

Umur Karagüzel

İşık Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine
Mühendisliği Bölümü, Őile, İstanbul

VICON Makine Sanayi ve Ticaret Ltd. Őti. ITU ARI
Teknokent, Maslak, 34469, İstanbul

Ali Taner Kuzu

Yeditepe Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi,
Malzeme ve Nano Teknoloji Müh. Bölümü,
Ataşehir, İstanbul

VICON Makine Sanayi ve Ticaret Ltd. Őti. ITU
ARI Teknokent, Maslak, 34469, İstanbul

Vedat Korap

Birinci Otomotiv Sanayi Ticaret Anonim Őirketi,
TAYSAD, Kocaeli

Hasan  ilingir

Birinci Otomotiv Sanayi Ticaret Anonim Őirketi,
TAYSAD, Kocaeli

Mustafa Bakkal*

İstanbul Teknik Üniversitesi, Makine Fakültesi,
Beyoğlu, 34437 İstanbul

VICON Makine Sanayi ve Ticaret Ltd. Őti. ITU ARI
Teknokent, Maslak, 34469, İstanbul

Makale Bilgisi:

Araştırma Makalesi

Gönderilme: 30-12-2019

Kabul: 06-08-2020

*Sorumlu Yazar: Mustafa Bakkal

Email: bakkalmu@itu.edu.tr

Sıcak Dövme Kalıplarına Infrared (Kızıl  tesi) Yöntemi ile  n Isıtma Uygulanmasına Yönelik Deneysel ve Teorik Analiz

Sıcak dövme işlemi, üretim teknolojisinin önemli bir parçasını oluşturur. Sıcak dövmeye uygulanan ısı enerjisi ile parçanın akma dayanımı azalır böylelikle Şekil verme kabiliyeti artarak daha karmaşık geometriye parçaların üretilmesine imk n tanır. Ancak artan sıcaklıkla birlikte kalıp dayanımında da düşüş yaşanması kalıp ömrünün azalmasına ve üretim maliyetlerinin artmasına neden olur. Kalıp ömrünü azaltan etkenlerden biri de kalıbın dövme işlemi süresince karşılaştığı yüksek sıcaklık farklarıdır, bunun önüne gecebilmek için dövme işlemi öncesinde kalıba ön ısıtma işlemi uygulanır. Bu çalışmada sıcak dövme sırasında dengeli ve homojen bir ön ısıtma için infrared ısıtıcı geliştirilmiş ve üretime uygulanmıştır. Infrared ısıtıcının verimi ısıtılacak kalıbın yüzey durumuna da bağlı olduğundan, çalışmada kalıp yüzeyi için çeşitli kaplamalar ve yüzey uygulamaları denemiş ve bunların verimleri karşılaştırılmıştır. Çalışmada ısıtma prosesinin sonlu elemanlar modeli de geliştirilmiş ve sıcaklık sonuçları deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Geliştirilen model ile sıcaklıkların en fazla %9'luk bir fark ile tahmin edilebileceği ortaya konulmuştur. Bu modelle ayrıca farklı kalıp geometri ve kalıp derinliğinde, istenilen sıcaklığa ulaşabilmek için gereken ısıtma süresi kolaylıkla belirlenebilir. Çalışma sonucunda infrared ısıtıcı ile kalıbın ön ısıtma işleminin homojen ve verimli bir Şekilde yapılabileceği gösterilmiştir.

Anahtar kelimeler: Sıcak dövme, infrared ısıtma, kalıp ısıtma, kalıp  mr 

1. GİRİŐ

Sıcak dövme işlemi, otomotiv sanayisi başta olmak üzere makina imalatı, havacılık, demir  elik sanayisi gibi birçok üretim sektöründe oldukça yoğun tercih edilen bir üretim tekniğidir. Günümüzde sadece Avrupa'da her sene 2 milyon tondan fazla  elik parçanın üretiminde sıcak dövme teknolojisinden faydalanılmaktadır [1]. Sıcak dövme işleminin tribolojik sistemi, 1000 C'nin üzerine ısıtılmış bir işparçasını, genellikle grafit bir yağlayıcıyı, hareketli bir üst kalıp ve sabit bir alt kalıp arasında meydana gelen plastik deformasyonu içermektedir. Böyle bir sistemde, takım malzemesi erozyon, plastik

deformasyon, ısı ve mekanik yorulma gibi hasar mekanizmalarına karşı dayanıklı olmalıdır [2]. Ancak sonuçta kalıbın hasara uğraması veya aşınması kaçınılmazdır böyle bir durumda işlenen parçada istenilen tolerans ve kalite sağlanamaz ve işlem verimliliği düşer. Bu durumda kalıp yüzeyi yeniden işlenmeli veya bu mümkün değilse kalıp değiştirilmelidir; fakat bu gerek takım malzemesi gerekse seri üretim durması nedeniyle ortaya çıkan maliyet nedeniyle üretim maliyetini arttırmaktadır. Özellikle takım maliyetinin toplam üretim maliyetinin %30 gibi bir oranda olduğu düşünüldüğünde kalıp ömrünün nedenli önemli olduğu daha iyi anlaşılacaktır

[3]. Ebara [4]'nın da belirttiği gibi kalıp ömrünü etkileyen önemli parametrelerden biri de kalıbın ön ısıtılmasıdır. Yukarıda da bahsedildiği gibi şekillendirilecek malzemeden malzemeye değişimle birlikte, çelik malzeme için sıcak dövme işleminde işparçası sıcaklığı 1000°C dolaylarındadır, bu nedenle soğuk kalıp bu sıcak işparçası ile karşılaştığında hem parçayı soğutur hem de kalıp çok yüksek sıcaklık farklılıklarına maruz kalır. Bunun sonucunda kalıpta hızlı aşınma ve hasar görülebilir. Bunu önlemek amacıyla kalıba işlem öncesinde önısıtma işlemi uygulanır. Bu önısıtma işlemi çeşitli şekillerde gerçekleştirilebilir; kalıp boşluğuna sıcak iş parçası yerleştirilerek, kalıplar gaz torçu ile ısıtılarak, kalıp tamamen fırına yerleştirilerek, elektrikli ısıtıcı kullanımı, infrared ışınlarla veya indüksiyon ile ısıtma bu yöntemlere örnek olarak verilebilir. Bu noktada önemli olan önısıtmanın homojen (kalıp yüzeyinin her noktasında aynı sıcaklığa sahip olacak şekilde) ve hızlı bir şekilde gerçekleştirilmesidir.

Kalıp ön ısıtmanın uygulanmasına yönelik literatürde sınırlı sayıda araştırma bulunmaktadır. Bu çalışmalardan birisi Luo ve arkadaşlarının [5] çalışmasıdır, çalışmada sonlu elemanlar metodunu kullanılarak Ti6Al4V türbin kanatçığının sıcak dövülmesi sırasındaki aşınma davranışlarını incelenmiştir. Buna göre kalıp önısıtma sıcaklıkları 100 - 400°C aralığında seçilmiş ve bu önısıtma sıcaklık değerinin arttıkça kalıp aşınma değerlerinin de arttığı sonucuna varılmıştır. Kalıp ön ısıtma işleminin önemli olduğu alanlardan biri de enjeksiyon ile kalıplamadır. Bu üretim yönteminde de akışkan hale gelmiş plastiğin kalıba yapışmaması için kalıbın belirli bir sıcaklıkta olması gerekir. Bu amaçla Yu [6] ve arkadaşları mikro enjeksiyon ile kalıplama yöntemi için bir infrared ısıtıcı sistem tasarlamışlardır. Çalışmada amaçlanan kalıp sıcaklığının kullanılan işparçası olan PMMA (Polimetil metakrilat)'nın camsı geçiş sıcaklığı olan 80 °C'nin üzerine çıkarmaktır, yapılan deneysel çalışma sonucunda 10 saniyelik bir ısıtma sonrasında bu sıcaklığa homojen bir şekilde ulaşılacağı gösterilmiştir. İnfrared kalıp ısıtma ile alakalı en kapsamlı araştırma ise Oak Ridge Ulusal Laboratuvarları'nda alüminyum dövme işlemi için gerçekleştirilmiştir [7]. Bu çalışmada infrared ısıtıcıların sadece laboratuvar ortamında değil alüminyum malzemelerin seri üretimde de verimli bir şekilde kullanılacağı gösterilmiştir ve bu şekilde gerçekleştirilen homojen ısıtma ile hem üretilen parça mekaniğinde hem de kalıp ömründe iyileştirme sağlanabileceği vurgulanmıştır.

Literatür araştırması sonucu bu çalışmanın konusu olan çelik parçaların sıcak dövülmesi sırasında infrared kalıp ön ısıtma ile ilgili herhangi bir çalışmaya rastlanmamıştır. Bu motivasyona ile, çalışmada otomotivde kullanılan bir sıcak dövme kalıbının ön ısıtması için özel bir infrared ısıtıcı tasarlanmış ve

üretilemiştir. Isıtıcının homojen ısıtma performansının belirlenebilmesi amacıyla kalıp üzerinde çeşitli bölgelerde termo eleman yardımı ile sıcaklık ölçümleri yapılmıştır. Isıtılacak yüzeyin yayıcılık (emissivite) değeri ısıtma performansını etkilediğinden kalıp yüzeyi için çeşitli kaplama ve yüzey uygulamaları denenmiş ve performansları değerlendirilerek uygun kalıp yüzeyi belirlenmeye çalışılmıştır. Son olarak infrared ısıtma ve kapalı kalıpta şekillendirme işlemleri için sonlu elemanlar modelleri geliştirilmiş ve bunlar deneysel sonuçlarla doğrulanmıştır.

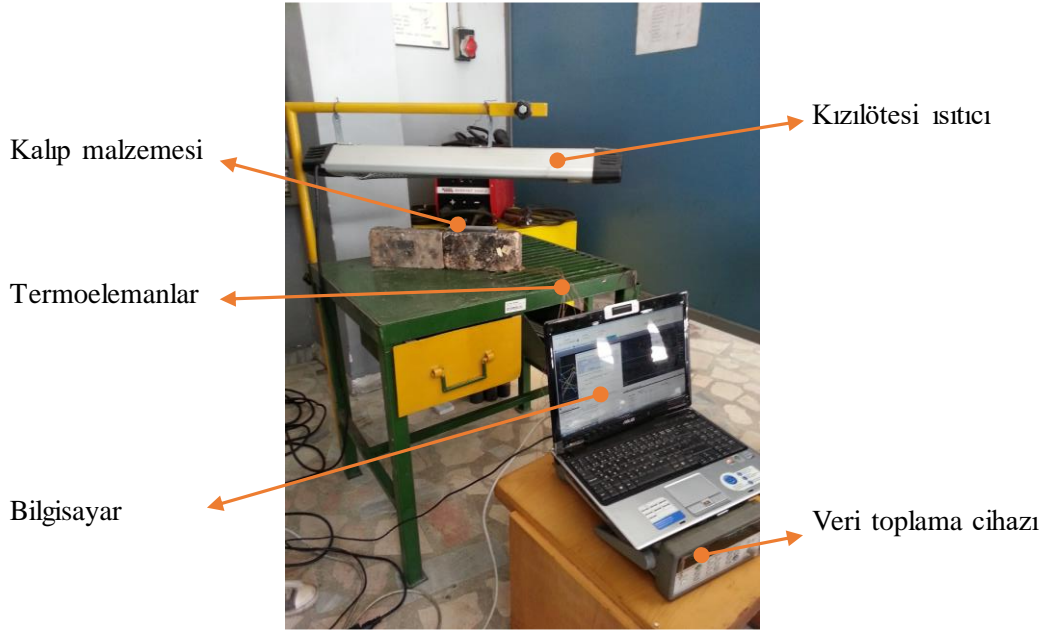
2. DENEYSEL ÇALIŞMA

Çalışmada; sıcak dövme kalıplarının ön ısıtma işleminde kullanılmak üzere bir infrared ısıtıcı tasarlanıp üretilmesi ve bunun uygun işlem parametreleri ile sıcak dövme operasyonuna uygulanması amaçlanmıştır. Bu amaçla bazı ön testler tasarlanmış ve kimi işlem parametrelerinin ısıtma performansı üzerine etkisi incelenmiştir. Çalışma genel olarak iki aşamada gerçekleştirilmiştir. Birinci aşamada gücü bilinen standart bir infrared ısıtıcı ile İTÜ Makine Fakültesi laboratuvarlarında, laboratuvar deneyleri gerçekleştirilmiş ve işlem parametrelerinin ısıtma performansı üzerine etkisi araştırılmıştır, ikinci aşamada ise Birinci Otomotiv Ar-Ge merkezinde tasarımı ve üretimi yapılan ısıtıcı ile gerçek üretim şartlarında, kalıp üzerindeki testler gerçekleştirilmiş ve ısıtma işleminin homojen olup olmadığı değerlendirilmiştir.

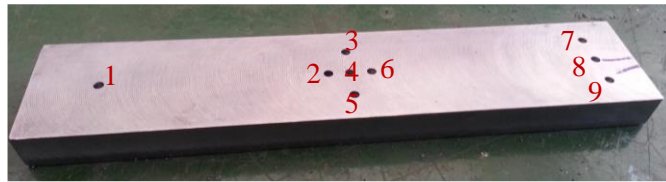
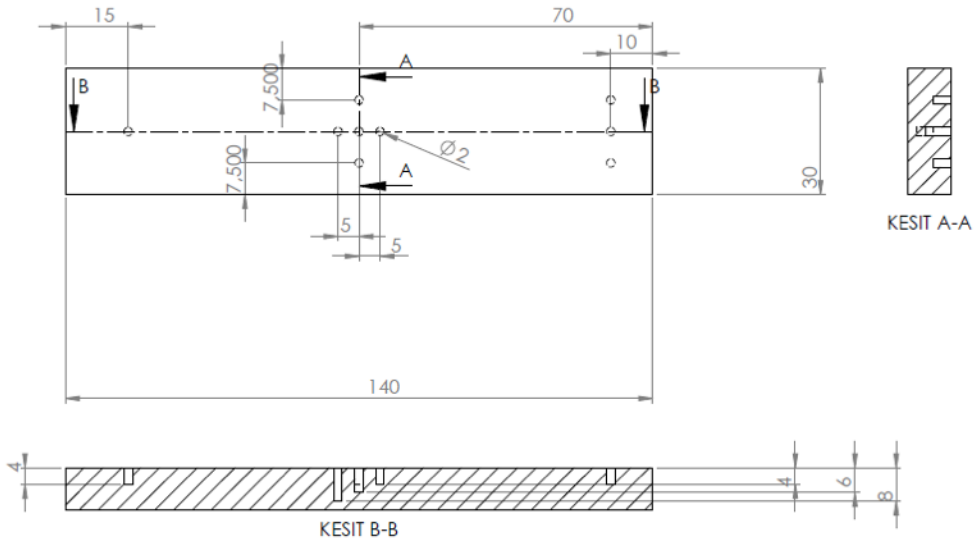
2.1. LABORATUVAR DENEYLERİ

Şekil 1 laboratuvar deneylerinde kullanılan deney kurulumunu göstermektedir. Bu deneylerde; kalıp malzemesi yüzeyi üzerindeki çeşitli farklılıkların ısıtma performansına etkisinin belirlenebilmesi amacıyla kalıp malzemesi ile aynı malzemeden olacak şekilde (DIN 1.2714) Şekil 2'deki gibi bir işparçası hazırlanmış ve bunun üzerine farklı konumlarda 9 adet termoeleman yerleştirilebilmesi için çapı 2 mm olan delikler delinmiştir. Bu deneyler sırasında Şekil 1'de görülen 2.8 kW gücünde standart bir infrared ısıtıcı kullanılmıştır.

Deneyler sırasından 9 adet K tipi termoeleman Şekil 2'de deliklere yerleştirilmiş ve kalıp malzemesinin infrared ısıtıcı altında ısınma performansı incelenmiştir. İnfrared ışınların yüzeye nüfuziyeti ve böylelikle parçayı ısıtması yüzeyin yayıcılık (emissivite) değerine bağlıdır [8]. Bu nedenle çalışmada en yüksek ısıtma performansına ulaşabilmek adına parçanın farklı yüzey durumları incelenmiş ve bu aşamada sıcaklıklar kontrol edilmiştir.



Şekil 1. Laboratuvar deneyleri için deney kurulumu



Şekil 2. İşparçası

Deneylere ilk olarak herhangi bir yüzey durumu oluşturmaksızın yapılan deneylerle başlanmıştır. Şekil 3'te 40 dakika ısıtma süresi boyunca 9 adet termoelemandan alınan sıcaklık sonuçları verilmiştir. Termoeleman numaraları (2 numaralı karttan alındığından) 201-209 şeklinde görülmektedir, ayrıca ölçülen sıcaklıklar °C cinsinden verilmiştir. Şekilden

de görüleceği gibi parça içinde farklı konumlara yerleştirilen termoelemanlar benzer sonuçlar vermiştir. Bu da infrared ısıtma ile homojen bir sıcaklık dağılımına ulaşılabileceğini göstermektedir.

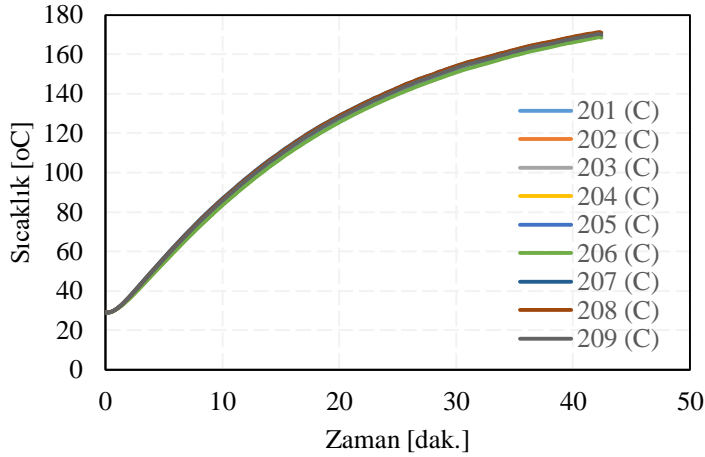
Şekil 4 yüzey pürüzlülüğünün ısıtma performansına olan etkisini göstermektedir. Bunu

anlamak amacıyla Şekil 2'deki numunlerin yüzeyi 240 ve 600 numaralı zımpara kâğıtları ile zımparalanarak sırasıyla 0.4 ve 0.15 μm yüzey pürüzlülükleri (R_a) elde edilmiştir. Sonuç olarak Şekil 4'te de görüleceği üzere arada büyük bir fark olmamakla birlikte aynı ısıtma süresi içerisinde 600'lük kâğıtla zımparalanan daha yüksek yüzey kalitesine sahip numune daha yüksek sıcaklığa ulaşmıştır.

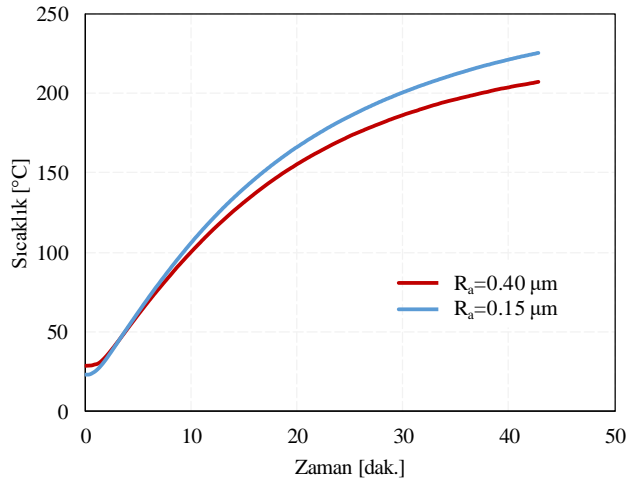
Yüzeyin yayıcılık katsayısını değiştirip ısıtma verimini arttırmak için ısıtma öncesi yüzeylere farklı tip ve renkte boyalar uygulanmıştır. Bunlar; su bazlı siyah boya, ısıya dayanıklı su bazlı siyah boya, yağ bazlı beyaz boya, su bazlı sarı boya, siyah spreyci ayakkabı boyası, siyah pasta formunda ayakkabı boyasıdır. Şekil 5 bu 6 farklı boyanın, boya uygulaması yapılmamış yüzeye karşı durumunu göstermektedir. Görüldüğü gibi uygulanan her boya ısıtma verimini arttırmaktadır. Bu boyalar arasında en yüksek verimi ise su bazlı siyah boya sağlamıştır. Sıcak dövme işleminde kalıpların boyanması işlemi

geleneksel ısıtma sistemlerinde yoktur. Bu çalışmada önerilen infrared ile ısıtma sisteminde emissivite değeri kalıbın hızlı bir şekilde ısınması için önemli olduğundan siyah bir boya (uygulaması ve uzaklaştırılması kolay, ucuz bir çözüm) ile yüzeyin emissivite değeri yükseltilmiş ve hızlı ısınma sağlanmıştır. Uygulanan boya 2 ila 5 parça işlemi sonrasında kendiliğinden çıktığından parça kalitesine kayda değer bir etkisi olmamaktadır.

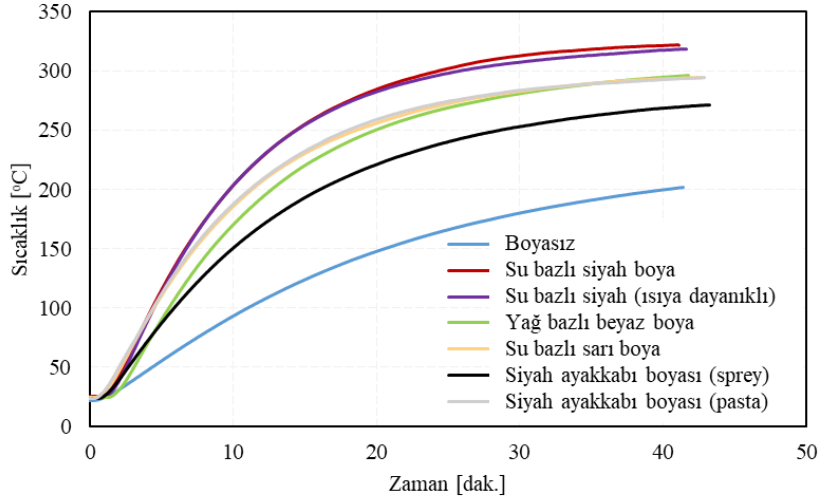
Son olarak Şekil 6'da görüleceği üzere yüzey kaplamasının ısıtma verimine olan etkisi incelenmiştir. Bu amaçla ekonomik ve kolay uygulanması sebebiyle NiP kaplama seçilmiştir. Şekil 6'da da görüldüğü üzere kaplama verimi bir miktar arttırmıştır ancak artış uygulanan siyah boya kadar olmamaktadır. Bu yapılan deneyler sonucunda infrared ile ısıtma sırasında verimi optimum duruma çeken uygulamanın, yüzeye siyah boya uygulanması olduğu sonucuna varılmıştır.



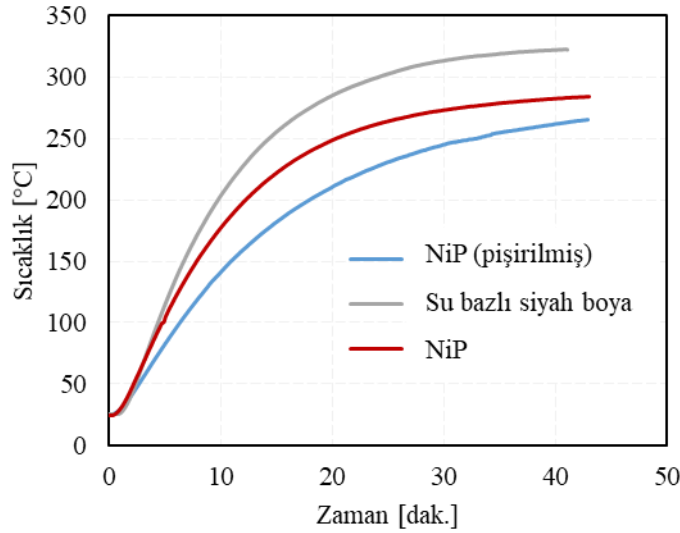
Şekil 3. Kontrol deneyi sıcaklık sonuçları



Şekil 4. Yüzey pürüzlülüğünün ısıtma performansına etkisi



Şekil 5. Yüzey boyasının ısıtma performansına etkisi



Şekil 6. Yüzey kaplamasının ısıtma verimine etkisi

2.2. ÜRETİM ORTAMINDA YAPILAN ISITMA DENEYLERİ

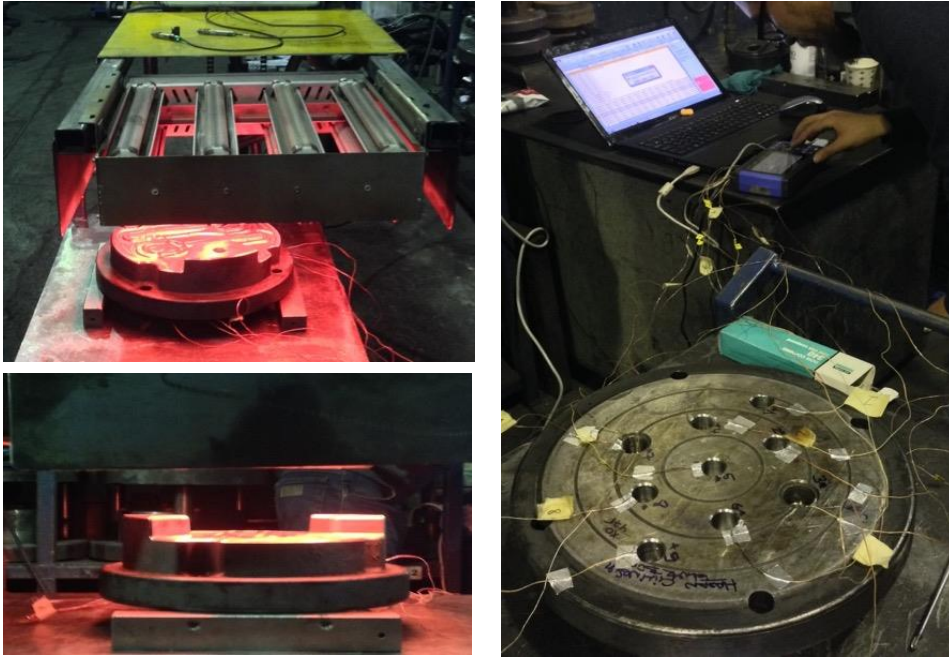
Çalışmanın bu aşamasında endüstriyel tip bir ısıtıcı tasarlanmış, üretilmiş ve bu ısıtıcı üretimde kullanılan gerçek bir kalıp üzerine uygulanmıştır. Şekil 7'de 25 kW gücündeki tasarlanan ısıtıcı gösterilmiştir. Plastik şekil vermenin gerçekleştiği kalıp yüzeyinin çeşitli noktalarından formlu yüzeye 35 mm uzaklıkta olacak şekilde 9 adet delik açılmıştır. Bu ısıtıcı ile Şekil 8'de gösterilen sıcak dövme kalıbı ısıtılmış ve kalıba açılan deliklere yerleştirilen K tipi termal elemanlar ile bu noktalardan sıcaklık ölçümü

alınmıştır. Tüm sıcaklık ölçümlerinin yüzeyden aynı mesafeden yapılmasını sağlamak üzere termoeleman delik derinliği mevcut kalıbın geometrisine uygun olarak (35mm) seçilmiştir.

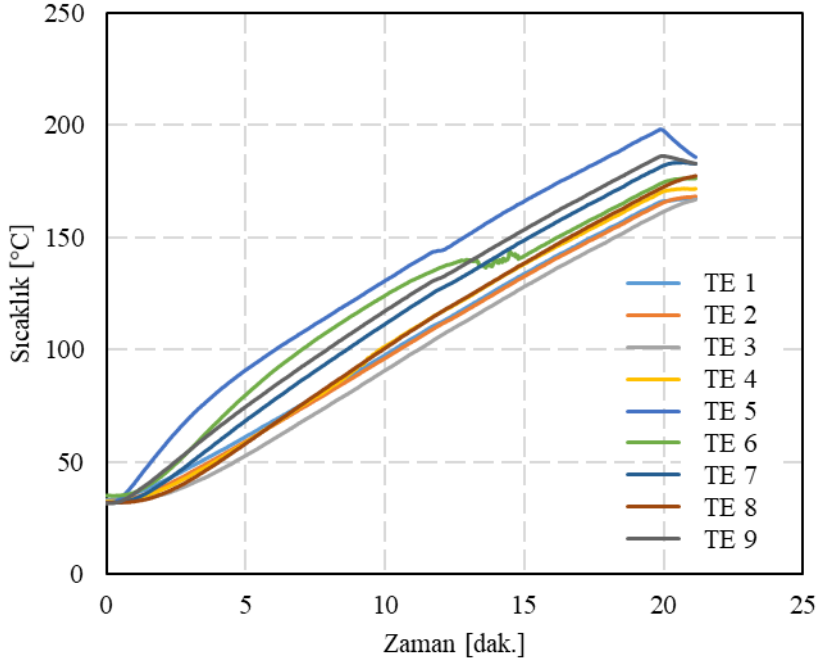
Şekil 9'da bu 9 termoelemandan toplanan sıcaklık verisi zamanın bir fonksiyonu olarak gösterilmiştir, şekilden de anlaşılacağı üzere tasarlanan ısıtıcının yaygın olarak kullanılan şaloma ile ısıtma yöntemine göre homojene daha yakın bir ısıtma yaptığı anlaşıldığından, homojen ısıtma ile daha uzun bir kalıp ömrü sağlanabileceği söylenebilir.



Şekil 7. Tasarlanan endüstriyel tip kalıp ısıtıcı



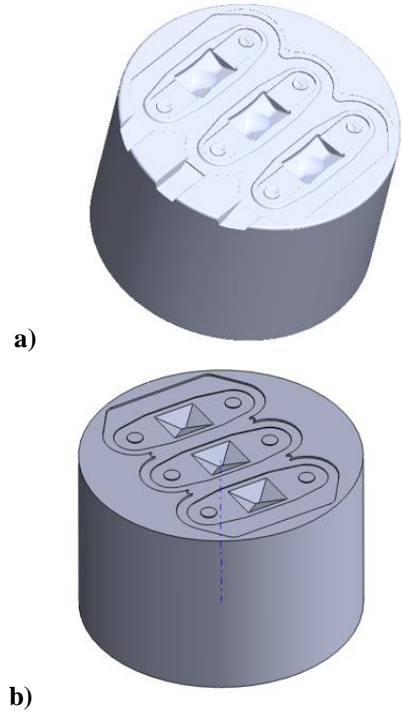
Şekil 8. Sıcak dövme kalıbının ısıtılması ve yerleştirilen termoelemanlar



Şekil 9. Sıcak dövme kalıbının ısıtılması sırasında toplanan sıcaklık verisi

3. ISITMANIN SONLU ELEMANLAR MODELİ VE DENEYSEL SONUÇLARLA KARŞILAŞTIRILMASI

Çalışmanın bu bölümünde tasarlanan kalıp önısıtma işlemi sonlu elemanlar modeli kullanılarak simüle edilmiştir. Bu model süreçte kullanılacak çeşitli kalıplar için istenilen kalıp derinliğinde arzu edilen sıcaklığa ulaşmak için gereken ısıtma süresinin önceden hesaplanmasını sağlayacaktır. Simülasyonlar için Deform 3D v11 yazılımı kullanılmıştır. Analizde infrared ısıtıcı ve kalıp ayrı ayrı modellenmiştir. İnfrared ısıtıcı Bölüm 2.2’de anlatılan deneylere uygun olacak şekilde 430*430*10 mm olan bir dikdörtgen levha olarak modellenmiş iş parçası yani ısıtılacak kalıp ise yine Bölüm 2.2’de belirtilen kalıp geometrisine uygun olarak fakat daha basit bir geometri ile tekrar oluşturulmuştur. Bu basitleştirme sırasında kalıbın orjinal CAD verisinden faydalanılmış ve ısıtılacak kalıp yüzeyinin aynı olmasına dikkat edilmiştir. Buradaki nihai amaç modelin işlem sonucunu etkilemeyecek şekilde daha basit olarak tanımlanıp işlem süresini kısaltmaktır. Orijinal kalıp geometrisi ve bu geometrinin orijinal çizime sadık kalınarak basitleştirilmiş hali karşılaştırma amacıyla Şekil 10’ da verilmiştir.



Şekil 10. a) Orijinal kalıp geometrisi b) Kalıp geometrisinin basitleştirilmiş hali

Analize ilk olarak infrared ısıtıcının sıcaklığı bulunarak başlanmıştır. Burada aşağıdaki temel ışınım formülü kullanılmıştır [9].

$$Q\eta = \varepsilon\sigma AT^4 \quad (1)$$

Denklem 1’de Q ısıtıcının gücünü, ε ısıtıcının emissivitesini, η verimi, σ Boltzman sabitini, A ısıtıcının alanını, T ise sıcaklığını temsil etmektedir. Bu durumda analizde aşağıda verilen değerler kullanılmıştır:

$$\varepsilon = 0.9$$

$$\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2$$

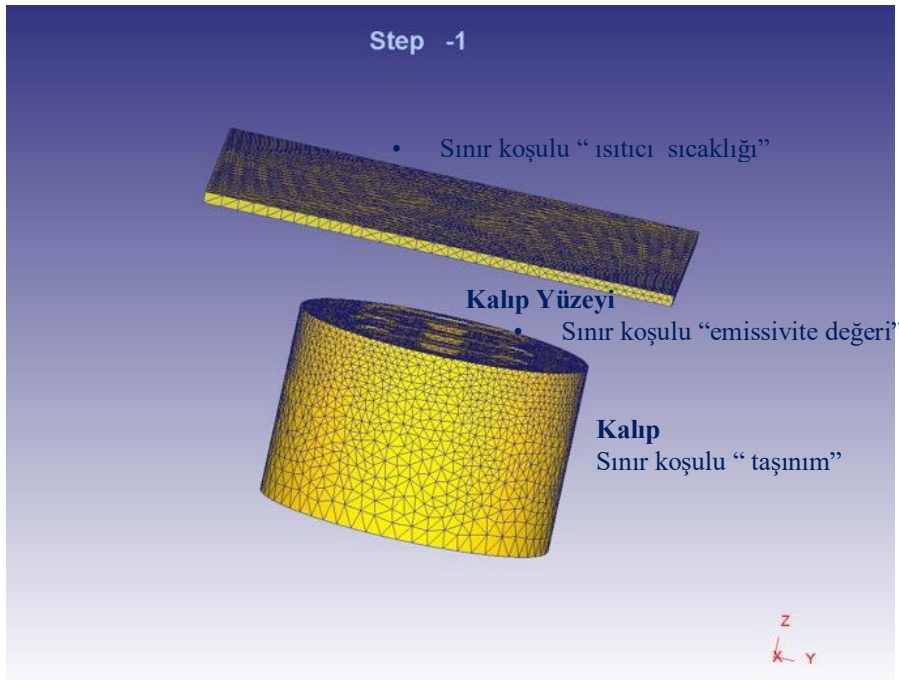
$$A = 0.16 \text{ m}^2$$

$$Q = 25 \text{ kW}$$

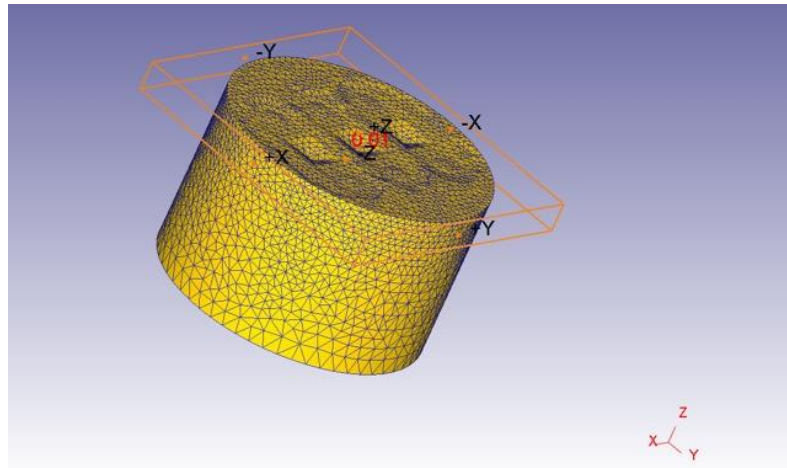
$$\eta = 0.7$$

buradan ısıtıcı yüzey sıcaklığı 936°C olarak hesaplanır ve bu değer analize başlangıç koşulu olarak girilir. Aşağıda Şekil 11’ de sonlu elemanlar programında kurulan problem ve sınır şartları görülmektedir.

Kalıp için oluşturulan ağ yapısı (mesh) Şekil 12’ te görülmektedir. Analizde tetrahedral elemanlar (32245 eleman) kullanılmıştır. Ayrıca analizin daha hızlı gerçekleşebilmesi için adaptif mesh uygulaması yapılmıştır. Buna göre bütün geometride küçük elemanlar kullanıp analizi daha hassas hale getirmek yerine sadece kritik bölgede küçük eleman uygulaması yapılmış böylelikle analizin daha hızlı gerçekleşmesi sağlanmıştır. Şekil 12’te daha ince ağ oluşturulan bölge kutu içinde görülmektedir.



Şekil 11. Problemın Deform programında görüntüsü



Şekil 12. Kalıp geometrisinin mesh uygulaması

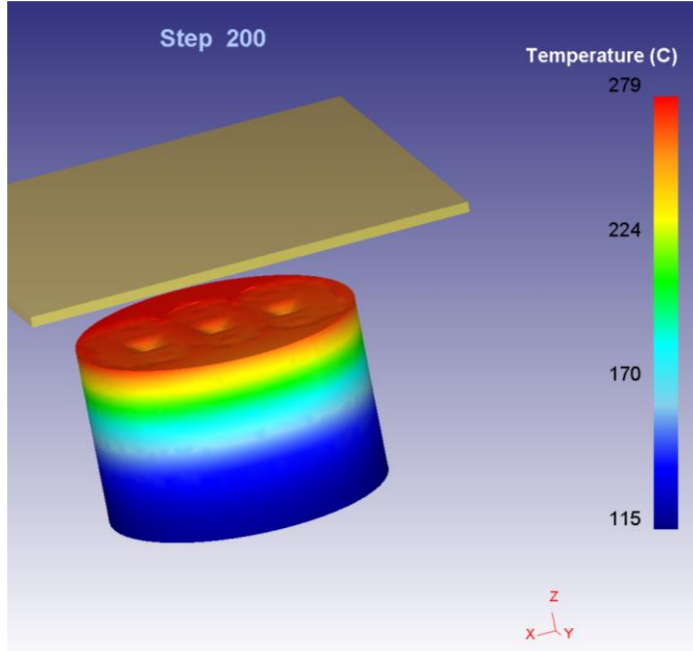
Bu şekilde tanımlanan problem Tablo 1 deki 4 farklı durum için çözdürülmüştür.

Tablo 1. Analizlerde kullanılan parametreler

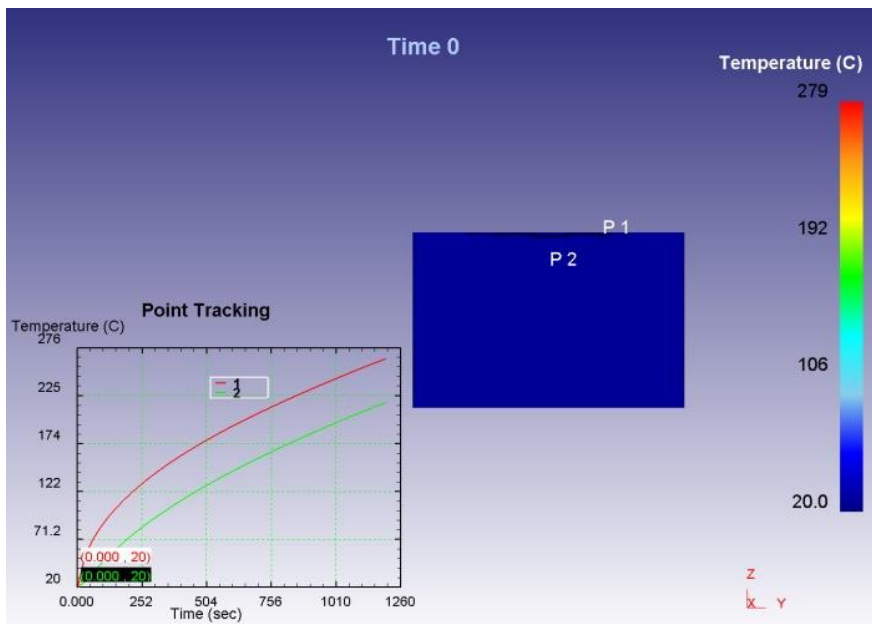
Analiz No	Süre (dakika)	Emissivite	Ölçüm Alınan Derinlik
1	20	0.5	35 mm
2	45	0.5	35 mm
3	20	0.9	35 mm
4	45	0.9	35 mm

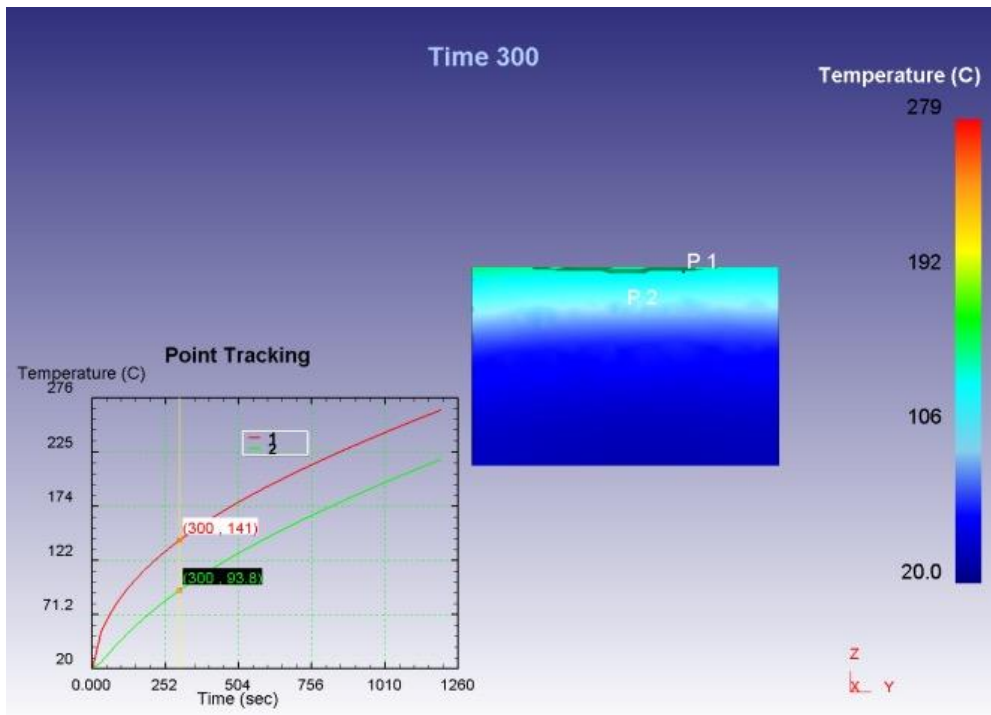
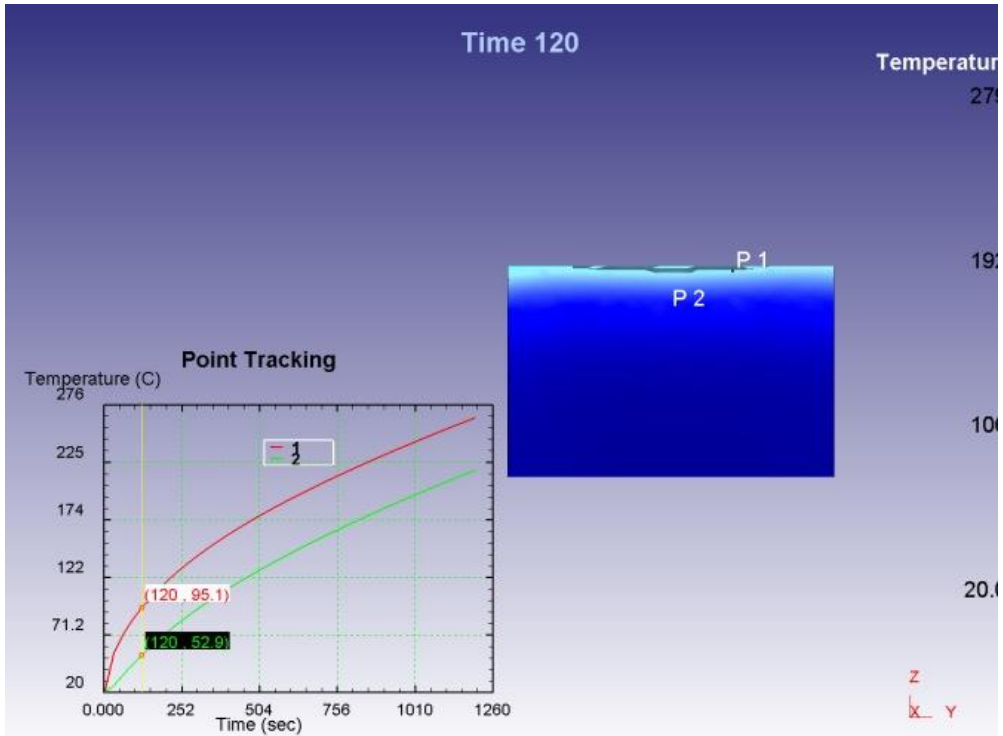
Şekil 13 analiz sırasında elde edilen sıcaklık dağılımını göstermektedir. Bu şekilde ısıtıcı sıcaklığı, bundan bağımsız olarak kalıp sıcaklığı ve kalıp sıcaklığının dağılımını görülebilir.

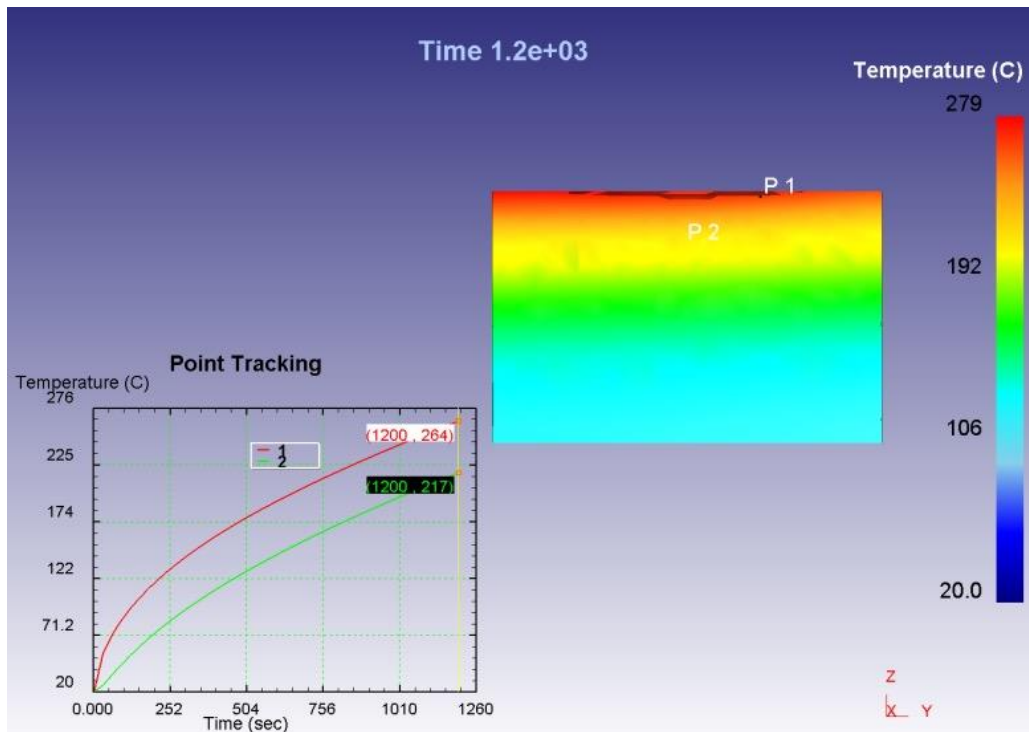
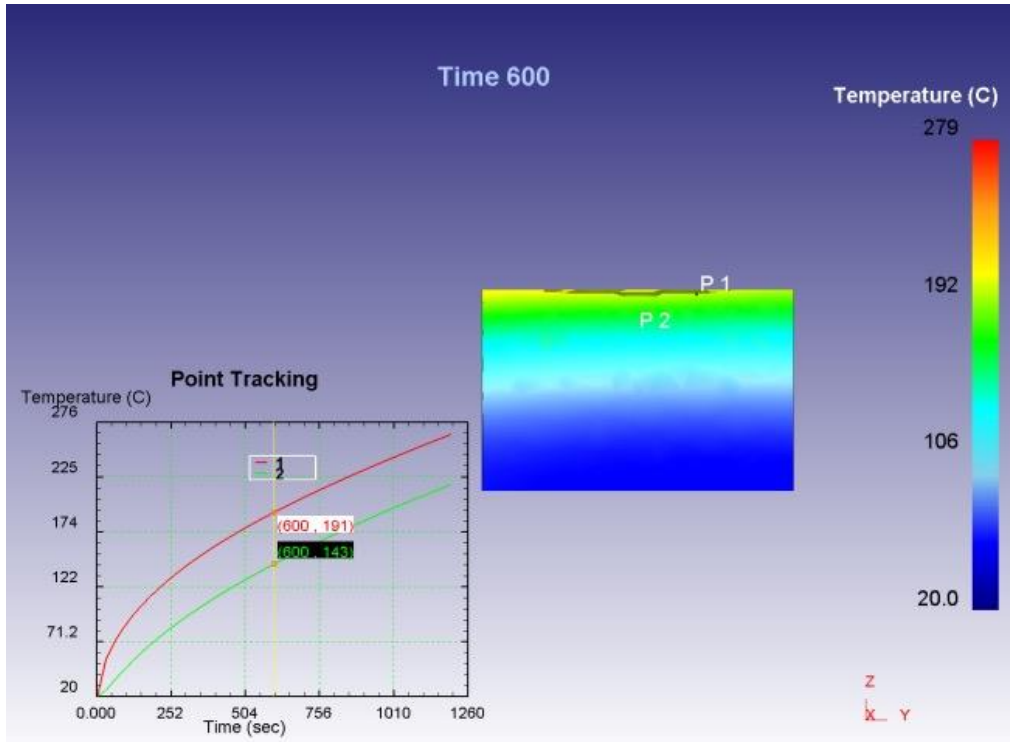
Şekil 14'te ise kalıp sıcaklığının zamanla değişimini gösteren farklı kareler görülebilir. Bu durumda 0.9 emissivite ve 20 dakika ısıtma süresi için 0, 120, 300, 600 ve 1200 saniyelerine ait kalıp kesitinde sıcaklık dağılımı verilmiştir. Bu şekillerden zamanla kalıp kesitinde sıcaklığın arttığı görülmektedir.



Şekil 13. Analiz sırasında elde edilen sıcaklık dağılımı (emissivite=0.9 süre 20 dakika)







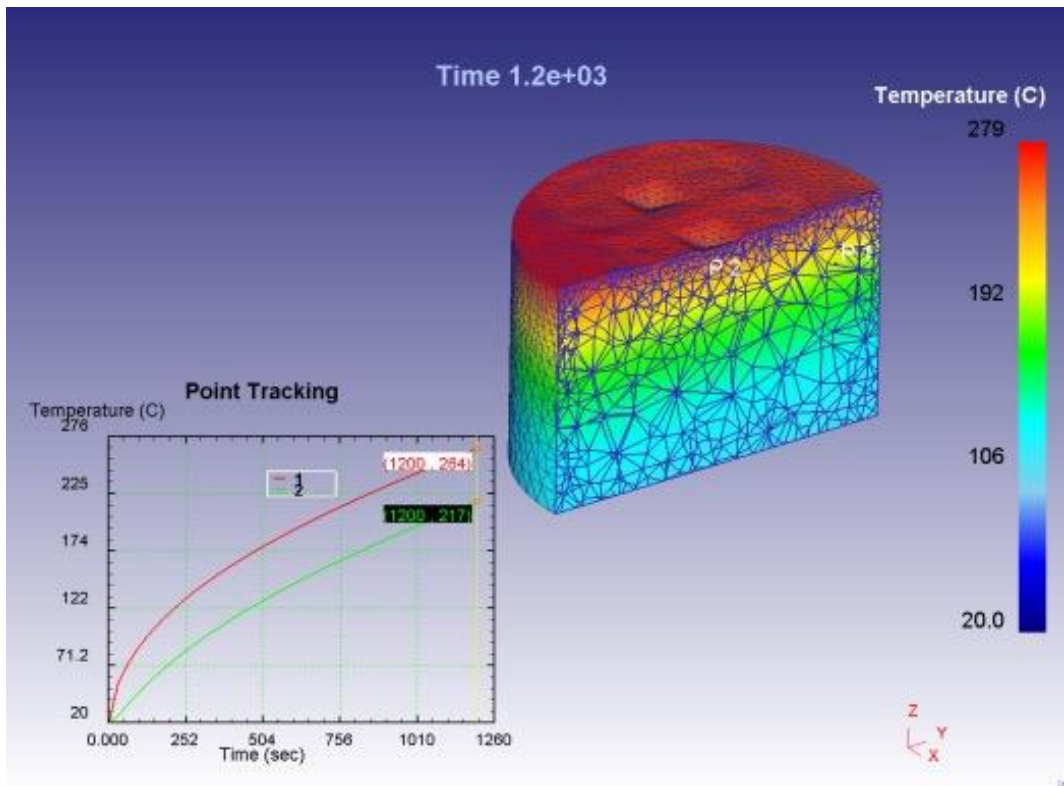
Şekil 14. 0.9 Emissivite ve 20 dakika ısıtma süresi için kalıp sıcaklığının zamanla değişimi (0-120-300-600 ve 1200 saniyedeki durumlar için)

Şekil 15 ısıtma sonrası kalıp sıcaklığının dağılımı, derinlikle değişimi ve ağ dağılımını göstermektedir. Ayrıca Şekil 16 ve Şekil 17 farklı kalıp derinlikleri için sıcaklık dağılımlarını göstermektedir. Şekil 16'da derinliğe bağlı sıcaklık analizi için seçilen noktalar görülebilir. Şekil 17' de ise bu durum ve noktaların geometrik konumu grafik halinde verilmiştir.

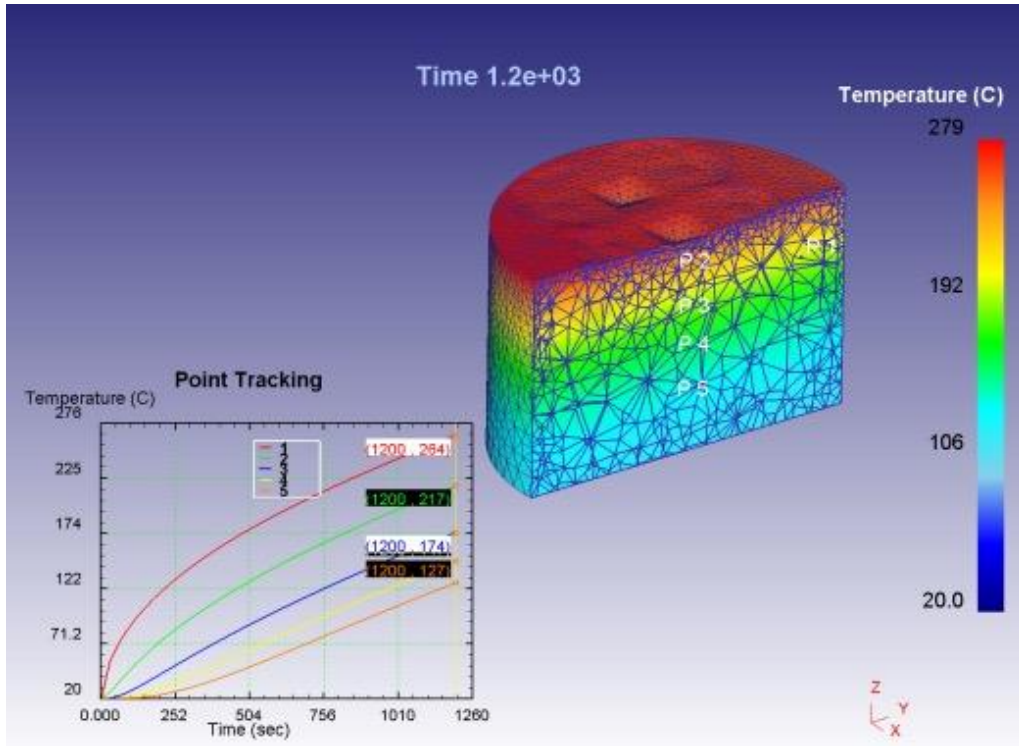
Son olarak gerçekleştirilen analizlerde elde edilen sonuçların karşılaştırılması Şekil 18'de verilmiştir. Şekil 18'de görüleceği gibi 35 mm derinlik için yapısal karşılaştırmada beklenildiği gibi büyük emissivite ve büyük ısıtma süresi için kalıp sıcaklığı daha yüksek çıkmıştır. Ayrıca çalışmada modellenen ısıtıcı ile yapılan deneyler sonrasında elde edilen

sıcaklık sonucu ile analiz sonucu da oldukça uyumludur. Isıtma süresi sonunda model ve deney arasındaki farkın en çok %9 olduğu hesaplanmıştır. Bu farkın nedenleri özetle; işlem süresini azaltmak için kalıp geometrisinde yapılan basitleştirmeler, termoelemanların yerleştirildiği deliklerin hassasiyeti, ısıtıcının analizde homojen ısı kaynağı olarak modellenmesi olarak açıklanabilir.

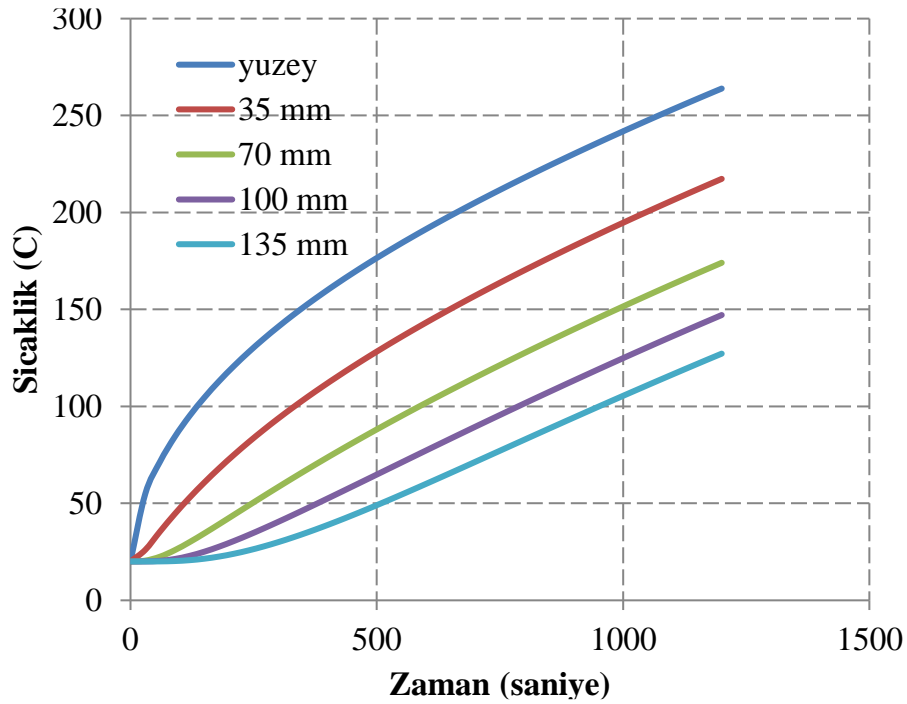
Deney ve simülasyon sonuçları arasındaki farkın nedeninin ise analizde kalıp emissivitesi sabit olarak kabul edilmesidir. Emissivitenin sıcaklıkla değiştiği bilindiğinden, bu değişimin hesaba katılması durumunda analizin deneysel ölçüme çok daha yakın sonuçlar vermesi beklenebilir.



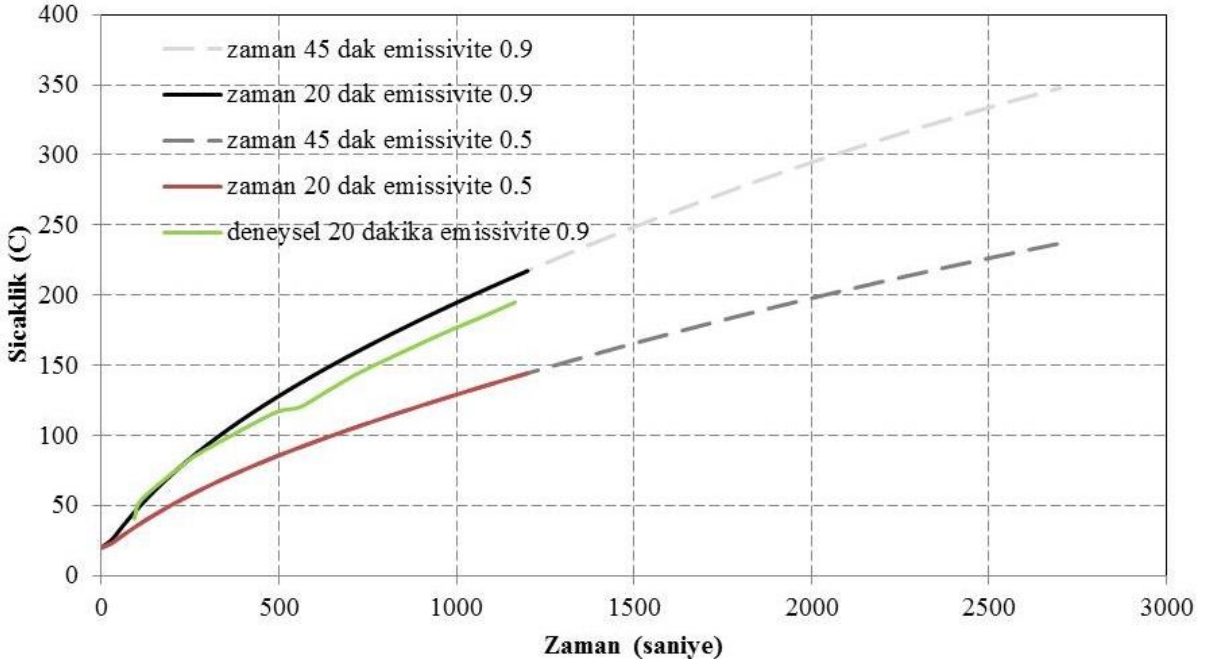
Şekil 15. Isıtma sonrası (1200. saniyedeki sıcaklık dağılımı) kalıp kesiti ve ağ durumu



Şekil 16. Kalıp üzerinde derinliğe göre sıcaklık dağılımı



Şekil 17. Sıcaklığın derinliğe göre değişimi emissivite 0.9 ve 20 dakika ısıtma için



Şekil 18. Farklı durumlar için 35 mm derinlikteki sıcaklıkların zamana bağlı değişimi ve deneysel sonuçlarla karşılaştırılması

4. SONUÇ

Bu çalışmada çelik malzemenin sıcak dövmesinde önemli bir aşama olan kalıp önısıtması için alternatif bir yöntem olan infrared ile ısıtma yöntemi incelenmiştir. Bu işlem için gerekli parametreler laboratuvar ortamında incelenmiş, ardından elde edilen bilgi gerçek üretim şartlarında uygulanmıştır. Son olarak bu ısıtma işlemi sayısal olarak da modellenmiş ve analiz sonuçları deneysel veriler ile karşılaştırılmıştır. Bu çalışma sonucunda elde edilen çıkarımlar aşağıda maddeler halinde verilmiştir:

- Kalıp malzemesi ile aynı malzemeye sahip numuneler üzerinde yapılan deneylerle malzeme yüzeyinin ısıtma performansına olan etkisi incelenmiştir. Deneysel sonuçlar göstermiştir ki, yüzey pürüzlülüğü ve kaplama durumu ısıtma performansı (enerji verimliliği) üzerinde etkili değildir; ancak yüzeye uygulanan boya renginin ısıtma performansını oldukça etkilemektedir. Bunun nedeni, uygulanan boyanın rengine göre yüzeyin yayıcılık (emissivite) katsayısının değişmesi, özellikle siyah renkte artması böylelikle daha çok infrared ışınını absorbe etmesidir.
- Endüstriyel tip infrared ısıtıcı ile gerçekleştirilen deneyler sonucunda makul bir sürede homojen bir sıcaklık dağılımı elde edilebileceği gösterilmiştir. Kalıp içerisinde

aynı derinlikte farklı noktaların en fazla 20 °C farkla ısıtılması sağlanmıştır.

- Çalışmada ayrıca önısıtma işlemi için bir sonlu elemanlar modeli geliştirilmiştir. Geliştirilen model ile elde edilen analiz sonuçları deneysel sonuçlar ile karşılaştırılmış ve birbirine oldukça yakın sonuçlar (en fazla %9 fark) elde edilerek model doğrulanmıştır. Model sonuçları da ayrıca, deney sonuçlarını doğrulayacak şekilde emissivitenin ısıtma üzerindeki önemini göstermiştir. Bu nedenle endüstriyel tip uygulamalarda yüzeyin kalıp yüzeyinin emissivitesini arttıracak bir uygulama işlem verimini de arttıracaktır.
- Bu çalışma bulgularının üretim ortamında uygulanma imkânı da bulunmuştur. Otomotiv sanayisi için yedek parça üreten Birinci Otomotiv firmasının sıcak dövme hattında gerçekleştirilen deneylerde, önerilen yöntem ile geleneksel şaloma ile ısıtmaya nazaran ısıtma süresinde %50 azalma, kalıp başına (bakımlar arasında) üretilen parça adetlerinde ise 17000'den 27000'e bir artış elde edilmiştir.

Hot forging is an important part of manufacturing technology. By the help of the heat applied in the hot forging process, the flow strength of the workpiece decreases and the formability improves; hence, more complex parts can be manufactured. However, with

increasing temperature, strength of the die also decreases, and this leads lower tool life and higher production cost. One of the other detrimental effect on tool life is the higher temperature gradient on die. In order to avoid this problem, a die preheating process is performed before forging operation. In this study, an infrared preheating tool is designed and manufactured for hot forging operation. The efficiency of the novel heating tool is a function of surface characteristics of the die; therefore, various coatings and surface treatment have been applied on to the die surface and the efficiencies are compared with each other. In addition, a finite element model for the heating process is developed and the results are compared to those obtained by the experiments. As a result, it is shown that the novel infrared preheating tool can be used to obtain a homogeneous and efficient temperature distribution in the die prior to the hot forging process.

Keywords: Hot forging, infrared heating, die temperature, die life

TEŞEKKÜR

Yazarlar bu çalışmaya destek olan Birinci Otomotiv'e, TÜBİTAK TEYDEB'e ve Yük. Müh. Sera ERTAY'a teşekkürü bir borç bilirlir.

KAYNAKÇA

1. Navinšek B., Panjan P., Gorenjak F., Improvement of hot forging manufacturing with PVD and DUPLEX coatings. *Surface and Coatings Technology*, 137(2-3), 255-264, 2001.
2. ASM Metals Handbook Volume 14- Forming and Forging, 1993.
3. Bayramoglu M., Polat H., Green N., Coast and Performance Evaluation of Different Surface Treated Dies for Hot Forging Process, *J. Mater. Process. Technol.*, 205, 394-403, 2008.
4. Ebara R., Kubota K., Failure analysis of hot forging dies for automotive components. *Engineering Failure Analysis*, 15(7), 881-893, 2008.
5. Luo S., Zhu D., Hua L., Qian D., Yan S., Numerical analysis of die wear characteristics in hot forging of titanium alloy turbine blade. *International Journal of Mechanical Sciences*, 123, 260-270, 2017.
6. Yu M.C., Young W.B., Hsu P.M., Micro-injection molding with the infrared assisted mold heating system. *Materials Science and Engineering: A*, 460, 288-295, 2007.
7. Blue C.A., Sikka V.K., Ohriner E.K., Engleman P.G., Mochnal G.F., Underys A., Wu W.T., Maguire M.C., Mayer R., *Infrared Heating of Forging Billets and Dies*, Oak Ridge National Laboratory, 1999.
8. Cengel Y.A., *Heat and mass transfer*. Tata McGraw-Hill Education, 2007.
9. Ozisik M.N., *Heat transfer: a basic approach*, 1985.