

## **METAL DÖKÜM KALIPLARIN SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİYLE TEKRARLI TERMAL ANALİZİ**

**M.DURAT<sup>1</sup>, E. NART<sup>1</sup>, R.KAYIKCI<sup>2</sup>, İ.ÖZSERT<sup>1</sup>**

Sakarya Üniversitesi, Teknik Eğitim Fakültesi, ( <sup>1</sup>Makine Eğitimi Bölümü, <sup>2</sup>Metal Eğitimi Bölümü),  
Esentepe Kampüsü, 54187 Adapazarı

[durat@sakarya.edu.tr](mailto:durat@sakarya.edu.tr), [enart@sakarya.edu.tr](mailto:enart@sakarya.edu.tr), [rkayikci@sakarya.edu.tr](mailto:rkayikci@sakarya.edu.tr), [ozsert@sakarya.edu.tr](mailto:ozsert@sakarya.edu.tr)

tel: 0-264-2956526

### **Özet**

Metal döküm kalıplarında termal gerilmelere ve şekil değişimlerine neden olan sıcaklıklar, sonlu elemanlar tekniği ile incelendi. Fiziksel döküm koşullarına uygun olarak, bilgisayar ortamında tasarlanan bir metal döküm kalıbın, belirli zaman aralıkları ile birbirini takip eden döküm ve soğuma süreçleri modellendi. Kalıptaki sıcaklık değişimleri kararlı hale gelinceye kadar analiz yapıldı. Bu analiz neticesinde, kalıptaki maksimum sıcaklıklar ve sıcaklık değişimleri elde edildi. Sonlu elemanlar analizinde kalıp ve dökümün bölüntülenmesinde 3 boyutlu 10 düğümlü dört kenarlı termal elemanlar kullanıldı. Üç boyutlu transiyen sonlu elemanlar modeli ile kalıpta oluşan, sıcaklık ve sıcaklık değişimleri grafiksel olarak gösterildi.

Anahtar Kelimeler: Sonlu elemanlar yöntemi, Termal analiz, Kokil kalıplar, CAD/CAE teknikleri

### **Abstract**

Temperatures distribution causing stresses and strains in permanent molds have been investigated by using finite element method. In this research, a permanent mold has been modeled by using CAD software. Then, casting and cooling cycles of a permanent mold has been modeled realistically. The temperature analysis has been repeated until the temperature distribution has reached to the steady-state in the mold. By using the temperature distribution, maximum and minimum temperatures have been found and the differences have been evaluated for later use. The element type used in the analysis has been selected as 3D 10-node tetrahedron element. The results of the transient thermal analysis have been shown in various graphics.

Keywords: Finite element method, Thermal analysis, Permanent mold casting, CAD/CAE techniques

### **1. GİRİŞ**

Metal kalıplar oldukça yüksek sıcaklıklara maruz kalırlar. Bu sıcaklıklar neticesinde oluşan termal gerilme ve şekil değişimlerden dolayı kalıp ömrü kısalmaktadır [1]. Metal kalıpların modellenmesinde, ergiyik metal ile kalıp arasındaki ısı transferi [2,3] ile faz dönüşümüne ilişkin [4] fiziksel özelliklerin iyi bilinmesi gerekmektedir. Metal kalıplarda dökülen parçaların karmaşık geometrilere sahip olmalarından dolayı, üç boyutlu olarak modelleme yapmak kaçınılmaz

olmaktadır. Ancak üç boyutlu simülasyonlarda mümkün olduğunca bilgisayar kaynaklarını daha az süre kullanarak sonuca ulaşmak önemli olmaktadır.

Metal dökümcülüğünde en sık karşılaşılan problemlerin başında kalıp tasarımı gelmektedir. Özellikle kokil kalıp tasarımı çok yönlü ve karmaşık hesaplamalar gerektirmektedir. Günümüzde yüksek imalat maliyeti gerektiren metal kalıpların çalışma ömürlerinin, tasarım ömrüne göre daha kısa olması önemli sorunlardan biri durumundadır [5]. Bu kalıpların planlanan ömürden önce servis dışı kalmaları büyük bir maliyet oluşturmaktadır. Bu sorunun kaynağında kalıpların ısı yorulma tasarımının iyi yapılamaması yatmaktadır.

Bu çalışmanın amacı, metal kalıpların döküm koşulları altında sonlu elemanlar tekniği ile tekrarlı olarak modellenmesi durumunda, kalıptaki sıcaklık değişimlerinin kararlı hale gelinceye kadar termal analizinin yapılmasıdır. Sıcaklık değişimleri kararlı hale geldikten sonra oluşacak gerilmeler ve şekil değişimleri maksimum ve minimumlar arasında değişeceğinden artık daha fazla çevrim yapmaya gereksinim kalmayacaktır. Problemin çözümünde, sonlu elemanlar yöntemi esasına sahip ANSYS programı kullanılmıştır. Kalıp ve dökümün bölüntülenmesinde (Meshing); 3 boyutlu 10 düğümlü dört kenarlı termal elementler kullanılmıştır. Döküm parçası simetrik olduğundan, kalıp geometrisinin tek tarafı modellenmiştir. Böylece, modellemede daha az düğüm ve eleman kullanarak hem çözüm süresi kısalmış hem de bilgisayarın kullanacağı hafıza azalmış olacaktır.

### 1.1. Metal Kalıp ve Kalıp-Döküm Arasındaki Isı Transferleri

Yapılan çalışmada faz dönüşümü ve sıcaklığa bağlı malzeme özellikleri mevcut olduğundan, dökümün katılaşması esnasında ve kalıptaki ısı transferinde doğrusal olmayan zamana bağlı (transient) denklemler kullanılmalıdır.

Kalıp ile döküm arasındaki ısı iletimi aşağıdaki şekilde belirtilebilir [6]:

$$\rho \cdot \frac{\partial H}{\partial t} = k \cdot \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \quad (1)$$

Entalpi de aşağıdaki şekilde yazılabilir [7]:

$$H = \int_0^T C_p dT + L [1 - f_s(T)] \quad (2)$$

Burada;

$\rho$  -  $\rho_0 f(T)$  sabit veya sıcaklığa bağlı yoğunluk

$k$  -  $k_0 f(T)$  sabit veya sıcaklığa bağlı ısı iletkenliği

$H$  - Entalpi

$L$  - Ergime gizli ısı

$f_s$  - Katılaşan kısım

$c_p$  - Özgül ısı

Döküm-kalıp ve kalıp-çevre ara yüzeylerindeki taşınım ısı transferi ise;

$$q_{1-2} = h(T_1 - T_2) = \frac{k}{x}(T_1 - T_2) \quad (3)$$

ve

$$q_{3-\infty} = h_{\infty}(T_3 - T_{\infty}) \quad (4)$$

Burada  $T_1$  ve  $T_2$  sırası ile dökümün ve kalıbın yüzey sıcaklığıdır. Döküm-kalıp ara yüzeyinde ve kalıp-atmosfer ara yüzeylerinde gerçekleşen ısı transfer katsayıları sırası ile  $h$  ve

$h_{\infty}$  ile tanımlanmaktadır. Kalıbın ısı iletim katsayısı  $k$ , ve kalıp kesit kalınlığı  $x$  ile gösterilmektedir.  $T_3$  ve  $T_{\infty}$  ise sırası ile kalıp dış yüzey ve ortam sıcaklıklarıdır.

## 1.2 Isı İletiminin Sonlu Elemanlar Tekniği İle Analizi

Döküm ve kalıbın termal iletkenlikleri sıcaklıkla değişiklik gösterir. Dökümün ve kalıbın sıcaklık profilleri sonlu elemanlar teknikleri kullanılarak eşzamanlı olarak hesaplanabilir. İlgili bölge, her  $i$  düğümü birleştirerek  $N_i$  şekil fonksiyonlu  $\Gamma$  sınır şartı ile belirli sayıda on düğümlü  $\Omega$  elemanlarla bölünür. Elemanlardaki şekil fonksiyonları koordinatlara dönüştürülerek kullanılır [8] ve bu durum eğri sınır şartlarının gösterilmesine de imkan tanır. Belli olmayan sıcaklık ( $T$ ) herhangi bir zamanda çözüm alanında şu denklemlerle belirlenir:

$$T = \sum_{i=1}^n T_i N_i(t) \quad (5)$$

Burada  $T_i$ ,  $i$  düğümündeki zamana bağlı sıcaklıktır. 5. denklemi 1. denklemin yerine yazarsak ve denklemden Galerkin metodu [9] uygulanırsa, sonlu eleman formülü şu şekilde yazılır:

$$[K]^e \{T_i\} + [C]^e \{\dot{T}_i\} = \{F\}^e \quad (6)$$

Burada  $T_i$  düğüm sıcaklıkları,  $\dot{T}_i$  zaman türevi,  $K$  iletkenlik matrisi,  $C$  kapasitans matrisi ve  $F$  de iç kuvvetleri gösterir. Genel olarak iletkenlik matrisi aşağıdaki gibi açıklanabilir:

$$K_{ij} = \sum_e \int_{\Omega^e} \left( K_x \frac{\partial N_i}{\partial x} \frac{\partial N_j}{\partial x} + K_y \frac{\partial N_i}{\partial y} \frac{\partial N_j}{\partial y} + K_z \frac{\partial N_i}{\partial z} \frac{\partial N_j}{\partial z} \right) d\Omega + \sum_e \int_{\Gamma^e} h N_i N_j d\Gamma \quad (7)$$

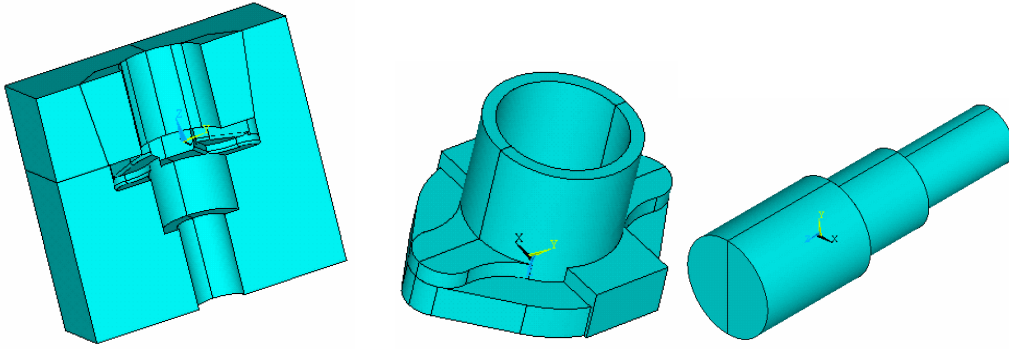
$$C_{ij} = \sum_e \int_{\Omega^e} \rho c N_i N_j d\Omega \quad (8)$$

$$F_i = - \sum_e \int_{\Gamma^e} N_i h T_{\infty} d\Gamma \quad (9)$$

## 2. YÖNTEM

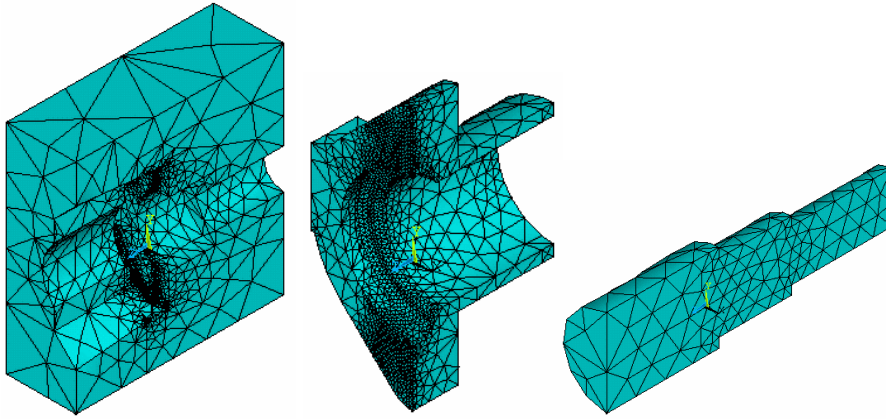
### 2.1.1. Kalıbın ve Döküm Parçasının Geometrik Modelinin Oluşturulması

Yapılan çalışmada incelenen kokil kalıp 140x150x100 mm genel boyutlarında olup, bir otomotiv parçası dökümünde kullanılmaktadır. Dökülen parça simetrik olduğundan, modellemede kalıp geometrisinin tek tarafı kullanılmıştır. Modelleme yaparken fazla sayıda eleman ve düğümünden kaçınmak modelleme süresini azaltacağından, kalıbın yarısını kullanmak hem zaman açısından hem de bilgisayarın kullanacağı hafıza açısından faydalı olmuştur. Kokil kalıpla döküm yaparken parçanın geometrik şeklinden dolayı çelik maça kullanılmıştır. Şekil 1'de modellenen kokil kalıbın yarısı ve kalıpta dökülecek parça ve dökümde kullanılan maça görülmektedir.



Şekil 1. Modellenen kokil kalıbın yarısı, kokil kalıpta dökülecek olan parça ve dökümde kullanılan maça

Kalıp bölüntülenirken, oluşacak eleman ve düğüm sayısını en aza indirebilmek için gerekli bölüntüleme optimizasyonu yapılmıştır. Bu bölüntüleme optimizasyonu neticesinde kalıp 11157 eleman ve 17957 düğümden, döküm parçası da 11198 eleman ve 18873 düğümden ve çelik maça da 766 eleman ve 1515 düğümden oluşmuştur. Şekil 2'de modellenen kalıbın, döküm parçasının ve maçanın bölüntülenmesi gösterilmiştir. Kalıbın ve dökümün malzeme özellikleri Tablo 1 ve Tablo 2'de gösterilmiştir.



Şekil 2. Kalıbın, döküm parçasının ve maçanın bölüntülenmiş durumları

Tablo 3.1. Kalıbın (GGG60) malzeme özellikleri [9]

Sıcaklıklar	Özgül Isı İletimi (J/kg K)	Termal İletkenlik (W/mK)	Yoğunluk (kg/m <sup>3</sup> )
200 °C (473 °K)	461	36	7760
300 °C (573 °K)	494		
400 °C (673 °K)	507		
500 °C (773 °K)	515		
600 °C (873 °K)	536		
750 °C (1023 °K)	603		

Tablo 3.2. Dökümün (AlSi7) malzeme özellikleri [10]

Sıcaklıklar	Entalpi (J/kg)	Termal iletkenlik (W/mK)
20 °C (293 °K)	-	185
577 °C (850 °K)	1.2698e9	183
600 °C (873 °K)	1.6e9	180
618 °C (891 °K)	2.301e9	178
690 °C (963 °K)	2.487e9	160
750 °C (1023 °K)	2.6439e9	200

Bu çalışmadakine benzer bir kalıp-döküm sistemi üzerine yapılan bir deneysel çalışmada, döküm alaşımı ve kalıp arasındaki arayüzey ısı transfer katsayısı ortalama 3000 W/m<sup>2</sup>K olarak ölçülmüştür. Bu çalışmada bu değer referans alınmıştır [10]. Malzeme özellikleri sıcaklığa ve zamana bağlı olarak değiştiği için transiyen analiz yapılmıştır. Çözüm nonlineer olduğu için kuvvet ve yer değişimleri için yakınsama toleransları belirlenmiştir. Sonlu elemanlar metodunda ergime gizli ısısını sisteme sokmanın yollarından biri Entalpi metodudur [11]. Entalpi, malzemenin yoğunluk ve özgül ısı özelliklerinden elde edilir ve malzemenin faz değişimi esnasında ortaya çıkan ergime gizli ısısını tanımlamak için kullanılır.

$$\text{Kati fazda} \quad H = \rho C_k (T - T_0) \quad T < T_k \quad (10)$$

$$\text{Kati/Sıvı fazda} \quad H = H_k + \rho C^* (T - T_k) \quad T_k < T < T_s \quad (11)$$

$$\text{Sıvı fazda} \quad H = H_s + \rho C_s (T - T_s) \quad T > T_s \quad (12)$$

Uygulamada başlangıçta kalıp ön ısıtmaya tabi tutulmaktadır. Bu nedenle modelleme yaparken de kalıbın ilk sıcaklığı pratik koşullara uygun olarak 200 °C (473°K) olarak tanımlanmıştır.

Tekrarlı döküm çevrimlerinin modellenmesinde, her bir döküm ve soğuma çevrimi süresince oluşan sıcaklık değerlerinin belirlenmesi gerekmektedir. Döküm sonucunda elde edilen son sıcaklıkların soğuma için ilk sıcaklık değerleri, soğuma sonucunda oluşan son sıcaklık değerlerinin de bir sonraki döküm için ilk sıcaklık değerleri olarak tanımlanması gerekmektedir. Yapılan çalışmada, her bir döküm ve soğumanın gerçekleştirilebilmesi ve döküm ile soğuma süreçlerinde oluşan sıcaklıkların elde edilebilmesi için Ansys Sonlu elemanlar analiz yazılımının kodlama dili olan APDL (Ansys Parametric Data Language) ile programlar geliştirilmiş ve kalıpta oluşan sıcaklık değişimleri kararlı hale gelinceye kadar gerekli çevrimsel ısısal analiz yapılmıştır.

Yapılan tüm çevrimlerde kalıp ve döküm beraber incelenmiştir. Yapılan modelleme üç boyutlu ve kullanılan eleman sayısı fazla olduğundan, programın çözüm süresi artmakta ve bilgisayarın kayıt kapasitesi yeterli olamamaktadır. Hem simülasyon çözüm süresinin kısaltılabilmesi hem de bilgisayarın kullandığı yer kapasitesinin azaltılabilmesi için sadece kalıpta meydana gelen sıcaklık değerlerinin incelenmesi çok önemlidir. Sadece kalıba ait düğüm noktalarında oluşan sıcaklıkların elde edilebilmesi için de ayrı bir program geliştirilmiştir.

Tüm çevrimler sonucunda elde edilen sıcaklık değerleri bir araya getirilerek, geliştirilen bir programın kullanılmasıyla kalıpta meydana gelen sıcaklık değişimleri elde edilmiş olur. Gerilme ve şekil değişimlerine neden olan sıcaklık değişimlerinin elde edilmesi ve bir dosyaya yazdırılması yapısal analizin gerçekleştirilmesi için önemlidir. Termal analizde elde edilen bu sıcaklık verileri yapısal analiz için sıcaklık girdisi olarak tanımlanacaktır.

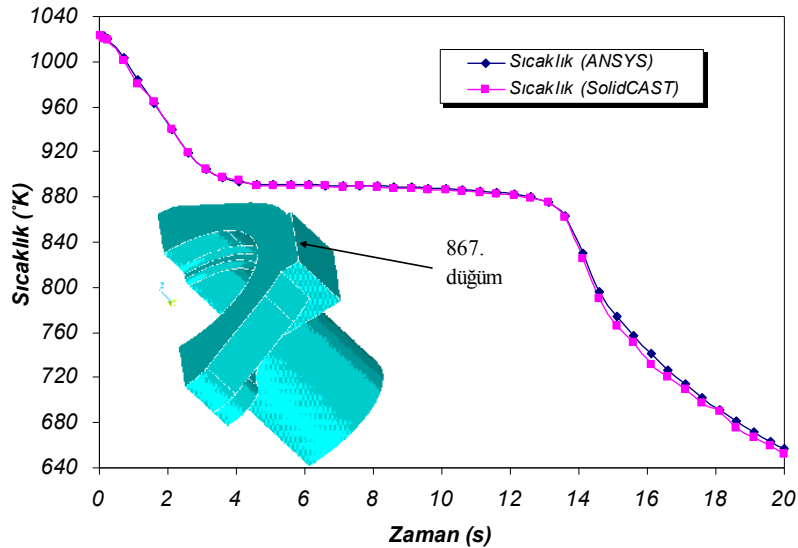
### 3. BULGULAR VE TARTIŞMA

Döküm alaşımının soğuma eğrisi karakteristiğinin elde edilmesi doğru çözüm açısından önemlidir. Alüminyum silisyum alaşımında faz dönüşümünün sıvı sınırı 891 °K (618 °C) ve katı sınırı ise 850 °K (577 °C) olduğu, daha önce yapılan deneyler neticesinde literatür bilgisi olarak bilinmektedir. ANSYS programı ve gerçek döküm simülasyonları yapabilen bir program olan SolidCAST simülasyon programıyla elde edilen soğuma eğrileri Şekil 3'te verilmiştir.

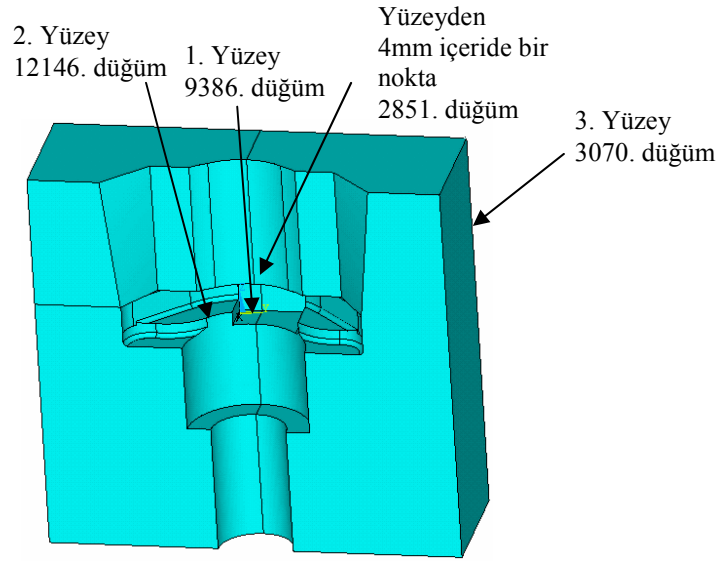
Anılan şeklin incelenmesinden de görüldüğü gibi her iki programla elde edilen soğuma eğrileri çakışmaktadır. Diğer bir önemli nokta ise faz dönüşümünün gerçekleştiği sıcaklık aralığının kaynaklara uygun olarak çıktığı görülmektedir. Bu eğrinin doğru olarak elde edilmesinin en önemli özelliği faz dönüşümü esnasında açığa çıkan oldukça büyük bir enerjinin (ergime gizli ısısı) ısı transferinde önemli bir etkiye sahip olmasındandır. Kullanılan analiz programıyla bu enerjinin doğru olarak tanımlanması, analiz programının güvenilirliğini ve geçerliliğini kanıtlamaktadır.

Metal döküm kalıplarında termal yorulma oluşumundaki en önemli etken, yüksek sıcaklık değişimleri sonucu ortaya çıkan gerilme ve şekil değişimleridir. Yapılan modellemede, gerilme ve şekil değişimine neden olan sıcaklık değişimleri elde edilmiştir.

Kalıpta oluşan sıcaklık değişimleri, maksimum sıcaklık değişimine sahip olunan döküm temas yüzeyleri (Yüzey 1 ve Yüzey 2), kalıbın dış yüzeyi (Yüzey 3) ve kalıbın iç yüzeyinden 4 mm içeride bir nokta olan yerlerde incelenmiştir. Belirtilen bu noktalar ve düğüm noktaları Şekil 4'te gösterilmiştir. Bunlar; Yüzey 1'de seçilen yer köşe noktasındaki 9386, Yüzey 2'de seçilen yer ise 12146, dış yüzey olan Yüzey 3'te seçilen 3070 ve kalıp yüzeyinin 4 mm iç kısmında seçilen 2851 numaralı düğüm noktalarıdır. Bu yerlerin seçilmesindeki amaç, çalışma ortamında incelenen kalıpta ince kesite sahip olan ve yüksek sıcaklık değişiminin meydana geldiği yüzeylerin ve bu yüzeylerle kıyaslama yapabilmek için kalıbın iç ve dış kısımlarındaki oluşan sıcaklık değişimlerinin gösterilmesidir. Analiz çalışmasında kalıbın tüm noktalarında oluşan sıcaklık değişimleri elde edilmesine rağmen gerilme ve şekil değişimlerine neden olan kritik noktalar ve bu noktalarla kıyaslama yapabilmek için belli noktalar seçilmiştir.

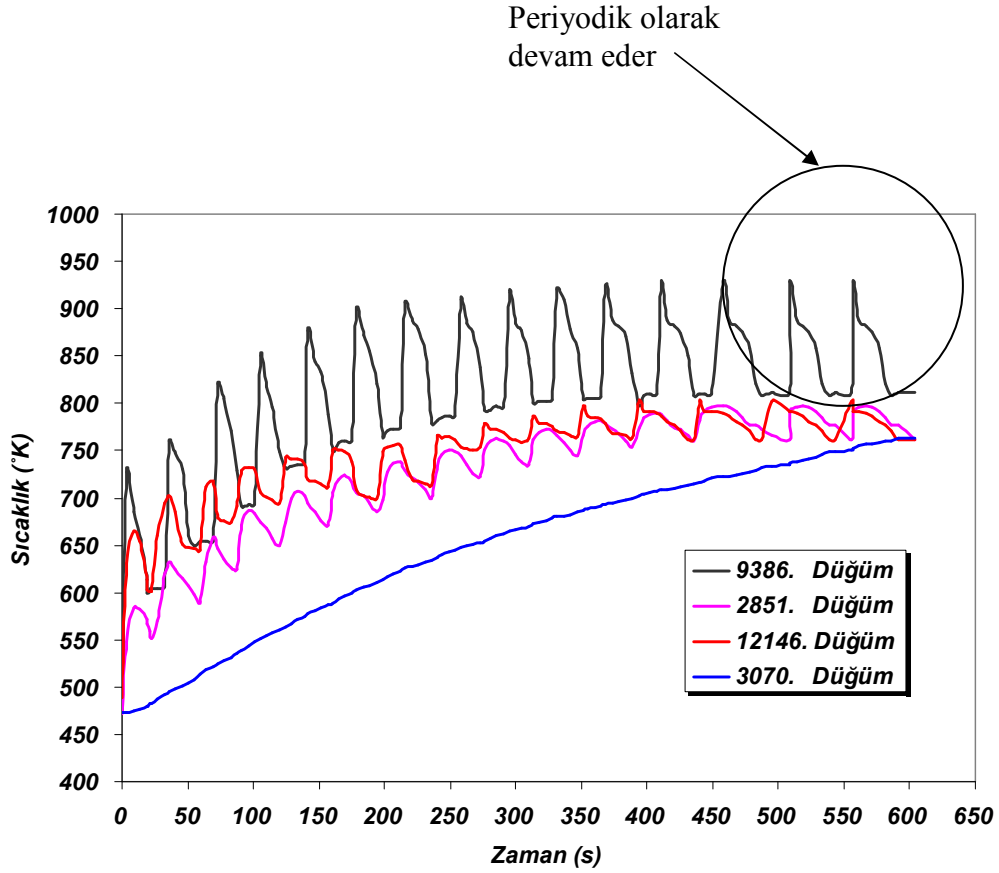


Şekil 3. Döküm alaşımının ANSYS ve SolidCAST programları ile 867. düğüm noktasındaki soğuma eğrileri sonuçlarının karşılaştırılması



Şekil 4. Kalıp üzerinde sıcaklık değişimlerinin incelendiği düğüm noktaları

Yapılan modelleme çalışmasında incelenen yüzeylerin (Şekil 4) kaç çevrim neticesinde kararlı sıcaklık yapısına sahip oldukları tespit edilmiştir. Şekil 5'te kalıbın 9386 numaralı, 12146. numaralı, 2851 numaralı ve 3070 numaralı düğüm noktalarındaki çevrimler neticesinde oluşan sıcaklık değerleri gösterilmiştir.



Şekil 5. Tekrarlı termal çevrim neticesi 9386, 12146, 2851 ve 3070. düğüm noktalarında belirlenen sıcaklık değişimleri

9386. düğüm noktasında kalıp sıcaklığının 13. çevrim sonunda kararlı hale geldiği tespit edilmiştir. Bu çevrimden sonra kalıbın alabileceği sıcaklık değerleri, minimum ve maksimum değerler arasında değişeceğinden dolayı daha fazla çevrim yapmak gereksiz olacaktır. 5. şekilden de anlaşılacağı üzere ilk çevrimde sıcaklık farklılığı yüksek iken daha sonraki çevrimlerde bu fark giderek azalmıştır ve sıcaklık değişimleri kararlı hale gelmiştir. Yüksek sıcaklık farklılıklarının olduğu bu yer(9386. düğüm noktası), yüksek termal gerilmelere ve şekil değişimlerine maruz kalacağından yorulmaya karşı en zayıf yer olarak tespit edilmiştir.

Kalıbın 12146. düğüm noktasında da sıcaklığın 13. çevrim neticesinde kararlı hale geldiği tespit edilmiştir. Fakat bu noktada meydana gelen sıcaklık farklılıklarının, bir önceki noktaya karşılaştırıldığında daha düşük oldukları görülmektedir. Dolayısıyla bu noktada meydana gelen gerilme ve şekil değişimleri diğer noktaya (9386. düğüm noktası) göre daha düşük olacaktır.

Kalıplarda sıcaklık değerleri iç yüzeylerde büyüktür ve dış yüzeylere gidildikçe bu sıcaklık değerleri azalır. Kalıp iç yüzeylerinde kararlı sıcaklıklar elde edilebilirken, dış yüzeylerde bu kararlı sıcaklıkları elde edebilmek için birkaç çevrim daha gerçekleştirmek gerekmektedir. Şekil 5'ten de görüleceği üzere 2851. düğüm noktasındaki sıcaklık değişiminin kararlı hale gelmesi için iki çevrim daha gerçekleştirmek yeterli olacaktır. Bu noktadaki sıcaklık değişimlerinin de 9386. düğüm noktasındaki sıcaklık değişimleri ile kıyaslandığında düşük oldukları görülmektedir. Bu noktada oluşan gerilme ve şekil değişimleri değerleri maksimum sıcaklık değişiminin olduğu 9386. düğüm noktasında oluşan değerlerden düşük olacaktır.

Dış yüzeydeki 3070. düğüm noktası için sıcaklık değişimlerinin kararlı hale gelmesi için daha fazla sayıda çevrime ihtiyaç vardır. Fakat bu noktadaki sıcaklık farklılıkları diğer noktalardan (9386., 12146. ve 2851. düğüm noktaları) büyük olmadığından bulunmak istenen yüksek gerilme ve şekil değişimlerinin bu noktalarda oluşması söz konusu değildir. Dolayısıyla bu noktaların kararlı sıcaklığa ulaşma çevrimlerini elde etmeye ihtiyaç yoktur.

Sonuç olarak kalıpta her bir çevrim sonunda meydana gelen sıcaklık değişimlerinin neden olduğu gerilmeleri elde etmek için sıcaklık değişimleri elde edilmiştir. Aynı zamanda kalıp tasarımında optimizasyon yapabilmek için sıcaklık farklarının minimize edilmesi de bu modellemeler neticesinde mümkün olabilecektir.

#### **4. SONUÇLAR**

Bu çalışma ile ulaşılan sonuçlar aşağıdaki şekilde özetlenebilir:

1- Kokil kalıp yöntemi ile dökme demir bir kalıba, ETİAL 171 alaşımından yapılan döküm işlemi, CAD/CAE teknikleri ile modellenerek dökümün soğuma ve katılaşması sonlu elemanlar tekniği ile modellendi.

2- Kalıp ile döküm arasındaki arayüzey ısı transfer katsayısı, döküm ile kalıp arasında temas (contact) yüzeyler sağlanarak tanımlandı.

3- Sıcaklık değişimleri kararlı hale gelinceye kadar, zamana bağlı olarak maksimum ve minimum sıcaklıklar ile kalıbın her bir noktasındaki sıcaklıklar hesaplandı.

Kararlı hale ulaşıldıktan sonra zamana bağlı sıcaklık değişimleri verilerini kullanarak yapılacak yapısal analizde, zamana bağlı gerilme ve şekil değiştirmelerin değişim miktarları modelin her noktası için hesaplanabilir. Şekil değiştirme esaslı yorulma ömrü tahminlerinde, maksimum gerilme ve şekil değiştirmenin olduğu noktalardaki zamana bağlı şekil değişimine bakarak, kalıbın yorulma ömrü tahmini yapılabilir [12].



## 5. KAYNAKÇA

- [1] STAHLAND, K. W., WHALER, K. R., " Reviewing Permanent Mold Process-Part 1", Modern Casting, pp:45-49, 1981
- [2] REDDY, A. V., BECKERMANN, C., "Measurements of Metal-Mold Interfacial Heat Transfer Coefficients During Solidification of Sn and Sn-Pb Alloys", Exp. Heat Transfer 6, pp:111-129,1993
- [3] LOULOU, T., ARTYUKHIN, E.A., BARDON, J.P.," Estimation of Thermal Contract Resistance During the First Stages of Metal Solidification Process: Experimental Setup and Results", Int. J. Heat Mass Transfer 42 , pp. 2129-2142, 1999
- [4] NI, J., BECKERMANN, C., " A Volume-Averaged Two-Phase Model for Transport Phenomena During Solification", Metal. Trans. B 22B , pp. 349-361, 1991
- [5] NYAMEKYE, K., WEI, S., MARTINEZ, K.M., "A CAD/CAE Model for Predicting Thermal Fatigue Life of a Permanent Mold", AFS Transaction, Vol 105, pp. 557-572, 1998
- [6] JONG, S. H., HWANG, W. S., " Study of Functional Relationship of Fraction of Solid with Temperature in Mushy Range for A356 Al Alloy ", AFS Transactions, Vol. 92, pp:939-946,1991
- [7] HO, K., PEHLKE, R. D., " Metal Mold Interfacial Heat Transfer", Metallurgical Transactions B, Vol. 160, pp: 585-594,1985
- [8] LEWIS, R.W., SEETHAAMU, K.N.," The Finite Elements Methods in Heat Transfer Analysis",John Wiley, New York, 1996
- [9] ASM Handbook, Vol. 1, pp 33-55
- [10] GRIFFITHS, W. D, "The Heat Transfer Coefficient During the Unidirectional Solidification of an Al-Si Alloy Casting", Metallurgical and Materials Transactions B, Vol. 30B, pp: 473-482, 1999
- [11] HU, H., ARGYROPOULOS, S. A.," Mathematical Modelling of Solidification and Melting: A Review", Modellind Simulati. Mater. Sci. Eng. 4, pp: 371-396, 1996
- [12] DURAT, M., "Metal Döküm Kalıplarının CAD/CAE Teknikleri İle Yorulma Ömrünün Modellenmesi", SaÜ Fen Bil. Enst. Doktora Tezi, Eylül 2005