üniform sıcaklıklar uygulanmıştır. Elde edilen analiz sonuçlarına göre, gerilmelerin parça üzerindeki delik etrafında fazlaştığı gözlemlenmiştir. Dolayısıyla, karma bağlantı üzerinde başlayacak bir hasarın delik etrafında oluşacağı anlaşılmıştır. Gerilmelerin değeri, üniform sıcaklık artışındaki orana bağlı olarak artmaktadır.

Freddy ve arkadaşlarının, (2013) çalışmalarında, Tahribatsız Manyetik Barkhausen Gürültüsü (MBN) tekniği, bir Jominy alın soğutma testinden sonra SAE 4140 ve SAE 6150 çeliklerinin değerlendirilmesi için uygulanmış. MBN ölçümleri aynı örnek bölgeler üzerinde üç uyarım frekansında gerçekleştirildi. Ölçülen sinyallere ait farklı parametreler hesaplandı. Her iki malzeme için de mekanik sertlik ve MBN parametreleri arasında bir ilişki bulunduğu ifade edilmiştir.

Güler ve Özcan, (2014) çalışmalarında, karbon oranı fazla çelik numuneye su ile soğutma işlemi uygulamış bu çalışmanın çelik numunenin tokluğuna etkisi ve yapısal değişiklikleri araştırmıştır. Ocaklarda ısıtılan numuneler aynı sıcaklık şartlarda normalleşmesi için bekletilir. Numuneler bekletildiği fırınlardan çıkarılarak hızlıca su ile soğutma işlemine alınır. Bu malzemeye bir çekme testi birde malzemenin belirli noktalarındaki sertlikleri belirlenir. Bu ölçümlerin neticesinde numune parçaya su nüfuz ettirildiğinde kırılma dayanımının arttığını dayanımının azaldığı gözlemlenmiştir. Numune malzemesindeki gevrekleşme ve dayanımının azalmasından dolayı, su ile soğutma işleminde oluşan sıcaklık kaybının fazla olmasını ifade etmişlerdir.

Chen ve arkadaşlarının, (2014) çalışmalarında, sonlu elemanlar modelinin bir alt

programı olan ticari ABAQUS yazılımının, yüksek mukavemetli bor çeliğindeki sıcaklık alanının ve faz dönüşümünün interaktif etkisini öngörmek üzere geliştirilmiştir. Koistinen ve Marburger (K-M) modeli, martenzitin yer değiştirme dönüşümünü tanımlarken, ostenit ayrışımını ferrit, perlit ve beynit olarak tanımlamak için bekleme süresi ve ekleme hipotezi ile JMAK tipi denklemler benimsenmiştir. Simülasyon sonuçları belirtilerin görülme süresinin bir JMAK denklemine girmesi, denklemin modifikasyona uğramamasından daha fazla dönüşüm kinetiği tahminini sağlayabileceğini göstermektedir. Simülasyon ve standart Jominy alından su verme testi arasındaki bir karşılaştırılarak, bu modelin şekil değiştirme kinetiği, mikroyapı dağılımı ve mekanik özelliklerin tahmininde yardımcı olmuştur.

Santos, ve Spim, (2015) çalışmalarında, CCT (Sürekli Soğutma Dönüşümü) diyagramına bağlı olarak, kritik sıcaklığın (A_{c3}) 20°C , 70°C ve 120°C üstünde, üç östenitizasyon sıcaklığında, Jominy alın soğutma testine gönderilen AISI 1045 çeliğinin sertleşebilirliğini etkileyebilecek faktörlerin sayısal korelasyonunu ele almaktadır. Jominy alın soğutma testi sırasında soğutma eğrileri elde etmek için önceden tanımlanmış noktalarda numunelere termokupullar yerleştirilmiştir. Metalografik analiz ve Jominy sertlik profilleri (Rockwell C metodu kullanılarak) östenitizasyon sıcaklıklarının işlevi içinde sertleşebilirliğin değerlendirilmesine izin verilmiştir. Mikroyapılarda sunulan faz yüzdesinin hesaplanması ve bu safhalarda ve mikro bileşenlerdeki Vickers mikro sertlik testleri, test sırasında soğutma hızı değişimlerine göre faz yüzdeleri ve sertlik profillerini ilişkilendirmek için sayısal ifadeler elde etmek için uygulanmıştır. Daha sonra denklemler, test esnasında oluşan fazların ve mikro-bileşenlerin (martenzit, beynit, perlit ve ferrit) miktarını tahmin etmek ve ayrıca sertlik profilini tahmin etmek için sayısal regresyon yöntemleri ile elde edilmiştir.

Alyanak ve Şen, (2015) çalışmalarında, amacı, üç boyutlu karma bağlantılı kompozit plakaların çekme yükü oluşturduğundaki gerilme analizinin yapılmasıdır. Karma bağlantı iki paralel pim ve yapıştırıcı tabakasının birlikte uygulanması ile meydana getirilmiştir. Yapıştırıcı olarak epoksi kullanılmıştır. Plakaları meydana getiren kompozit malzeme ise çelik fiberlerle takviye edilmiş alüminyum matris metal matris kompozittir. Üç boyutlu modelleme ve sonrasında yapılan gerilme analizleri için ANSYS sonlu elemanlar yöntemi kullanılmıştır. Dolayısıyla gerilme analizi sonlu elemanlar yöntemi (FEM) ile gerçekleştirilmiştir. Üç boyutlu olarak modellenen karma

bağlantı üzerine probleme ve geometriye uygun olacak şekilde gerekli yapısal sınır şartları uygulanmıştır. Karma bağlantı üzerinde meydana getireceği farklı değerlerdeki gerilmeleri oluşturmak amacıyla, 100, 200, 300, 400 ve 500 N değerlerinde çekme yükleri üç boyutlu modele uygulanmıştır. Karma bağlantıya etki eden beş farklı değerdeki çekme yükü tesiriyle, kompozit plakalar ve yapıştırıcı tabakası üzerinde oluşan gerilme ve gerilme dağılımları bulunmuştur. Üç boyutlu sonlu elemanlar yöntemi sonuçları, karma bağlantı üzerindeki çekme gerilmelerinin değerleri ve dağılımlarının, etki ettiği çekme yükü miktarının değişimine bağlı olarak farklılaştığını göstermiştir.

Demir dışı malzemeler kullanılarak jominy test verilerinin incelendiği çalışmalar; Li ve arkadaşlarının, (2012) çalışmalarında, AA7050'nin kalın plakalarının elektrik iletkenliği ve mikroyapı üzerindeki etkisi Jominy alın soğutma testi kullanılarak araştırılmıştır. Elektrik iletkenliği ölçümü ve mikroyapısal gözlem, soğutulmuş uçtan farklı mesafelerde gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar, soğutmaya duyarlı sıcaklık aralığında barın soğutulmuş ucu arasındaki mesafenin artmasıyla ortalama soğutma hızlarının düştüğünü göstermektedir. Bununla birlikte, elektrik iletkenliği, soğutulmuş uçtan uzaklığın artmasıyla birlikte artar. Plakanın yüzey parçaları tamamen kristalleştirilirken kısmi yeniden kristalleştirme plakanın dörtte birinde ve orta kısımlarında gerçekleşmiştir.

Ammar, Aoufi, ve Darrieulat, (2012) çalışmalarında, nükleer santral yakıt kaplaması için soğutulan zirkonyum alaşımları kullanılmıştır. Büyük boyutları olan bu yapılara yapılan soğutma işlemi dış yüzey ve parçanın çekirdek arasında soğuma oranlarının farkı mikro değişime sebep olmaktadır. Bu olguyu araştırmak için, Jominy alın-söndürme cihazı Zircaloy-4'e uyarlanmıştır.

Campo ve arkadaşlarının, (2016) çalışmalarında, Piyasada mevcut olan titanyum alaşımları arasında, metastabil β Ti-5553 alaşımı (ağırlıkça% 5 Fe₅Mo₃Cr_{0.5}Fe) ağırlıklı olarak ilgi çekici bir konudur çünkü öncelikle çelik bileşenlerinin değiştirilmesinde havacılık yapısal uygulamalarında kullanılır. Bu alaşımın birincil avantajlarından biri, yüksek sertleşebilirliktir ve β fazını düşük soğutma hızlarında dahi oda sıcaklığında tutmaya ve böylece kalın parçaların termal olarak işlenmesine olanak tanır. Bu çalışmada, V'nin Nb ile değiştirilmesinin Ti-5553'ün sertleşebilirliği üzerindeki etkisini değerlendirmektedir. Molibden eşdeğer kriterine dayanarak, Nb

modifiye Ti-5553 alaşımı,% 12 wt. Nb, % 5 V ihtiva edecek şekilde tasarlanmıştır. Düşük soğutma hızlarında bir faz çökeltisi gözlemlendi, ancak Nb modifiyeli Ti-5553'te daha az belirgindi ki, V'nin Nb ile yer değiştirmesinin, alaşımın sertleşebilirliğini arttırdığı ifade edildi.

Yapay sinir ağları kullanılarak Jominy test verilerinin incelendiği çalışmalar;

Kovačić, (2009) tarafından yapılan çalışmada 51CrV4 (DIN) yay çeliği için geliştirilen genetik programlama modellemesi sunulmaktadır. Değişken olarak 74 adet test numunesi kullanılmıştır. Numunelerin kimyasal kompozisyonu, sertlik ölçümü yapılan kısımlar ile test numunesi yüzeyi arasındaki uzaklıklar ve o noktadaki sertlik değerlerinden oluşan toplamda 945 adet veriden oluşmaktadır. Bu verilerin bir kısmı eğitim ve bir kısmı da test verisi olarak genetik modellemede kullanılmıştır. Modelleme sonucunda pratikte kullanılabilir bir bağıntı önerilmiştir.

Taghizadeh ve arkadaşlarının, (2013) çalışmalarında, tavlama sıcaklığı ve zaman parametrelerinin bir fonksiyonu olarak, suyla soğutulmuş ve temperlenmiş AISI 1045 çelik numunelerinin sertliğinin azaldığını görmek için yapay sinir ağı (YSA) modeli geliştirmişlerdir. İlk aşamada, seçilen tavlama parametrelerinin sertlik düşme değerine etkisi araştırılmıştır. İkinci aşamada, YSA modelinin eğitimi için deneylerden elde edilen bir grup veri kullanılmıştır. Benzer şekilde, YSA model doğrulaması için başka bir deney verisi grubu kullanılmıştır. Nihai olarak YSA tahmini için maksimum hata tespiti yapılmıştır. YSA modelinin tahmin ettiği değerler ile deney verileri arasındaki farklılıkların kabul edilebilir derecede olduğu görülmüştür.

Özgüder, Özbay ve Adin, (2017) çalışmalarında, boyutları bilinen M101 top namlusu 1.25 emniyet katsayısına uygun şekilde malzeme değişikliğine gidilerek kütlelerinin 270 kilogramdan 115.95 kilograma düşürülmüştür. Ağırlığı azalan boyutları aynı kalan malzemenin et kalınlığında haliyle bir incelme olacaktır. Analitik yöntemlerle çözümlenmesi oldukça zor olan namlu cidar kalınlığının patlama sonucu oluşan basınç değerleriyle eksen boyunca hesaplanması ve optimizasyonu hedeflenmiştir. Ayrıca iç balistik temel denklemlerine değinilmiş, optimizasyon kavramı açıklanmış, analiz adımlarında izlenen metot ve kabuller verilmiştir. Seçilen mühimmata ait basınç değerleri Prodas programıyla elde edilmiştir. Namlu tasarımı 3 boyutlu tasarım programlarından olan Catia'da yapılmış ve sonlu elemanlar paket programı Ansys Workbench'e aktarılmıştır. Model burada çözümlenerek gerilme

dağılımında kritik noktalar belirlenmiştir. Bu yüksek gerilme değerlerine göre namlu cidar kalınlığı, emniyet faktörü ve otofretaj etkisi hesaba katılmış ve optimize edilmiştir. Çözüm oluşturulurken elde edilen basınçlar değerlendirilmiş, modele bu basınç değerlerinin doğru verilebilmesi için gerçek patlama olayını temsil edebilecek bir sistem oluşturulmuştur. Balistik değerler Vallier-Heydenreich sistemiyle, gerilme değerleri ise Lamé formülüyle tekrar analiz edilmiş, sonuçlar karşılaştırılmış ve oluşan farkların sebepleri araştırılmıştır. Bu çalışmayla, namlu malzemesi, kalibresi, uzunluğu ile mühimmata ait parametreleri belli olan sistemlerin namlu cidarında optimum noktanın yakalanmasına yönelik akademik çalışmalara yol gösterici bir yaklaşım geliştirilmiştir.

Çolak, (2002) çalışmalarında, merdanelere taşlama sırasında verilebilecek bombenin değiştirilmesi ile gerilme yığılmalarını azaltmak ve maksimum gerilmeyi, hasar oluşmasına karşı daha duyarlı olan merdane omuzlarından uzaklaştırarak hasarları önlemek ve merdane ömrünü uzatmak için çalışmalar yapılmıştır. Sonlu elemanlar metodu ile çeşitli bombeler denenerek merdanelerde gerilme yığılmalarının oluşmayacağı ya da daha az oluşacağı bombe miktarları bulunmaya çalışılmıştır.

Literatür incelendiğinde, soğutucu sıvının debisi, sıcaklığı, türü, yüzey pürüzlülüğü ve malzeme türünün konveksiyon katsayısına etkisini irdeleyen çalışmalara denk gelinmiştir. Fakat bu etkilerin konveksiyon katsayısı ile ilişkisini, matematiksel modelleme kullanıp iterasyon yöntemiyle, irdeleyen bir çalışmaya denk gelinmemiştir.

Bu çalışmada, ısıl işlemde bilinmesi zaruri olan, konveksiyon katsayısının bulunmasında yeni bir yaklaşım sunulmaktadır. Sunulan yaklaşım ile ticari yazılım “sonlu elemanlar yöntemiyle modelleme” ve test cihazı kullanılarak elde edilen zaman-soğuma eğrileri kıyaslanıp, grafiklerin örtüşmesi beklenecek. Örtüşme olana kadar ticari yazılımda, rastgele konveksiyon katsayısı değiştirilecek. Örtüşme olduğu durumdaki ticari yazılıma verilen konveksiyon katsayısı, o anki değişkenlerden (soğutucu sıvının debisi, sıcaklığı ve türü, test numunesinin yüzey pürüzlülüğü ve malzeme türü) kaynaklanan gerçek konveksiyon katsayısı olarak tespit edilecektir.

3. MATERYAL ve YÖNTEM

3.1 Materyal

3.1.1 SAE 1050 Çeliği

Bu çalışmada kullanılan AISI 1050 karbon çeliği, sanayide geniş kullanım alanına sahip olmakla birlikte literatürde de fazlaca çalışılmış bir malzemedir. Bu malzemeyi biraz tanımlamamız gerekir ise alaşımsız çeliklerden olan AISI 1050 içeriğindeki yüksek oranda karbon miktarı sebebiyle karbon çeliği olarak isimlendirilir. Sertleşebilirliği kimyasal kompozisyonunda bulunan karbon miktarının çokluğu ile doğru orantılı olarak artarken, tokluğu ise karbon miktarı ile ters orantılı olarak azalır.

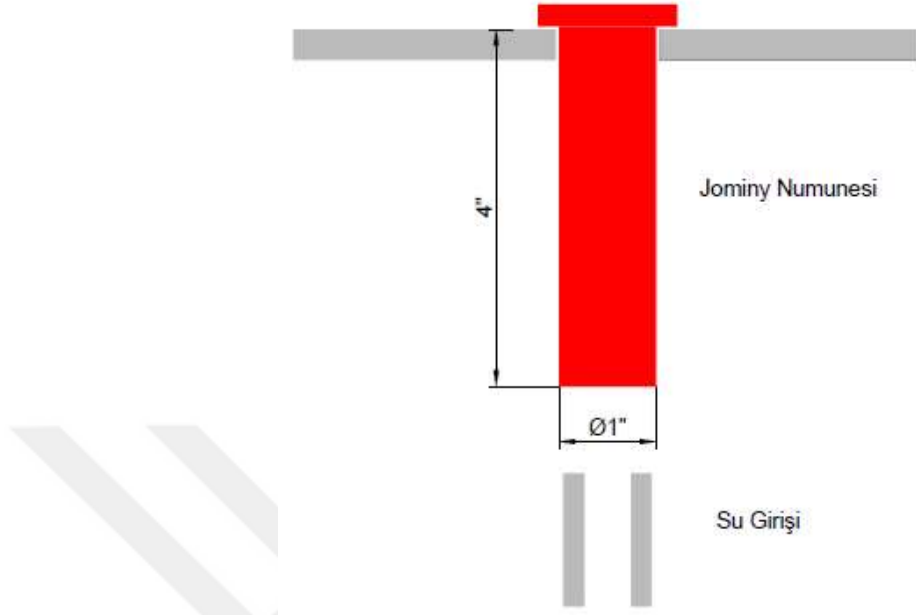
Kullanıldığı yerler, araçlarda, motor şasilerinde ve ekipmanların da, makine imalatında ve her türlü imalat parçası çalışmaların da, çok yük taşımayan imalatlarda, küçük yük taşıma kapasiteli kanca imalatında, dişli imalatında, orta yükteki burkulmalara dayanacak mil çeşitlerin de kullanılır. Aynı zamanda yüzey sertleştirmeye uygun bir malzemedir (Atıcı ve Güllü, 2005). Çizelge 3.1’de AISI 1050 çeliğinin alaşım oranları, Çizelge 3.2 de ısıtma işlem özellikleri görülmektedir. Deney numunesi EN ISO642:1999 standardına uygun olarak Şekil 3.1 görülen geometrik ölçülerde kullanılmaktadır.

Çizelge 3.1 AISI 1050 çeliğinin kimyasal özellikleri (Prabhudev, 2008)

C	Si	Mn	Pmax	Smax
0.42-0.50	0.15-0.36	0.50-0.80	0.045	0.045

Çizelge 3.2 AISI 1050 çeliği ısıtma işlem özellikleri (Prabhudev, 2008)

Sıcak Şekillendirme Sıcaklığı (°C)	Yumuşatma Şekillendirme Sıcaklığı (°C)	Yumuşatma Tavlama Sertliği HB	Tavlama Sıcaklığı (°C)	Sertleştirme			Menevişleme Sıcaklığı (°C)
				Soğutma Ortamı	Su	Yağ	
850–1100	650–700	206	840–870	T (°C) HRC	820- 850 50-57	830- 860 50-55	540–600



Şekil 3.1 Standart jominy test numunesinin görünümü

3.1.2 Isıtma Fırını

Jominy deney numunelerinin deney için gerekli sıcaklığa çıkarılmasında Protherm marka PLF 120/15 model ısıtma fırını kullanılmıştır. Fırın 220V ile beslenerek 3600W güç üreterek 1200 °C sıcaklığa 1 saat içerisinde çıkabilmektedir. Fırının da tuğla ve fiber yalıtım elemanları kullanılmıştır. Aynı zamanda kolay kullanım için önden ısıtılacak malzeme yüklemeye ve daha serin bir dış kasanın muhafaza edilmesi için çift cidarlı yapıya sahiptir. Isıtmada kullanılan silikon karpit rezistanslar çok uzun servis ömrü sağlarlar. Protherm ısıtma fırını PLF 120/15 serisi fırının teknik özellikleri Çizelge 3.3 verilmiştir. Fırının görünümü Şekil 3.2 de gösterilmektedir.

Çizelge 3.3 Protherm fırını PLF 120/15 serisi fırını teknik özellikleri

Model	En Fazla Sıcaklık (°C)	Operasyon Sıcaklığı (°C)	Hacim (L)	İç Ölçüleri (cm)	Dış Ölçüleri (cm)	Güç (kW)	Faz
PLF 120/15	1200	1150	15	23x22x30	72x56x64	3.6	1



Şekil 3.2 Isıl işlem fırını

3.1.3 InfraRed Termometre

İnfrared Termometreler, ısıyı temas olmadan ölçüm yapabilen sıcaklık ölçerlerden birisidir. Bu tip termometrelerde doğru ölçüm yapılabilmesi için bir pilot ışın demeti ölçüm yapılacak malzeme üzerine gönderilir. İnfrared termometreler ışın demetinin temas ettiği bölgelerin ölçümünü yapabildiği için sadece görünür yüzeylerdeki sıcaklığı ölçerler. Dolayısıyla ışın demetini yansıtacak veyahut ışın demetini kıracak cam, su gibi şeffaf yüzeylerin arkasından ölçüm gerçekleştiremezler. İnfrared termometre emisyon derecesi, ölçüm yaptığı numune malzemesinin aldığı veya verdiği kızılötesi ışının seviyesinin belirlendiği ölçme tekniğidir. Skala 0'dan 1'e kadardır.

Çalışmalarda kullanılan Extech 42570 Dual Lazer İnfrared Termometrenin görüntüsü Şekil 3.3'de ve teknik özellikleri Çizelge 3.4'de verilmektedir. Bu İnfrared Termometre ile normal şartlarda -50°C ile 2200°C arası ölçüm yapılabilmektedir. Tepki süre hızlı 100 milisaniyedir. MAX / MIN / AVG / DIF özelliği ile en yüksek, en düşük, ortalama ve maksimum ve minimum ölçüm değerlerini vermektedir. Ayarlanabilir emissivite özelliği ile farklı yüzeyler için ölçüm doğruluğunu artırır.



Şekil 3.3 İnfared Termometre

Çizelge 3.4 InfraRed Termometre Özellikleri (Extech 42570)

InfraRed Termometre özellikleri	
Ekran	Beyaz arkadan aydınlatmalı LCD ekran
Operasyon zamanı	0° C / 50 ° C
Çalışma sıcaklığı	-50 / +2200 ° C
Batarya tipi	9V pil
Ömür	4 Saat
Ağırlık	320 g
Boyut	204x155x52 mm
Gövde malzemesi	ABS
Tipi	İnfared termokupl
Ölçüm aralığı	-50° C/ +1370 ° C
Doğruluk	1.5 % ölçüde

3.1.4 Termal Kamera

-273°C'nin üstünde sıcaklığa sahip olan tüm nesnelere kızıl ötesi termal radyasyon yayarlar ki bu termal radyasyon insan gözü tarafından görülemez. Işınım bu cihaz ile kayıt altına alınır. Sıcaklık bilgisi alınacak malzemedeki yansıyan ışınım (yansımış, yayılmış, iletilmiş uzun dalgalı kızılötesi ışınım) termal kameranın ekranındaki ölçülecek malzeme üzerinden görülür. Sıcaklığı belirlenecek malzemenin ısı bilgisi buradan görülmektedir. Bu cihazlarla ölçülecek malzemenin yayılan kızılötesi radyasyonu elektrik sinyallerine çevirir ve ekran görüntüsü olarak

bize gösterir. Termografi’de -termal kamera ile sıcaklık ölçümü-, tahribatsız ve temas olmaksızın ölçüm yöntemidir (Günyel, 2007).

Çalışmalar esnasında kullanılan termal kameranın görüntüsü Şekil 3.2’de verilmektedir. Bu termal kamera ile normal şartlarda -20°C ile 100°C arası ölçüm yapılabilmekte olup istenildiğinde optiği değiştirilerek ölçüm sıcaklığı 350°C kadar yükseltilebilmektedir. Testo 881 markalı bu termal kameranın ölçme hassasiyeti $\pm\%2$ olup çekimlerin yapıldığı termal kameranın teknik özellikleri Çizelge 3.1’de verilmektedir.



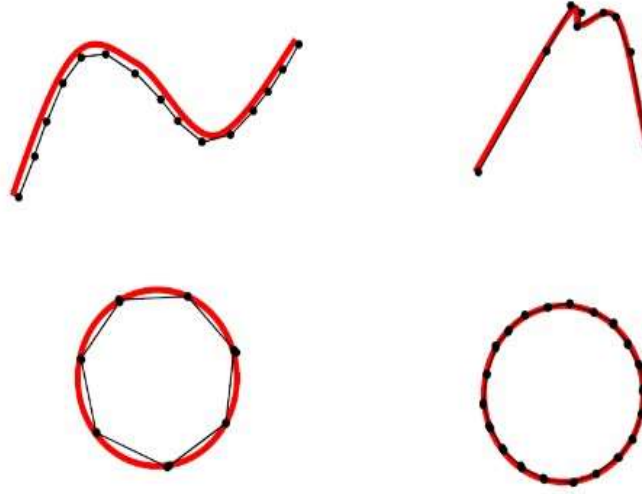
Şekil 3.4 Termal kamera

Çizelge 3.5 Ölçümlerde kullanılan termal kamera özellikleri (Testo 881)

Termal kamera özellikleri	
Ekran	3,5 — LCD, 320 x 240 piksel
Saklama sıcaklığı	-30 / +60 ° C
Çalışma sıcaklığı	-15 / +40 ° C
Batarya tipi	Hızlı şarj olan, Li – iyon pil
Ömür	5 Saat
Ağırlık	901 g
Boyut	152x108x262 mm
Gövde malzemesi	ABS
Tipi	Prop kızılötesi
Ölçüm aralığı	-20° C/ +350 ° C
Doğruluk	2 % ölçüde

3.1.5 Sonlu Elemanlar Yöntemi

Karmaşık problemleri insanlar çoğu zaman kolayca kavrayıp doğrudan çözemezler. Doğrudan çözüme gidilemediği için karmaşık problemler kavranabilecek alt problemlere ayrılır ve anlaşılır hale getirilir. Elde edilen alt problemler ayrı ayrı çözülür ve en son alt problemlerin sonuçları birleştirilir. Bu işlemin sonucunda karmaşık problemin sonucuna varılmış olur. Gerilme analizleriyle ilgilenen mühendisler gerilme problemlerinde kiriş, plak, silindir gibi basit geometrilere sahip şekilleri kullanırlar. Problemlerin sonlu elemanlar yöntemiyle çözümü sonrasında elde edilen sonuçlar çoğu kez yaklaşık çözümdür. Bu değer ya doğrudan kullanılır ya da düzeltme katsayıları ile kullanılır. Mühendislik uygulamalarındaki karmaşık problemlerde tam çözüm yerine genelde kabul edilebilir seviyede bir yaklaşık çözüm tercih edilir (Topcu ve Taşgetiren, 1998)



Şekil 3.5 Çeşitli bir boyutlu parçaların elemanlara bölünmüş hali (Topcu, 2015)

Sonlu elemanlar yönteminde karmaşık yapıya sahip problemler daha basit alt problemlere ayrılır ve bu alt problemler kendi içinde çözülmesiyle sonuca ulaşılır. Bu metodun üç aşaması vardır: İlk aşamasında geometrik olarak karmaşık yapıya sahip çözüm bölgesi basit alt bölgelere ayrılır. İkinci aşamada, elemanlardaki sürekli fonksiyonlar, cebirsel polinomların lineer kombinasyonu şeklinde gösterilebileceği kabulü yapılır. Üçüncü aşamada ise her eleman içinde sürekli olan tanım denklemlerinin düğüm noktalarındaki değerlerinin elde edilmesiyle problemin çözümüne

gidileceği kabulü yapılır. İnterpolasyon teorisinin genel kavramları yardımıyla yaklaşım fonksiyonları polinomlardan seçilir. Seçilen polinomların derecesi iki farklı parametreye bağlıdır: Çözülecek problemin tanım denkleminin derecesine ve çözüm yapılacak elemandaki düğüm sayısına (Topcu ve Taşgetiren, 1998).

Gerilme, yer değiştirme ve basınç gibi değişkenler sürekli bir ortamda sonsuz sayıda farklı değere sahiptir. Eğer sürekli bir ortamın belirli bölgelerinin de sürekli ortam özelliği gösterdiği biliniyorsa, bu alt bölgelerde ki alan değişkenlerinin değişimi sonlu sayıda bilinmeyen olan fonksiyonla gösterilebilir. Seçilen fonksiyonlar bilinmeyen sayısına göre lineer ya da yüksek mertebeden olabilir. Notlar arasında süreklilik olduğundan sürekli ortamın alt bölgeleri de aynı karakteristik özellikleri sergiler ve bu alt bölgelerin alan denklemleri birleştirildiğinde bütün sistemi ifade eden denklem elde edilir. Komple sisteme ait denklemin çözülmesi sonucunda sürekli ortamdaki alan değişkenleri sayısal hale gelir (Topcu ve Taşgetiren, 1998).

Eski zamanlarda karmaşık makine elemanlarının değerlendirilmesi pahalı deneylerle yapılmaktaydı. Fakat bu tür karmaşık modeller eskiden bu şekilde değerlendirilmesine rağmen son zamanlarda sonlu elemanlar yönteminin kullanımıyla bu işler daha kolay hale gelmiştir. Özellikle son yıllarda sonlu elemanlar yönteminin sanayi uygulamalarına girmesiyle daha önceleri pahalı deneylerle değerlendirilen sistemler daha kolay ve daha ekonomik şekilde incelenebilmişlerdir. Bu sayede makine parçalarının seçimi daha tasarım aşamasındayken sonlu elemanlar yöntemi ile optimum hale getirilebilmiştir (Topcu ve Taşgetiren, 1998).

Sonlu Elemanlar yöntemi uygulamasında izlenecek üç yol vardır. Bunlar:

Sonlu elemanlar ağı oluşturma; Matematiksel model kurulduktan sonra başlangıç bilgilerine göre bağlantı noktalarının oluşturduğu yapı aynı ağ görünümündedir (Öztürk, 2013).

Etki eden kuvvetlerin belirlenmesi; Kütle kuvvetleri, soğutma sıvılarının etkisi, malzeme tipi olmak üzere sistem üzerinde etkili olan kuvvetler ve parametreler belirlenir (Öztürk, 2013).

Sınır şartlarının belirlenmesi; Sistemde doğal veyahut yapay olarak oluşturulmuş sınır şartları bulunur. Buna örnek vermek gerekir ise yapısal analizde elastik yer değiştirmeler, sınır şartları referans alınarak hesaplanır (Öztürk, 2013).

Sonlu eleman analizleri ANSYS, MSC/NASTRAN, ALGOR, ABAQUS gibi geliştirilen yazılımlarla birlikte Catia ve SolidWorks gibi CAD yazılımlarına entegre edilmiş analiz modülleri de kullanılmaktadır (Öztürk, 2013).

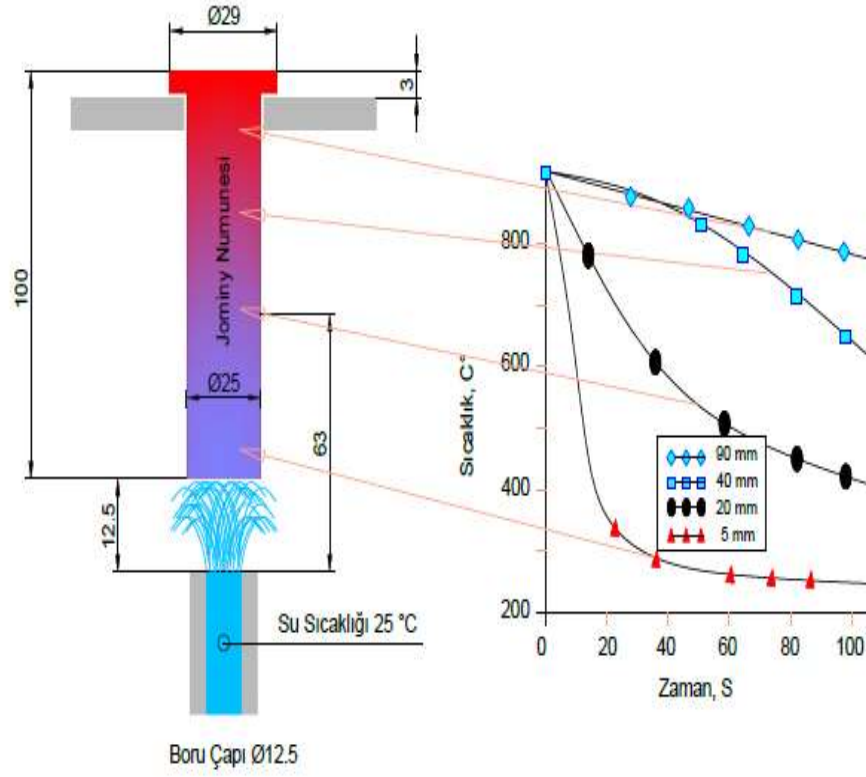
Her çeşit yapı girift geometri için uygulanabilir olması diğer sayısal yöntemlere göre daha kullanışlı olduğunu göstermektedir. Mühendislik tasarımlarının üretim hattına geçilmeden önceki AR GE sürecini önemli ölçüde kısaltır. Normal yapılan AR GE süreçlerinden daha başarılı ilk tasarım örneklerinin ortaya konulmasını sağlar. Matematiksel olarak genelleştirilerek farklı problemlerin çözümünde kullanılır (Öztürk, 2013).

3.2 Yöntem

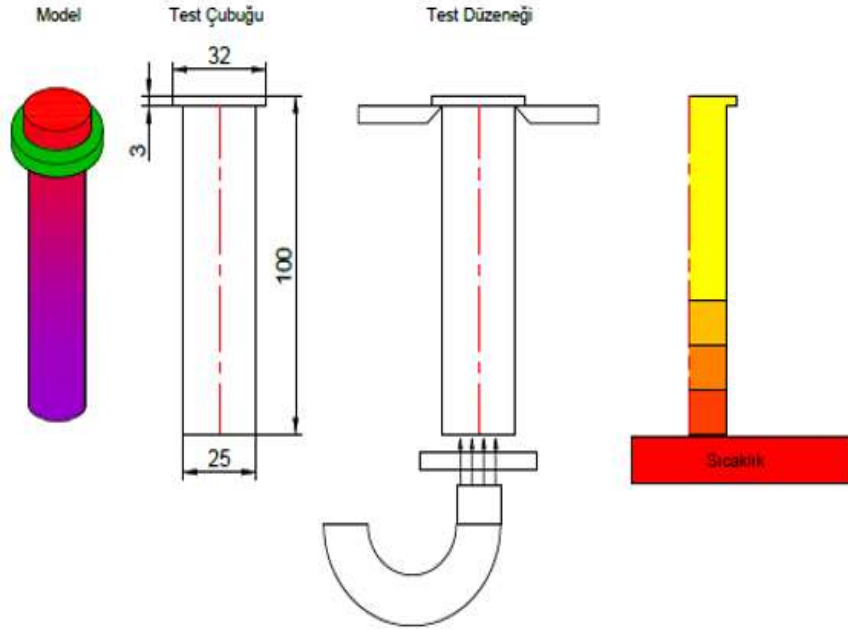
Soğutucu sıvının debisi, sıcaklığı ve türü (biz çalışmamızda 10lt/dk hızda, 25 °C sıcaklıkta soğutucu sıvı olarak su kullandık) konveksiyon değerini etkilediği gibi test numunesinin de yüzey pürüzlülüğü ve malzeme türü de aynı şekilde etkili olacaktır. Bahsi geçen değişkenlerin konveksiyon katsayısına etkileri tam anlamıyla bilinmemektedir. Teorik hesaplamalardaki ihmal veya kabuller gerçek sonuçları oldukça etkilemektedir. Bu durumu aşmak için konveksiyon katsayısına etki eden parametrelerden biri üzerinde değişiklik yaparken diğerleri sabit tutulur.

Malzemedem emilen ısı malzemenin soğuma hızına doğrudan etki etmektedir. Malzeme uç kısmından soğumaya başlar ve baş kısmına doğru soğumaya devam eder. Bu soğuma hızı ise malzemenin kondüksiyon (ısı iletim) katsayısına bağlıdır. Bu değer malzemeyi üreten firma tarafından belirtilir.

Bu tez kapsamında tasarlanıp imal edilen test cihazı ile deney numunelerinin istenen kısımlarının zaman-sıcaklık grafikleri Şekil 3.6'da çizilir. Benzer koşullarda ticari yazılım kullanılarak Şekil 3.7'de görüldüğü gibi simüle edilir. Ticari yazılımla test cihazı grafikleri kıyaslanıp, grafiklerin örtüşmesi beklenir. Örtüşme olana kadar ticari yazılımda rastgele verilen konveksiyon katsayısı değiştirilir. Örtüşme olduğu durumdaki ticari yazılıma verilen konveksiyon katsayısı, o anki değişkenlerden (soğutucu sıvının debisi, sıcaklığı ve türü, test numunesinin yüzey pürüzlülüğü ve malzeme türü) kaynaklanan gerçek konveksiyon katsayısı olarak tespit edilir.



Şekil 3.6 Jominy test numunesi sıcaklık-zaman eğrisi



Şekil 3.7 Ticari yazılım kullanılarak jominy testi koşulları simüle edilmesi

4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

4.1 Jominy Test Cihazının Yeniden Tasarlanıp İmal Edilmesi

Tasarlanıp imalatı yapılan cihaz, İskenderun Teknik Üniversitesi Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi Makine Mühendisliği Laboratuvarında bulunmaktadır. İlgili cihaz için, 25.05.2016 tarihinde, 2016/06925 başvuru ve 2016-GE-212458 evrak numarası ile “Metal ve Alaşımların ısıtılma kabiliyet tayin cihazı” buluş başlığı kullanılarak ulusal patent şeklinde Türk Patent ve Marka Kurumuna müracaatı yapılmıştır. Bu cihazda değişik soğutma sıvıları ve bu sıvıların farklı sıcaklıklarda ısıtılmış metale uygulanmasıyla metalde oluşan sertleşebilirlik kabiliyetinin tespitinde kullanıldı. Cihaz, başka ortamlarda sertleştirme (ostenit) sıcaklık seviyesinin üzerine ısıtılan silindirik test numunesinin, farklı soğutma ortamlarını simüle maksadıyla değişik soğutma sıvılarını istenilen debi ve sıcaklıkta test numunesinin uç kısmına uygulanabilmesi ve test numunesinin işlem esnasında uç kısmından itibaren sıcaklık değerlerinin anlık olarak tespit edilmesi vasıtasıyla sıcaklık- zaman grafiklerini çizebilecek niteliktedir.

Test numunesinin istenilen noktalarının sıcaklık-zaman grafikleri numune üzerindeki ısı iletimini (kondüksiyon) tespit edilmesinin yanında dış ortamdan ısı alma kabiliyeti olan (soğutma sıvısı vb.) ve ortam koşullarını (malzeme yüzey pürüzlülüğü, akışkanın türü, debi ve sıcaklığı) içinde barındıran konveksiyon katsayısını tespitinde kullanılacaktır.

Bu cihaz, metallerin sertleşebilirliğinin tespitinde farklı sıcaklık ve debilerdeki soğutma sıvılarının uygulanabileceği, test numunesinin istenilen sayıdaki bölgesinden sıcaklık değerlerini anlık olarak alınır, kayıt edilebilir ve grafiklendirilir. Yeni üretilen metal alaşımlarının sahip olduğu mekanik özelliklerinin yanında ısıtılma işlemle geliştirilen mekanik özellikleri ve ısıtılma kabiliyetlerinin bilinir olması geliştirilen alaşımın kullanım alanını ortaya koyacaktır. Bir çeliğin su verme işlemiyle martenzite dönüşümü sonucu sertleşme kabiliyeti olan sertleşebilirlik; uygun çeliğin seçiminde en çok dikkat edilen özelliklerden bir tanesidir.

Bu cihaz, ısıtılma işlem süreçlerindeki malzeme ile soğutucu sıvı arasındaki ısı taşınım katsayısı olan konveksiyon katsayısının bulunduğu koşullardaki değerinin

tespit edilmesiyle su verme yöntemi ile sertleştirme sürecinin matematiksel modelleme ve analitik çözümlerin yapılabilmesine olanak sağlamıştır.

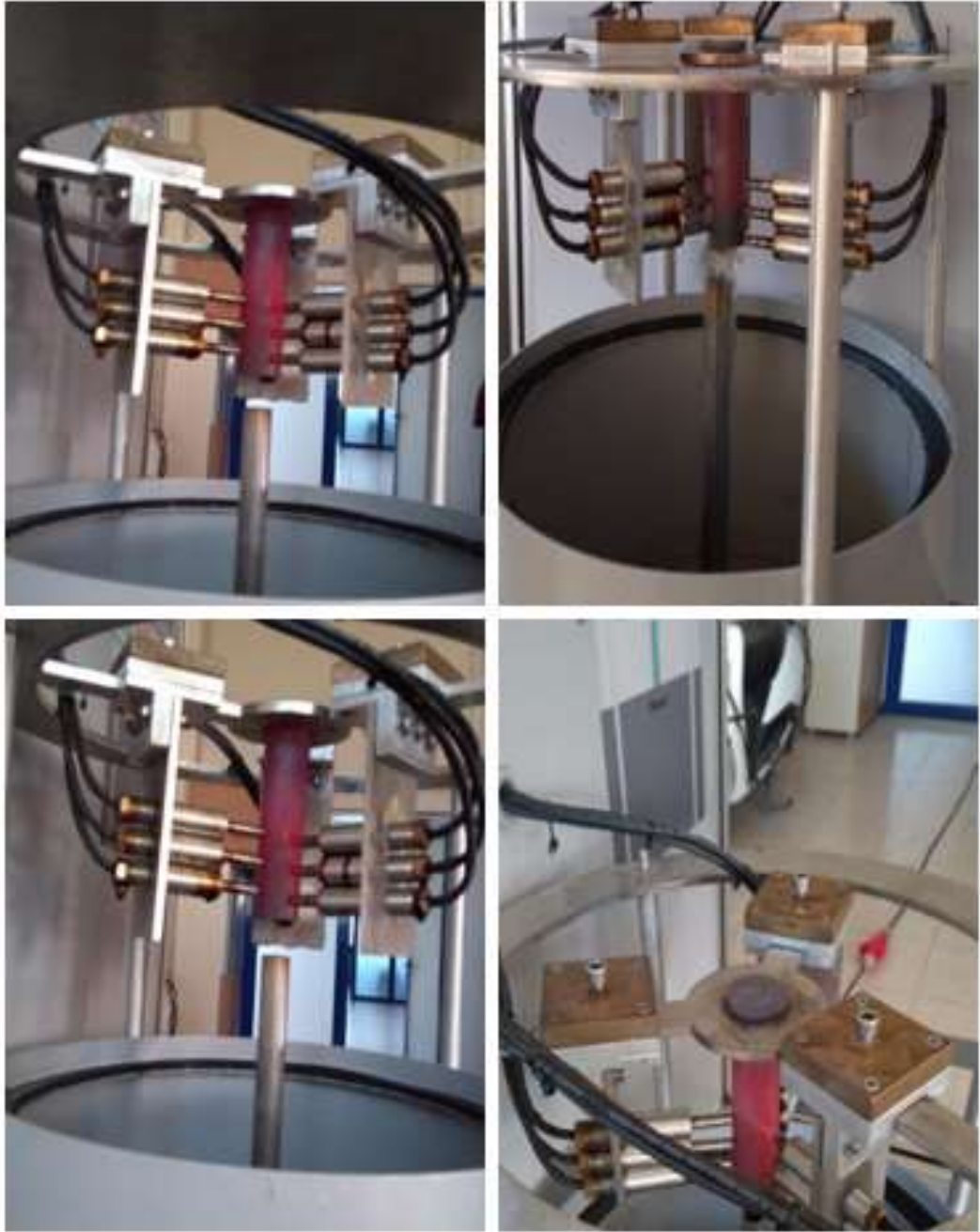
Bu cihaz, pratik sahadaki ısıtma işlem uygulamalarında kullanılan değişik soğutma sıvılarının (su, yağ vb.) farklı sıcaklık ve debilerdeki uygulamalarının malzeme üzerindeki etkilerini simüle edilmesini sağlamıştır. Cihaz sayesinde test numunesi üzerindeki soğutma ucundan diğer uca doğru sıcaklık değişimlerinin anlık tespit edilmesi ile malzemenin ısı iletim katsayısı tespiti ve ısıtma işlemlerinin büyük bir çoğunluğunda işlemin belirleyici faktörlerden biri olan zaman parametresinin etkisinin gösterildiği, tezin ilerleyen bölümlerinde görülecek olan "Zaman-Sıcaklık-Dönüşüm" diyagramlarının çizilmesine olanak sağlamıştır.

Tasarlayıp imalatını yaptığımız ve fakültemiz laboratuvarlarına getirdiğimiz jominy test cihazının görünümü Şekil 4.1'de gösterilmiştir. Özetlemek gerekirse cihaz çelik üretimi ve mekanik özellik iyileştirme safhası olan ısıtma işlem prosesleri ile ilgilidir.



Şekil 4.1 Tasarlanıp imalatı yapılan jominy test cihazının görünümü

Numune ölçümleri birbirinden bağımsız farklı ölçüm yöntemleri ile yapıldı. Bunlardan ilk olanı jominy deney cihazını dizaynında üzerine adapte ettiğimiz 9 noktadan ölçüm alabildiğimiz termokopllardır. Bunların görünümü ayrıntılı olarak Şekil 4. 2 de görülmektedir.



Şekil 4.2 Farklı 9 noktadan termokupl ile sıcaklık ölçüm yapımı ve test numunesi

Bu cihaz; soğutucu sıvının debi, sıcaklık ve türü ile soğutulacak malzemenin yüzey pürüzlülüğü ve malzeme türünün bir fonksiyonu olan aralarındaki ısı taşınım (konveksiyon) katsayısının tespitine yardımcı olacak donanımları vardır. Bu amaçla, Şekil 4.3 tasarlanan jominy test cihazı Şekil 4.4 test cihazının soğutma kabini, Şekil 4.5 de Jominy test cihazının soğutma sıvısı sirkülasyon sistemi gösterildiği gibi, cihazla ilgili sistemlerin üzerinde sabitlenebildiği ana gövde (1), sistemlerin kontrol edildiği kontrol ve gösterge paneli (2), sistemlere gelen enerjiyi kontrol eden ana şalter (3), istenmeyen durumlarda sistemlerin enerjilerini kesen acil stop (4), değişik sıvıların farklı sıcaklık ve debide test numunesine uygulanacağı soğutma kabini (5), işlem gören soğutma sıvısının toplandığı tahliye tankı (6), soğutma sıvılarının istenilen sıcaklığa çıkartan ısıtma tankı (7) ve soğutma sıvılarını istenilen debide test numunesine uygulayacak olan pompa (8) olmak üzere ana kısımlardan oluşmaktadır.

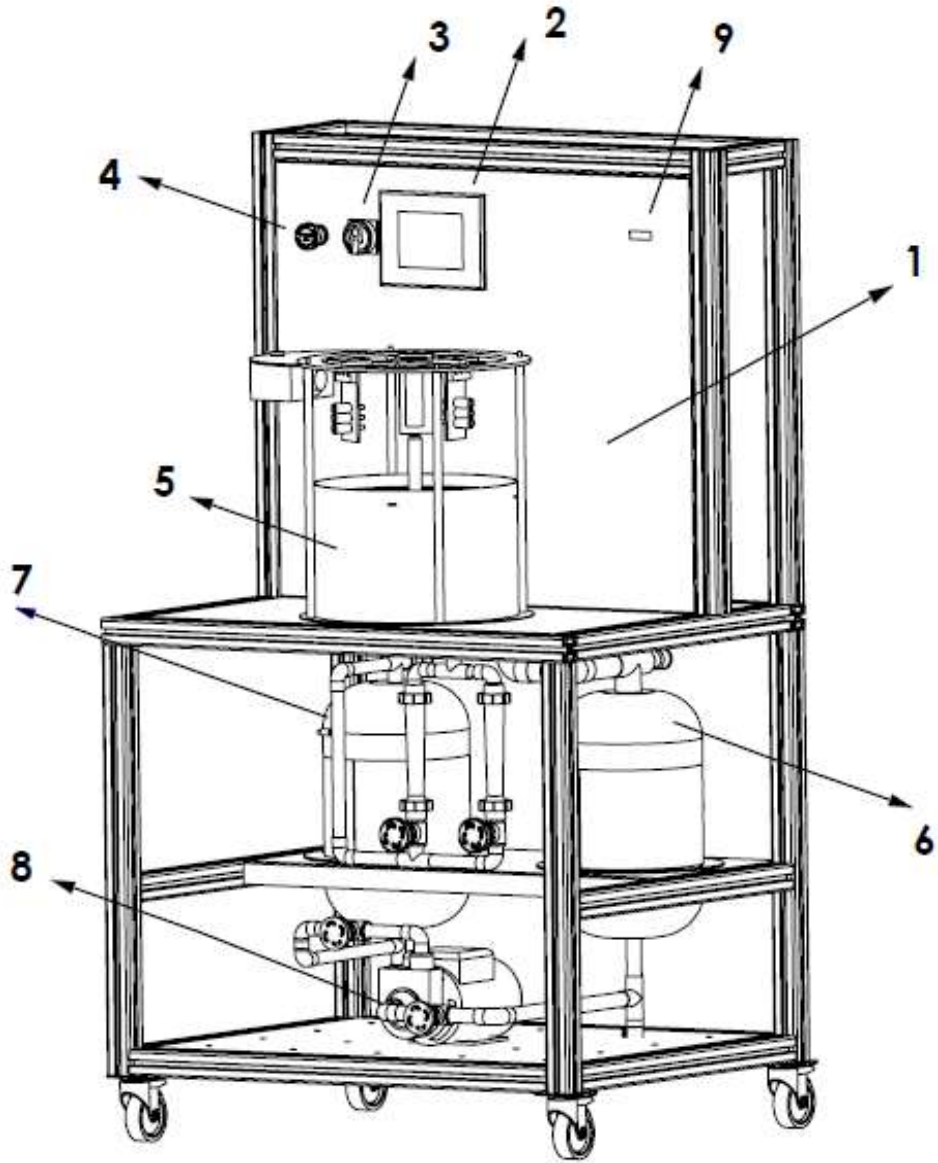
Öncelikle tanklar (6, 7) istenilen soğutma sıvısıyla doldurulur. Soğutma sıvısının uygulama sıcaklığı kontrol panelinden (2) ayarlanır ve rezistans (19) vasıtasıyla istenilen dereceye soğutma sıvısı getirilir. Eğer soğutma sıvısının uygulama sıcaklığı 100 °C den az ise düşük sıcaklık debimetresinin (20) veri sağlaması için kendi vanası

(22) açık yüksek sıcaklık debimetre vanası (23) kapalı pozisyona getirilir, sıcaklık 100 °C den fazla ise yüksek sıcaklık debimetresi (21) çalışması için vanaların (22, 23) çalışma pozisyonları değiştirilir. Soğutma sıvısının sıcaklığı ve geçiş güzergâhı ayarlandıktan sonra soğutma sıvısının test numunesine pompa (8) ve debi ayar vanalarıyla (24) istenilen debide gönderilir. Soğutma sıvısı, küresel sıvı tahliye vanaları (25) açılıp kör tapalar (26) sökülerek, sistemden tahliye edilir.

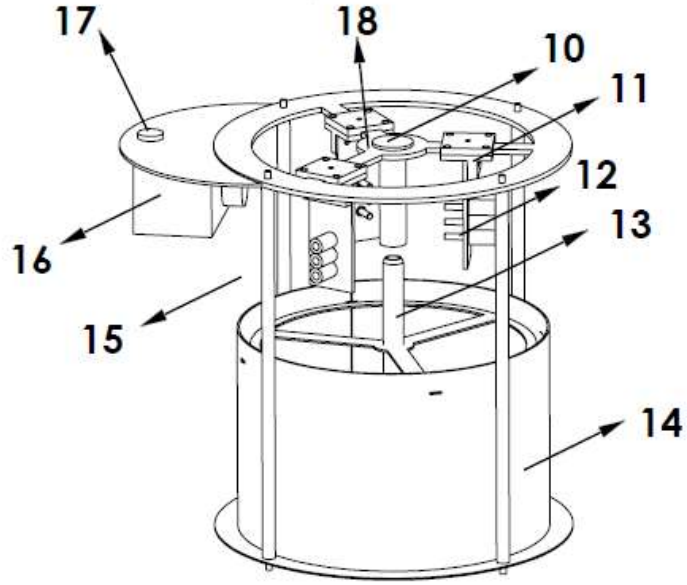
Isıl işlem fırınlarında (ostenit) sıcaklık seviyesinin üzerine ısıtılan silindirik test numunesini (10) numune tutucuya (18) yerleştirilir. Yatay dikey yataklar üzerine (12) belli sırayla sabitlenen pirometreler (12) soğutma sıvısının test numunesine temas ettiği noktadan itibaren belli mesafelerin soğutma süresince zamana bağlı değişimleri anlık olarak kontrol ve gösterge paneline gönderir. Ayrıca termal kamera (16) kendi bağlantısı (17) sayesinde ana gövdeye sabitlenip test numune üzerindeki zamana bağlı sıcaklık konum verilerini alternatif veri olarak kaydeder. Veri güvenilirliğini sağlamak için iki farklı yolla alınan değerler bilgisayar bağlantı portu (9) vasıtasıyla istediğimiz bir bilgisayara yüklenir.

Bilgisayara alınan veriler işlenerek metalin ısı iletimini (kondüksiyon) belirlenir. Aynı zamanda ticari yazılım “matematiksel modelleme yöntemleriyle” ve test cihazı kullanılarak elde edilen zaman-soğuma eğrileri kıyaslanıp, grafikler örtüştürülerek ticari yazılıma verilen konveksiyon katsayısı, o anki değişkenlerden (soğutucu sıvının debisi, sıcaklığı ve türü, test numunesinin yüzey pürüzlülüğü ve malzeme türü) kaynaklanan gerçek konveksiyon katsayısı olarak tespit edilmesini sağlamaktadır.

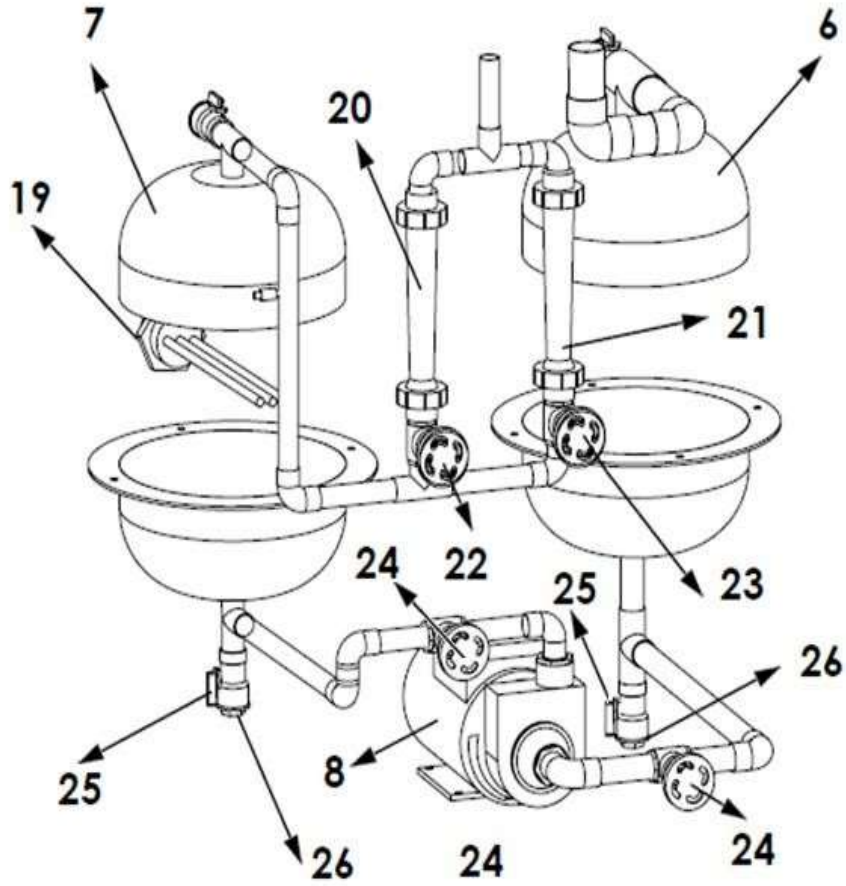
Danışmanlarımızın ile beraber tasarlayıp çizimlerini yaptığımız test cihazının ekte bölümlere ayrılmış ve komple resimleri görülmektedir.



Şekil 4.3 Tasarlanıp imalatı yapılan jominy test cihazının temsili görünümü



Şekil 4.4 Jominy test cihazının soğutma kabini



Şekil 4.5 Jominy test cihazının soğutma sıvısı sirkülasyon sistemi

4.2 Jominy Deney Teorik Hesaplanması

Uygulamada karşılaşılan ısı iletimi problemlerinin çoğunda sıcaklık dağılımı zamana bağlıdır. Bu tarzdaki ısı iletimi problemleri geçici rejimde ısı iletimi olarak adlandırılır. Türbinin harekete başlaması veya durdurulması esnasında türbin kanatçıklarıyla etrafındaki gazların etkileşimi, ısıtılan veya soğutulmaya bırakılmış bir fırının duvarlarındaki sıcaklık dağılımı, çeliğe su verilmesi sırasında çelik içerisindeki sıcaklık dağılımı ve içten yanmalı motorların silindirleri içerisinde gaz sıcaklığının periyodik değişimi, geçici rejimde ısı iletiminin tipik örnekleridir.

Geçici rejimde ısı iletimi problemleri periyodik ve periyodik olmayan problemler olarak iki gruba ayrılır. Periyodik olmayan durumlarda sistemin herhangi bir yerinde sıcaklık zamanın doğrusal olmayan bir fonksiyonudur. Uygulamada, katı bir cismin bir akışkanla ısıtılması veya soğutulması periyodik olmayan geçici rejim problemlerinin en yaygın örneğidir.

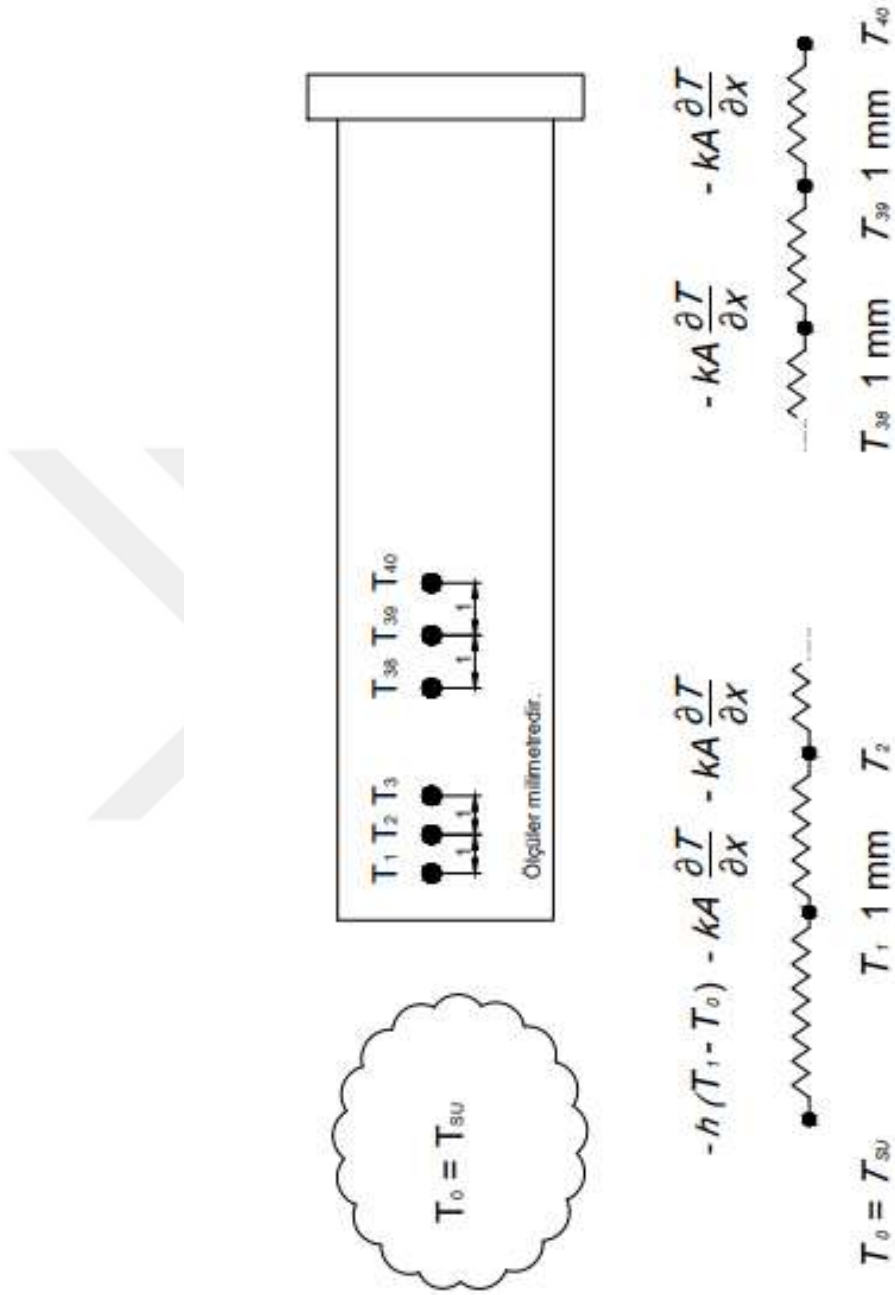
Zamana bağlı ısı transferi problemlerinin sayısal çözümleri belli sınır şartlarıyla geçerlidir. Bu çalışmada, sonlu elemanlar yönteminden faydalanılarak bir sayısal problemin çözümü yapılmaktadır. Sınır şartları bu yöntem için kabul edilmiştir. Zamana bağlı tek boyutlu ısı transfer eşitliği aşağıdaki denklemde görülmektedir.

$$\frac{1}{\alpha} * \frac{\partial T(x, t)}{\partial t} = \frac{\partial^2 T(x, t)}{\partial x^2} \quad 4.1$$

Jominy numunesinin ucundan 40 mm iç mesafeye kadar her 1 mm için bir düğüm noktası Şekil 4.6 de gösterildiği gibi belirlenmiştir. Soğumanın başladığı 0 ve 1 noktaları arasında taşınım olduğu için Newton'un Soğuma Yasası, 1 mm mesafeden sonraki iç düğüm noktalarında iletim safhasına geçtiği için Fourier Yasası uygulanarak sonlu elemanlar metodu ile açık yaklaşım kuramıyla, Jominy numunesi su verme anı için zamana bağlı tek boyutlu, ısı transfer modeli kurulmuştur.

Problemin çözümlenebilmesi için başlangıç sınır şartlarının belirlenmesi ve AISI 1050 çeliğinin gerekli fiziksel özelliklerinin bilinmesi gereklidir.

Jominy numunesinin ilk su ile temas ettiği noktadaki taşınım ile malzemenin iç bölümlerinde oluşan iletim safhasını formülle gösterimi aşağıda görülmektedir.



Şekil 4.6 Bir boyutlu jominy numunesinin ısı transfer modeli

$$\frac{1}{\alpha} * \frac{T_p^{t+1} - T_p^t}{\Delta t} = \frac{T_{p+1}^t + T_{p-1}^t - 2T_p^t}{\Delta x^2} \quad 4.2$$

$$T_p^{t+1} = Fo(T_{p+1}^t + T_{p-1}^t) + (1 - 2Fo) T_p^t \quad 4.3$$

$$q_{taş} + q_{iletim} = q_{depolanan} \quad 4.4$$

$$hA(T_0 - T_s^t) + \frac{kA}{\Delta t} (T_{s-1}^t - T_s^t) = \rho c_p A \frac{\Delta x}{2} \frac{T_s^{t+1} - T_s^t}{\Delta t} \quad 4.5$$

$$T_s^{t+1} = 2Fo(T_{s-1}^t + BiT_0) + (1 - 2Fo - 2BiFo)T_s^t \quad 4.6$$

Bu denklemi oluşması için en büyük Fo sayısı ve Δt değeri için en hassas çözüm sağlanmıştır. Çalışmada gerçek verilerle bir karşılaştırma yapılacak olması nedeniyle en hassas çözümün bulunabilmesi adına, $\Delta x=1\text{mm}$ ve $\Delta t=0,023$ saniye kabulleri yapılır.

$$\text{Fourier sayısı, } Fo = \frac{\alpha \Delta t}{(\Delta x)^2} \quad Fo = \frac{17,7 * 0,023}{1} = 0,407 \quad 4.7$$

$$Fo(1 + Bi) \geq \frac{1}{2} \quad Bi = \frac{h\Delta x}{k} = \frac{15000*0,023}{60,5} = 0,2479 \quad 4.8$$

Numunenin ilk sıcaklığı 1100°C , soğutma suyu sıcaklığı 25°C olarak belirlenmiş olup, gerçek deney başlangıç şartlarına getirilmiştir. Sınır koşullar ve başlangıç şartlarına göre 39 iç düğüm ve 1 uç düğüm noktası için zamana bağlı hesaplamalar yapılmıştır.

Yukarıdaki ifade de geçen biot sayısı taşınım esnasında geçerli olmakla beraber iletim safhasındaki 39 iç düğüm noktasında 1 olarak kabul edilmiştir. (Çakır ve Özsoy 2011)

T_1^{t+1} 'den T_{40}^{t+1} 'a kadar sıcaklık bilgilerinin verildiği aşağıdaki formüller, ana formül 4.6 da gerekli değerlerin yerine konulması ile gösterilmiştir.

$$\begin{aligned}
T_1^{t+1} &= 0,814(T_2^t + 6,1975) + 0,1054T_1^t \\
&\vdots \\
T_5^{t+1} &= 0,407(T_4^t + T_6^t) + 0,186T_5^t \\
&\vdots \\
T_{10}^{t+1} &= 0,407(T_9^t + T_{11}^t) + 0,186T_{10}^t \\
&\vdots \\
T_{15}^{t+1} &= 0,407(T_{14}^t + T_{16}^t) + 0,186T_{15}^t \\
&\vdots \\
T_{20}^{t+1} &= 0,407(T_{19}^t + T_{21}^t) + 0,186T_{20}^t \\
&\vdots \\
T_{25}^{t+1} &= 0,407(T_{24}^t + T_{26}^t) + 0,186T_{25}^t \\
&\vdots \\
T_{30}^{t+1} &= 0,407(T_{29}^t + T_{31}^t) + 0,186T_{30}^t \\
&\vdots \\
T_{35}^{t+1} &= 0,407(T_{34}^t + T_{36}^t) + 0,186T_{35}^t \\
&\vdots \\
T_{40}^{t+1} &= 0,407(T_{39}^t + T_{41}^t) + 0,186T_{40}^t
\end{aligned}$$

Çizelge 4.1'den alınan fiziksel özelliklerle elde edilen Fo ve Bi sayısı gibi değerler yukarıda belirtilen formüllerde Excel ortamına yerleştirilmesi ve 1mm aralıkla işleme sokulması sonucunda sıcaklık bilgilerine zaman ve nokta bazında ulaşılmıştır. Zaman ve numune üzerindeki noktaların sıcaklık bilgileri, kısmen Çizelge 4.2 de gösterilmektedir.

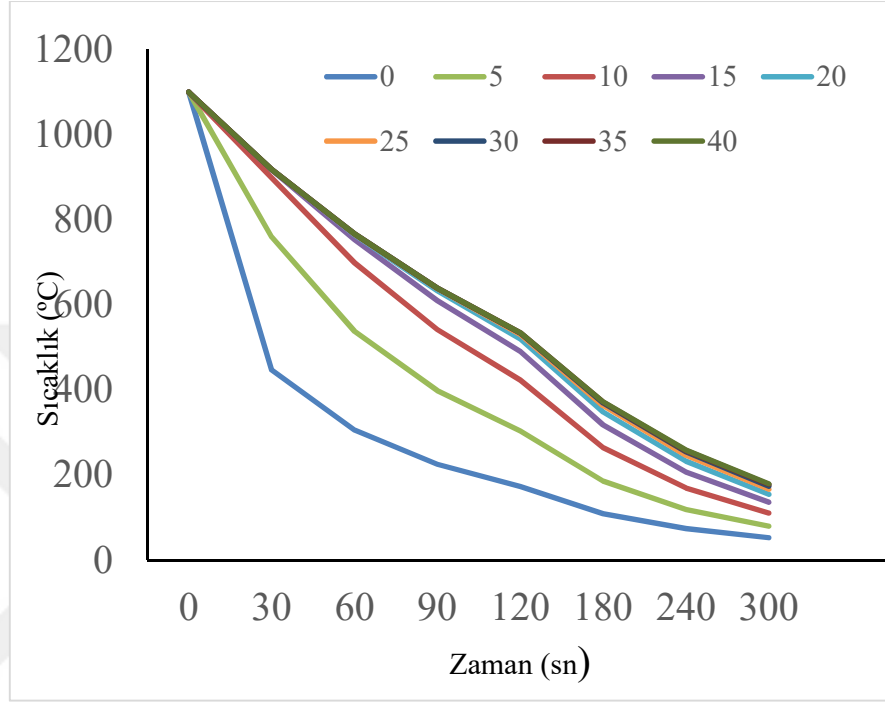
Çizelge 4.1 AISI 1050 çeliğinin gerekli fiziksel özellikleri (Prabhudev, 2008)

Özgül Kütle ρ , kg/m ³	Özgül Isı cp, J/kg.K	Isıl İletkenlik k, W/m.K	Isıl Yayınım Katsayısı α , m ² /s ²	Isıl Taşıma Katsayısı h, W/m ² .K
7854	434	60.5	17.7	15000

Çizelge 4.2 Teorik hesaplamalarda sıcaklık zaman grafiği çizelgesi

	Zaman (sn)							
	0	30	60	90	120	180	240	300
T1	1100	448	306	226	173	109	74	53
T2	1100	544	372	273	208	129	86	60
T3	1100	629	432	318	242	149	97	66
T4	1100	701	488	360	274	168	108	73
T5	1100	760	538	399	304	186	120	80
T6	1100	807	581	434	332	204	130	86
T7	1100	842	619	466	358	220	141	93
T8	1100	868	651	495	382	236	151	99
T9	1100	886	677	520	404	251	160	105
T10	1100	899	699	542	423	264	170	111
T11	1100	907	716	561	441	277	178	117
T12	1100	912	730	577	456	289	186	122
T13	1100	915	740	590	469	299	194	127
T14	1100	916	748	601	481	309	201	132
T15	1100	917	754	610	491	318	207	137
T16	1100	918	758	617	499	325	213	141
T17	1100	918	761	623	506	332	219	145
T18	1100	918	763	627	512	338	224	148
T19	1100	918	764	630	517	344	228	152
T20	1100	918	765	633	521	348	232	155
T21	1100	918	766	635	524	352	236	158
T22	1100	918	766	636	526	356	239	161
T23	1100	918	766	638	528	359	242	163
T24	1100	918	766	638	530	361	244	165
T25	1100	918	767	639	531	363	247	167
T26	1100	918	767	639	532	365	249	169
T27	1100	918	767	639	532	366	250	170
T28	1100	918	767	640	533	368	252	172
T29	1100	918	767	640	533	369	253	173
T30	1100	918	767	640	534	369	254	174
T31	1100	918	767	640	534	370	255	175
T32	1100	918	767	640	534	371	256	176
T33	1100	918	767	640	534	371	256	177
T34	1100	918	767	640	534	371	257	177
T35	1100	918	767	640	534	372	257	178
T36	1100	918	767	640	534	372	258	178
T37	1100	918	767	640	534	372	258	179
T38	1100	918	767	640	534	372	258	179
T39	1100	918	767	640	534	372	259	179
T40	1100	918	767	640	534	372	259	180

Teorik hesaplamalarımıza göre Çizelge 4.2 den elde edilen zaman sıcaklık grafiği Şekil 4.7 da görölmektedir.



Şekil 4.7 Teorik hesaplamalara göre AISI 1050 çeliğinin zaman soğutma grafiği

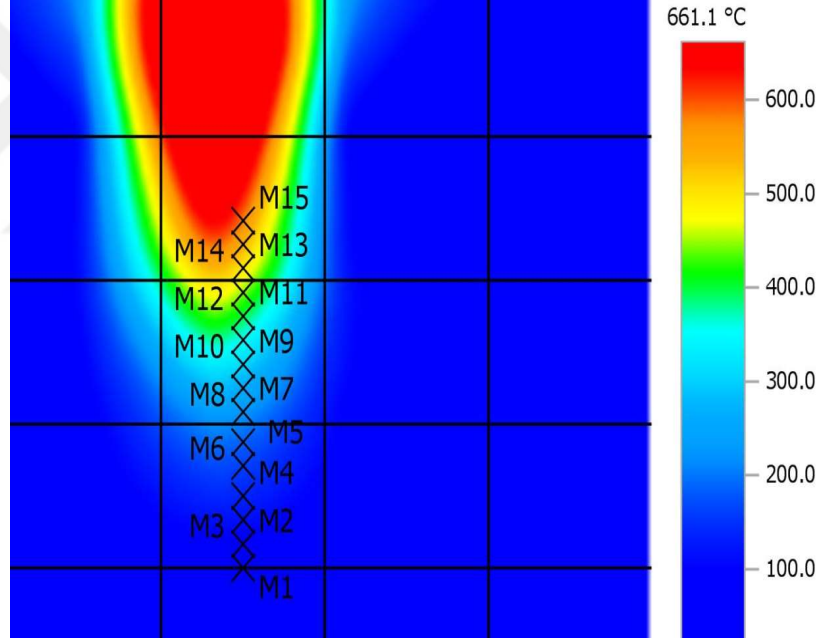
4.3 Jominy Test Sonuçları

İmalatını yaptığımız test cihazı; metal ve alaşımlarının sertleştirilebilirlik tayinindeki soğutucu sıvının debi, sıcaklık ve türü ile soğutulacak malzemenin yüzey pürüzlülüğü ve malzeme türünün bir fonksiyonu olan metal veya alaşımın ile soğutma sıvısı arasındaki ısı taşınım (konveksiyon) katsayısının tespit edilebilmesi için tasarlanmıştır.

Termokuplların algılama süresini kısaltmak için test malzemesine temas yüzeyi artırılmıştır. Bu işlem için termokuplların uçları orijinalinde sivri durumda iken test numunesine temas edebilmesi için numune parçalarının şekline uygun, olacak geometriye taşlanarak çevrildi. Bunlara ek olarak test numunesi üzerinde istenilen nokta ve sayıda sıcaklık verilerinin anlık ölçülmesi için termokupllar ve InfraRed termometre kullanım görüntüleri Şekil 4.8 ayrıca termal kamera kullanım görüntüsü Şekil 4.9 verilmiştir.

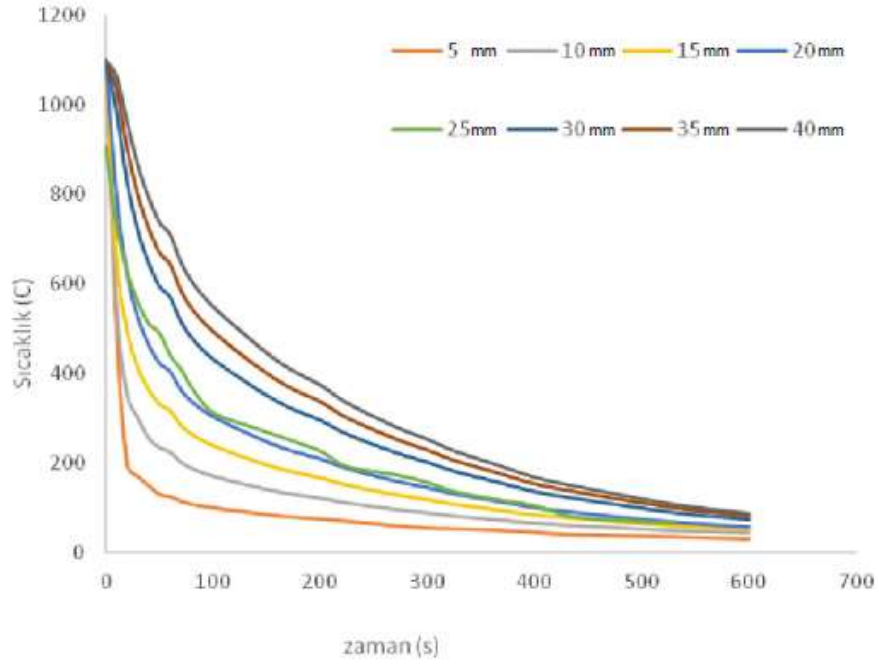


Şekil 4.8 Infrared termometre ile numune sıcaklıklarının okunması



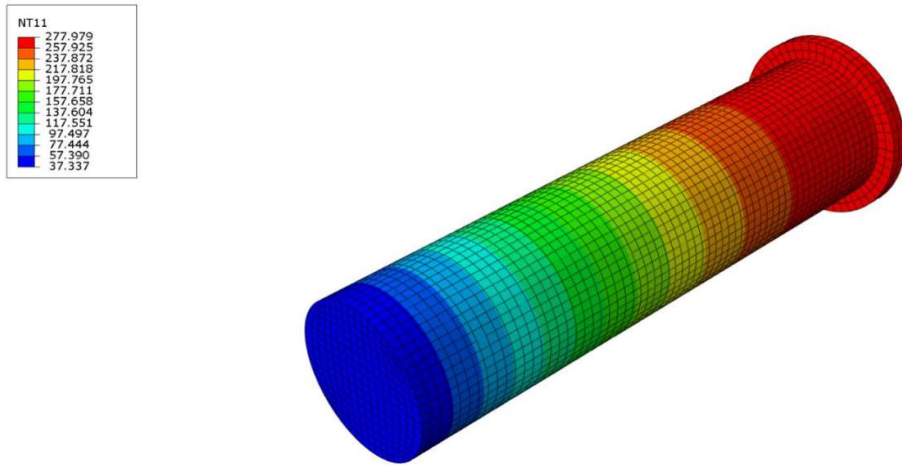
Şekil 4.9 Jominy testi yapılırken çekilen termal kamera görüntüleri

Bu bağlamda, AISI 1050 çeliği tavlama fırınında 1100°C sıcaklıkta 30 dakika bekletildikten sonra tasarlanıp imal edilen cihazın soğutma kabindeki bölme konumlandırıldı. 25°C de su kullanarak 10 lt/dk'lık bir akışkan debisi verecek şekilde cihazın çalışma koşulları ayarlandı. Pirometrelerden anlık veriler alınarak jominy test numunesinin istenen kısımlarının sıcaklık zaman grafikleri elde edildi (Şekil 4.10).



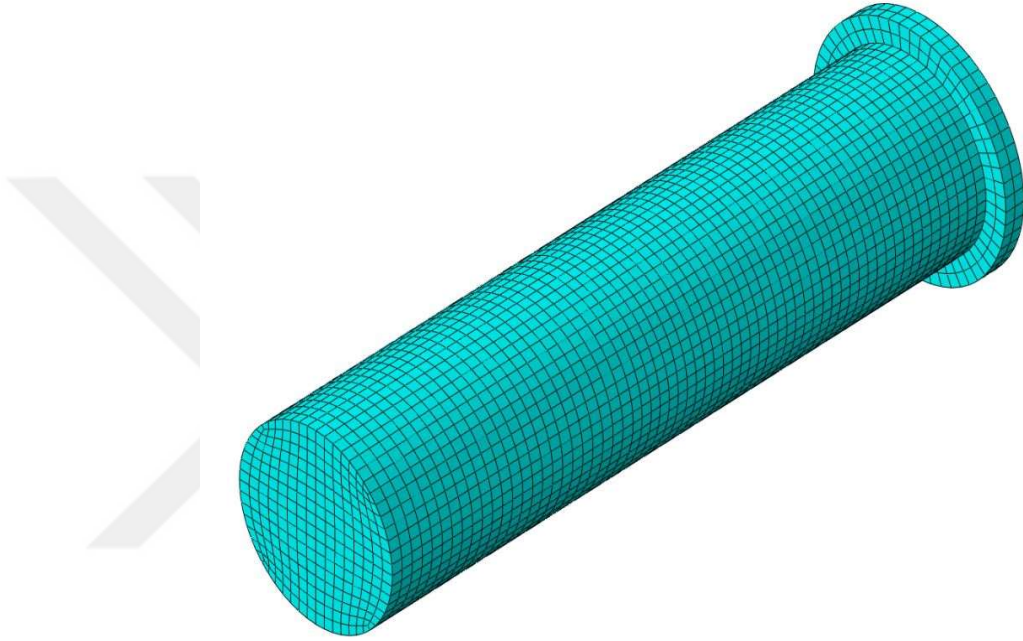
Şekil 4.10 Jominy deney cihazında AISI 1050 çeliği test numunesi üzerinden elde edilen soğuma eğrisi

Isıl işlem modellemesi yapabilen bir ticari yazılım olan ABAQUS kullanılarak Jominy testi simüle edildi. Şekil 4.11 de görüldüğü gibi bu modellemeye rastgele bir değer olarak programa girilen konveksiyon katsayısı sonucu deney numunesi üzerindeki sıcaklık değişimleri teorik olarak hesaplanmaktadır.



Şekil 4.11 ABAQUS sonlu elemanlar yazılımı kullanılarak jominy testi simülasyon görünümü

FEM yazılımlarından birisi olan ABAQUS programında soğutulan numune paça için matematiksel model kurulduktan sonra alt elemanlar ve bağlantı noktalarının oluşturduğu yapı bir ağ görünümündedir. Bununla ilgili görsel Şekil 4.12 da görülmektedir.



Şekil 4.12 ABAQUS sonlu elemanlar yazılımı kullanılarak oluşturulan sonlu elemanlar ağı

Bu çalışmada, AISI 1050 çeliğinin jominy numunesi boyutlarında ayrıntılı modeli oluşturulmuştur. İkinci aşamada, numune üzerine gelen termal değişimlerinin görülmesi için, sonlu elemanlar yöntemi gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar, tasarım ve imalatı tarafımızca yapılan jominy deney düzeneğinde elde edilen deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Bu çalışmada östenitleme sıcaklığına kadar ısıtılan jominy numunesinin soğutucu sıvı ile soğutulmasındaki sıcaklık değişimlerini sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak belirlenmesi amaçlanmıştır. Hazırlanan sonlu elemanlar modeli, deney koşullarına uygun koşullarda çalıştırılmış ve farklı konveksiyon katsayıları verilerek zaman soğutma eğrileri oluşturulmuştur. Deneysel sonuçlarından elde edilen eğri ile uyumlu modelleme eğrisi belirlenmiştir. Bu karşılaştırma işleminin

yapılabilmesi için ABAQUS sonlu elemanlar yazılımında bilgi girişleri Şekil 4.13, Şekil 4.14 ve Şekil 4.15 sırası ile uygulanarak yapılan çalışmalar teze eklenmiştir.

Simülasyon için kullanılan ABAQUS sonlu elemanlar yazılımında, malzeme mekanik özelliklerinden olan iletkenlik Şekil 4.13’de gösterilmiştir.

Edit Material

Name: Steel-C1050

Description:

Material Behaviors

- Conductivity
- Density
- Specific Heat

General Mechanical Thermal Electrical/Magnetic Other

Conductivity

Type: Isotropic

Use temperature-dependent data

Number of field variables: 0

Data

	Conductivity
1	49.8

OK Cancel

Şekil 4.13 ABAQUS sonlu elemanlar yazılımında iletkenlik bilgi girişi

Simülasyon için kullanılan ABAQUS sonlu elemanlar yazılımında, malzeme mekanik özelliklerinden olan yoğunluk Şekil 4.14’de gösterilmiştir.

Edit Material [X]

Name: Steel-C1050

Description: []

Material Behaviors

- Conductivity
- Density**
- Specific Heat

General Mechanical Thermal Electrical/Magnetic Other

Density

Distribution: Uniform [v] []

Use temperature-dependent data

Number of field variables: 0 []

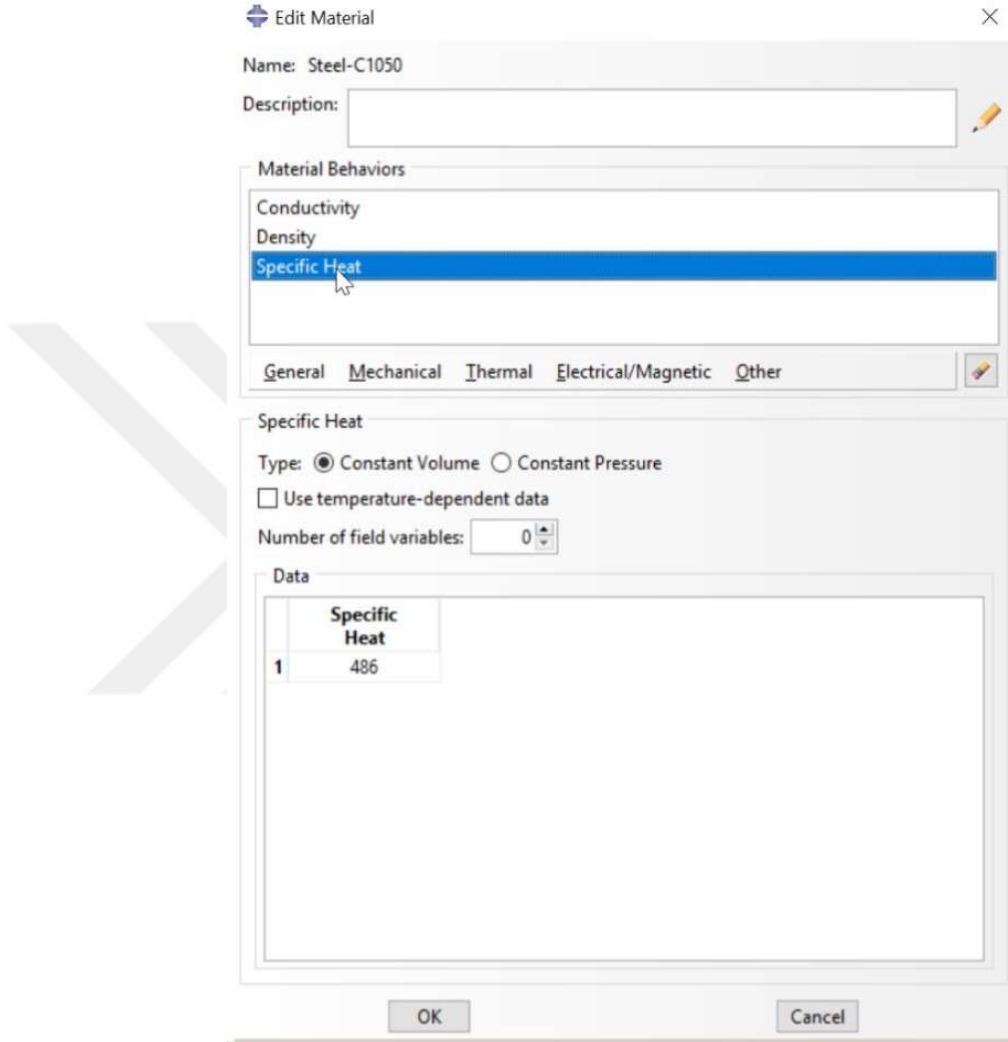
Data

	Mass Density
1	7850

OK Cancel

Şekil 4.14 ABAQUS sonlu elemanlar yazılımında yoğunluk bilgi girişi

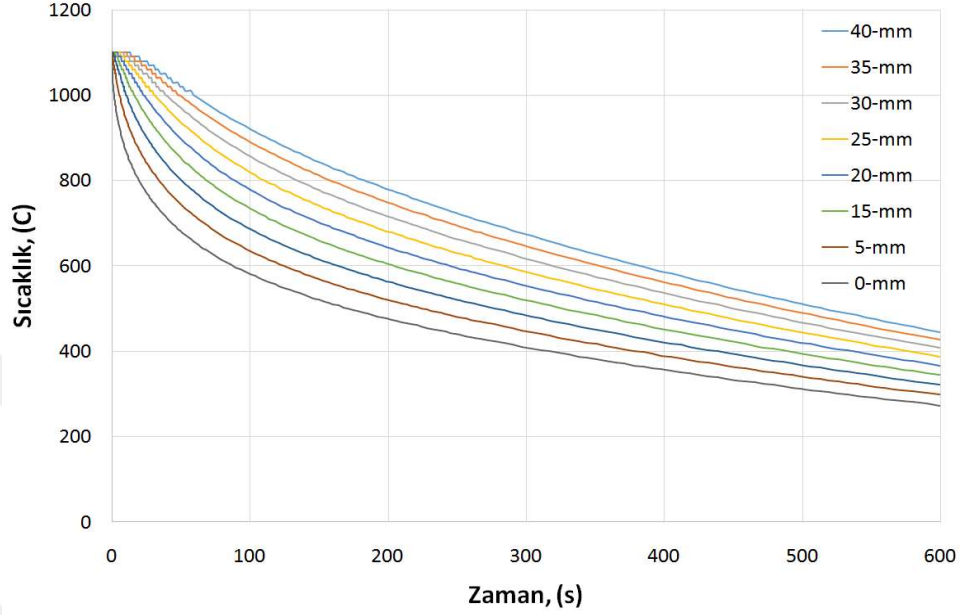
Simülasyon için kullanılan ABAQUS sonlu elemanlar yazılımında, malzeme mekanik özelliklerinden olan özgül ısı Şekil 4.15’de gösterilmiştir.



Şekil 4.15 ABAQUS sonlu elemanlar yazılımında özgül ısı bilgi girişi

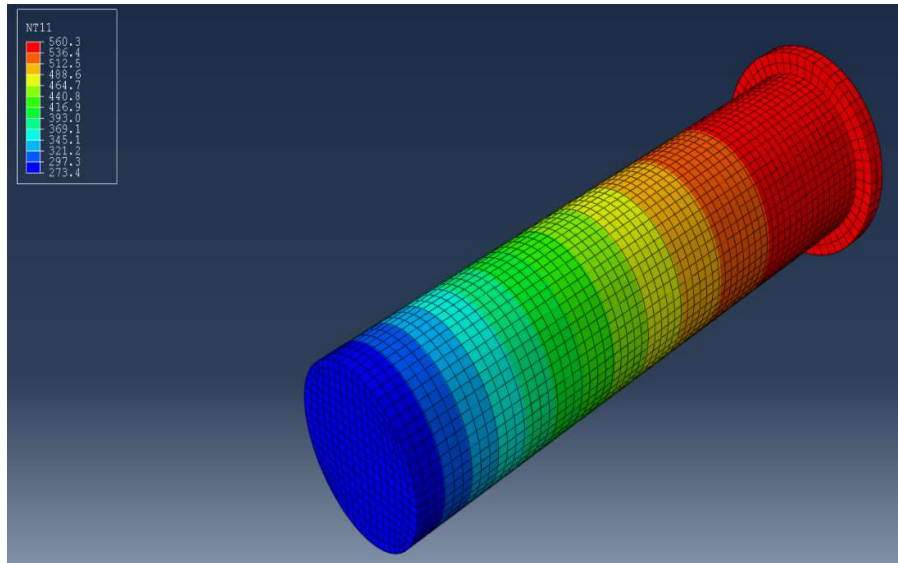
Ticari yazılımdan elde edilen veriler kullanılarak modellenen test numunesine ait sıcaklık zaman grafikleri aşağıda sıralı olarak verilecektir. Bu grafikler modellemeye girilen konveksiyon katsayısına göre değişiklik göstermektedir. Yaptığımız deney sonucunda elde ettiğimiz grafikte örtüşen modellemedeki grafiğin uyumuna göre tespit ettik. Bu amaçla modellemedeki değişkenlerden birisi olan konveksiyon katsayısına 1, 2, 3, 4, 5, 7.5, 10, 15, 20, 25 kW/m²K değerlerini verdik. Elde ettiğimiz grafikleri sıralı şekilde bu tezde belirttik.

Bu çalışmada FEM yazılımlarından olan ABAQUS ticari yazılımına $1 \text{ kW/m}^2\text{K}$ konveksiyon katsayı bilgi girişini yaparak aşağıda görülmekte olan zaman sıcaklık eğrisi ile modelleme simülasyonuna ulaşılmıştır. (Şekil 4.16), . (Şekil 4.17)



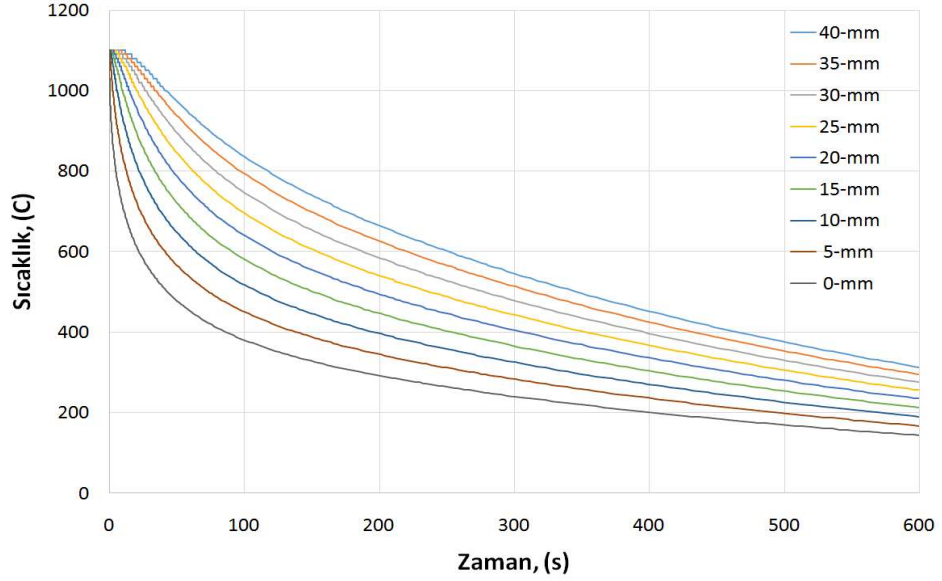
Şekil 4.16 Modelleme sonrası jominy test numunesi boyut standartları ve soğuma eğrisi

$h = 1 \text{ kW/m}^2\text{K}$ için elde ettiğimiz zamana göre sıcaklık değişimini gösteren simülasyon Şekil 4.17 görüldüğü gibidir.



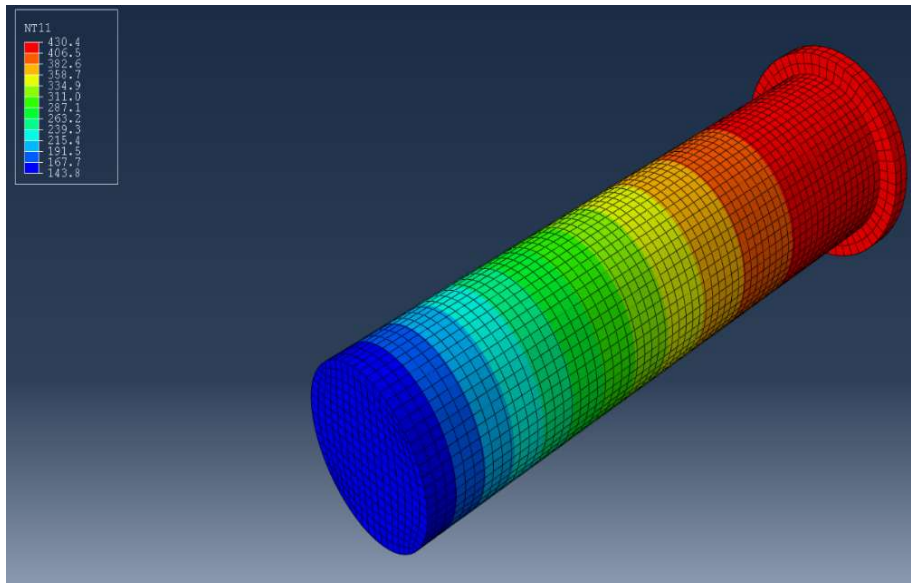
Şekil 4.17 $h = 1 \text{ kW/m}^2\text{K}$ için ABAQUS sonlu elemanlar yazılım modellemesi

Bu çalışmada FEM yazılımlarından olan ABAQUS ticari yazılımına $2 \text{ kW/m}^2\text{K}$ konveksiyon katsayı bilgi girişini yaparak aşağıda görülmekte olan zaman sıcaklık eğrisi ile modelleme simülasyonuna ulaşılmıştır. (Şekil 4.18), (Şekil 4.19)



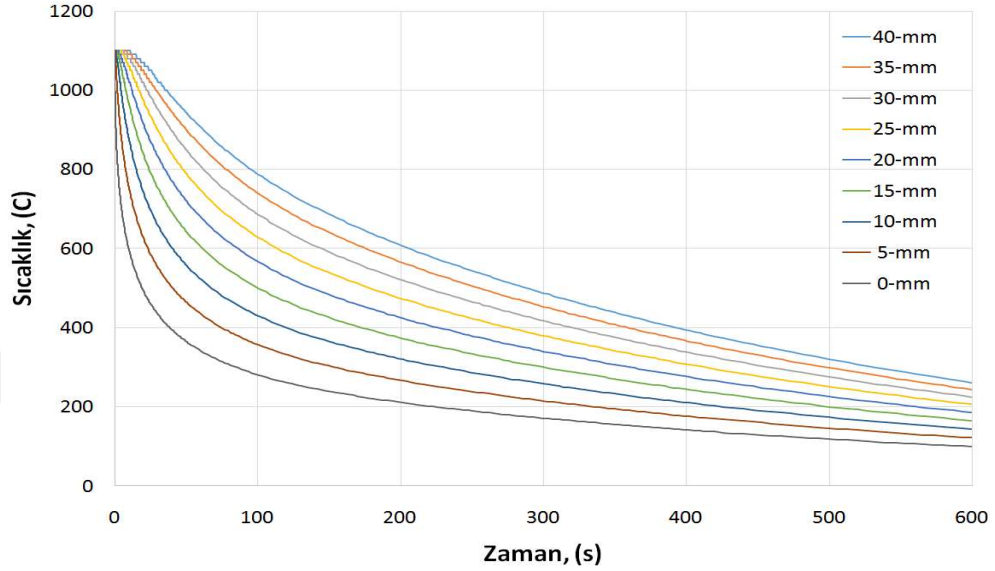
Şekil 4.18 Modelleme sonrası jominy test numunesi boyut standartları ve soğuma eğrisi

$h = 2 \text{ kW/m}^2\text{K}$ için elde ettiğimiz zamana göre sıcaklık değişimini gösteren simülasyon Şekil 4.19 görüldüğü gibidir.



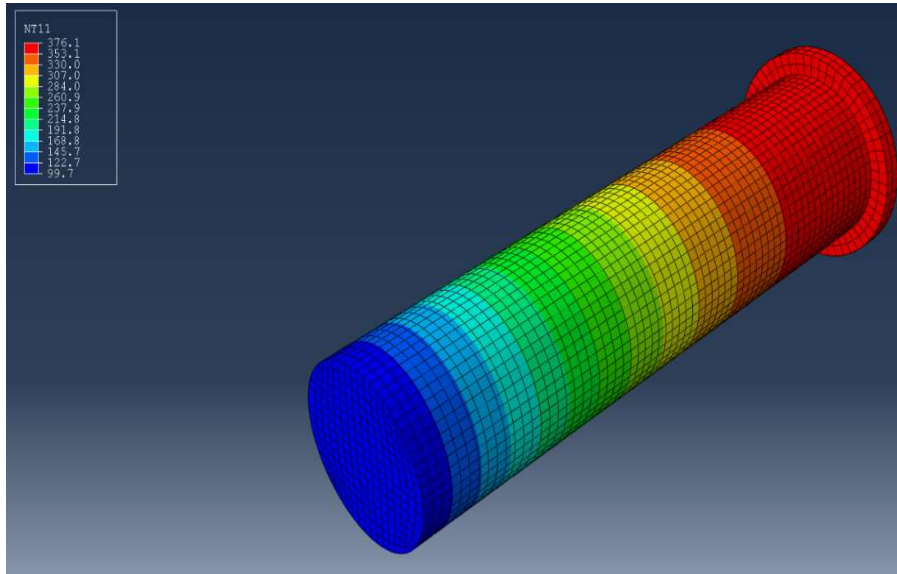
Şekil 4.19 $h = 2 \text{ kW/m}^2\text{K}$ için ABAQUS sonlu elemanlar yazılım modellemesi

Bu çalışmada FEM yazılımlarından olan ABAQUS ticari yazılımına 3 kW/m²K konveksiyon katsayı bilgi girişini yaparak aşağıda görülmekte olan zaman sıcaklık eğrisi ile modelleme simülasyonuna ulaşılmıştır. (Şekil 4.20), (Şekil 4.21)



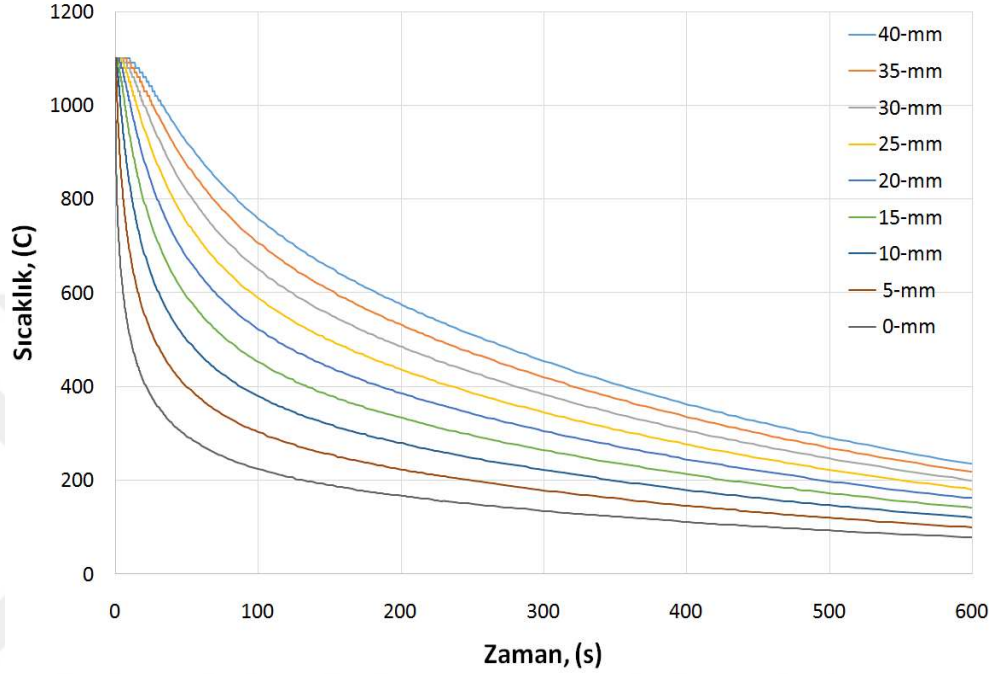
Şekil 4.20 Modelleme sonrası jominy test numunesi boyut standartları ve soğuma eğrisi

$h = 3 \text{ kW/m}^2\text{K}$ için elde ettiğimiz zamana göre sıcaklık değişimini gösteren simülasyon Şekil 4.21 görüldüğü gibidir.



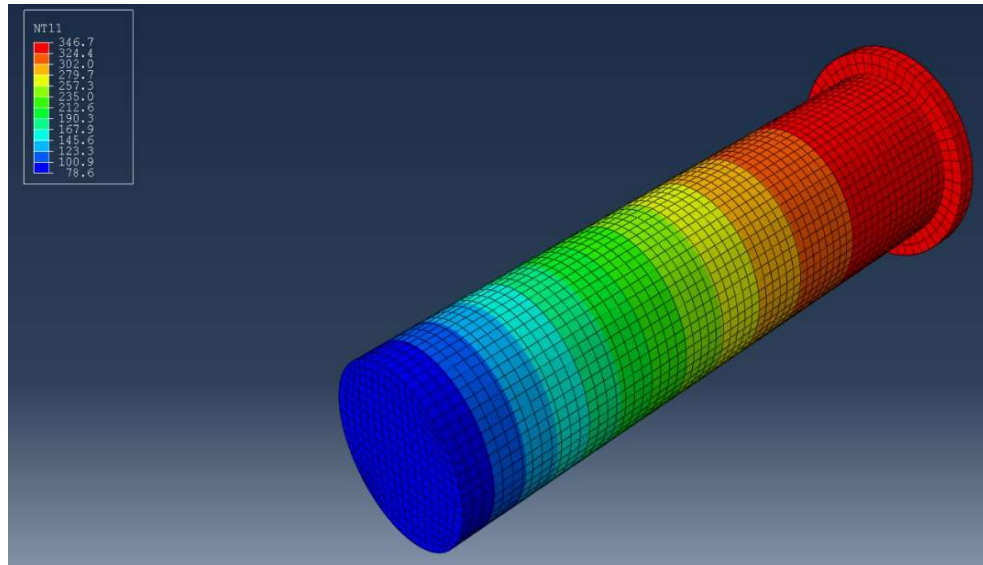
Şekil 4.21 $h = 3 \text{ kW/m}^2\text{K}$ için ABAQUS sonlu elemanlar yazılım modellemesi

Bu çalışmada FEM yazılımlarından olan ABAQUS ticari yazılımına $4 \text{ kW/m}^2\text{K}$ konveksiyon katsayı bilgi girişini yaparak aşağıda görülmekte olan zaman sıcaklık eğrisi ile modelleme simülasyonuna ulaşılmıştır. (Şekil 4.22), (Şekil 4.23)



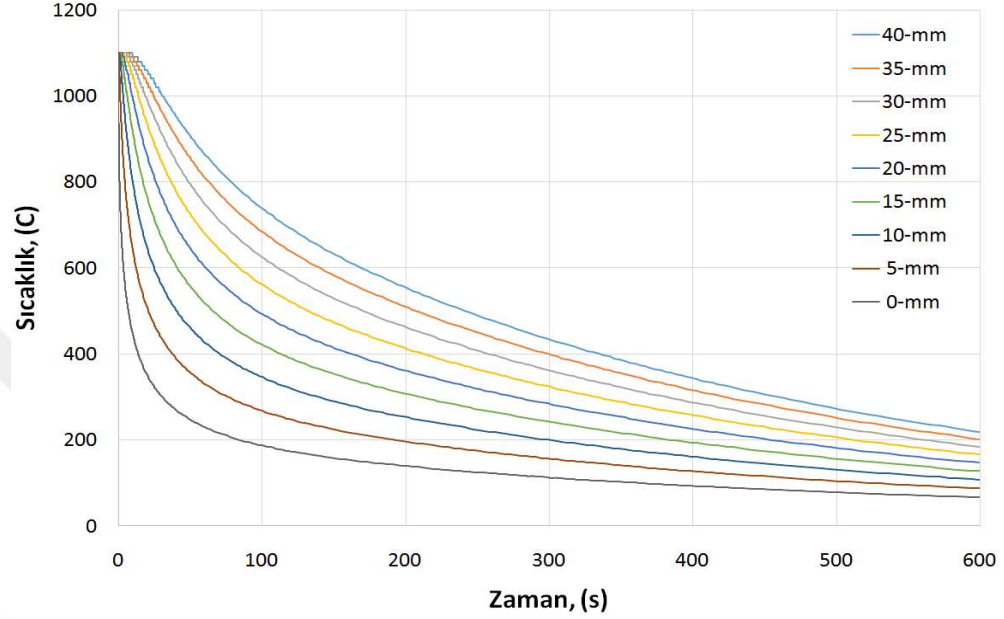
Şekil 4.22 Modelleme sonrası jominy test numunesi boyut standartları ve soğuma eğrisi

$h = 4 \text{ kW/m}^2\text{K}$ için elde ettiğimiz zamana göre sıcaklık değişimini gösteren simülasyon Şekil 4.23 görüldüğü gibidir.



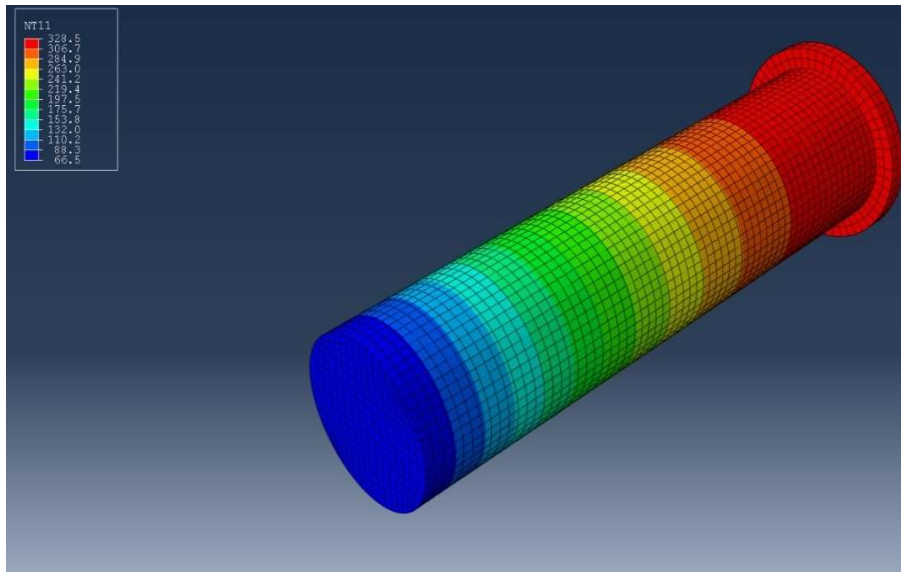
Şekil 4.23 $h = 4 \text{ kW/m}^2\text{K}$ için ABAQUS sonlu elemanlar yazılım modellemesi

Bu çalışmada FEM yazılımlarından olan ABAQUS ticari yazılımına 5 kW/m²K konveksiyon katsayı bilgi girişini yaparak aşağıda görülmekte olan zaman sıcaklık eğrisi ile modelleme simülasyonuna ulaşılmıştır. (Şekil 4.24), (Şekil 4.25)



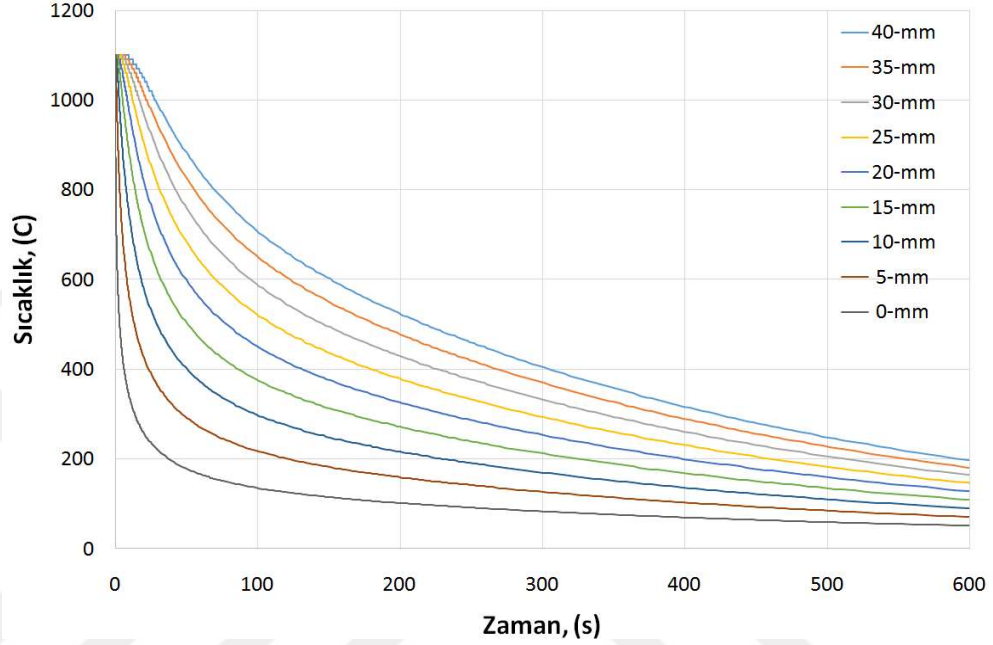
Şekil 4.24 Modelleme sonrası jominy test numunesi boyut standartları ve soğuma eğrisi

$h = 5 \text{ kW/m}^2\text{K}$ için elde ettiğimiz zamana göre sıcaklık değişimini gösteren simülasyon Şekil 4.25 görüldüğü gibidir.



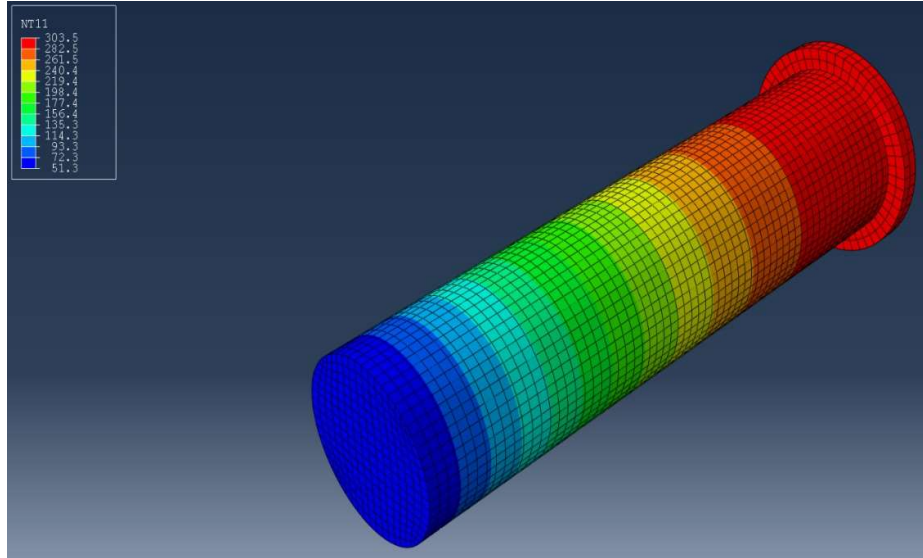
Şekil 4.25 $h = 5 \text{ kW/m}^2\text{K}$ için ABAQUS sonlu elemanlar yazılım modellemesi

Bu çalışmada FEM yazılımlarından olan ABAQUS ticari yazılımına $7.5 \text{ kW/m}^2\text{K}$ konveksiyon katsayı bilgi girişini yaparak aşağıda görülmekte olan zaman sıcaklık eğrisi ile modelleme simülasyonuna ulaşılmıştır. (Şekil 4.26), (Şekil 4.27)



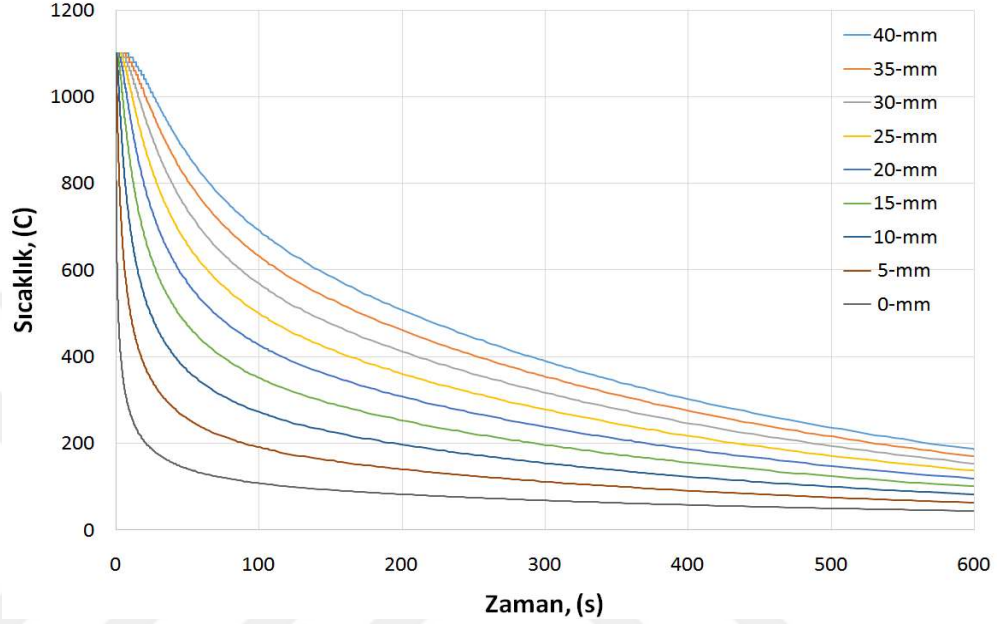
Şekil 4.26 Modelleme sonrası jominy test numunesi boyut standartları ve soğuma eğrisi

$h = 7.5 \text{ kW/m}^2\text{K}$ için elde ettiğimiz zamana göre sıcaklık değişimini gösteren simülasyon Şekil 4. 27 görüldüğü gibidir.



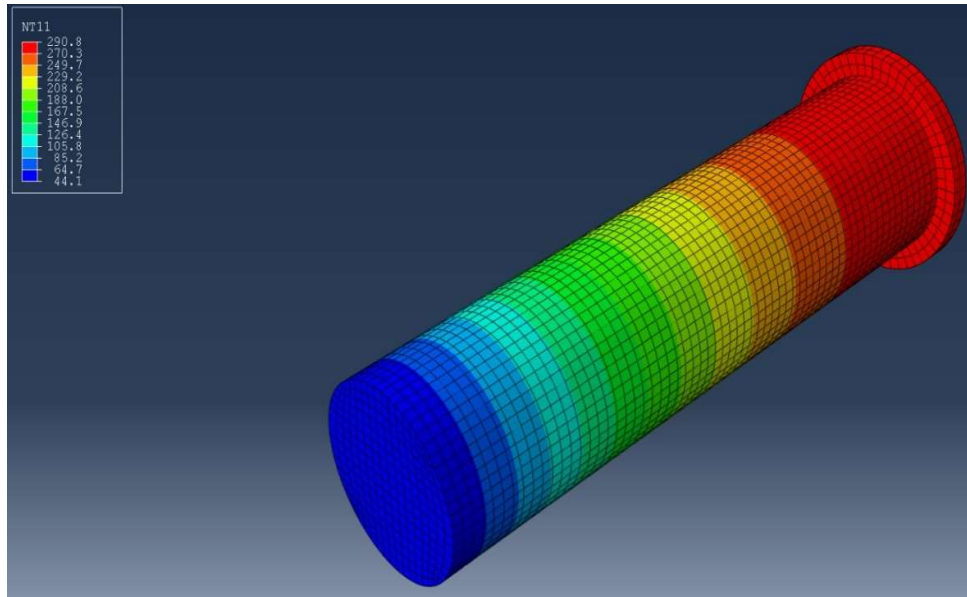
Şekil 4.27 $h = 7.5 \text{ kW/m}^2\text{K}$ için ABAQUS sonlu elemanlar yazılım modellemesi

Bu çalışmada FEM yazılımlarından olan ABAQUS ticari yazılımına $10 \text{ kW/m}^2\text{K}$ konveksiyon katsayı bilgi girişini yaparak aşağıda görülmekte olan zaman sıcaklık eğrisi ile modelleme simülasyonuna ulaşılmıştır. (Şekil 4.28), (Şekil 4.29)



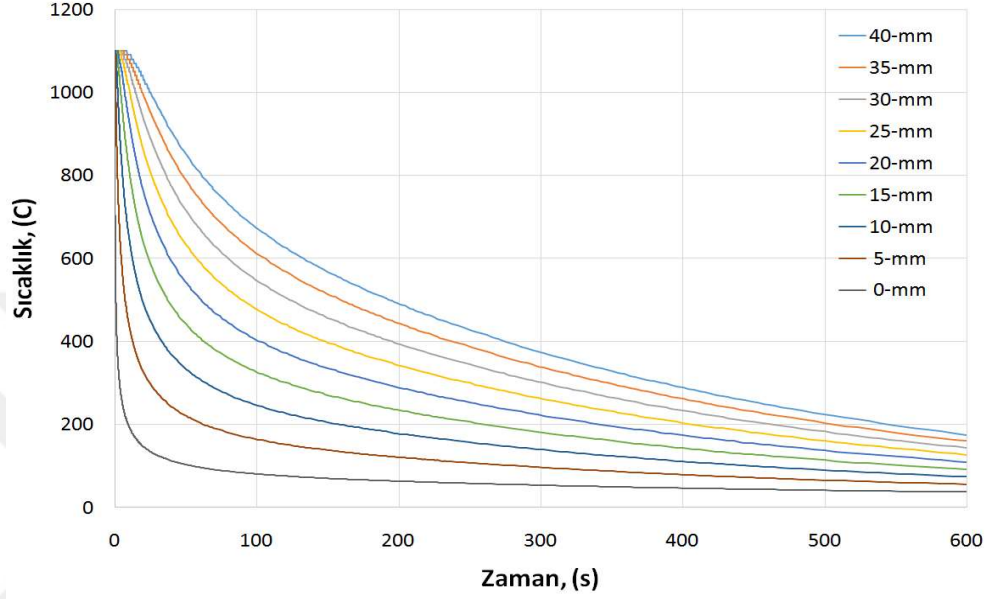
Şekil 4.28 Modelleme sonrası jominy test numunesi boyut standartları ve soğuma eğrisi

$h = 10 \text{ kW/m}^2\text{K}$ için elde ettiğimiz zamana göre sıcaklık değişimini gösteren simülasyon Şekil 4. 29 görüldüğü gibidir.



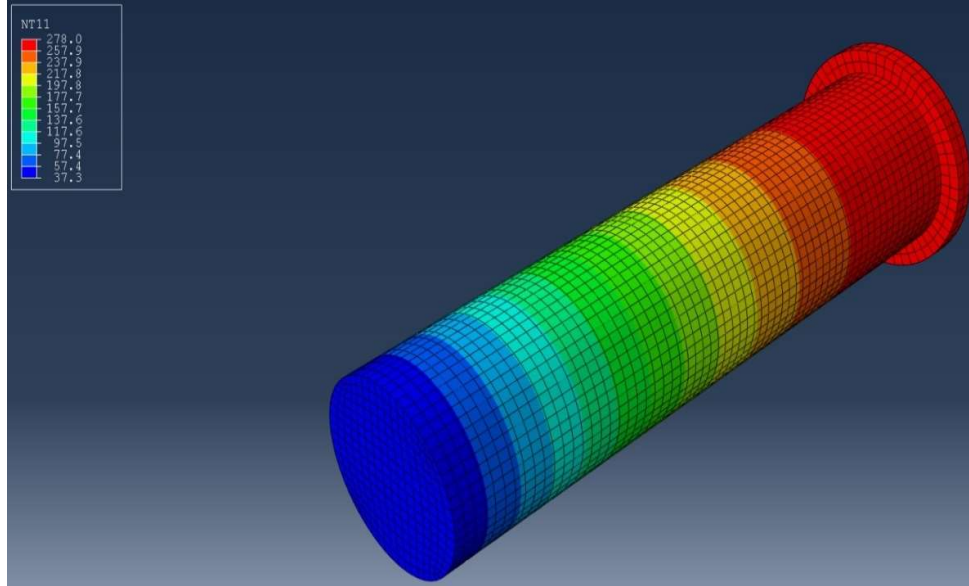
Şekil 4.29 $h = 10 \text{ kW/m}^2\text{K}$ için ABAQUS sonlu elemanlar yazılım modellemesi

Bu çalışmada FEM yazılımlarından olan ABAQUS ticari yazılımına $15 \text{ kW/m}^2\text{K}$ konveksiyon katsayı bilgi girişini yaparak aşağıda görülmekte olan zaman sıcaklık eğrisi ile modelleme simülasyonuna ulaşılmıştır. (Şekil 4.30), (Şekil 4.31)



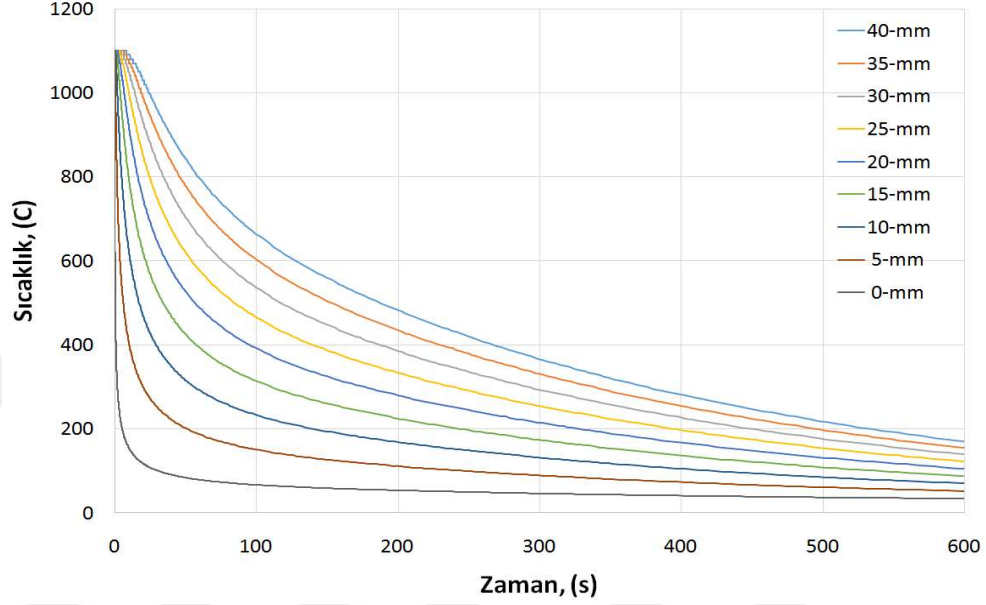
Şekil 4.30 Modelleme sonrası jominy test numunesi boyut standartları ve soğuma eğrisi

$h = 15 \text{ kW/m}^2\text{K}$ için elde ettiğimiz zamana göre sıcaklık değişimini gösteren simülasyon Şekil 4. 31 görüldüğü gibidir.



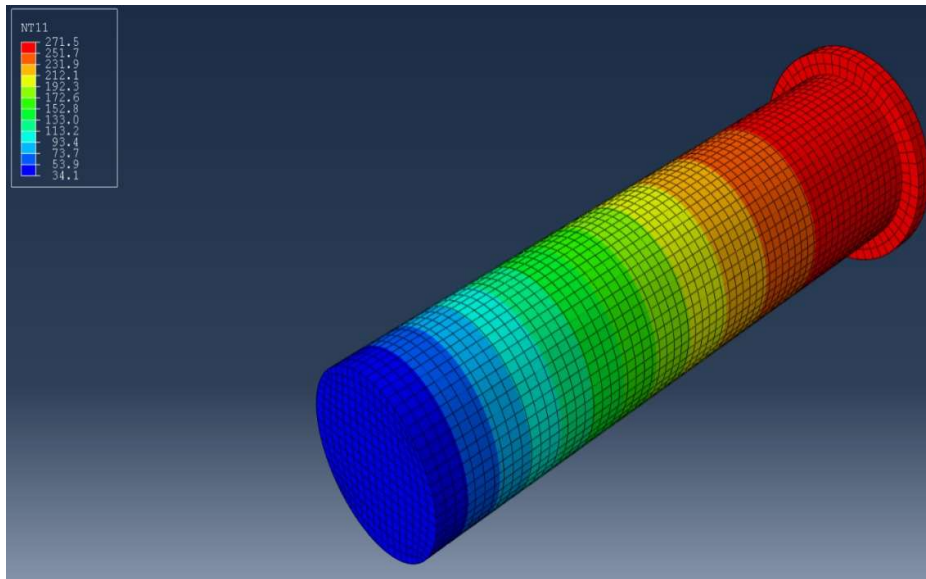
Şekil 4.31 $h = 15 \text{ kW/m}^2\text{K}$ için ABAQUS sonlu elemanlar yazılım modellemesi

Bu çalışmada FEM yazılımlarından olan ABAQUS ticari yazılımına 20 kW/m²K konveksiyon katsayı bilgi girişini yaparak aşağıda görülmekte olan zaman sıcaklık eğrisi ile modelleme simülasyonuna ulaşılmıştır. (Şekil 4.32), (Şekil 4.33)



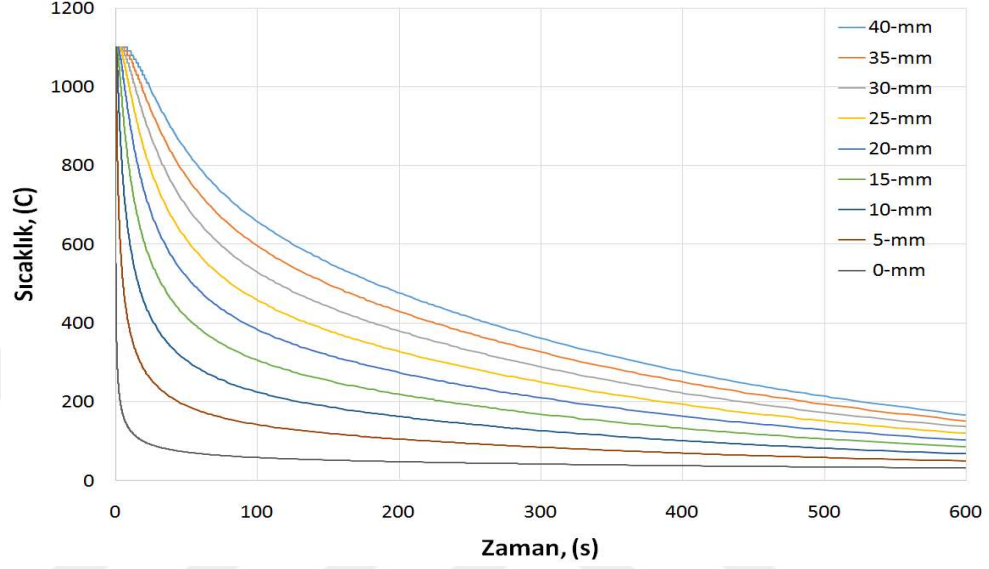
Şekil 4.32 Modelleme sonrası jominy test numunesi boyut standartları ve soğuma eğrisi

$h = 20 \text{ kW/m}^2\text{K}$ için elde ettiğimiz zamana göre sıcaklık değişimini gösteren simülasyon Şekil 4.33 görüldüğü gibidir.



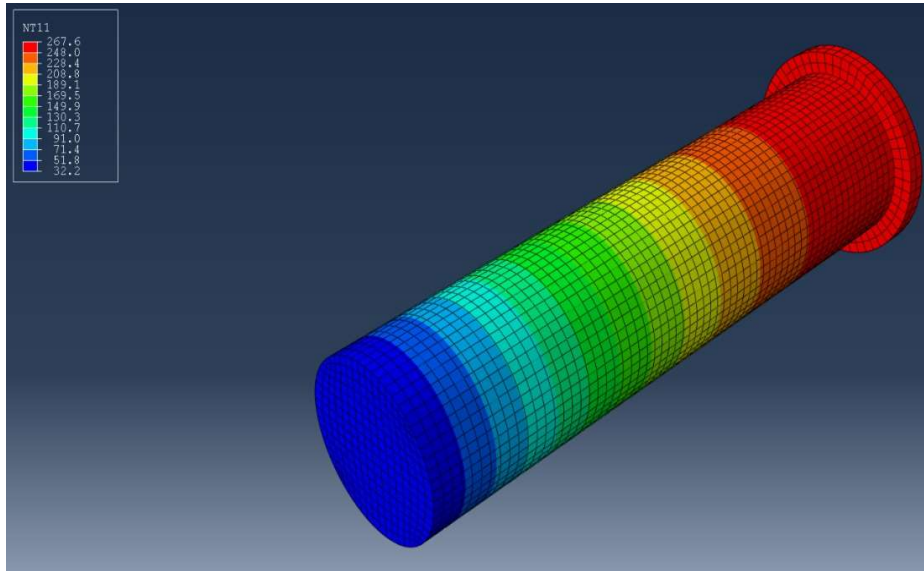
Şekil 4.33 $h = 20 \text{ kW/m}^2\text{K}$ için ABAQUS sonlu elemanlar yazılım modellemesi

Bu çalışmada FEM yazılımlarından olan ABAQUS ticari yazılımına $25 \text{ kW/m}^2\text{K}$ konveksiyon katsayı bilgi girişini yaparak aşağıda görülmekte olan zaman sıcaklık eğrisi ile modelleme simülasyonuna ulaşılmıştır. (Şekil 4.34), (Şekil 4.35)



Şekil 4.34 Modelleme sonrası jominy test numunesi boyut standartları ve soğuma eğrisi

$h = 25 \text{ kW/m}^2\text{K}$ için elde ettiğimiz zamana göre sıcaklık değişimini gösteren simülasyon Şekil 4. 35 görüldüğü gibidir.



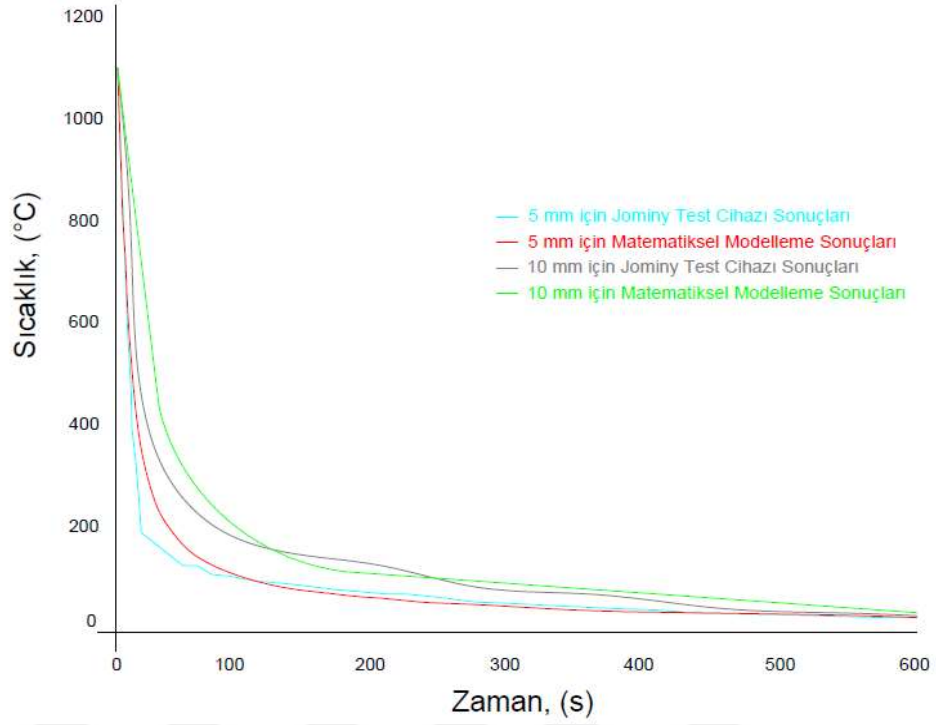
Şekil 4.35 $h = 25 \text{ kW/m}^2\text{K}$ için ABAQUS sonlu elemanlar yazılım modellemesi

Ticari yazılımla test cihazı sıcaklık zaman grafikleri bahsedilen yöntemlerle çizildikten sonra grafikleri kıyaslanıp, grafiklerin örtüşmesi beklenir. Örtüşme olana kadar ticari yazılıma 1, 2, 3, 4, 5, 7.5, 10, 15, 20, 25 kW/m²K konveksiyon katsayısı değerleri sırası ile girilmiştir. Örtüşme olduğu durumdaki ticari yazılıma verilen konveksiyon katsayısı, deney yapıldığı koşullardaki değişkenlerden (soğutucu sıvının debisi, sıcaklığı ve türü, test numunesinin yüzey pürüzlülüğü ve malzeme türü) kaynaklanan gerçek konveksiyon katsayısı olarak tespit edilmiştir. Bu çalışmada konveksiyon katsayısı 15 kW/m²K değerine göre ABAQUS Sonlu Elemanlar Modellemesiyle çizilen zaman soğuma grafiğiyle, Jominy deney numunesinden elde edilen zaman soğuma grafiğinin tamamen örtüştüğü görülmüştür.

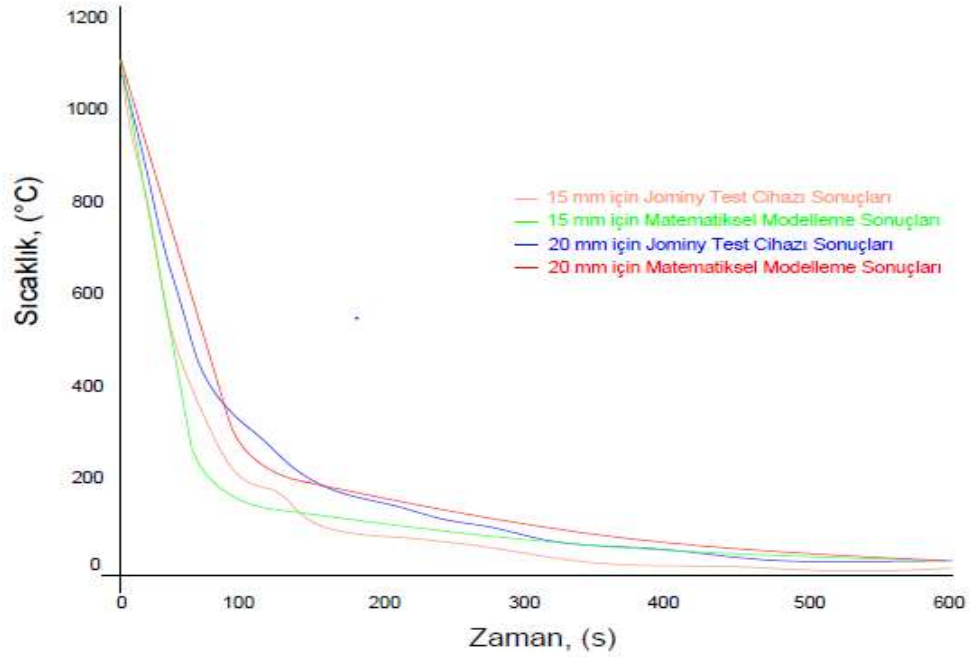
Test cihazında, numune parçasının en alt ucu olan alın kısmı ile alından 40 mm yukarıda olan nokta arasındaki sıcaklık bilgileri alınmış ve alınan bilgiler doğrultusunda sıcaklık-zaman soğuma eğrisi çizilmiştir. Çalışmanın devamında ABAQUS sonlu elemanlar yöntemi ile aynı koşullar sağlanarak farklı konveksiyon katsayıları atamak sureti ile soğuma eğrileri çizilmiştir. Test cihazındaki soğuma eğrisine en yakın modelleme eğrisindeki konveksiyon katsayısı ilgili koşullardaki konveksiyon katsayısı olarak kabul edilmiştir. Örtüşmenin daha iyi anlaşılabilmesi için Jominy testinde kullanılan numune parçasının alt ucundan yukarı doğru 5mm aralıklarla noktalar belirlenmiştir. Bu noktaları 5mm-10mm, 15mm-20mm, 25mm-30mm, 35mm-40mm şeklinde guruplara ayırarak aşağıda Şekil 4.34, Şekil 4.35, Şekil 4.36, Şekil 4.37 de üst üste örtüşmeleri gösterilmiştir.

Numune parçasının üzerinden 5mm ile 10mm noktasında oluşan soğuma eğrisi ile aynı koşullardaki test düzeneğinden aldığımız 5mm ile 10mm noktasının soğuma eğrisi mukayese edilerek Şekil 4.34 de gösterilmiştir. Test grafiği ile en yakın modelleme grafiği birbiri üzerine bindirilmiştir.

Numune parçasının üzerinden 15mm ile 20mm noktasında oluşan soğuma eğrisi ile aynı koşullardaki test düzeneğinden aldığımız 15mm ile 20mm noktasının soğuma eğrisi mukayese edilerek Şekil 4.35 de gösterilmiştir. Test grafiği ile en yakın modelleme grafiği birbiri üzerine bindirilmiştir.

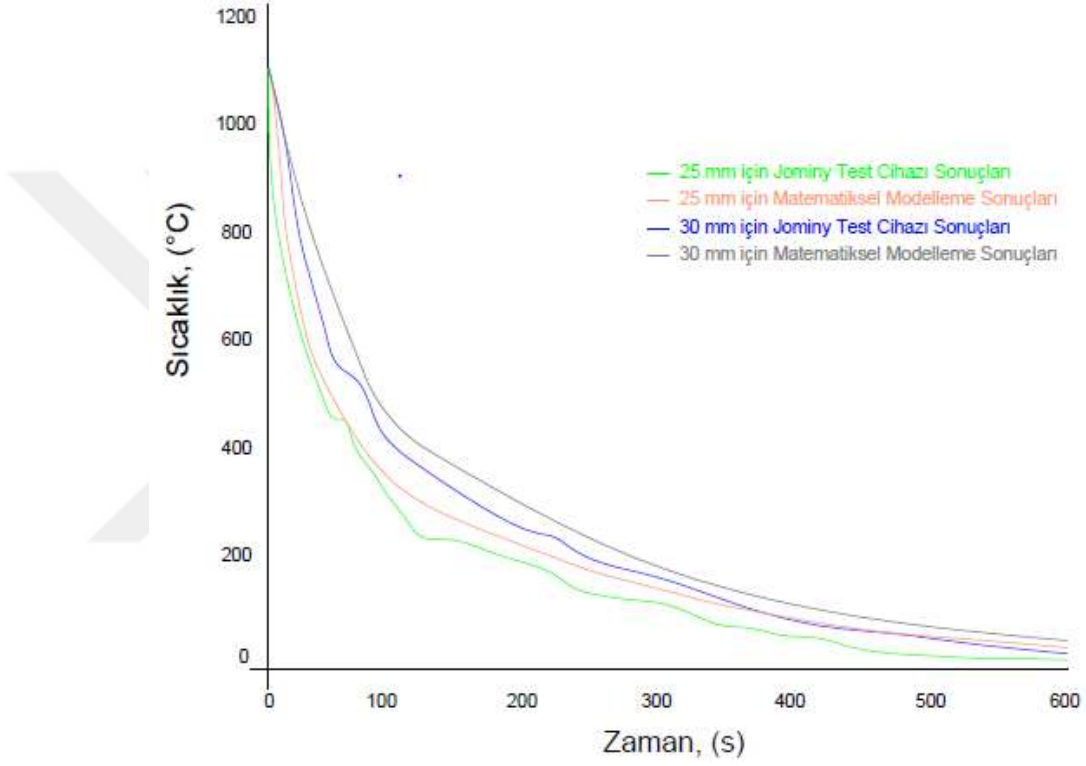


Şekil 4.36 h; 15 kW/m²K için ABAQUS sonlu elemanlar yazılım modellemesi ile test grafiğinin 5 mm ile 10 mm noktalarında karşılaştırılması



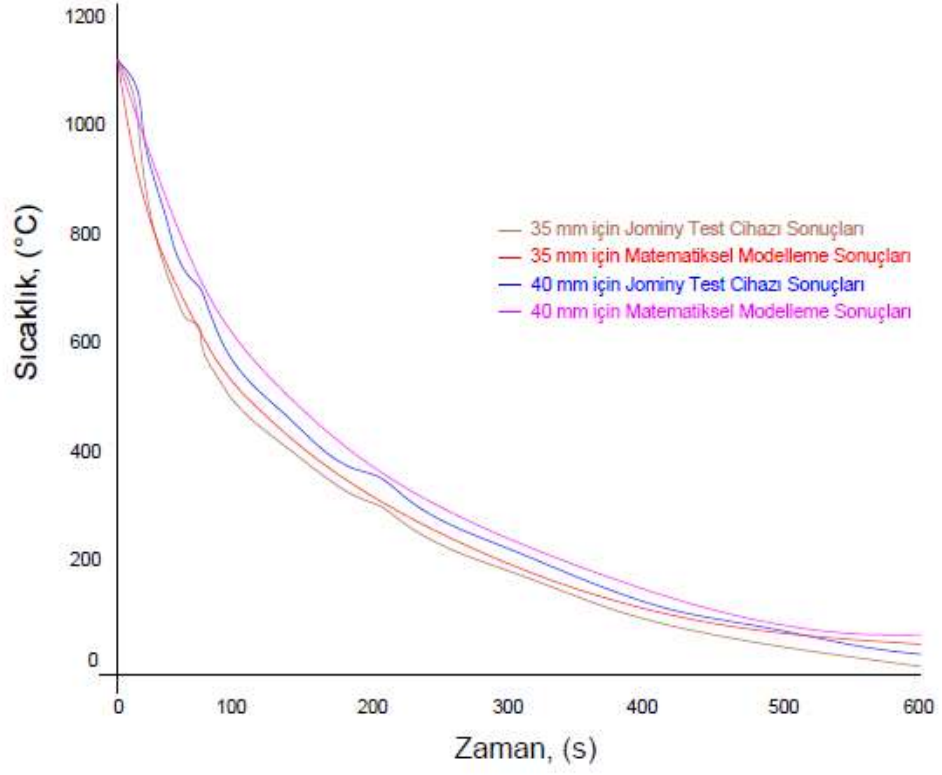
Şekil 4.37 h; 15 kW/m²K için ABAQUS sonlu elemanlar yazılım modellemesi ile test grafiğinin 15 mm ile 20 mm noktalarında karşılaştırılması

Numune parçasının üzerinden 25mm ile 30mm noktasında oluşan soğuma eğrisi ile aynı koşullardaki test düzeneğinden aldığımız 25mm ile 30mm noktasının soğuma eğrisi mukayese edilerek Şekil 4.36 de gösterilmiştir. Test grafiği ile en yakın modelleme grafiği birbiri üzerine bindirilmiştir.



Şekil 4.38 h; 15 kW/m²K için ABAQUS sonlu elemanlar yazılım modellemesi ile test grafiğinin 25 mm ile 30 mm noktalarında karşılaştırılması

Numune parçasının üzerinden 35mm ile 40mm noktasında oluşan soğuma eğrisi ile aynı koşullardaki test düzeneğinden aldığımız 35mm ile 40mm noktasının soğuma eğrisi mukayese edilerek Şekil 4.37 de gösterilmiştir. Test grafiği ile en yakın modelleme grafiği birbiri üzerine bindirilmiştir.



Şekil 4.39 h; 15 kW/m²K için ABAQUS sonlu elemanlar yazılım modellemesi ile test grafiğinin 35 mm ile 40 mm noktalarında karşılaştırılması

5. SONUÇ ve ÖNERİLER

5.1 Sonuçlar

Malzemelere uygulanan ısı işlemlerin modellenebilmesi günümüzde ticari yazılımlarla yapılmaktadır. Bu modellemeleri yapan ticari programlar, iş parçasının ısı işlem sonrasındaki mekanik özellikleri ve tane yapıları hakkında kapsamlı bilgiyi yüksek oranda doğrulukla kullanıcılarına sunmaktadır. Bahsi geçen hesaplamaları yapan modelleme programları ısı işlem ortamı ve malzeme bilgilerini kullanmaktadırlar. Isıl işlemde malzemenin soğuma hızı sonucu doğrudan etkiler. Malzemenin soğuma hızı, soğutucu akışkanın metalden ısı soğurma kabiliyeti anlamına gelmektedir.

Malzeme ile soğutucu sıvı arasındaki ısı taşınım miktarını sembolize eden konveksiyon katsayısının değerinin doğru tespit edilmesi ısı işlem modellemelerinin doğruluk oranını yükseltecektir. Konveksiyon katsayısının ısı işlem koşullarını içerecek şekilde teorik olarak bulunması gerçek değerden biraz farklı olacaktır. Teorik hesaplamalarda kullanılan yaklaşımlar, bazı koşulların ihmal edilmesi veya kabullerle sonuca gidilmesi, gerçek sonuçları oldukça etkilemektedir.

Soğutucu sıvının debisi, sıcaklığı ve türü konveksiyon değerini etkilediği gibi test numunesinin de yüzey pürüzlülüğü ve malzeme türü de aynı şekilde etkili olacaktır. Bahsi geçen değişkenlerin konveksiyon katsayısına etkileri tam anlamıyla bilinmemektedir. Bu bağlamda, yeniden tasarlanıp imal edilen Jominy test cihazı, ısı işleme etki eden değişkenleri (soğutucu sıvı türü, sıcaklığı ve uygulama hızı) kontrollü ve ölçülebilir şekilde test numunesine uygulayabilmektedir. Aynı zamanda geliştirilen cihaz test numunesinin sıcaklık değişimlerini farklı yöntemlerle (termokupl, InfraRed termometre ve termal kamera) ölçmektedir. Bu farklı yöntemler sıcaklık ölçmedeki hatanın en aza indirilmesi için kullanılmıştır.

Bu çalışma, ısı işlem de bilinmesi zaruri olan, konveksiyon katsayısının bulunmasında yeni bir yaklaşım sunmuştur. Sunulan yaklaşım ile ticari yazılım “sonlu elemanlar yöntemiyle modelleme” ve test cihazı kullanılarak elde edilen zaman-soğuma eğrileri kıyaslanıp, grafiklerin örtüşmesi sağlanmıştır. Örtüşme olduğu durumdaki ticari yazılıma verilen konveksiyon katsayısı, o anki değişkenlerden

(soğutucu sıvının debisi, sıcaklığı ve türü, test numunesinin yüzey pürüzlülüğü ve malzeme türü) kaynaklanan gerçek konveksiyon katsayısı olarak tespit edildi. Bu bağlamda, SAE/AISI 1050 çeliğinin Jominy alından su verme deneyi ve sonlu elemanlar modellemesi yapıldı.

Jominy cihazında test koşulları, ticari yazılımla (ABAQUS) girilerek AISI 1050 çeliğinin soğuma koşulları modellendi. Modelleme esnasında rastgele verilen konveksiyon katsayısına göre grafikler elde edildi. Bu grafikler arasından uygulama ile en iyi örtüşen sonuç grafiği Şekil 4.28 de verilmiştir. Şekil 4.10 ve Şekil 4.28 deki eğrilerin yaklaşık olarak örtüşmesi, jominy deney koşullarındaki soğutma parametrelerine (kullanılan soğutma sıvısı ve sıcaklığı, soğutma sıvı debisi, malzeme türü ve yüzey özellikleri gibi) ait konveksiyon katsayısının $15000 \text{ W/m}^2\text{K}$ olduğu tespit edildi.

5.2 Öneriler

Bu cihaz ile elde edilen yöntemde kullanılan sertleşebilirlik tayin metodu ile elde edilecek veriler endüstride matematiksel modelleme yazılımlarına veri girdisi sağlayarak metal ve alaşımların ısı işlemleri alanında kullanılabilir olup sanayiye uygulanabilir yapıdadır. Yöntem kapsamında yapılacak sertleşebilirlik tayinleriyle daha kesin sonuçlara ulaşılabileceğinden endüstride malzeme seçimini kolaylaştıracak ve daha ekonomik yapılabilmesini sağlayacaktır.

Konveksiyon katsayılarının (h) tespiti ileriye dönük termodinamik ve enerji transferini ilgilendiren çalışmalar için de bir veri tabanı oluşturacaktır. Günümüzde enerji sistemlerini ihtiva eden makine cihaz ve ekipmanlarının termal dizaynındaki en büyük problem konveksiyon katsayılarının (h) hesaplanmasındaki zorluklardır. Bu tez çalışması ile konveksiyon katsayılarının (h) tespitine yardımcı olacak bilimsel bulgular ortaya konmuş olacaktır.

KAYNAKLAR

- Alan, A., Bayrakçı, H.C. ve Özgür, A.E., 2005 “Akışkanlar Mekaniği Ve İklimlendirme Sistemlerinde Sonlu Elemanlar Metodunun Uygulanması” Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi (1) 49 – 54
- Aldaş, K., Palancıoğlu, H. ve Sen, F., 2009 “Thermal Stresses in Adhesively Bonded Double Lap Joints by FEM” Electronic Journal of Machine Technologies Vol: 6, No: 4, (55-64)
- Aldaş, K. ve Sen, F., 2011 “Investigation of Stresses on Dissimilar Metal Sheets Applied Hybrid Joints” Electronic Journal of Machine Technologies Vol: 8, No: 2, (1-12)
- Aldaş, K. ve Sen, F., 2012 “Karma Bağlantılı Kompozit Plaklarda Farklı Sıcaklıklar Etkisiyle Oluşan Gerilmelerin Analizi” KSU-JES Vol.: 15, No.:1
- Alyanak, İ ve Sen, F., 2015 “Paralel Çift Pim Uygulanmış ve Yapıştırılmış Karma Bağlantılı Kompozit Plakaların Çekme Yükü Altında Gerilme Analizi” Adıyaman Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi Ana Sayfa Cilt: 2, Sayı: 2
- Ammar, B. Y., Aoufi, A. ve Darrieulat M., 2012. “Influence of the cooling rate on the texture and the microstructure of Zircaloy-4 studied by means of a Jominy end- quench test”. Materials Science and Engineering A 556: 184–93.
- Aslantaş, K. ve Taşgetiren, S., 2002 “Bir Yüzey Altı Çatlağın Yayılma Davranışının Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Analizi” Turkish J. Eng. Env. Sci.26, 137 - 145.
- Astaf'ev, A. A. ve Levitan, L. M., 1999. “Controlled quenching sprayer and water-air cooling”. Metal Science and Heat Treatment 41: 54–57.
- Atıcı, U. ve Güllü, A., 2005. “A Comparison of the effects of plasma arc methods on surface roughness and hardness variations of AISI 304 and AISI 1050 Steels”. : 647–55.
- Bekçi, U., Varol, R. ve Taylan, F., 2006 “Farklı Malzemelerden İmal Edilmiş Modüler Dişli Çarkların ANSYS ile Gerilme Analizi” Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi (2) 19-26
- Bourouga, B. ve Gilles, J., 2010. “Roles of heat transfer modes on transient cooling by quenching process”. International Journal of Material Forming 3(2): 77–88.
- Campo, K.N., Andrade, D.R., Opini, V.C., Mello, M.G., Lopes, E.S.N. ve Caram, R., 2016. “On the hardenability of Nb-modified metastable beta Ti-5553 alloy”. Journal of Alloys and Compounds 667: 211–18.
- Crafts, W, ve Lamont, J.L., 1949. “Hardenability and Steel Selection”.

- Çakır, M. ve Özsoy, A., 2011. “Investigation of the correlation between thermal properties and hardenability of Jominy bars quenched with air-water mixture for AISI 1050 steel”. *Materials and Design* 32(5): 3099–3105.
- Çakır, M. ve Özsoy, A., 2013. “Jominy Numunesinde Deneysel Ve Teorik Isı Transferi İle Sertleşebilirlik Arasındaki İlişkinin Araştırılması”. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University* 28: 256–256.
- Çavdar, B., 2007. “Alaşımli Çeliklerin Sertleşebilme Kabiliyetinin Saptanması” Trakya Üniversitesi. Fen Bilimleri Enstitüsü. Çorlu Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı
- Çolak, B., 2002 “Sonlu Elemanlar Yöntemi İle Yassı Mamul Hadde Merdanelerinin Gerilme Analizi Ve Optimum Bombe Miktarının Belirlenmesi” Erdemir A.Ş. 67300 Ereğli/Zonguldak
- Franco, F.A., González, M.F.R., Campos, M.F. ve Padovese. L.R., 2013. “Relation Between Magnetic Barkhausen Noise and Hardness”. *J Nondestruct Eval* 32: 93–103.
- Gök, M., Ulu, S. ve Said, G., 2011. “1030 Çeliğinin Sertleşebilirliğine Tane Boyutunun Etkisi”. İçinde 6th International Advanced Technologies Symposium (IATS’11), , 329–33.
- Gök, K., Aydın, M. ve Gök, A., 2012 “The Static Analysis of Hoeing Machine Blade Using Finite Element Method” *Electronic Journal of Machine Technologies* Vol: 9, No: 4, (45-51)
- Groover, M.P., 2016. *Modern İmalatın Prensipleri.pdf*. 4. Basımda. NOBEL.
- Güler, H, ve R. Özcan. 2014. “Yüksek Karbonlu Çeliklere Su Verme İşleminin”. *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi* 19: 77–83.
- Cheng, H., Xieqing, H. ve Jianbin, X., 2003. “Comparison of surface heat-transfer coefficients between various diameter cylinders during rapid cooling”. *Journal of Materials Processing Technology* 138(1–3): 399–402.
- Hömberg, D., 1996. “A numerical simulation of the Jominy End-Quench test”. *Acta Metall.* 44(11): 4375–85.
- Kaya, S, Dağhan, B. ve Uyaner, M., 2002 “Delikli İzotropik Levhalarda Termal Gerilme Analizi” DEÜ Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi Cilt: 4 Sayı: 1 sh. 63-69
- Kobasko, N., 2008. “Hardness and Structure Prediction at the Core of Any Steel Part Using Jominy Standard Test”. İçinde 5th WSEAS Int. Conf. on Heat and Mass transfer (HMT’08), , 25–27.
- Kovačić, M., 2009. “Genetic programming and jominy test modeling”. *Materials and Manufacturing Processes* 24(7–8): 806–8.
- Köse, S., 2008. “AISI SAE 1040 2738 304 Çeliklerinin Sertleşme Kabiliyetlerinin Jominy Deney İle Araştırılması”. Afyon Kocatepe Üniversitesi.
- Köse, S. ve Sakin, R., 2010. “AISI-1040 ve AISI-P20 Çeliklerde Alaşım Oranları ve Mikroyapının Sertleşme Kabiliyetine Etkisi”. İçinde 2. Ulusal Tasarım

İmalat ve Analiz Kongresi, , 170–82.

- Krauss, G., 1990. “Heat Treatment and Processing Principles, Tempering of Steel”.
- Philippe, L.M., Loulou, T., Artioukhine, E., Rogeon, P., Carron, D. ve Quemener, J.J., 2002. “A numerical study for the estimation of a convection heat transfer coefficient during a metallurgical ‘Jominy end-quench’ test”. *International Journal of Thermal Sciences* 41(6): 517–27.
- Jae, L.S., Pavlina, E.J. ve Tyne, C.J.V., 2010. “Kinetics modeling of austenite decomposition for an end-quenched 1045 steel”. *Materials Science and Engineering A* 527(13–14): 3186–94.
- Victor, L.M., Niebuhr, D.V., Meekisho, L.L. ve Atteridge, D.G., 1998. “A computational model for the prediction of steel hardenability”. *Metallurgical and Materials Transactions B* 29(3): 661–72.
- Li, P.Y., Xiong, B.Q., Zhang, Y., Huli, Z., Zhu, B.H., Wang, F. ve Liu, H.W., 2012. “Quench sensitivity and microstructure character of high strength AA7050”. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China (English Edition)* 22(2): 268–74. [http://dx.doi.org/10.1016/S1003-6326\(11\)61170-9](http://dx.doi.org/10.1016/S1003-6326(11)61170-9).
- Lyman, T., 1971. *Heat Treating, Cleaning and Finishing (Metals Handbook, Volume 2)*. ed. Taylor. The Amazon Book Review.
- Küçük, M., 2002 “Analysis Of Thermal Stresses In The Upper Canine Coated by Aluminous Porcelain Reinforced Ceramics” *DEÜ Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi Cilt: 4 Sayı: 1 sh. 79-88*
- Narazaki, M, K., Osawa, A.S. ve Fuchizawa, S., 1999. “Influence of validity of heat transfer coefficients on simulation of quenching process of steel”. *İçinde 19th ASM Heat Treating Society Conference, , 600–607.*
- Narazaki, M., Kogawara, M., Shirayori, A. ve Fuchizawa, S., 2003. “Evaluation of heat transfer coefficient in Jominy End-quench test”. *Proc. of the 4th Int. Conference on Quenching and the Control of Distortion: 97–104.*
- Nunura, C.R.N., Carlos, A., Santos, D. ve Spim, J.A., 2015. “Numerical - Experimental correlation of microstructures, cooling rates and mechanical properties of AISI 1045 steel during the Jominy end-quench test”. *Materials and Design* 76: 230–43.
- Öztürk, O., 2013 “Sonlu Elemanlar Analizi” *CatiaTürk Türkiye’nin CAD-CAM Sitesi*
- Peter, F. ve Prabhu, K.N., 2007. “Effect of section size and agitation on heat transfer during quenching of AISI 1040 steel”. *Journal of Materials Processing Technology* 183(1): 1–5.
- Özçelik, S. ve Engin, S., 2009 “7000 Dwt Luk Bir Petrol Tankeri İçin Isıl Gerilme Analizi” *Tez (Yüksek Lisans) İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*
- Özgüder, O., Özbay, M. ve Adin, H., 2017 “Namlu İçeri Balistik Davranışın Sonlu Elemanlar Yöntemiyle Analizi” *Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi*

Dergisi Cilt: 8, Sayı: 3 609-620

- Özkan, M.T., Dündar, K. ve Gümüş, F., 2009 “Bilgisayar Destekli Helisel Yay Tasarımı Ve Sonlu Elemanlar Analizi” Tübav Bilim Dergisi Ana Sayfa, Cilt: 2, Sayı: 2
- Pietrzyk, M. ve Kuziak, R., 2011. “Computer aided interpretation of results of the Jominy test”. Archives of Civil and Mechanical Engineering 11(3): 707–22. <http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-84856241142&partnerID=tZOTx3y1>.
- Prabhudev, K. H., 2008. Handbook of Heat Treatment of Steels.pdf. McGraw-Hill. 2008.
- Sarıkavak, Y. ve Çoğun, C., 2010 “Elektro Erozyon İle İşlemede İşleme Mekanizmasının Isıl Modellenmesi” Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi Ana Sayfa Cilt: 25, Sayı: 3
- Smoljan, B., Iljkić, S., Hanza, S. ve Traven, F., 2009. “An analysis of modified Jominy-test”. Archives of Computational Materials Science and Surface Engineering 1(2): 120–24.
- Smoljan, B., 2002. “Numerical Simulation of Steel Quenching”. Journal of Materials Engineering and Performance 11(1): 75–79. <http://www.ingentaselect.com/rpsv/cgi-bin/cgi?ini=xref&body=linker&reqdoi=10.1361/105994902770344420>.
- Smoljan, B., 2006. “Prediction of mechanical properties and microstructure distribution of quenched and tempered steel shaft”. Journal of Materials Processing Technology 175(1–3): 393–97.
- Soncu, R., Yavuz, N. ve Ertan, R., 2010 “Korniş Usulü Tozaltı Kaynağı İle Kaynak Edilen St37 Malzemesinin Sonlu Elemanlar Yöntemi İle Termal Analizi” Uludağ Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi, Cilt 15, Sayı 1
- Arif, S., Narazaki, M., Kogawara, M. ve Shirayori, A., 2009. “A comparative study on determination method of heat transfer coefficient using inverse heat transfer and iterative modification”. Journal of Materials Processing Technology 209(10): 4627–32.
- Şen, F. ve Aldaş, K., 2010 “Sıcaklık Değişiminin Yapıştırılmalı ve Pimli Alüminyum Plakalardaki Gerilmeler Üzerine Etkisi” Tübav Bilim Dergisi Ana Sayfa, Cilt: 3, Sayı: 4
- Şen, F. ve Aldaş, K., 2011 “Effects of Using Different Metal Materials on Stresses in Metal-Composite Hybrid Joints” Çankaya University Journal of Science and Engineering Vol.: 8 , No:1, 1-13
- Taghizadeh, S., Safarian, A., Jalali, S. ve Salimiasl, A., 2013. “Developing a model for hardness prediction in water-quenched and tempered AISI 1045 steel through an artificial neural network”. Materials and Design 51: 530–35.
- Taher, G., Bejaoui, F., Hamdi, A. ve Yacoubi, N., 2008. “Correlation between thermal properties and hardness of end-quench bars for C48, 42CrMo4 and

- 35NiCrMo16 steels". *Thermochimica Acta* 473(1–2): 86–91.
- Thehning, K. E. 1984. *Çelik ve Isıl İşlem*. 2. baskı Butterworths. Topcu, Ahmet. 2015. "Sonlu Elemanlar Metodu".
- Topcu, M. ve Taşgetiren, S., 1998. 1998 Mühendisler için sonlu elemanlar metodu.pdf. Denizli: Pamukkale Üniversitesi.
- Trojan, F. 1992. "Materiales de Ingenieria y sus aplicaciones".
- Ucun, İ., Aslantaş, K. ve Apaydın, D., 2010 "Finite Element Modelling Of Turning Process Using Cutting Tool With Multilayer Coatings" *Electronic Journal of Machine Technologies* Vol: 7, No: 1, (69-82)
- Chen, X., Xiao, N., Li, G. ve Sun, G., 2014 "The Finite Element Analysis of Austenite Decomposition During Continuous Cooling In 22mnb5 Steel" *Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering*, Volume 22, Number 6 591
- Çengel, Y.A., 2011 "Isı ve Kütle Transferi" (3) University of Nevada Reno
- Yavuz, N., Özcan, R. ve Polat, G.F., 2005 "Tozaltı Kaynak Bağlantısının Sonlu Elemanlar Yöntemi İle Termal ve Mekanik Analizi" *Uludağ Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi* Cilt 10,Sayı 2
- Wang, D., Lo, W., Chien, W. ve Hwu, Y., 2012 "Computational Modeling of a Jominy Test" *Çin Makine Mühendisliği Topluluğu, Ulusal Bildiriler Kitabı Ulusal Sempozyum Otuzuncu Ulusal Üniversitesi İlanı*
- Yazdi, A.Z., Sajjadi, S.A., Zebarjad, S.M. ve Nezhad, S.M.M., 2008. "Prediction of hardness at different points of Jominy specimen using quench factor analysis method". *Journal of Materials Processing Technology* 199(1): 124–29.
- Zhang, J., Deng, Y., Yang, W., Hu, S. ve Zhang, X., 2014. "Design of the multi-stage quenching process for 7050 aluminum alloy". *Materials and Design* 56: 334–44. <http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2013.09.029>.

ÖZGEÇMİŞ

Yazar, 1979 yılında Adana Seyhan'da doğdu. İlkokul, Ortaokul ve Lise'yi Adana'da tamamladı. Atatürk Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği bölümünü 1997 yılında kazandı. Üniversiteden 2002 yılında mezun oldu. Askerliğini 2003 yılında tamamladı. Akabinde özel sektörde çalışmaya başlayan Soner YÜRÜK 2003-2004 arasında Rultrans Transmisyon A.Ş. de Satış Temsilcisi, 2004-2005 arasında Güney Doğal Gaz A.Ş. de Makine Bakım Şefi, 2005'den günümüze kadar ise Yazıcı Demir Çelik Turizm Ticaret A.Ş de Yatırım İmalat Toz Toplama Şefi olarak görev yapmaktadır.