



POLİTEKNİK DERGİSİ

JOURNAL of POLYTECHNIC

ISSN: 1302-0900 (PRINT), ISSN: 2147-9429 (ONLINE)

URL: <http://dergipark.org.tr/politeknik>



# İndüksiyon ile sıcak şekillendirmede etkin kalıp ısıtma parametrelerinin sayısal analizi

## Numerical analysis of effective die heating parameters in induction hot forming

Yazar(lar) (Author(s)): Emre EROL<sup>1</sup>, Tayfun MENLİK<sup>2</sup>, Çetin KARATAŞ<sup>3</sup>, Adnan SÖZEN<sup>4</sup>

ORCID<sup>1</sup>: 0000-0002-7053-5145

ORCID<sup>2</sup>: 0000-0003-0970-6600

ORCID<sup>3</sup>: 0000-0003-0005-3068

ORCID<sup>4</sup>: 0000-0002-8373-2674

**To cite to this article:** Erol E., Menlik T., Karataş Ç. ve Sözen A., “İndüksiyon ile sıcak şekillendirmede etkin kalıp ısıtma parametrelerinin sayısal analizi”, *Journal of Polytechnic*, \*(\*) : \*, (\*).

**Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz:** Erol E., Menlik T., Karataş Ç. ve Sözen A., “İndüksiyon ile sıcak şekillendirmede etkin kalıp ısıtma parametrelerinin sayısal analizi”, *Politeknik Dergisi*, \*(\*) : \*, (\*).

**Erişim linki (To link to this article):** <http://dergipark.org.tr/politeknik/archive>

**DOI:** 10.2339/politeknik.1588854

# İndüksiyon ile Sıcak Şekillendirmede Etkin Kalıp Isıtma Parametrelerinin Sayısal Analizi

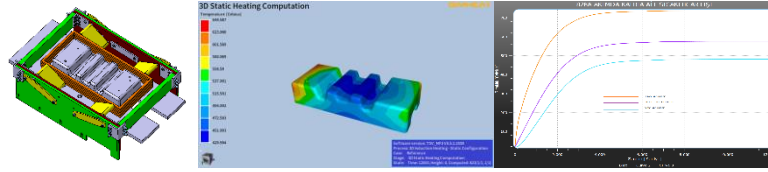
## Numerical Analysis of Effective Die Heating Parameters in Induction Hot Forming

### Önemli noktalar (Highlights)

- ❖ Sıcak şekillendirme yöntemlerinin incelenmesi (Examination of hot forming methods)
- ❖ İndüksiyon ile sıcak şekillendirmenin araştırılması (Research on induction hot forming)
- ❖ İndüksiyon etken parametrelerinin belirlenmesi (Determination of induction effective parameters)
- ❖ Akım değerinin ısınmaya etkisinin analizi (Analysis of the effect of current value on heating)
- ❖ Termal gerilim hesabının yapılması (Calculating thermal stress)

### Grafik Özet (Graphical Abstract)

İndüksiyon ile sıcak şekillendirme yapılırken kalıbın istenilen sıcaklıkta ve homojen olarak ısınabilmesi için etkin parametrelerden akım değeri sonlu elemanlar yöntemiyle analiz edilmiştir. Çalışma sonucunda uygun akım değeri bulunmuş ve termal gerilimler hesaplanmıştır. / While hot forming with induction, the current value, one of the effective parameters, was analyzed by the finite element method in order to heat the die at the desired temperature and homogeneously. As a result of the study, the appropriate current value was found and thermal voltages were calculated.



**Şekil.** Kalıp tasarımı, analizi ve sıcaklık sonuçları / **Figure.** Die design, analysis and temperature results

### Amaç (Aim)

Kalıbın istenilen sıcaklıkta homojen ısınması için uygun akım değerinin belirlenmesi. / Determining the appropriate current value for homogeneous heating of the die at the desired temperature.

### Tasarım ve Yöntem (Design & Methodology)

Kalıbın ve bobinin tasarımı ve sonlu elemanlar analizi. / Design and finite element analysis of the mold and coil.

### Özgünlük (Originality)

Yenilikçi indüksiyon yöntemi ile kalıp ısıtma / Die heating with innovative induction method.

### Bulgular (Findings)

Yüksek akımda, daha hızlı ısıtma ve daha yüksek sıcaklık değeri elde edilmiştir. / At high current, faster heating and higher temperature values were obtained.

### Sonuç (Conclusion)

Yüksek akımda istenilen sıcaklıklara daha yakın değerler elde edilirken termal gerilimin çatlama riskine neden olmadığı hesaplanmıştır. / While values closer to the desired temperatures were obtained at high current, it was calculated that thermal stress did not cause the risk of cracking.

### Etik Standartların Beyanı (Declaration of Ethical Standards)

Bu makalenin yazar(lar)ı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler. / The author(s) of this article declare that the materials and methods used in this study do not require ethical committee permission and/or legal-special permission.

# İndüksiyon ile Sıcak Şekillendirmede Etkin Kalıp Isıtma Parametrelerinin Sayısal Analizi

Araştırma Makalesi / Research Article

Emre EROL<sup>1\*</sup>, Tayfun MENLİK<sup>1</sup>, Çetin KARATAŞ<sup>2</sup>, Adnan SÖZEN<sup>3a,b</sup>

<sup>1</sup>Teknoloji Fakültesi, Enerji Sistemleri Mühendisliği, Gazi Üniversitesi, Türkiye

<sup>2</sup>Teknoloji Fakültesi, İmalat Mühendisliği, Gazi Üniversitesi, Türkiye

<sup>3a</sup>Teknoloji Fakültesi, Enerji Sistemleri Mühendisliği, Gazi Üniversitesi, Türkiye

<sup>3b</sup>Adana Alparslan Türkeş Bilim ve Teknoloji Üniversitesi, Türkiye

(Geliş/Received : 21.11.2024 ; Kabul/Accepted : 03.12.2024 ; Erken Görünüm/Early View : 10.12.2024 )

## ÖZ

Günümüzde özellikle havacılık ve otomotiv sektörlerinde yakıt tasarrufu sağlamak için en etkin yöntemlerden biri de ağırlık azaltmaktır. Bu nedenle yüksek mukavemet gereken yerlerde görece daha düşük özgül ağırlığa sahip malzemeler tercih edilmektedir. Bu özelliğe sahip malzemelerin şekillendirilebilme kabiliyetleri genellikle soğuk şekillendirme için uygun değildir. Bu sebeple sıcak şekillendirme yöntemleri tercih edilmektedir. Bu yöntemler arasında hızlı sıcaklık artışı sağlaması, çevre dostu olması ve düşük enerji tüketimi gibi özelliklere sahip olması nedeniyle yenilikçi indüksiyon ile sıcak şekillendirme yöntemi öne çıkmaktadır. Bu çalışmada indüksiyon ile sıcak şekillendirme sırasında kalıbın istenilen sıcaklığa en hızlı ve uygun şekilde gelebilmesi için etkin parametrelerin tespiti ve sayısal analizi yapılmıştır. Yapılan çalışmada, tasarlanan kalıp ve dörtgen bobin modeli farklı akım değerlerine göre sonlu elemanlar metodu ile analiz edilmiştir. Sırasıyla 601, 726 ve 828 Amper (A) akım değerleri sisteme verilmiş ve istenilen sıcaklığa 828 A değerinde ulaşılmıştır. Akım değeri arttıkça kalıbın ısınma hızı artmaktadır. 6000 saniye sonunda seçilen akım değerleri için kalıpta görülen en yüksek sıcaklıklar sırasıyla 513, 640 ve 733 °C olarak görülmüştür. Tüm akım değerlerine göre termal gerilim hesabı matematiksel olarak hesaplanmış ve hiçbir akım değerinde termal çatlağa sebebiyet verecek bir değere ulaşılmadığı görülmüştür.

**Anahtar Kelimeler:** Sıcak şekillendirme, İndüksiyon ile ısıtma, Kalıp ısıtma, İndüksiyon verimliliği, Elektro termal analiz

## Numerical Analysis of Effective Die Heating Parameters in Induction Hot Forming

### ABSTRACT

Today, one of the most effective ways to save fuel, especially in the aviation and automotive sectors, is to reduce weights. Therefore, materials with relatively lower specific weights are preferred in places where high-strength material is required. The formability of materials with this feature is generally not suitable for cold forming. Therefore, hot forming methods are preferred. Among these methods, the induction hot forming method stands out because it provides rapid temperature increase, environmentally friendly and has low energy consumption. In this study, the effective parameters were determined and numerically analyzed so that the die can reach the desired temperature in the fastest and most appropriate way during induction hot forming. In this study, the designed die and rectangular coil model were analyzed with the finite element method according to different current values. Current values of 601, 726 and 828 Amper (A) were given to the system, respectively, and the desired temperature was reached at 828 Amper (A). As the current value increases, the heating rate of the die increases. At the end of 6000 seconds, the highest temperatures seen in the die for the selected current values were determined as 513, 640 and 733 °C, respectively. Thermal stress times were calculated mathematically for all current values and it was observed that no current value reached a value that would cause thermal cracking.

**Keywords:** Hot forming, Induction heating, Die heating, Induction efficiency, Electrothermal analysis.

### 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Sınırlı enerji kaynakları ve yüksek enerji maliyetleri bilim insanlarını; havacılık ve otomotiv gibi sektörlerde üretilen araçlarda yakıt tüketimini azaltacak yöntemler aramaya itmiştir. Özellikle havacılıkta aracın ağırlığını azaltmak yakıt tasarrufuna büyük katkı sağlamaktadır. Bu bağlamda aynı fiziksel ve mekanik özellikleri sağlayabilen fakat daha düşük özgül ağırlığa sahip alternatif malzemeler tercih edilmeye başlanmıştır [1].

Yüksek mukavemet ve düşük özgül ağırlığa sahip titanyum vb. metaller düşük özgül ağırlıkları sayesinde yakıt tasarrufuna katkı sağlasa da düşük şekillendirilebilme özellikleri nedeniyle beraberinde başka sorunları meydana getirmektedir. Bu özelliklere sahip sac metal malzemeler, soğuk şekillendirme yöntemleriyle üretildiğinde çatlak oluşumu ve yüksek geri yaylanma değerleri görülmektedir. Bu sorunlar iş parçalarında istenilen geometrinin elde edilmesini

\*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)

e-posta : emre.erol@tai.com.tr

zorlaştırmaktadır. Soğuk şekillendirmenin sebep olduğu bu sorunları engellemek ve istenilen geometriyi elde edebilmek için bu tarz sac metal malzemelerde sıcak şekillendirme yöntemleri tercih edilmektedir [2].

Sıcak şekillendirme yöntemlerinin tercih edilmesinde, yüksek sıcaklıkta metallerin süneklik davranışlarının iyileşmesi ve geri yaylanma tepkilerinin azalması en önemli nedenler arasındadır [3]. Yapılan çalışmalarda; sıcaklık arttıkça parçanın şekillendirme sonrası geri yaylanma tepkisinin minimum düzeye indiği görülmüştür [4-6]. Ayrıca yapılan çalışmalar sıcaklık artışının malzemenin mekanik özelliklerini iyileştirerek form alma ve uzama kabiliyetlerini arttırdığını göstermiştir [7-9].

Günümüzde birçok farklı sıcak şekillendirme yöntemi bulunmaktadır. Bu yöntemler iş parçasının ısıtıldığı yerde şekillendirilmesine göre, ısıtma yöntemine göre, kalıbın ve/veya malzemenin ısıtılıp ısıtılmamasına göre sınıflandırılabilir [3,10-12]. Doğrudan sıcak şekillendirme yönteminde parça ayrı bir fırında ısıtılarak, elle veya robotik bir sistem yardımıyla formun verileceği pres üzerine taşınır [18]. Bu yöntem alternatif olarak, ön form sonrası sıcak şekillendirmede parçaya ön form verildikten sonra ısıtma, taşınma ve form verme işlemleri gerçekleştirilir [19]. Taşınma sırasında oluşan sıcaklık kayıplarını engellemek için iş parçasının form edileceği yerde ısıtılması gerekmektedir. Malzemenin taşınmadan form edildiği sıcak şekillendirme yöntemleri ısıtma yöntemine göre incelenebilir. Eğer parça ve/veya kalıp kapalı bir fırın içinde ısıtılarak form verme işlemi gerçekleşiyorsa fırın içinde sıcak şekillendirme [20]; iş parçasının bakır çeneler yardımıyla tutulup, üzerinden akım geçirilerek sıcaklığının artırılması yöntemi uygulanıyor ise elektrik direnci ile sıcak şekillendirme olarak adlandırılır [21]. Fırın içinde ısıtma; tüm hacim kapalı ve yalıtımlı bir ortamda ısıtıldığı için homojen ısınma bakımından avantaj sağlanırken, süre ve

de indüksiyon ile sıcak şekillendirme yöntemidir. Hem kalıbın hem de parçanın ısıtılabilmesi sayesinde homojen ısınmaya katkı sağlarken, fırında ısıtmaya kıyasla manyetik alan yardımıyla direk olarak iş parçası ve kalıbın ısıtılması sayesinde enerji ve süre tasarrufu sağlamaktadır. Fakat bu yöntem için yapılan çalışmalarda genellikle iş parçası ısıtılırken, kalıplar soğuk halde bırakılmaktadır. Kalıpların soğuk olması ve titanyum gibi malzemelerin indüksiyon ile homojen ısıtılamaması, istenilen geometrinin ve içyapının elde edilmesinde sorunlara neden olmaktadır [13-16, 22]. Bu nedenle iş parçası yerine kalıbı homojen ısıtarak, iş parçasını kalıp üzerinde istenilen sıcaklığa getirdikten sonra form verme işlemini gerçekleştirilmesinin daha etkin bir çözüm olacağı düşünülmektedir. Kalıbı ısıtarak form verme işleminin yapıldığı çalışmalar literatürde oldukça sınırlıdır [17]. Bu sebeple bu çalışmada form verme işlemi öncesi kalıpların homojen olarak ısınabilmesi için etkin indüksiyon ile ısıtma parametreleri araştırılmıştır.

İndüksiyon sistemi yardımıyla birçok farklı uygulama sanayide sıklıkla kullanılmaktadır. Yüzey sertleştirme, kaynak yapma, dövme işlemi öncesi iş parçasının ısıtılması, temperleme, gerginlik giderme ve malzeme eritme bu uygulamalardan bazılarıdır. Tüm bu uygulamaların yanında büyük kütleli malzemelerin indüksiyonla ısıtılması da özellikle sıcak şekillendirme için kullanılmaya başlanan uygulamalardan biridir [26].

İndüksiyon ile ısıtma sırasında, iş parçasının homojen olarak ısınmasına etki eden birçok parametre bulunmaktadır. Bu parametrelerden en etkili olanları Çizelge-1'de verilmiştir [23]. İstenilen sıcaklık değerine ve dağılımına ulaşmak için etkin parametreler dışında dikkat edilmesi gereken, indüksiyon ile ısıtmanın doğası gereği karşılaşılan çeşitli elektriksel etkiler Çizelge 2'de verilmiştir. Bu etkiler ısıtılan malzemenin fiziksel, termal ve elektriksel özelliklerine göre değişmektedir [23]. Çizelge 1'de verilen parametrelerden, bobin geometrisi

**Çizelge 1.** İndüksiyon ısıtma verimliliğine etki eden parametreler (Parameters affecting induction heating efficiency)

Parametreler	Isınmaya etkileri	Riskler	Referanslar
<i>Bobin geometrisi</i>	Manyetik akım yoğunluğuna bağlıdır.	Geometriye bağlı olarak bölgesel yüksek akım yoğunluğu oluşabilir. Bu durum bazı bölgelerin çok ısınmasına sebep olur.	[25, 28]
<i>Sistem frekansı</i>	Isınma hızına etki eder.	Yüksek frekans parçanın çok hızlı ısınmasını sağlarken, manyetik olan dalma derinliğini azalttığı için büyük kütleli malzemelerde çekirdeğin ısınmamasına neden olur.	[25, 27, 29]
<i>Bobin-parça mesafesi</i>	Mesafe azaldıkça ısı etkileri artar.	Yakın mesafelerde ısı verimliliği yükselse de homojen ısıtma için mesafenin artırılması gerekir.	[26, 29]
<i>Bobin akımı</i>	Yüksek akım daha yüksek sıcaklıklarda ısınmaya olanak sağlar.	Deri etkisi nedeniyle çok yüksek akım yüzey sıcaklığı ile çekirdek sıcaklığı arasındaki farkı yükselterek termal gerilmelere sebep olabilir.	[27, 28, 29]

enerji tüketimi bakımından dezavantajlıdır. Elektrik direnci ile ısıtma ise çok hızlı bir yöntem olması ile öne çıkarken, kalıbı ısıtmanın mümkün olmaması ve ham malzeme şeklinin homojen ısınmayı engellemesi sebebiyle sınırlı uygulama alanına sahiptir [21]. Bu yöntemlere alternatif olarak kullanılan yöntemlerden biri

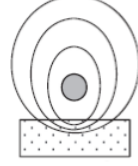

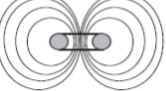
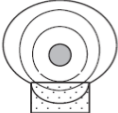
ve sistem frekansı indüksiyon ile sıcak şekillendirme sistemi kurulurken sistem verimliliği için dikkat edilmesi gereken etkenlerdir. Kalıp parça mesafesi ve sistem akımı, sistem çalışması sırasında ısıtılan iş parçası özelinde değiştirilerek sistem verimliliği artırılabilir. İndüksiyonla sıcak şekillendirme için yapılan ilk

çalışmalarda her bir kalıp için ayrı bir bobin grubu imal edilmektedir. Türk Havacılık ve Uzay Sanayi A.Ş. (TUSAŞ) firmasında yapılan araştırma geliştirme faaliyetleri ile farklı geometri ve kalınlıktaki parçaları sıcak şekillendirmek için tasarlanan kalıpların aynı bobin sistemiyle ısıtılması sağlanmıştır [24]. Büyük kütleli malzemelerin ısıtılması sırasında bobin parça mesafesi homojen ısınmayı sağlamak için bobin mesafesinin çok yakın olmaması gerekmektedir. Tasarlanan ve üretilen indüksiyon ile orta frekans ısıtma sisteminde en verimli homojen ısıtma için gereken mesafe 20-25 mm arası olarak hesaplanmıştır [24].

Çizelge 1’de verilen parametrelerin sistemin performansına etkisini hesaplarken Çizelge 2’de verilen

Comsol programı kullanılarak yapılan diğer bir çalışmada ise, enjeksiyon kalıpları modellenerek sonlu elemanlar metoduyla çözüm sağlanmıştır. Elde edilen sıcaklık verileri deneysel verilerle karşılaştırılmıştır [34]. Genelde dövme işlemleri önce kalıbın indüksiyon ile ısıtılması süreçlerinde kullanılan sonlu elemanlar programı SIMHEAT ile ilgili literatürde birçok farklı çalışma yapılmıştır. Sıcaklığın değişmesi ile değişen termal iletkenlik, manyetik geçirgenlik gibi değerlerin anlık olarak ve istenilen sıcaklık değerlerinde hesaplanabildiği bu program kalıp ısıtma özelinde tasarlanmış olması ve kalıbın mekanik özelliklerinin değişimini de hesaplayabilmesi özellikleriyle ön plana çıkmaktadır [35,36].

**Çizelge 2.** İndüksiyon ile ısıtma sırasında görülen bazı elektromanyetik etkiler ( Induction heating electromagnetic effects)

İsim	Karakteristik özelliği	Sematik gösterimi	Referanslar
Deri etkisi	Doğrusal akımda bir iletkenin geçen akım tüm kesit alanında aynıken alternatif akımda çekirdeğe doğru manyetik alan azalır. Dalma derinliği denen bu durum iş parçasında da aynı şekilde görülür.		[26]
Yakınlık etkisi	Bobinin oluşturduğu manyetik alana zıt yönde iş parçasında da manyetik alan oluşur. Bu iki manyetik alan birbirini besleyerek toplam manyetik alanı artırır.		[26]
Yüzük etkisi	Bükülüp halka şekline gelen bobinlerde iç kısımda manyetik alan artarken dış kısımda manyetik alan azalır.		[26, 30]
Kenar etkisi	İş parçasının kenarlarında oluşan farklı manyetik geçirgenlik manyetik alan çizgilerini değiştirir.		[26, 30]

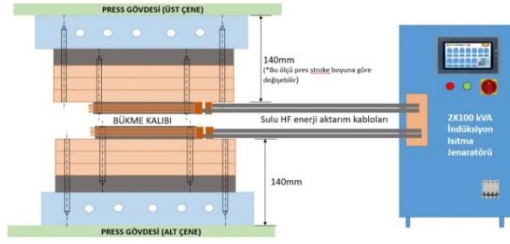
karakteristik özellikleri de dikkate almak gerekmektedir. İndüksiyon ile ısıtma sistemi, elektriksel ve termal olayların birbirini tetiklediği bir mekanizmaya sahiptir. Bu tarz karmaşık mekanizmaları çözebilmek için sonlu elemanlar programlarından yardım almak gerekmektedir. İndüksiyon sistemi ile ısıtma incelenirken sonlu elemanlar metodunu kullanan birçok çalışma yapılmıştır. Comsol programı yardımı ile yapılan çalışmada, farklı frekans değerlerine göre elde edilen güç değerleri deneysel verilerle karşılaştırılmıştır. Deney sonuçlarıyla sonlu elemanlar çözümü sonuçları arasında yaklaşık %5 civarında bir hata oranı tespit edilmiştir. [32]. Ansys programı yardımıyla yapılan bir başka çalışmada ise bobin iş parçası arası mesafe ve akım değişkenlerinin parçanın sıcaklık değişimine etkisi incelenmiştir. Çalışma sonucunda frekans arttıkça yüzey sıcaklığının daha hızlı arttığı, bobin ile iş parçası arası mesafe arttıkça ise sıcaklık artış hızının azaldığı gözlemlenmiştir [33].

Bu çalışmada, kalıbın indüksiyon ile, iş parçasının ise kalıp yardımıyla istenilen sıcaklığa getirilerek form verme işleminin yapıldığı indüksiyon ile sıcak şekillendirme yöntemi akım etken parametresi yönünden sonlu elemanlar yöntemi yardımıyla incelenmiştir. Analiz için Simheat programı kullanılmıştır.

## 2. MATERYAL VE METOD (MATERIAL and METHOD)

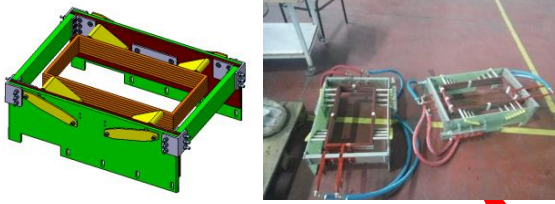
Bu çalışmada, hâlihazırda TUSAŞ bünyesinde kullanılan indüksiyon sistemi modellenmiş ve SIMHEAT programı ile elektro-termal sonlu elemanlar analizi yapılmıştır. İndüksiyon sistemi 3 ana bileşenden oluşmaktadır. Bu bileşenler soğutucu sistemi, jeneratör ve bobin grubu olup Şekil 1’de gösterilmiştir. Bobin tellerinin içinden soğutma sıvısı geçmekte ve soğutucu grubu yardımıyla bobinin sıcaklığı 25 °C ‘de sabit tutulmaktadır.





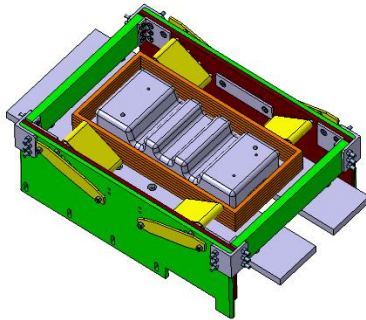
**Şekil 1.** İndüksiyon sisteminin şematik gösterimi (Schematic view of induction system)

Bobinler 6 sarımdan oluşmaktadır. Dikdörtgensel bir geometrik şekle sahiptir. Her bir bobin sarımının kesit ölçüleri 10 mm x 10mm'dir. Bobinin iç ölçüleri 215 mm x 450 mm ve toplam yüksekliği 65 mm olarak üretilmiştir. Bobinde iletken tel olarak bakır kullanılmıştır. Her bir sarımın arasına izolatör konularak temas etmeleri engellenmiştir. Bobinlerin pres ile birlikte hareket edebilmesi ve kalıplara temas etmeden havada asılı kalabilmesi için uzun kenarlarından ikişer adet bağlantı elemanı kaynatılarak imal edilen dış çerçeveye bağlanmıştır ve Şekil 2'de gösterilmiştir. Jeneratör grubu 100 kVA gücüne sahip iki adet jeneratörden oluşmaktadır.



**Şekil 2.** İndüksiyon bobinleri (Induction coils)

Bobin içinde ısıtılması için deneysel bir kalıp tasarımı yapılmıştır. Kalıbın ebatları 205 mm x 440 mm olarak belirlenmiştir. Kalıp bobinlere her kenarda eşit mesafede olacak şekilde tasarlanmıştır ve Şekil 3'te gösterilmiştir.



**Şekil 3.** İndüksiyon kalıbı tasarımı (Design of induction die)

Tasarlanan kalıbın malzemesi 1.2344 (X40CrMoV5-1) sıcak iş çeliği olarak seçilmiştir. Bu malzeme tipi genelde yüksek sıcaklıkta sertliğini kaybetmeme özelliği sayesinde sıcak şekillendirme takımı, dövme takımı ve benzeri yüksek sıcaklık uygulamalarında tercih edilmektedir. Malzeme özellikleri Çizelge 3'te verilmiştir. Malzeme kartı oluşturulurken Hensel Spittel malzeme modelinden faydalanılmıştır.

Eşitlik 1'de verilen matematiksel ifade malzemenin gerinim, gerinim oranı ve deformasyon sıcaklığı arasındaki ilişkiyi vermektedir. Bu malzeme modeli ile oluşturulan 1.2344 malzemesine ait sabitler Çizelge 4'te gösterilmiştir. Verilmeyen sabitlerin değeri sıfırdır.

$$\sigma_f = A \exp(m_1 T) \varepsilon^{m_2} \dot{\varepsilon}^{m_3} \exp\left(\frac{m_4}{\varepsilon}\right) (1 + \varepsilon)^{m_5 T} \exp(m_7 - \varepsilon) \dot{\varepsilon}^{m_8 T} T^{m_9} \quad (1)$$

**Çizelge 3.** 1.2344(X40CrMoV5-1) malzemesine ait fiziksel ve kimyasal özellikler (Mechanical and chemical properties of 1.2344(X40CrMoV5-1) materials)

Kimyasal Bileşenler	C	Cr	Mo	V
	(%0,40)	(%5,30)	(%1,40)	(%1,0)
Isıl Genleşme Katsayısı $\left[\frac{10^{-6}m}{mK}\right]$	10,8 (20-100 °C)	12,3 (20-300 °C)	13,0 (20-500 °C)	13,5 (20-700 °C)
Isıl İletkenlik $\left[\frac{W}{mK}\right]$	25,6 (20 °C)	28,4 (350 °C)	29,4 (700 °C)	-
Elastisite Modülü $\left[\frac{kN}{mm^2}\right]$	212 (20 °C)	197 (250 °C)	175 (500 °C)	-

**Çizelge 4.** 1.2344(X40CrMoV5-1) malzemesine ait Hensel Spittel değerleri (Hensel Spittel values of 1.2344(X40CrMoV5-1) material)

A	$m_1$	$m_2$	$m_3$	$m_4$	$\varepsilon$	$\dot{\varepsilon}$
2601.8	-0.003	-0.1	0.13	0.046	0.9	2.0

İndüksiyon ile sıcak şekillendirmede sonlu elemanlar analizi yapılırken hem Maxwell denklemlerinden hem de sıcaklık denklemlerinden yararlanılmaktadır. Sistemin temel çalışma prensibi şu şekildedir. Şebekeden alınan akım jeneratör içindeki ilgili elektrik ekipmanları ile istenilen frekansa ve akım değerine ayarlanır. Akım değeri sistemin güç oranı değiştirilerek ayarlanabilir. Bobinlerden geçen akım malzeme üzerinde bir manyetik alan oluşturur. Alternatif akımın etkisiyle bu manyetik alan iş parçası üzerinde frekansa bağlı değişkenlik göstererek büyüyüp küçülür. İş parçası üzerinde oluşan bu değişken manyetik alan girdap akımlarına sebebiyet verir. Oluşan girdap akımları iş parçası üzerinden geçerken malzeme direnç etkisi göstererek bir elektro motor kuvveti oluşturur ve tıpkı üzerinden akım geçen bir tel gibi ısı açığa çıkarır. Bu ısının etkisiyle iş parçasının sıcaklığı artar [26].

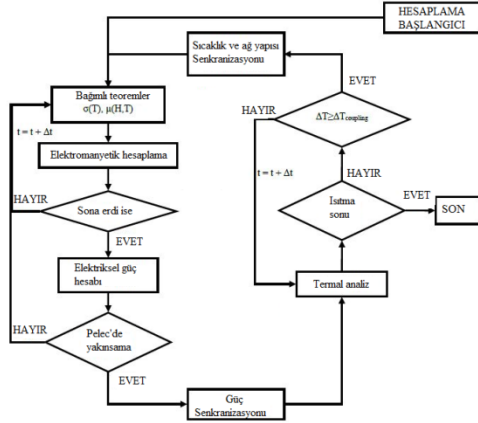
Bu çalışmada farklı güç değerlerine göre frekans, kol akım ve bobine giren akım değerleri ölçülmüştür ve Çizelge 5'te gösterilmiştir. Farklı akım değerlerinde

ısıtılan kalıba ait sıcaklık değerleri belirlenmiş ve termal gerilimler hesaplanmıştır.

**Çizelge 5.** İndüksiyon sisteminden ölçülen elektriksel değerler (Measured electrical values of induction systems)

Sistemin güç değeri (%)	Frekans (Hz)	Kol Akımı (A)	Bobine giren akım (A)
25	3150	106	601
30	3150	128	726
35	3150	146	828

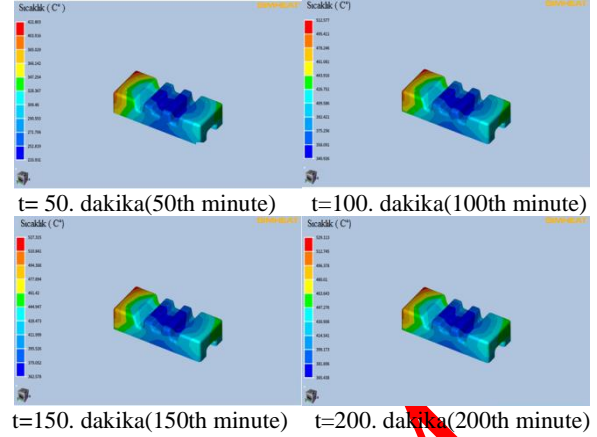
Termal ve elektriksel unsurların birbirini tetiklediği ve etkilediği bu tarz sistemlerde birbirleriyle haberleşen sonlu elemanlar programları kullanmak gerekmektedir. SIMHEAT programı yardımıyla zamana bağlı sıcaklık değişimleri hesaplanmıştır. Analiz programının temel çalışma mantığı Şekil 4’te gösterilmiştir.



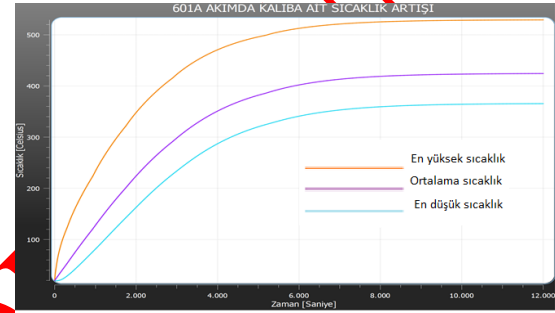
**Şekil 4.** Haberleşmeli elektro-termal sayısal analiz şematik gösterimi (Schematic representation of communicating electro-thermal numerical analysis)

## 5. SONUÇLAR ve TARTIŞMA (RESULTS AND DISCUSSION)

Yapılan çalışmada tasarlanan kalıp ve bobin modeli, tezgâhın güç değerlerine göre hesaplanan bobine giren akım değerleri ile analiz edilmiştir. Analizde kalıp bobin arası mesafe 25 mm alınmıştır. Sistemin frekansı 3150 Hertz (Hz) değerinde sabit tutulmuştur. Elde edilmek istenen sıcaklık olarak Ti6Al4Vd malzemenin sıcak şekillendirme sıcaklığı olan 650 °C-750 °C arası olarak belirlenmiştir. Kalıplar 200 dakika boyunca ısıtılmıştır. 601 Amper değeri için elde edilen sonuçlar Şekil 5 ve Şekil 6’da gösterilmiştir. Analiz sonucunda en yüksek sıcaklık farkı 3090 saniye sonucunda 189 °C olarak görülmüştür. Erişilen en yüksek sıcaklık 529 °C olmuştur.

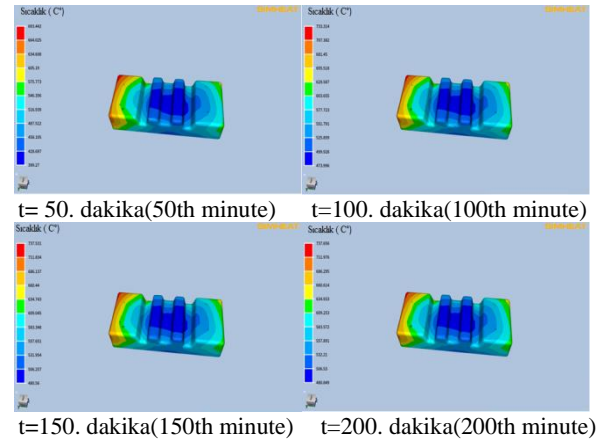


**Şekil 5.** 601 Amper değerinde kalıp üzerindeki sıcaklık dağılımı (Temperature distribution on the die at 601 Amps)



**Şekil 6.** 601 Amper değerinde en düşük, ortalama ve en yüksek sıcaklık dağılımı (Minimum, average and maximum temperature distribution at 601 Amps)

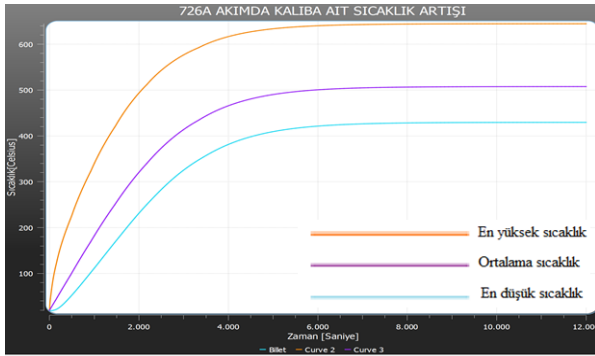
726 Amper değeri için elde edilen sonuçlar Şekil 7 ve Şekil 8’de gösterilmiştir. Analiz sonucunda en yüksek sıcaklık farkı 1995 saniye sonucunda 262 °C olarak görülmüştür. Erişilen en yüksek sıcaklık 645 °C olmuştur.



**Şekil 7.** 726 Amper değerinde kalıp üzerindeki sıcaklık dağılımı (Temperature distribution on the die at 726 Amps)

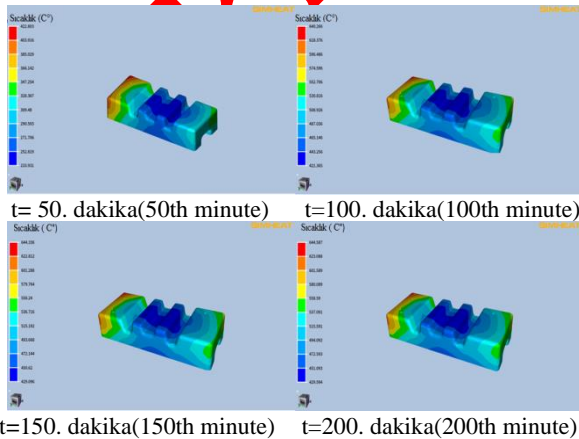
**Çizelge 6.** Farklı akımlardaki sıcaklık değerleri (Temperature values at different currents)

601A SICAKLIK DEĞERLERİ				726A SICAKLIK DEĞERLERİ				828A SICAKLIK DEĞERLERİ			
t(s)	Min. (°C)	Max. (°C)	ΔT(°C)	t(s)	Min. (°C)	Max. (°C)	ΔT(°C)	t(s)	Min. (°C)	Max. (°C)	ΔT (°C)
0	20	20	0	0	20	20	0	0	20	20	0
1200	98	261	164	1200	136	378	242	1200	174	486	313
2400	194	382	189	1995	231	493	262	1665	247	573	326
3090	240	429	189	2400	273	534	261	2400	345	656	312
3600	268	455	187	3600	363	604	241	3600	435	714	279
4800	315	492	177	4800	405	631	226	4800	465	729	264
6000	341	513	172	6000	421	640	219	6000	474	733	259
7200	355	522	168	7200	427	643	216	7200	479	737	258
8400	361	526	165	8400	429	644	215	8400	480	737	257
9600	364	528	164	9600	429	644	215	9600	481	738	257
10800	365	529	164	10800	430	645	215	10800	481	738	257
12000	365	529	164	12000	430	645	215	12000	481	738	257

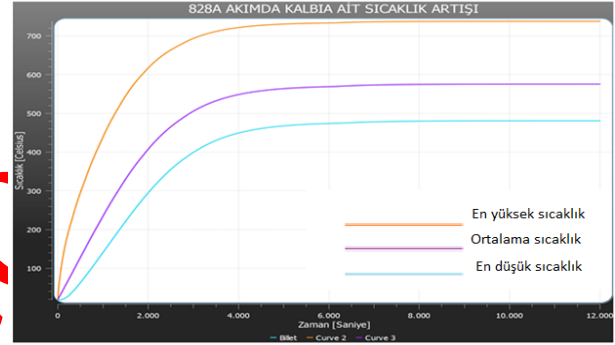


**Şekil 8.** 726 Amper değerinde en düşük, ortalama ve en yüksek sıcaklık dağılımı (Minimum, average and maximum temperature distribution at 726 Amps)

828 Amper değeri için elde edilen sonuçlar Şekil 9 ve Şekil 10'da gösterilmiştir. Analiz sonucunda en yüksek sıcaklık farkı 1665 saniye sonucunda 326 °C olarak görülmüştür. Erişilen en yüksek sıcaklık 738 °C olmuştur.



**Şekil 9.** 828 Amper değerinde kalıp üzerindeki sıcaklık dağılımı(Temperature distribution on the die at 828 Amps)



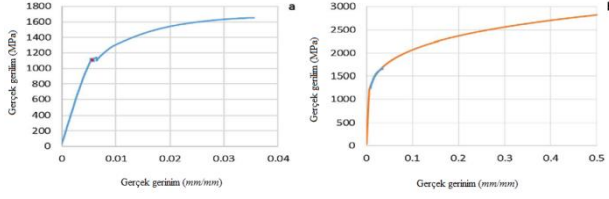
**Şekil 10.** 828 Amper değerinde en düşük, ortalama ve en yüksek sıcaklık dağılımı (Minimum, average and maximum temperature distribution at 828 Amps)

Elde edilen sonuçlara göre her bir akım değeri için kalıpta oluşan termal gerilimler Eşitlik 2 yardımıyla hesaplanmıştır.

$$\sigma_t = E\alpha\Delta T \quad (2)$$

Çizelge 3 ve Çizelge 6' da verilen değerler yardımıyla Eşitlik 2 kullanılarak yapılan hesaplamalar sonucunda 601A, 726A ve 828A değerleri için oluşan termal gerilimler sırasıyla 430 MPa, 596 MPa ve 741 MPa olarak hesaplanmıştır. Her bir akım değeri için oluşan en yüksek sıcaklık farkı Çizelge 6'da koyu renkle gösterilmiştir. En yüksek sıcaklık farkının olduğu zamanda kalıpta görülen en yüksek sıcaklıklar 400 °C civarında görüldüğü için kalıp malzemesinin bahsedilen sıcaklığındaki gerilim-gerinim değerine göre değerlendirilmiştir. Kalıpta oluşan termal gerilimler Şekil 11'de verilen gerilim-gerinim grafiğine göre değerlendirildiğinde, oluşan gerilimlerin elastik bölge içerisinde kaldığı görülmüştür.





a-) 400 °C ve 0.1 s<sup>-1</sup> gerinim oranında (At 400 °C and 0.1 s<sup>-1</sup> strain rate) b) 400 °C ve 0.5 s<sup>-1</sup> gerinim oranında (At 400 °C and 0.5 s<sup>-1</sup> strain rate)

Şekil 11. 1.2344 malzemesine ait gerilim-gerinim grafiği [31] (Stress-strain graph of 1.2344 material [31])

## 6. SONUÇ VE ÖNERİLER (CONCLUSION AND SUGGESTIONS)

Bu çalışmada yenilikçi bir sıcak şekillendirme yöntemi olan indüksiyonla sıcak şekillendirme yöntemi araştırılmıştır. Elektriksel, termal ve mekanik özelliklerin iç içe çalıştığı bu yöntemde, iş parçasına form veren kalıpların istenilen sıcaklığa ulaşmasında en etkili parametrelerin ne olduğu daha önce yapılan çalışmalar yardımıyla değerlendirilmiştir. Çalışma sonucunda elde edilen bulgular aşağıda özet olarak verilmiştir.

- Akım değeri arttıkça kalıbın, daha kısa sürede daha yüksek sıcaklıklara çıkılabildiği tespit edilmiştir. Bu sonuç akım değerini yükselterek istenilen sıcaklığa daha hızlı bir şekilde erişilebildiğini göstermiştir. En yüksek akım değeri olan 828 Amper değerinde kalıpta en yüksek sıcaklık noktası yaklaşık 738 °C olarak görülmüştür.
- Yüksek akımda yüksek sıcaklık elde edilmesine karşın takımın en sıcak ve en soğuk noktalarındaki sıcaklık farkı akım değeri arttıkça yükselmiştir. 601 Amper değerinde en yüksek sıcaklık farkı 189 °C iken, 801 Amper değerinde bu fark 247 °C'ye çıkmıştır.
- Matematiksel olarak yapılan hesaplamada en yüksek termal gerilim en yüksek akımda 746 MPa olarak bulunmuştur. Bu değer malzemenin elastik bölgesinde kaldığı için bir termal çatlak riski oluşturmaktadır.

Kalıbın homojen sıcaklığa sahip olmasını sağlamak için akım değerleri yükseltilerek en yüksek sıcaklık artırılabilir. Daha yüksek sıcaklık elde edildiğinde bobin sisteminin akımı azaltılarak iç ve dış yüzey arasındaki sıcaklık farkı dengelenebilir. Bu yöntem uygulanırken termal gerilmelere dikkat etmek gerekmektedir.

## SİMGELER VE KISALTMALAR (SYMBOLS AND ABBREVIATIONS)

$A$	: Malzeme sabiti ( $Pa$ )
$\alpha$	: Termal genleşme katsayısı ( $1/^{\circ}K$ )
$\sigma_f$	: Akış gerilimi ( $Pa$ )
$\sigma_t$	: Termal gerilim ( $MPa$ )
$\varepsilon$	: Etkin gerinim

$\dot{\varepsilon}$	: Etkin gerinim oranı ( $s^{-1}$ )
$E$	: Elastisite Modülü ( $MPa$ )
$m_1 \dots m_9$	: Malzeme sabitleri (boyutsuz)
$\Delta T$	: Sıcaklık farkı ( $^{\circ}K$ )

## TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENT)

Tezgaah ölçümleri ve sistem analizi sırasında sağladıkları yardımlardan dolayı TUSAŞ ( Türk Havacılık ve Uzay Sanayi) firmasına teşekkür ederiz.

## ETİK STANDARTLARIN BEYANI (DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS)

Bu makalenin yazar(lar)ı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler.

## YAZARLARIN KATKILARI (AUTHORS' CONTRIBUTIONS)

**Emre EROL:** Gerekli ölçümleri yapmış, analizleri yapmış ve makalenin yazımını gerçekleştirmiştir.

**Tayfun MENLİK:** Isıl analizlerin teorik altyapısını oluşturmuş ve sonuçlarını analiz etmiştir.

**Çetin KARATAŞ:** Kalıp ve sistem tasarımını yapmıştır.

**Adnan SÖZEN:** Genel tasarım kurgusunu ve analiz modellemesini gerçekleştirmiştir.

## ÇIKAR ÇATIŞMASI (CONFLICT OF INTEREST)

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

## KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Kleiner, M., Geiger, M., & Klaus, A., "Manufacturing of lightweight components by metal forming." *CIRP annals*, 52(2), 521-542. (2003).
- [2] Neugebauer, R., Altan, T., Geiger, M., Kleiner, M., & Sterzing, A., "Sheet metal forming at elevated temperatures." *CIRP annals*, 55(2), 793-816. (2006).
- [3] Karbasian, H., & Tekkaya, A. E., "A review on hot stamping." *Journal of Materials Processing Technology*, 210(15), 2103-2118. (2010).
- [4] Mori, K., Maki, S., & Tanaka, Y., "Warm and hot stamping of ultra high tensile strength steel sheets using resistance heating." *CIRP annals*, 54(1), 209-212. (2005).
- [5] Yanagimoto, J., Oyamada, K., & Nakagawa, T., "Springback of high-strength steel after hot and warm sheet formings." *CIRP annals*, 54(1), 213-216. (2005).
- [6] Yanagimoto, J., & Oyamada, K., "Mechanism of springback-free bending of high-strength steel sheets under warm forming conditions." *CIRP annals*, 56(1), 265-268. (2007).
- [7] Bariani, P. F., Bruschi, S., Ghiotti, A., & Turetta, A., "Testing formability in the hot stamping of HSS." *CIRP annals*, 57(1), 265-268., (2008).
- [8] Kotkunde, N., Deole, A. D., Gupta, A. K., Singh, S. K., & Aditya, B., "Failure and formability studies in warm deep drawing of Ti-6Al-4V alloy." *Materials & Design*, 60, 540-547., (2014).

- [9] Perez, J. A., Eguía, V. M., Sobrino, J. C., & Martínez, A. M., "Experimental results and constitutive model of the mechanical behavior of Ti6Al4V alloy at high temperature." *Procedia Manufacturing*, 41, 723-730., (2019).
- [10] Stachowicz, F., Trzepieciński, T., & Pieja, T., "Warm forming of stainless steel sheet." *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 10(4), 85-94., (2010).
- [11] Mori, K. I., Bariani, P. F., Behrens, B. A., Brosius, A., Bruschi, S., Maeno, T., ... & Yanagimoto, J. J. C. A., "Hot stamping of ultra-high strength steel parts." *Cirp Annals*, 66(2), 755-777., (2017).
- [12] Song, M. C., & Moon, Y. H., "Coupled electromagnetic and thermal analysis of induction heating for the forging of marine crankshafts." *Applied Thermal Engineering*, 98, 98-109., (2016).
- [13] Kim, D. K., Woo, Y. Y., Park, K. S., Sim, W. J., & Moon, Y. H., "Advanced induction heating system for hot stamping." *The international journal of advanced manufacturing technology*, 99, 583-593., (2018).
- [14] Kolleck, R., Veit, R., Merklein, M., Lechler, J., & Geiger, M., "Investigation on induction heating for hot stamping of boron alloyed steels." *CIRP annals*, 58(1), 275-278. (2009).
- [15] Huang, M. S., & Tai, N. S., "Experimental rapid surface heating by induction for micro-injection molding of light-guided plates." *Journal of applied polymer science*, 113(2), 1345-1354., (2009).
- [16] Francesco, G., Giuseppina, A., & Luigino, P., "Incremental forming with local induction heating of materials with magnetic and non-magnetic properties." *Procedia Engineering*, 183, 143-148., (2017).
- [17] Frizen, V., Tarasov, F., Bychkov, S., Fatkullin, S., & Sarapulov, S., "Induction heating system for die tooling of press for isothermal stamping of large-sized parts." *In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 950, No. 1, p. 012011). IOP Publishing., (2020).
- [18] Schwingenschlögl, P., & Merklein, M., "Characterization of tribological conditions within direct hot stamping." *Journal of Materials Processing Technology*, 278, 116535., (2020).
- [19] Tang, Z., Gu, Z., Li, Y., Li, X., Yu, G., & Yi, L., "Study on the Effect of the Pre-Forming of 22MnB5 Steel in Indirect Hot Stamping." *Materials*, 16(10), 3739., (2023).
- [20] Dvorak, B., Tavak, J. J., & Vit, T., "Advanced Design for Continuous Roller Furnace for Hot Forming Line." *In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 418, No. 1, p. 012017). IOP Publishing., (2018).
- [21] Ozturk, F., Ece, R. E., Polat, N., Koksall, A., Evis, Z., & Sheikh-Ahmad, J. Y., "Application of electric resistance heating method on titanium hot forming at industrial scale." *Arabian Journal for Science and Engineering*, 41, 4441-4448. (2016).
- [22] Sun, Y., Wang, Y., Yang, X., & Pang, L., "A novel coil distribution for transverse flux induction heating." *Physics Procedia*, 50, 32-37., (2013).
- [23] Bayerl, T., Duhovic, M., Mitschang, P., & Bhattacharyya, D., "The heating of polymer composites by electromagnetic induction—A review." *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 57, 27-40., (2014).
- [24] Ozturk, F., Polat, A. N., Ece, R. E., Sever, H. M., & Erol, E., *U.S. Patent Application No. 18/015,481.*, (2023).
- [25] Zinn, S., & Semiatin, S. L., *Elements of Induction Heating-Design, Control, and Applications*. ASM International. *Electronic Power Research Institute.*, (1988).
- [26] Rudnev, V., Loveless, D., & Cook, R. L., *Handbook of induction heating*. CRC press., (2017).
- [27] Dvorkin Y., Wang Y., Pandzic H., Kirschen D., "Comparison of Scenario Reduction Techniques for the Stochastic Unit Commitment." *IEEE PES General Meeting| Conference & Exposition*, 1-5., (2014).
- [28] Davies, J. *Conduction and induction heating* (No. 11). IET., (1989).
- [29] Moser, L., "Experimental analysis and modeling of susceptorless induction welding of high performance thermoplastic polymer composites" (Doctoral dissertation, Dissertation, Kaiserslautern, Technische Universität Kaiserslautern), (2012).
- [30] Rapoport, E., & Pleshivtseva, Y., *Optimal control of induction heating processes*. CRC Press., (2006).
- [31] Marashi, J., Yakushina, E., Xirouchakis, P., Zante, R., & Foster, J., "An evaluation of H13 tool steel deformation in hot forging conditions." *Journal of Materials Processing Technology*, 246, 276-284. (2017).
- [32] Kennedy, M. W., Akhtar, S., Bakken, J. A., & Aune, R. E., "Analytical and FEM modeling of aluminum billet induction heating with experimental verification." *Light Metals 2012*, 269-275. (2016).
- [33] Bao, L., Qi, X. W., Mei, R. B., Zhang, X., & Li, G. L., "Investigation and modelling of work roll temperature in induction heating by finite element method." *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 118(7), 735-743., (2018).
- [34] Guerrier, P., Nielsen, K. K., Menotti, S., & Hattel, J. H., "An axisymmetrical non-linear finite element model for induction heating in injection molding tools." *Finite Elements in Analysis and Design*, 110, 1-10., (2016).
- [35] Badia, A., Alves, J., Bay, F., & Barlier, J., "On the effect of boundary conditions for electromagnetism in induction heat treatment simulations." *In AIP Conference Proceedings* (Vol. 2113, No. 1). AIP Publishing, (2019).
- [36] Alves, J. R., Barlier, J., Marie, S., Beraudo, C., & Bay, F., "Modelling of large displacements and large strains in coupled electromagnetic/solid mechanics/heat transfer problems." *In 8th International Conference on Electromagnetic Processing of Materials.*, (2015).