



İSTANBUL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

129553

YÜKSEK LİSANS TEZİ

SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ İLE METAL VE ALAŞIMLARININ DÖKÜM
KATILAŞMASININ BENZETİMİ VE BAĞLANTILI OLARAK KATILAŞMA
SONRASI MEYDANA GELEN GERİLME VE YER DEĞİŞTİRMELERİN
BELİRLENMESİ

Eray ERZİ

METALURJİ VE MALZEME MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
MALZEME BİLİMİ PROGRAMI

Danışman
Yard. Doç. Dr. Suat YILMAZ

Haziran-2003

129553

İSTANBUL

T.C. YÜKSEK LİSANS TEZİ
DOKÜMANİSTON ERZİ



Bu Tez Çalışması, İstanbul Üniversitesi Araştırma Fonu Yürütücü Sekreterliği tarafından desteklenen 1772/21122001 No' lu Proje kapsamında gerçekleştirilmiştir.

İSTANBUL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Bu çalışma 16/07/2003 tarihinde, aşağıdaki jüri tarafından, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı, Malzeme Bilimi Programında Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. T.Osman ÖZKAN



Prof. Dr. İbrahim YUSUFOĞLU



Prof. Dr. Enver OKTAY




Doç. Dr. Şafak ÖZKAN



Yard.Doç.Dr.Suat YILMAZ

Danışman



ÖNSÖZ

Tez çalışmamın her aşamasında yardımlarını, yoğun destek ve ilgilerini benden esirgemeyen sayın hocam Yard. Doç. Dr. Suat YILMAZ' a teşekkür ederim.

Yüksek lisans eğitimim boyunca her türlü fedakarlığı benden esirgemeyen yerinde önerileri, teşvik ve yardımlarını gördüğüm çalışma arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Eğitim hayatım boyunca maddi ve manevi her türlü desteği sağlayan, bu günlere gelmemde sonsuz emekleri olan ve attığım her adımda arkamda olduklarını hissettiğim sevgili aileme sonsuz teşekkürler ederim.



İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ	I
İÇİNDEKİLER	II
ŞEKİL LİSTESİ	IV
TABLO LİSTESİ	VI
ÖZET	VII
SUMMARY	VIII
1.GİRİŞ	1
1.1. SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİNE GİRİŞ	2
1.1.1 Isı Transferinin Temelleri ve Sonlu Elemanlar Yöntemine Uyarlanması	3
1.1.2 Isı Transferi Mekanizmaları	5
1.1.2.1 Isı iletimi	5
1.1.2.2. Isı Taşınımı	11
1.1.2.3 Isı Işınımı	13
1.1.3 Katılaşma faz dönüşümünde iç enerji, entalpi ve ısı kapasitesi bilgisi	15
1.2. ALÜMİNYUM DÖKÜM ALAŞIMLARI VE DÖKÜM YÖNTEMLERİ	18
1.2.1 Kokil Kalıba Döküm	20
1.2.2 Basınçlı Döküm	21
1.2.3 Hassas Döküm	22
1.2.3.1 Model Malzemeleri	22
1.2.3.2 Model Yapımı	25
1.2.3.3 Model Salkım Üretimi	26
1.2.3.4 Seramik Kabuk Kalıbı Üretimi	27
1.2.3.5 Ergitme ve Döküm	33
1.2.3.6 Döküm Sonrası İşlemler	34

2. MALZEME VE YÖNTEM	37
2.1 Geometrik modelin oluşturulması	38
2.2 Malzeme modelinin oluşturulması	39
2.2.1 Malzeme Özelliklerinin Belirlenmesi	39
2.2.1.1 Döküm Alaşımının Özellikleri	39
2.2.1.1 Seramik Kalıbın Özellikleri	43
2.2.2 Sonlu elemanlar modelinin oluşturulması	44
3. BULGULAR	46
3.1 Termal Analiz	47
3.2 Bağlantılı Yapısal Analiz	53
4. SONUÇLAR VE İRDELEME	56
5. KAYNAKLAR	57
6. ÖZGEÇMİŞ	59

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 1.1	İki boyutlu gerilme-şekil değiştirme durumu	2
Şekil 1.2	Isı akışının yönü.	6
Şekil 1.3	Düzlem duvar	7
Şekil 1.4	Isı akışının yönü	8
Şekil 1.5	Yalıtım malzemelerinin ısı iletim katsayılarının sıcaklıkla değişimi	10
Şekil 1.6	Metallerin ısı iletim katsayılarının sıcaklıkla değişimi	11
Şekil 1.7	Isı taşınımı.	12
Şekil 1.8	Al-Si Faz diyagramı	17
Şekil 1.9	Hassas döküm kademeleri	23
Şekil 2.1	Hassas olarak dökülecek parçanın standart 3 görünüşü	37
Şekil 2.2	Seramik kalıp ve hassas döküm parçasının 3 boyutlu geometrik modeli.	38
Şekil 2.3	AlSi9Cu3 alaşımından elde edilen ısı akışı-sıcaklık diagramı.	40
Şekil 2.4	Entalpi ile sıcaklık arasındaki ilişki.	41
Şekil 2.5	Termal iletkenlik ile sıcaklık arasındaki ilişki.	41
Şekil 2.6	Isıl genleşme katsayısı ile sıcaklık arasındaki ilişki.	42
Şekil 2.7	Elastisite modülü ile sıcaklık arasındaki ilişki.	42
Şekil 2.8	Al-Si Faz diyagramı.	43
Şekil 2.9	Döküm parçası ve seramik kalıbın sonlu elemanlar modelinin önden görüntüsü.	44
Şekil 2.10	Döküm parçası ve seramik kalıbın sonlu elemanlar modelinin arkadan görüntüsü.	45
Şekil 3.1	İterasyon grafiği.	46

Şekil 3.2	AlSi9Cu3 Alaşım üzerinde tanımlanan noktalar.	47
Şekil 3.3	AlSi9Cu3 Alaşımı üzerinde tanımlanan noktaların 2 saatlik sıcaklık dağılımı.	48
Şekil 3.4	AlSi9Cu3 Alaşımı üzerinde tanımlanan noktaların 7 saatlik sıcaklık dağılımı.	48
Şekil 3.5	Döküm parçasının dökümden 0,7 saat sonraki sıcaklık dağılımı .	49
Şekil 3.6	Döküm parçasının dökümden 1 saat sonraki sıcaklık dağılımı	49
Şekil 3.7	Döküm parçasının dökümden 1,7 saat sonraki sıcaklık dağılımı.	50
Şekil 3.8	Döküm parçasının dökümden 2,3 saat sonraki sıcaklık dağılımı.	50
Şekil 3.9	Döküm parçasının dökümden 2,9 saat sonraki sıcaklık dağılımı.	51
Şekil 3.10	Döküm parçasının dökümden 4 saat sonraki sıcaklık dağılımı.	51
Şekil 3.11	Döküm parçasının dökümden 5 saat sonraki sıcaklık dağılımı.	52
Şekil 3.12	Döküm parçasının dökümden 6 saat sonraki sıcaklık dağılımı.	52
Şekil 3.13	Döküm parçasının dökümden 7 saat sonraki sıcaklık dağılımı.	53
Şekil 3.14	Döküm parçasının döküm esnasında bağlantı bölgesindeki Von Mises gerilim dağılımı (Ön'den görünüş).	54
Şekil 3.15	Döküm parçasının döküm esnasında bağlantı bölgesindeki Von Mises gerilim dağılımı(Arda'dan görünüş)	54
Şekil 3.16	Döküm parçasının sıcaklığa bağlı mekanik deformasyonu (Arkadan görünüş)	55
Şekil 3.17	Döküm parçasının sıcaklığa bağlı mekanik deformasyonu (Önden görünüş)	55

TABLO LİSTESİ

Tablo 1.1	Çeşitli maddelerin ısı iletim katsayılarının mertebeleri	11
Tablo 1.2	Mertebe olarak ortalama ısı transferi katsayıları	13
Tablo 1.3	Döküm alüminyum alaşım grupları	18
Tablo 1.4	Üç zirkon çamurunun formülasyonu ve özellikleri	29
Tablo 2.1	AlSi9Cu3 hassas döküm alaşımının kimyasal bileşimi	37
Tablo 2.2	Sonlu elemanlar modeline ilişkin istatistiki bilgiler.	45



ÖZET

SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ İLE METAL VE ALAŞIMLARININ DÖKÜM KATILAŞMASININ BENZETİMİ VE BAĞLANTILI OLARAK KATILAŞMA SONRASI MEYDANA GELEN GERİLME VE YER DEĞİŞTİRMELERİN BELİRLENMESİ

Son yıllarda hızla gelişen bilgisayar sistemleri ve uygulamaları paralelinde, mühendislik problemlerinin çözümünde, Sonlu Elemanlar Yöntemi (SEY)' in kullanımı, gün geçtikçe artmaktadır. Bu yöntemin endüstride kullanımı üretimde kaliteyi ve verimi etkilemeden bir ürünü daha ekonomik olarak üretilmesini sağlamaktadır.

Bu tez çalışmasında; SEY' den yararlanılarak, $AlSi9Cu3$ hassas döküm alaşımı sıvı metalin kalıbı tam olarak doldurmasından katılaşıncaya kadar geçen süredeki termal ve termomekanik özelliklerin değişimi ANSYS 6.1 yazılımı kullanılarak incelenmiştir. Bu amaçla "Block ASSY" olarak adlandırılan bir uçak parçasını, 3 boyutlu (3D) dizayn edilmiş ve sonlu elemanlar modeli hazırlanmıştır. Daha sonra bu modele mevcut malzeme özellikleri ve sınır şartları girilmiş ve maruz kaldığı termal ve termomekanik davranışların incelenmesi için sonlu elemanlar analizine tabi tutulmuştur. İlk aşamada gerçekleştirilen Termal analiz sonucunda döküm parçasındaki zamana bağlı sıcaklık dağılımları tespit edilmiştir. Daha sonra gerçekleştirilen Bağıntılı yapısal analiz sonucunda ise; döküm parçasında meydana gelen deformasyonların yönü, şiddeti ve miktarı belirlenmeye çalışılmıştır.

SUMMARY

SIMULATION OF SOLIDIFICATION OF CASTING BY FINITE ELEMENT ANALYSIS AND DETERMINATION OF STRESSES AND DEFORMATIONS THAT OCCURRED AFTER SOLIDIFICATION OF CASTING

The application of Finite Element Analysis Method (FEM) in solving engineering related problems has been expanding rapidly in recent years. By using FEM production of a product becomes cheaper and faster without reducing the quality and production capacity.

In this study the variation of thermal and thermo-mechanical properties of an AlSi9Cu3 investment-casting piece were investigated. For this purpose a plane part called “Block ASSY” was 3 dimensionally designed and FE model was prepared. FE-Analysis of this model was performed in order to investigate the thermal and thermo-mechanical behavior of the casting piece within present material properties and boundary conditions. Transient temperature distributions of the casting piece were determined as a result of Thermal Analysis. Also by Coupled Structural Analysis the distribution, intensity and direction of deformations of the casting piece were determined.

1.GİRİŞ

Günümüzde üretim endüstrisinin genel hedefi, kalite yönetimi ilkesine uygun müşteri istekleri doğrultusunda üstün özelliklere sahip ürünleri, verimli ve ekonomik yollarla üretebilmenin yollarını aramaktır. İlerleyen teknoloji gereği gelişen üretim yöntemleri ile değişik ve üstün özelliklere sahip ürünler üretilmektedir. Metalurjik işlemler ile üretim sırasında, üretimdeki kaliteyi ve verimi arttırmak için çalışma koşullarının ve kullanılan malzemelerin dikkatle seçilmesi gerekir.

Son yıllarda bilgisayar teknoloji ve sistemlerinin hızla gelişmesine paralel olarak, hemen her tür mühendislik probleminin çözülmesinde önemli bir ışık tutan matematiksel Sonlu Elemanlar Yöntemi (SEY)' nin kullanımı artmıştır. Bu artış üretim teknolojilerini de içine alarak değişik alanlarda kullanılmaya başlanmıştır [1,2].

Günümüzde SEY' ni kullanarak çalışan paket programlar (MAGMASOFT [3], Procast [4] yardımıyla ısı iletimi, akışkanlar mekaniği, mekanik, statik, dinamik, manyetik, akustik v.b. mühendislik problemlerinin çözümü gerçekleştirilebilmektedir [5]. Son yıllarda dünyada döküm katılaşması gibi metalurjik problemlerin çözümüne dönük çalışmaların yoğunluğu dikkat çekici bir şekilde artmaktadır.

Bu çalışma ile bir AlSi9Cu3 hassas döküm alaşımının, döküldükten sonraki katılaşma hızları belirlenmesi amaçlanmış ve buna bağlı olarak gelişen termo-mekanik davranışlar simüle edilmeye çalışılmıştır.

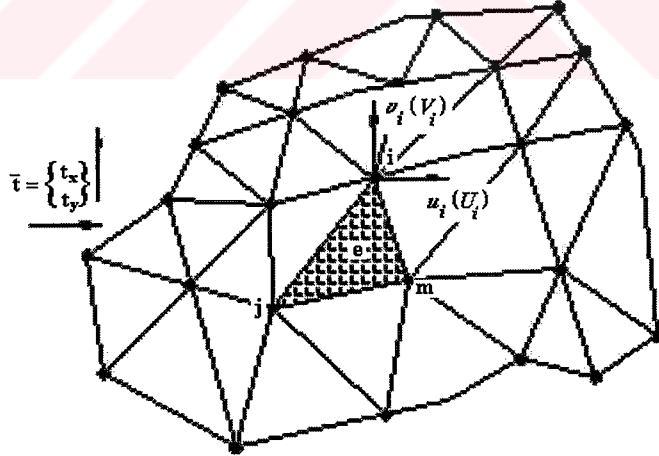
1.1 SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİNE GİRİŞ

Sonlu Elemanlar Yöntemi (SEY)' nin mühendislik problemlerinin çözümünde uygulama alanı bulması ve yaygınlaşması özellikle bilgisayar sistem ve yazılımlarının gelişmesiyle ivme kazanmıştır.

Bir Sonlu Elemanlar hesaplanması sırasında, genel olarak aşağıdaki işlem akışı takip edilmektedir;

1- İlk olarak analizi yapılacak olan katı modelin geometrik özelliklerin tanımlanması, sınır şartlarının belirlenmesi ve katı modelin Sonlu Elemanlara bölünmesi gerekmektedir [1,2].

2- Elemanlar, her elemanın sınırında bulunan düğümlerle birbirine zincirleme biçimde ve sonlu sayıda olacak şekilde bağlantılı olmalıdır. Şekil 1.1'de bu durum, şematik olarak görülmektedir. Buradaki düğüm noktalarının yer değişimi, hesaplamaların bilinmeyen değişkenlerini oluşturmaktadır ve problemin cinsine göre; sıcaklık, basınç gibi fiziksel büyüklükleri ifade etmektedir[1,2].



Şekil 1.1 İki boyutlu gerilme-şekil değiştirme durumu

3- Düğüm noktalarının yer değiştirmesine bağımlı olarak, elemanların yer değiştirmesini ifade edebilecek bir fonksiyon seçilmelidir. Buna, Şekil Fonksiyonu veya İnterpolasyon fonksiyonu adı verilir[1,2].

4- Toplam potansiyel enerjinin minimizasyonu baz alınarak, her eleman için rijitlik matrisi, hesap yoluyla belirlenmektedir. Modeli oluşturan malzeme yada malzemelerin

fiziksel özelliklerine uygun olarak seçilecek malzeme özellik ve davranışlarının belirlenmesiyle (örneğin; lineer-elastik, elasto-plastik v.b.) beraber her bir elemanın gerilme – şekil değiştirme bağıntısı tanımlanmaktadır[1,2].

5- Problemin durumuna ve özelliklerine uygun eleman tipi (2 boyutlu veya 3 boyutlu, kabuk, plaka v.b.) seçilmelidir[1,2].

6- Belirlenen bu veriler ışığında, aşağıda basite indirgenmiş olarak verilen denklem sistemi kullanılarak, hesaplamalar gerçekleştirilmektedir[1,2].

$$\{f\} = [K] \{a\} \quad (1.1)$$

Burada, [K] rijitlik matrisi, {a} düğüm noktası bilinmeyenleri (yer değiştirme, sıcaklık v.b.) ve {f} yük vektörünü ifade etmektedir[1,2].

7- Gerilme ve şekil değiştirme gibi ikincil sonuçlar hesaplatılarak, işleme devam edilmektedir[1,2].

8- Elde edilen sonuçlar, grafik ortamda sergilenmekte ve doğruluğu, sebep-sonuç ilişkisine dayandırılarak sınanmaktadır.

Buraya kadar anlatılanlar özetle işlemin adımlarını tanımlamaktadır [1,2].

1.1.1 Isı Transferinin Temelleri ve Sonlu Elemanlar Yöntemine Uyarlanması

Isı transferi sıcaklık farkı nedeni ile iki sistem arasındaki veya bir sistem ile çevresi arasındaki enerji transferini inceler. Isı transferi problemleriyle mühendisliğin hemen hemen her dalında karşılaşılabilir. Isı transferi alanında kimya, nükleer, metalurji ve elektrik mühendisleri tarafından çok sayıda araştırma yapılmış olması ısı transferinin makine mühendisleri kadar diğer mühendisler için de önemli olduğunun göstergesidir.

Isı transferi günümüzde enerji ve çevre sorunlarının ön plana çıkması ile daha da önem kazanmıştır [6].

Termodinamikte bir işlem sırasında, sistem ile çevresi arasındaki sıcaklık farkı nedeni ile, sistemin sınırından geçen enerji ısı olarak tanımlanır. Isı, sistemin sınırında geçiş halindeki enerji şeklindedir, ısı geçişinin nedeni de sıcaklık farkıdır [6].

Termodinamik, bir sistemi belirli bir denge durumundan başka bir denge durumuna getirmek için sistem ile çevresi arasındaki ısı ve iş alışverişi ile sistemin enerji değişimini inceler; sisteme transfer edilen ısı miktarı sistemin enerji değişimi ile sistemin yaptığı işin toplamına eşittir (enerjinin sakınımı prensibi). Termodinamik sistemin durum değişimi için gerekli ısının nasıl transfer edildiği yani, sıcaklık farkı nedeniyle enerji transferinin fiziki mekanizması hakkında bilgi vermez. Termodinamik kanunları ile sistem sınırından birim zamanda transfer edilecek ısı miktarını belirlemek de mümkün değildir [6].

Isı transferinde ise termodinamik kanunlarından da yararlanılarak birim zamanda transfer edilecek ısı miktarını belirleyebilmek için, deneysel sonuçlardan gerekli teoriler geliştirilir, eşitlikler türetilir. Fiziğin dalı olan bütün bilimlerde olduğu gibi ısı transferinin teorisi de genel doğa kanunlarının üzerine bazı tanım ve özel kanunlar eklenerek inşa edilir. Isı transferinde analizlerin hareket noktası olan dört doğa kanunu (genel prensip) şunlardır:

- a) Kütlelenin sakınımı prensibi.
- b) Momentumun sakınımı prensibi (Newton'un ikinci hareket kanunu).
- c) Enerjinin sakınımı prensibi (Termodinamiğin birinci kanunu).
- d) Entropinin artışı prensibi (Termodinamiğin ikinci kanunu).

Bu kanunlar, uygulamaları incelenen ortamın doğasından bağımsız olduğundan, genel kanunlar olarak adlandırılırlar [6].

Isı transferi problemlerinin analizinde bu dört genel kanuna ek olarak, genelde konuya özel üç kanun daha kullanılır. Bu kanunlar:

- a) Fourier ısı iletim kanunu,
- b) Newton soğuma kanunu,
- c) Stefan-Boltzmann ışınım kanunudur.

Bu kanunların uygulanması incelenen ortamın doğasına bağlıdır. Bu nedenle özel

kanunlar olarak adlandırılırlar

1.1.2 Isı Transferi Mekanizmaları

Isı transferinin fiziki mekanizması genelde oldukça karmaşık olmakla beraber literatürde üç tür ısı transferi mekanizması tanımlanır. Bunlar: a) Isı iletimi (kısaca iletim) b) Isı taşınımı (kısaca taşınım) c) Isı ışınımı (kısaca ışınım) olarak adlandırılır.

1.1.2.1 Isı iletimi

Isı iletimi aynı katı, sıvı veya gaz ortamındaki farklı bölgeler arasında, veya doğrudan fiziki temas durumunda bulunan farklı ortamlar arasında, moleküllerin farklı bir yer değiştirmesi olmaksızın, moleküllerin doğrudan teması sonucunda oluşan ısı yayılımı işlemidir. Bildiğimiz gibi bir maddenin sıcaklığı bu maddeyi meydana getiren moleküllerin ortalama kinetik enerjileri ile orantılıdır (kinetik teori). Ortam içerisinde bir bölgede sıcaklığın yüksek olması o bölgedeki moleküllerin ortalama kinetik enerjilerinin yüksek olduğunu gösterir. Ortalama kinetik enerjileri yüksek olan moleküller enerjilerinin bir kısmını ortalama kinetik enerjileri düşük olan komşu bölgedeki moleküllere iletirler. İletme işlemi sıvılarda moleküllerin birbirini takip eden çarpışmaları ile olur. Katılarda ise, moleküllerin ve maddenin yapısını oluşturan kafeslerin titreşimleri ve/veya yüksek sıcaklıktan alçak sıcaklığa serbest elektron sürüklenmesi ile olur. Genelde titreşimle iletilen enerji miktarı, elektron sürüklenmesi ile iletilen enerji miktarına kıyasla ihmal edilebilecek kadar az olduğundan katılarda enerji iletiminin elektron sürüklenmesiyle olduğu varsayılabilir. Bu nedenle iyi elektrik iletkenler aynı zamanda iyi ısı iletkenlerdir [6].

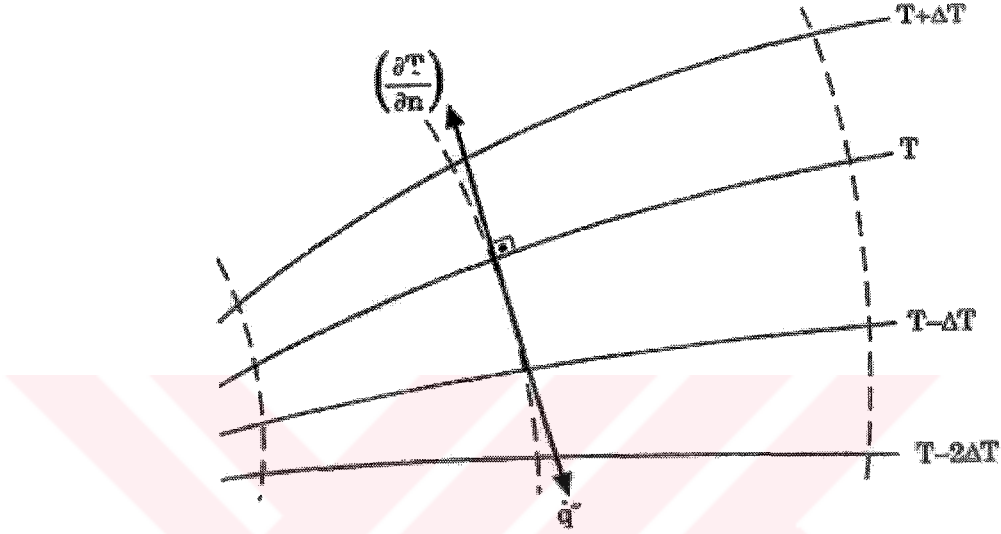
Isı iletiminde genel olarak birim zamanda birim alandan transfer edilen ısı miktarı q'' (kısaca ısı akısı) sıcaklığa ve sıcaklık basamağına bağlıdır. Sıcaklık da en genel durumda yere ve zamana bağlıdır [6].

$$T = T(r,t) \quad (1.2)$$

Burada $r = ix + jy + kz$ ve i, j ve k' da x, y ve z yönündeki birim vektörlerdir. Eşitlik (1.2) sıcaklık alanının matematiksel ifadesidir. Verilen bir noktada sıcaklık zamana göre değişmiyorsa (zamanın fonksiyonu değilse) yataşkın durumdan bahsedilir. Eşit sıcaklık noktalarının birleştirilmesi ile oluşan yüzeylere eş-sıcaklık (izotermal) yüzeyleri denir. Bir noktada değişik iki sıcaklık bulunamayacağından eş-sıcaklık yüzeyleri birbirlerini kesmezler; ya kendi üzerlerine kapanarak bir çevrim oluştururlar, ya da sistemin sınırında son bulurlar. Şekil 1.2' de eş sıcaklık düzlemlerinden bir grup

görülmektedir. Bir sistem içerisinde en büyük sıcaklık basamağı eş sıcaklık düzlemine dik yöndedir. Buna göre sıcaklık basamağı olarak tanımlanır.

$$\lim_{\Delta n \rightarrow 0} \left(\frac{\Delta T}{\Delta n} \right) = \frac{\partial T}{\partial n} \quad (1.3)$$



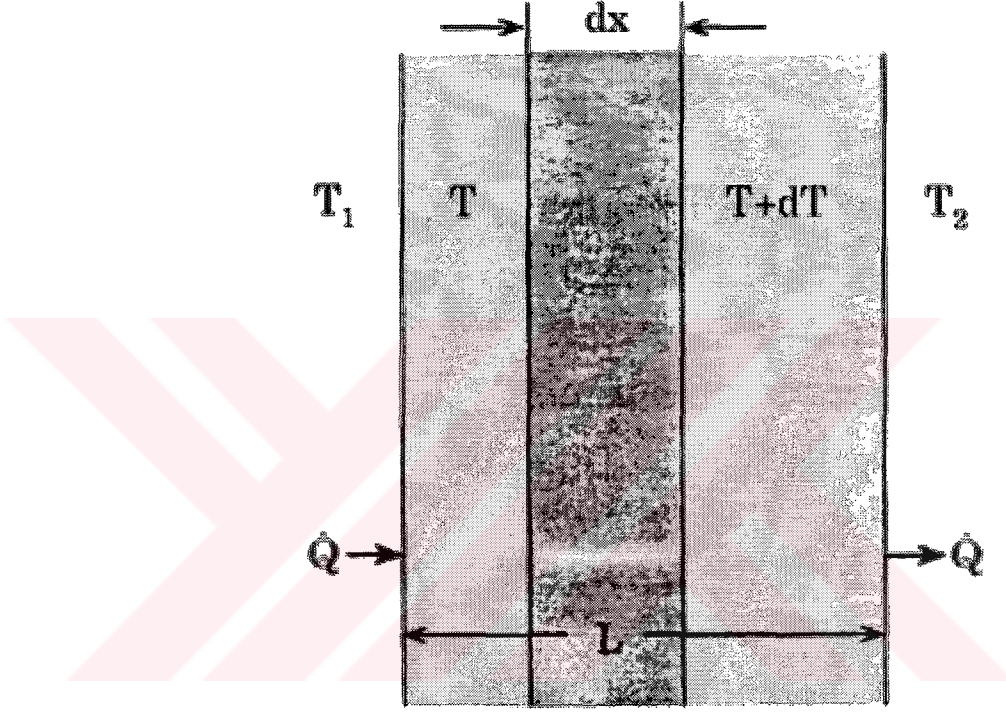
Şekil 1.2 Isı akışının yönü.

Sıcaklık skalar bir büyüklüktür. Sıcaklık basamağı ise eş sıcaklık düzlemine dik bir vektördür. Sıcaklığın arttığı yönde bu vektör pozitiftir. Sıcaklık basamağının negatif olması sıcaklık düşümünü gösterir. Sıcaklık alanı ve sıcaklık basamağı bu şekilde kısaca tamamladıktan sonra, sıcaklık basamağı $(\partial T / \partial n)$ ile birim zamanda ısı transferi miktarı \dot{Q} (kısaca ısı akımı) arasındaki ilişkiyi kuralım. Bunun için yüzey sıcaklıkları T_1 ve T_2 , kalınlığı L ve yüzey alanı A olan Şekil 1.2' deki sonsuz düzlem duvarı düşünelim. Farklı T_1 ve T_2 sıcaklıklarında bu duvar üzerinde yapılan deneyler, $(T_1 - T_2)$ sıcaklık farkı duvarın özelliklerini değiştirecek büyüklükte değilse, sıcaklıklar da zamanla değişmiyorsa (yatışkın durum) ısı akımının

$$\dot{Q} = \lambda A \frac{(T_1 - T_2)}{L} \quad (T_1 > T_2) \quad (1.4)$$

ifadesinden hesaplanabileceğini göstermiştir [6].

Burada λ sabit orantı katsayısıdır, ısı iletim katsayısı olarak adlandırılır. Genelde λ sabit olmayıp sıcaklığın, bir dereceye kadar da basıncın fonksiyonudur. Eşitlik (1.4) homojen, izotropik (λ herhangi bir noktada ve bütün yönlerde aynı) ortamlar için Fourier ısı iletimi kanunu adını alır [6]. Bu kanun ilk defa Fransız bilim adamı J.E. Fourier tarafından 1822 senesinde önerilmiştir. Bu ifade kalınlığı L olan, hareketsiz bir akışkandan ısı akımını hesaplamakta da kullanılabilir. Şekil 1.3' de görülen dx kalınlığındaki bir elemanın yüzey sıcaklıklar T ve $T + dT$ ise Fourier ısı iletimi kanunu;



Şekil 1.3 Düzlem duvar

$$q_x = \frac{Q_x}{A} = -\lambda \frac{dT}{dx} \quad (1.5)$$

olur. Şekil 1.3' de gösterildiği gibi hangi bir n yönü için, Fourier ısı iletimi kanunu

$$q_n = -\lambda \frac{\partial T}{\partial n} \quad (1.6)$$

olarak yazılabilir [6].

Isı akısı sıcaklığın azaldığı yönde olduğu için $(\partial T/\partial n)$ negatif iken ısı akısı $+n$ yönündedir. Bu nedenle Eşitlik (1.5)' e (-) ilave edilerek artan n yönünde pozitif ısı akısı elde edilmiştir. Isı akısı bir vektördür, sayısal değeri ve yönü ile belirlenir. Şekil 1.4' de görüldüğü gibi, ısı akısı eğrileri eş sıcaklık eğrilerini keser ve kesim noktalarında eş sıcaklık eğrilerine diktir. Eşitlik (1.6) Fourier ısı iletimi kanununun genel ifadesidir. Sıcaklık sürekli rejim olayıdır ve Eşitlik (1.6) de sürekli rejimde geçerlidir. Fakat zamana bağlı ısı transferinde de aynı eşitlik uygulanır.

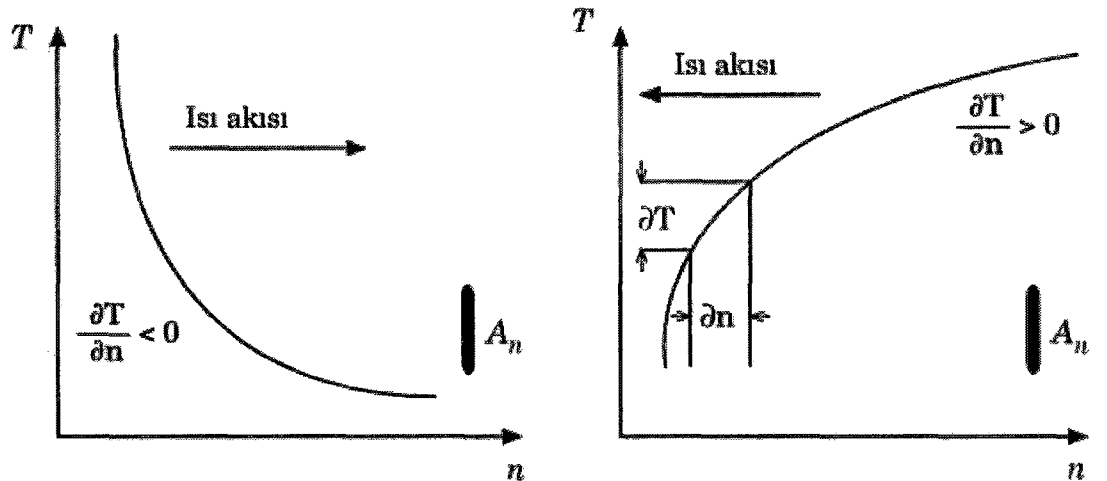
Eşitlik (1.6), Şekil 1.4' de görülen A_n yüzey elemanı için

$$\dot{Q}_n = -\lambda A_n \frac{\partial T}{\partial n} \quad (1.7)$$

olarak ifade edilebilir. Eş sıcaklık düzlemi ile φ açısı yapan herhangi bir A_k elemanı için ısı akımı

$$\dot{Q}_k = -\lambda A_n \frac{\partial T}{\partial n} \cos \varphi \quad (1.8)$$

olarak yazılabilir. O halde ısı akısı $\dot{q}_k (= \frac{\dot{Q}_k}{A_n} \cos \varphi)$, ısı akısı $\dot{q}_n (= \frac{\dot{Q}_n}{A_n})$ vektörünün bir birleşimidir [6].



Şekil 1.4 Isı akışının yönü

Buna göre (x, y, z) kartezyen koordinat sisteminde ısı akısının \dot{q} , x , y ve z yönlerindeki bileşenleri

$$\dot{q}_x = -\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \quad (1.9)a,$$

$$\dot{q}_y = -\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \quad (1.9) b$$

$$\dot{q}_z = -\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \quad (1.9) c$$

yazılabilir [2,6].

Eğer ısı iletimi zamana bağlı bir değişkenlik göstermiyorsa, bu durumda;

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) = -q_{x,y,z} \quad (1.10)$$

Eğer ısı iletimi döküm katılaşmasının soğumasında olduğu gibi zamana bağlı ilerliyorsa;

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) = c \frac{dT}{dt} - q_{x,y,z} \quad (1.11)$$

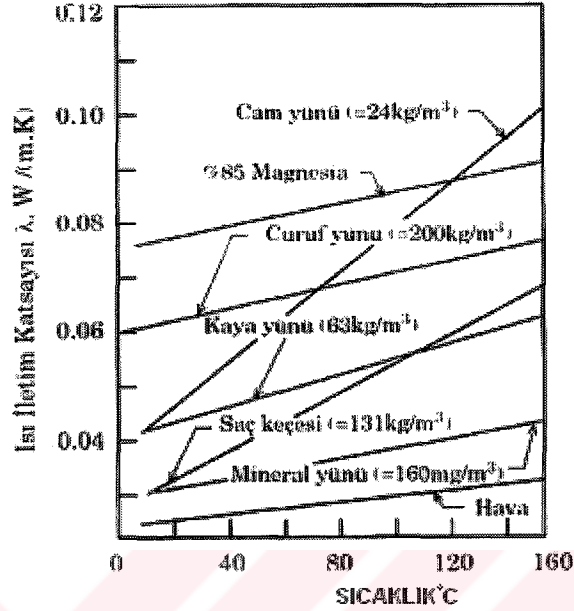
Formülde c ısı kapasitesidir [2,6,7]. Burada şunu belirtmek yerinde olur. Eşitlik (1.6) bir kanundan ziyade ısı iletim katsayısının tanımıdır. Isı iletim katsayısı λ ;

$$\lambda = \frac{(\dot{Q}_n / A_n)}{\left(\frac{\partial T}{\partial n} \right)} \quad (1.12)$$

malzemenin fiziki bir özelliği olup, ısı iletme kabiliyetini gösterir. λ ' nın boyutu Eşitlik (1.12)' dan bulunur. SI (Systeme International d'Unite's) birim sisteminde ısı akımı Watt (W), yüzey alanı (m²), sıcaklık basamağı derece Kelvin/metre (K/m) olarak ifade edilirse λ ' nın boyutu

$$[\lambda] = [W / m^2] / [K / m] = W / (m \cdot K)$$

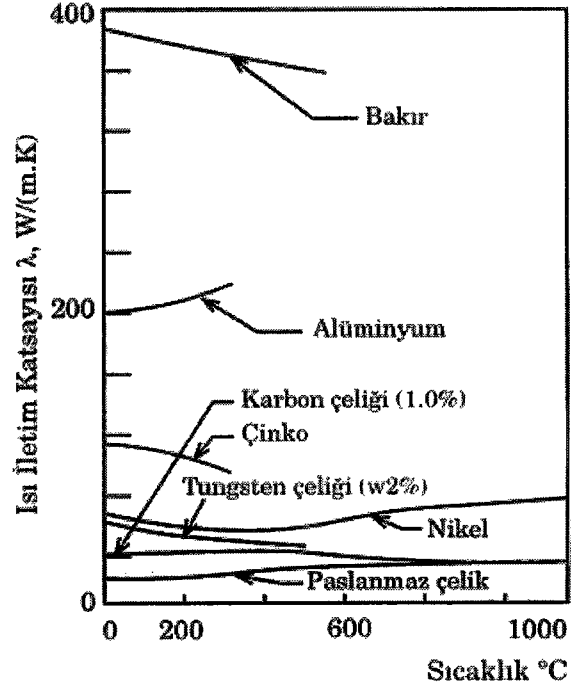
bulunur. Isı iletim katsayısının değeri birim zamanda, birim yüzeyden, birim uzaklıkta, birim K sıcaklık düşümü halinde ısı transferi miktarını verir. Isı iletim katsayısı her madde için farklı olup, maddenin yapısına, nemliliğine ve sıcaklığına bağlıdır.



Şekil 1.5 Yalıtım malzemelerinin ısı iletim katsayılarının sıcaklıkla değişimi [6].

Fırın ve kazan yanma odalarında kullanılan yansıtıcı yapı malzemeleri ile ısı iletim katsayıları yaklaşık olarak 0.03 W/(m.K) arasında değişir. Şekil 1.5’de de görüldüğü gibi bu maddelerin ısı iletim katsayıları sıcaklıkla artar. Genelde ısı iletim katsayısı yoğunlukla da artmaktadır. Artış malzemenin iç yapısına, içerisinde bulunan gözeneklere ve nemlilik derecesine bağlıdır.

Nemli bir malzemenin ısı iletim katsayısı, kuru malzemelerin ve suyun ayrı ayrı ısı iletim katsayılarından fazla olabilir. Bazı metallerin ısı iletim katsayıları Şekil 1.6’de verilmektedir. İletken olarak en iyi gümüş bunu takiben bakır, altın, alüminyumdur. Saf bir metalin ısı iletim katsayısı, içerisine başka bir bileşen ilave edilirse azalır. Örneğin 20°C konstantının (% 60 bakır + % 40 nikel) ısı iletim katsayısı 22.7 W/(m.K) olduğu halde sadece bakırın 336 W/(m.K), sadece nikelin 69 W/(m.K) dir. Çeliğin içerisinde % 0.5 karbon bulunursa ısı iletim katsayısı 54 W/(m.K), % 1 karbon bulunursa, 43 W/(m.K), % 1.5 karbon bulunursa, 36 W/(m.K) dir. Böyle hallerde ısı iletim katsayısının deneylerle tayini tek çıkar yoldur. Çeşitli maddelerin ısı iletim katsayılarının mertebeleri Tablo 1.1 de verilmiştir.



Şekil 1.6 Metallerin ısı iletim katsayılarının sıcaklıkla değişimi [6].

Tablo 1.1 Çeşitli maddelerin ısı iletim katsayılarının mertebeleri [6,8]

Malzeme	Isı İletim Katsayısı W/m.K
Gazlar	0.002 – 0.2
Yağlar	0.1 – 1.0
Su	0.5 – 0.7
Sıvı metaller	10 – 100
Katılar (metal olmayan)	0.03 – 3.0
Katılar (alaşımlar)	20 – 200
Saf metaller	40 - 400

1.1.2.2 Isı Taşınımı

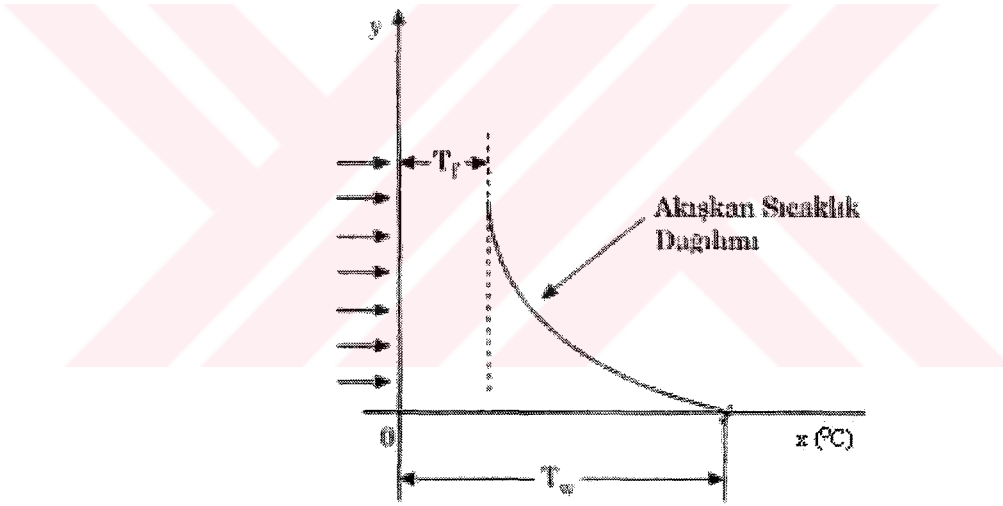
Bir yüzey üzerinden veya bir boru içerisinde bulunan akışkanın sıcaklığı yüzey sıcaklığından farklı ise akışkan hareketi sonucu akışkan ile yüzey arasındaki ısı transferi mekanizması konveksiyon (taşınım) olarak adlandırılır. Akışkanın hareketi uygulanan basınç farkı nedeniyle oluşuyorsa (örneğin, ısıtılmış bir borudan pompa ile akışkanın devredilmesi v.b. gibi) zorlanmış konveksiyondan, akışkan hareketi yoğunluk farkı nedeniyle oluşuyorsa (örneğin, bir sobanın veya radyatörün çevresini ısıtması v.b. gibi) doğal konveksiyondan bahsedilir. Şekil 1.7' de görüldüğü gibi yüzey sıcaklığı T_w , yüzey ile temasta bulunan akışkanın sıcaklığı T_f ise yüzey ile akışkan arasındaki ısı akışı

$$\dot{q} = \alpha (T_w - T_f) \quad (1.13)$$

ifadesi ile hesaplanır. Bu ifade 1701 senesinde Newton tarafından önerilmiş olup, literatür de Newton'un Soğutma Kanunu olarak adlandırılır [6] ve konveksiyonun (ısı taşınımının) özel kanunudur. Bu ifadede α yüzey ile akışkan arasındaki ısı transferi katsayısı (film katsayısı), T_f kanal içerisinde akışkanın ortalama sıcaklığı (yüzey üzerindeki akışta yüzeyden uzakta akışkan sıcaklığı T_∞) ve T_w yüzey sıcaklığıdır. Isı akısı W/m^2 , sıcaklık farkı K olarak ifade edilirse Eşitlik (1.13)' den ısı transferi katsayısı α ' nın birimi,

$$[\alpha] = \frac{(W / m^2)}{K} = W / (m^2 \cdot K)$$

olarak bulunur [2,6].



Şekil 1.7 Isı taşınımı.

Yüzey ile akışkan arasındaki konveksiyon mekanizması oldukça karmaşık olduğundan, ısı transferi katsayısı α ' nın teorik veya deneysel olarak tayini oldukça zordur. Burada ısı transferi katsayısı α ' nın yüzey geometrisine, akış şartlarına, akışkanın fiziki özelliklerine ve akışkan ile yüzey arasındaki sıcaklık farkına bağlı olduğunu belirtmekle yetinilmektedir [2,6].

Isı transferi katsayısı genelde akış yönünde yüzey boyunca değişir. Uygulamada ısı akımını hesaplamak için ortalama ısı transferi katsayısı tanımlanır $\bar{\alpha}$ ve Eşitlik (1.13) deki α , $\bar{\alpha}$ ile değiştirilerek aynen kullanılır. Bu durumda \dot{q} da adı geçen yüzeyden

ortalama ısı akışı olur. Pratikte önemli olan ortalama ısı transferi katsayısıdır. Fikir vermek amacı ile değişik akışkanlar için ortalama ısı transferi katsayısının mertebeleri Tablo 1.2' de verilmiştir.

Tablo1.2 Mertebe olarak ortalama ısı transferi katsayıları [6,8].

Akışkan	Doğal Konveksiyon W / (m ² .K)	Zorlanmış Konveksiyon W / (m ² .K)
Gazlar	5 – 30	30 – 300
Yağlar	5 – 100	30 – 3000
Su (tek faz)	30 – 300	300 – 10000
Sıvı metaller	50 - 500	500 – 20000
Su kaynaması	2000 – 20000	3000 – 100000
Su buharı yoğunlaşması	3000 - 30000	3000 - 200000

1.1.2.3 Isı Işınımı

İletim ve taşınımında, enerji bir ortam vasıtası ile transfer edilir. Deneysel sonuçlar hiç bir transfer ortamı olmaması durumunda da enerjinin transfer edildiğini göstermektedir. Elektromanyetik dalgalar vasıtasıyla olan bu ısı transferi mekanizması kısaca ışınım olarak adlandırılır. Işıma terimi genel olarak bütün manyetik dalga olayları için kullanılır. Burada belirtmek istediğimiz bir cismin sıcaklığından dolayı meydana gelen ısı ışınımıdır [6].

Bütün cisimler (katı, sıvı veya gaz), özellikle yüksek sıcaklıkta enerji yayınlarlar. Yayınlanan enerjinin yoğunluğu yüzey sıcaklığına ve yüzeyin doğasına bağlıdır. Ayrıca, bütün cisimler üzerlerine düşen ısı ışınımının bir kısmını soğurur, bir kısmını geçirir, kalan kısmını da yansıtırlar. Cismin yansıttığı enerjinin üzerine düşen enerjiye oranına, yansıtma katsayısı ρ , cismin soğurduğu enerjinin üzerine düşen enerjiye oranına soğurma katsayısı α ve geçirdiği enerjinin üzerine düşen enerjiye oranına da geçirgenlik katsayısı τ denir [6].

$$\rho + \alpha + \tau = 1 \quad (1.14)$$

Üzerine düşen bütün enerjiyi tamamen soğuran ideal cisimler de siyah cisim (black body) olarak adlandırılır. Bir siyah cismin birim zamanda ışınım ile yayınladığı enerji miktarı sıcaklığının dördüncü kuvveti ile orantılıdır [6] ve

$$\dot{E} = A\sigma T^4 \quad (1.15)$$

ifadesinden hesaplanır. Bu ifade Stefan-Boltzmann ışıma kanunu olarak bilinir. Burada \dot{E} birim zamanda ışıma ile A yüzey alanından yayınlanan enerji miktarı, T yüzey sıcaklığı ve σ ise Stefan-Boltzmann sabitidir.

Birim zamanda yayınlanan enerji miktarı (ısı akımı) W, yüzey alanı m² ve sıcaklık da K olarak ifade edilirse σ 'nın boyutu,

$$[\sigma] = W / (m^2 \cdot K^4)$$

olur. Değeri de $5.6697 \times 10^{-8} W / (m^2 \cdot K^4)$ dir.

Bir siyah cismin ışıma ile birim alandan, birim zamanda yayınladığı enerji miktarı bu siyah cismin ısıl ışıma yayımlama gücü olarak tanımlanır. Eşitlik (1.15) den

$$\dot{E}_b = \sigma T^4 \quad (1.16)$$

siyah bir cisim ile, kendisini tamamen çevreleyen başka bir siyah yüzey (üzerine düşen bütün enerjiyi soğuran yüzey) arasındaki birim zamandaki ısı transferi miktarı

$$\dot{Q} = \sigma A (T_1^4 - T_2^4) \quad (1.17)$$

olarak ifade edilir. Burada T₁ siyah cismin sıcaklığı, T₂ ise siyah cismi çevreleyen siyah yüzeyin sıcaklığıdır [6].

Sadece siyah cisim olarak adlandırılan ideal radyatörlerin ısıl ışıma ile birim zamanda yayınladıkları enerji miktarı Eşitlik (1.15)' ten hesaplanabilir. Gerçek cisimlerin ısıl ışıma ile yayınladıkları enerji aynı sıcaklıktaki ve aynı büyüklükteki siyah cismin yayınladığı enerjiden daima daha azdır. Gri cisim olarak adlandırılan gerçek cisimlerin ışıma ile birim zamanda, birim alandan yayınladıkları enerji de

$$\dot{E} = \varepsilon \dot{E}_b = \varepsilon \sigma T^4 \quad (1.18)$$

olarak ifade edilir. Burada ε yayınlama katsayısı olarak adlandırılır. 1 ile 0 arasında değişir. Bütün gerçek cisimler (gri cisimler) için 1 den küçüktür. Alanı A olan, T₁ sıcaklığındaki bir gri cisim ile, bu cismi tamamen çevreleyen T₂ sıcaklığındaki siyah bir

yüzeysel arasındaki birim zamandaki ısı transferi miktarı (ısı akımı) ise

$$\dot{Q} = \sigma A \varepsilon (T_1^4 - T_2^4) \quad (1.19)$$

ifadesinden hesaplanır. Işıma ile ısı transferi oldukça karmaşık bir mekanizmadır. Yüzeyler arasındaki ısı akımının hesaplanmasında yukarıda verilen eşitlikler nadiren kullanılabilir [6].

1.1.3 Katılma faz dönüşümünde iç enerji, entalpi ve ısı kapasitesi bilgisi

Özgül hacmi veya yoğunluğu sabit olan maddeye sıkıştırılmayan madde denir. Katı ve sıvıların özgül hacimleri bir hal değişimi sırasında hemen hemen sabit kalır. Bu nedenle katı ve sıvılar büyük bir hata yapmadan sıkıştırılmayan madde sayılabilir. Hacmin değişmediği kabulü, hacim değişikliği ile ilgili enerjinin, örneğin sınır işinin, diğer enerji etkileşimine göre ihmal edilebilir büyüklükte olduğu şeklinde anlaşılmalıdır. Kabulü bunun ötesine taşımak, sıvı termometrelerini veya katılarda sıcaklığın neden olduğu hacim değişikliklerinden kaynaklanan ısı genleşmeleri açıklamayı olanaksız kılar [9].

Sıkıştırılmayan bir madde için sabit basınçta ve sabit hacimde özgül ısıların eşittir. Bu nedenle katılar ve sıvılar için C_p ve C_v 'nin indisleri atılabilir ve her iki özgül ısı C ile gösterilebilir [9].

$$C_p = C_v = C \quad (1.20)$$

Bu sonuç aynı zamanda sabit hacimde ve sabit basınçta özgül ısıların fiziksel tanımlarından da çıkarılabilir.

Mükemmel gazlara benzer olarak, sıkıştırılmayan maddelerin özgül ısıları da sadece sıcaklığın bir fonksiyonudur. Bu nedenle C_v 'yi tanımlayan Eşitlik 1.21 kısmi türevler, tam türevlerle değiştirilebilir. Bu durumda,

$$C_v = \left(\frac{\partial u}{\partial T} \right)_v \quad (1.21)$$

$$du = C_v dT = C(T) dT \quad (1.22)$$

olur. 1 ve 2 halleri arasındaki iç enerji farkı integralle hesaplanabilir:

$$\Delta u = u_2 - u_1 = \int_1^2 C(T) dT \quad (\text{kJ/kg}) \quad (1.23)$$

Bu integralin hesaplanabilmesi için C' nin sıcaklıkla değişiminin bilinmesi gerekir. Küçük sıcaklık aralıkları için, ortalama sıcaklıkta hesaplanan sabit bir C değeri alınabilir. Bu durumda,

$$\Delta u \cong C_{ort} (T_2 - T_1) \quad (\text{kJ/kg}) \quad (1.24)$$

olur. Sıkıştırılmayan maddenin (katı veya sıvı), bir hal değişimi sırasındaki entalpi değişimi, entalpinin tanımından ($h = u + Pv$) belirlenebilir.

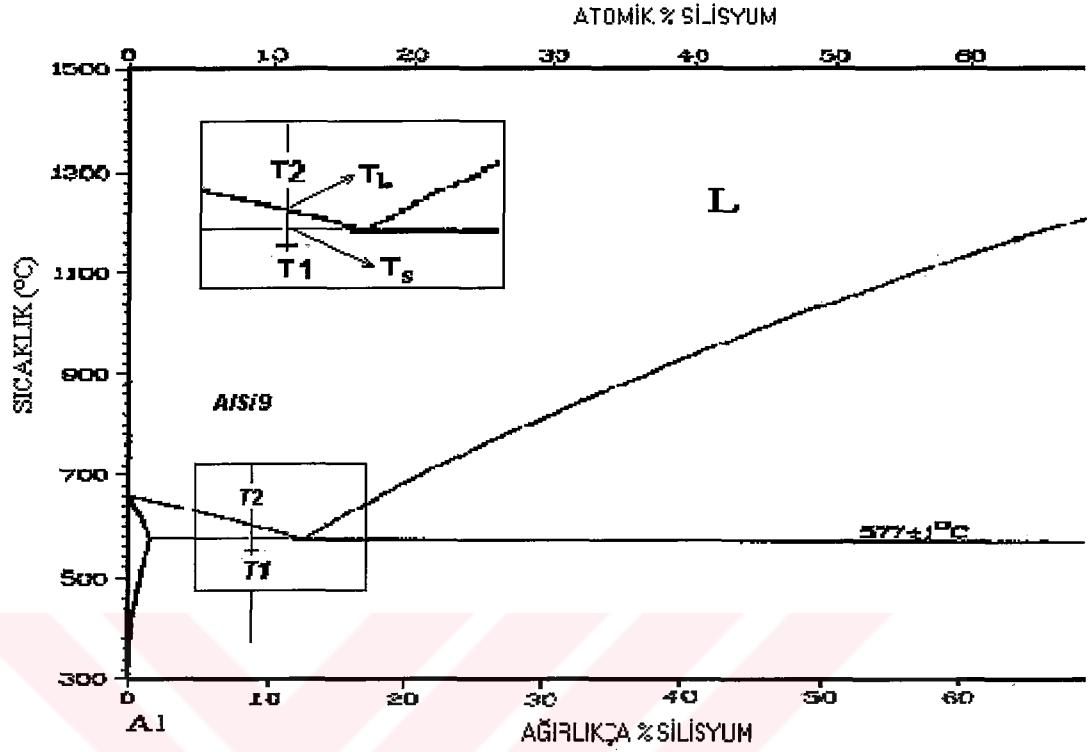
$$h_2 - h_1 = (u_2 - u_1) + v (P_2 - P_1) \quad (1.25)$$

Burada $v_1 = v_2 = v$ olduğu not edilmelidir. Aynı denklem kısaltılarak

$$\Delta h = \Delta u + v \Delta P \quad (\text{kJ/kg}) \quad (1.26)$$

şeklinde yazılabilir. Bu denklemdeki ikinci terim ($v \Delta P$) genellikle birinci terimden (Δu) çok küçüktür ve büyük bir hataya yol açmadan ihmal edilebilir [9].

Metal ve alaşımlarında Şekil 1.8' de görüldüğü gibi sıvı-katı faz dönüşüm aralığında bir sıcaklık intervali bulunmaktadır. Bu intervali sınırları, solidus (T_S) ve likidüs. (T_L) olarak gösterilmiştir. Alaşım likidüs sıcaklığına kadar sıvı halde soğumaktadır. Bu noktadan itibaren ilk kristalizasyon başlamaktadır. Daha sonraki enerji azalışıyla bu kristal oluşumu soğumayla birlikte devam etmektedir. Likidüs ile solidus noktası arasındaki bu bölgede yapı sıvı ve katının karışımıdır. Eriyiğin kristal oluşturması sıcaklığa bağlıdır. Ötektik sıcaklıkta ötektik reaksiyon tamamlandıktan sonra alaşım artık tamamen katıdır. [7,9,10].

Al-Si

Şekil 1.8 Al-Si Faz diyagramı [11].

Şekil 1.8' deki gibi ötektik altı bir alaşımın T_1 'den T_2 'ye kadar $T_1 < T_S < T_L < T_2$ sıcaklık intervali için gerekli entalpi farkı aşağıda belirtilen şekilde özetlenebilir.

$$\Delta h_{(T_2-T_1)}^{\zeta} = h_{(T_2)}^{\zeta} - h_{(T_1)}^{\zeta} = v^S \rho^S \int_{T_1}^{T_S} C_p^S dT + h_{lat} + v^L \rho^L \int_{T_L}^{T_2} C_p^L dT \quad (1.27)$$

Burada v hacmi, ρ yoğunluğu, h_{lat} erime entalpisini veya gizli ısı olarak ifade etmektedir. Buradaki L ve S indisleri sırasıyla sıvı ve katı hali belirtmektedir. Buradaki alaşım entalpisi (h) sıcaklığa ve alaşımın bileşimine bağlıdır [7,9,10].

1.2 ALÜMİNYUM DÖKÜM ALAŞIMLARI VE DÖKÜM YÖNTEMLERİ

Dört basamaklı sayısal bir tasarım sistemi, alüminyum ve alüminyum alaşımlarını dökülmüş ve dökümhane ingotu şeklinde belirlemede kullanılır. İlk basamak alaşım grubunu gösterir. Bir kesir işareti ile diğerlerinden ayrılan son basamak türünün biçimini örneğin dökümler veya ingotu gösterir. Orjinal alaşım veya empürite sınırlarını bir modifikasyonu sayısal tasarımdan önce bir seri harfle gösterilir. Harf “x” deneysel alaşımlar için kullanılır [12].

Bununla beraber alüminyum döküm alaşımları daha yaygın olarak üç basamakla tanımlanır. Döküm alüminyum alaşım grupları Tablo 1.3’ te verilmiştir.

Tablo 1.3 Döküm alüminyum alaşım grupları [12].

Alüminyum % minimum ve daha büyük	1xxx
Alüminyum alaşımları ana alaşım elementi ile gruplandırılır	
Bakır	2xxx
Mangan	3xxx
Silisyum	4xxx
Magnezyum	5xxx
Magnezyum ve silisyum	6xxx
Çinko	7xxx
Diğer element	8xxx
Kullanılmamış seriler	9xxx

1000 SERİSİ : % 99 ve daha üstü saflıktaki alüminyumun birçok kullanım alanı vardır, özellikle elektriksel ve kimyasal alanlarda kullanılır. Bu alaşımlar mükemmel korozyon dayanımı, yüksek elektrik ve ısı iletkenliği, kötü mekanik özellikler ve mükemmel işlenebilirlik gibi özelliklere sahiptir. Deformasyon sertleşmesi ile mukavemette artış olabilir. Demir ve silisyum temel safsızlıklardır [12,13].

2000 SERİSİ : Bakır bu gruptaki ana alaşım elementidir. Bu alaşımlar en uygun özelliklere ısı ile işlemle sahip olurlar ve ısı ile işlem görmüş malzemelerin mekanik özellikleri yumuşak çeliğe benzer. Bazı durumlarda mekanik özellikleri daha fazla arttırmak için suni yaşlandırma işlemi uygulanır. Bu uygulama ile malzemenin akma gerilimi artarken % uzaması azalır ancak kopma mukavemetini fazla etkilemez. Bu gruptaki alaşımların korozyon direnci diğer alüminyum alaşımlarındaki kadar yüksek değildir ve belirli koşullarda tane arası (intergranüler) korozyon görülür. Bu nedenle bu alaşımlar levha şeklinde üretildiğinde, yüksek saflıktaki bir alaşım ile veya magnezyum-silisyum alaşımı ile kaplanır ve bu kaplama alaşımına galvanik koruma sağlayarak korozyon direncini artırır. 2024 alaşımı en çok bilinen ve havacılıkta en çok kullanılan alaşımdır [12,13].

3000 SERİSİ : Manganez bu gruptaki ana alaşım elementidir ve bu gruptaki alaşımlara ısıtılma işlemi uygulanmaz. Bunun sebebi alaşıma sınırlı miktarda manganez (% 1.5'e kadar) ilave edilebilmesi ve sadece birkaç durumda manganezin ana alaşım elementi olarak kullanılabilmesidir. Bunlardan biri 3003 alaşımıdır ve bu alaşım orta mukavemetli aynı zamanda iyi işlenebilirliğe sahip olup genel amaçlı kullanıma uygundur[12,13].

4000 SERİSİ : Bu gruptaki ana alaşım elementi silisyumdur ve silisyum alaşıma kafi miktarlarda katıldığında ergime sıcaklığında düşüşe sebep olur. Bu yüzden alüminyum-silisyum alaşımları kaynak teli ve lehim alaşımı olarak kullanılır (kaynak edilecek metalin ergime sıcaklığı alaşımın ergime sıcaklığından yüksek olmalıdır). Bu serideki birçok alaşıma ısıtılma işlemi uygulanmaz. Ancak ısıtılma işlemi uygulanabilir alaşımlar kaynak işleminde kullanıldığında diğer alaşım elementlerini bünyesine katabilir ve böylece ısıtılma işlemi sınırlı miktarda uygunluk gösterebilir. Yeterli miktarda silisyum içeren alaşımlar anodik reaksiyon sonucu koyu griye dönüşebilir. Bu yüzden mimari tasarımlarda tercih edilirler [12,13].

5000 SERİSİ : Magnezyum bu grubun en etkili ve en çok kullanılan alaşım elementidir. Magnezyum ana alaşım elementi olarak veya manganez ile birlikte kullanıldığında yüksek mukavemetli, ısıtılma işlemi uygun olmayan alaşımı yumuşatabilir. Magnezyum sertleştirme açısından manganezden daha etkilidir ve % 0.8 magnezyum, % 1.25 manganeze eşittir ve alaşıma daha fazla eklenebilir. Bu gruptaki alaşımlar iyi kaynak özellikleri ve deniz suyu atmosferinde iyi bir korozyon direncine sahiptir. Buna rağmen soğuk işlemde belirli sınırlamalar vardır ve yüksek magnezyum içeren alaşımlar için belirli işlem sıcaklıkları mevcuttur [12,13].

6000 SERİSİ : Bu gruptaki alaşımlar silisyum ve magnezyum içerir ve uygun oranlarda birleşerek magnezyum silikat oluşturur. Böylece ısıtılma işlemi yatkın hale gelirler. Bu alaşımların en önemlisi 6061 (ısıtılma işlemi yapılabilir) dir. Ayrıca 2000-7000 serisi alaşımlardan daha az mukavemetlidirler. Magnezyum-silisyum alaşımları iyi şekillendirilebilir, korozyona dayanıklı ve orta mukavemetlidir[12,13].

7000 SERİSİ : Çinko bu gruptaki ana alaşım elementidir ve düşük miktarlarda magnezyum ile alaşımda bulunduğu çok yüksek mukavemetli ısıtılma işlemi yapılabilir alaşımlar oluşturulur. Diğer elementler (krom ve bakır) az miktarda ilave edilir. Bu gruptaki en çok kullanılan alaşım 7075 alaşımıdır ve en yüksek mukavemetli alaşımdır. Bu alaşım yüksek gerilimli parçalarda kullanılır. Bu gruptaki orta mukavemetli alaşımlar yüksek korozyon direncine ve iyi kaynak edilebilirlik özelliğine sahiptir. Bu grupta 7004, 7005, 7039 alaşımları bulunur[12,13].

1.2.1 Kokil Kalıba Döküm

Metal kalıba döküm yöntemi bir parçadan çok sayıda üretmek için defalarca kullanılan bir metal kalıpla yapılan döküm yöntemidir. Metal kalıp iki veya daha fazla parçadan oluşabilir. Sıvı metal kalıp içine yerçekimi etkisiyle dolar. Basit maçalar metalden, kompleks şekilli maçalar ise kum karışımı veya alçıdan yapılabilir. Metal olmayan maçalar kullanıldığında yöntem 'yarı-kalıcı kalıba döküm' denir [14].

Bu yöntemin kum kalıba döküm yöntemine nazaran bazı avantajları vardır. Döküm yapısının daha sık ve ince taneli oluşu, dökümün daha düzgün yüzeyli ve boyutlarının daha hassas oluşu ve mekanik özelliklerinin daha üstün oluşu gibi avantajlar sayılabilir. Üretim hızı ise kum kalıplamadan yüksek, basınçlı dökümden düşüktür [14].

Metal kalıba döküm yöntemi nispeten kompleks şekilli parçaların üretiminde de kullanılabilir, ancak üretilecek parça sayısının çok olması kalıbın yüksek maliyetini karşılaması açısından önemlidir [14].

Metal kalıba döküm yönteminde bazı sınırlamalar vardır:

- 1- Her ne kadar bir maksimum boyut sınırlaması yoksa da yöntem daha çok küçük boyutlu parçaların dökümüne uygundur.
- 2- Bütün alaşımlar metal kalıpta dökülmeye uygun değildir.
- 3- Yöntem az sayıda parça üretiminde çok pahalı hale gelir.
- 4- Bazı şekillerin bu yöntemle üretimi olanaksızdır, buna ya ayırma yüzeyi yeri veya dökümün kalıptan çıkarılışındaki zorluk neden olmaktadır [14].

Alüminyum esaslı alaşımların düşük yoğunlukları ve oksit filmi oluşturma karakteristikleri nedeniyle kalıp içindeki akış hareketleri nispeten yavaştır. Alüminyum alaşımlarının katılaşma esnasındaki çekilme veya büzülme %' leri oldukça yüksek olup karbon çeliğinkine yakındır. Dolayısıyla bu büzülme karşılayacak geniş besleyicilere gerek gösterirler. Dökümden sonra yüksek sıcaklıklarda, alüminyum alaşımdan dökümler hala yumuşak oldukları için parçanın kalıptan çıkarılması esnasında çarpılma olasılığı her zaman vardır. Kalıp ömrünün daha uzun olabilmesi ve dökümün kalıptan daha kolay çıkarılabilmesi için kalıp iç yüzeyini çeşitli örtü maddeleri sıvanabilir. Bu tür örtü veya kaplamaların kalınlıkları değiştirilerek kalıptan ısının uzaklaşma hızı da kontrol altında tutulabilir [14].

1.2.2 Basınçlı Döküm

Basınçlı döküm yöntemi, sıvı metalin basınç altında metal kalıba doldurulması yöntemidir. Basınçlı döküm, metal (kokil) kalıba döküm yöntemine benzemektedir. (her ikisinde de harcanmayan metal kalıp kullanılmaktadır) Ancak aralarındaki en önemli fark, basınçlı dökümde sıvı metalin kalıba basınç altında doldurulmasıdır. Bu sebeple sıvı metal kalıba çok yüksek hızla dolar ve bu sayede çok karmaşık şekilli parçaların dökümle üretilmesi mümkün olmaktadır. Kokil kalıba dökümde ise herhangi bir basınç uygulaması yoktur ve sıvı metal kalıba gravitenin etkisiyle dolar [14].

Basınçlı dökümde kalıp kapatılıp kilitlendikten sonra, sıvı metal soğuk veya metal sıcaklığına ısıtılmış pompa haznesine aktarılır. Pompa sıvı metali süratle besleme sisteminden geçirir, bu sırada kalıp içindeki hava, kaçma deliklerinden dışarı çıkar. Kalıp boşluğu tamamen dolduktan sonra basınç döküm soğuyuncaya kadar tatbik edilir. Bundan sonra kalıp açılır ve döküm parça dışarıya alınır. Kalıp açık durumda iken içi temizlenir ve yağlanır, sonra kapatılarak bir sonraki döküm için hazır hale getirilir [14].

Basınçlı döküm yönteminin başlıca avantajları şunlardır :

Metal kalıba kıyasla çok daha karmaşık şekilli parçaların dökümüne imkan sağlar.

Sıvı metal basınç altında doldurulduğundan, diğer döküm yöntemlerine kıyasla daha ince cidarlı, 'uzunluk/kalınlık' oranı daha yüksek ve boyutsal hassasiyeti daha fazla olan parçalar üretilebilir.

Özellikle birden fazla kalıp boşluğu içeren kalıplar (bir kalıpla birden fazla parça üretilebilen kalıplar) kullanıldığında üretim hızı diğer yöntemlerden çok fazladır.

Basınçlı döküm yönteminde parçalar tekrar işlenmeye hemen hemen hiç ihtiyaç duyulmayacak şekilde üretildiğinden, zaman ve işçilikten tasarruf edilmiş olur.

Dökülen parça boyutlarında bir değişiklik olmadığı sürece aynı kalıpla binlerce parça üretilebilir

Daha ince kesitlerin dökülebilmesi metal maliyetini azaltabilir.

Basınçlı döküm ürünleri genellikle çok az bir yüzey işleme gerektirir. (basınçlı dökümle yüzeyi düzgün boyutları hassas ürünler elde edilir.)

Bazı alaşımlar (ör. Al alaşımları) basınçlı dökümle üretildiğinde, diğer üretim yöntemlerine nazaran çok daha yüksek mekanik özellikler gösterirler [14].

Bunların yanında basınçlı dökümle üretim yönteminin bazı sınırlamalarda mevcuttur. Bu sınırlamalar :

Döküm boyutları sınırlıdır.(döküm ağırlığı genellikle 4-5kg'dır ve 23 kg' ı aşamaz)

Kalıp dizaynında parça şekline, yolluklara ve en önemlisi hava çıkış yollarına dikkat edilmelidir. Aksi takdirde hava tahliye olamaz ve sıkışan hava parçada gaz boşluklarına sebep olur.

Komple bir basınçlı döküm makinesi (ana pres, kalıplar ve yardımcı cihazlar) çok pahalıdır. Bu nedenle bu yöntemin ekonomik olabilmesi için çok fazla sayıda parça üretilmelidir [14].

1.2.3 Hassas Döküm

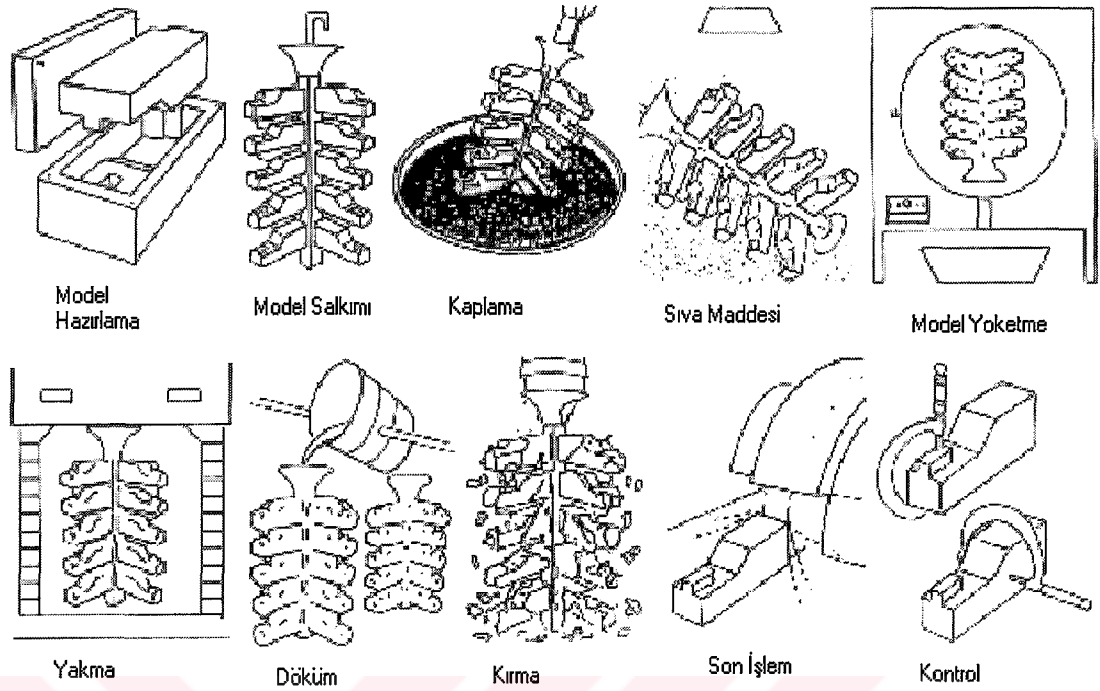
Hassas döküm, kullanıldıktan sonra parçalanabilen(genellikle mum) model etrafına seramik çamurunun modelin şeklini alarak sertleşmesi ve böylece modelin etrafını saran bir kalıp oluşturması işlemidir. Döküm işlemi, bu mum model yok edildikten sonra gerçekleşir. Modelin ergime sıcaklığı düşük olduğu için model, kalıp ısıtılarak yok edilir. Ve geride modelin ölçüsüne sahip dışı bir kalıp kalır[14].(Şekil 1.9)

Birbirinden ayrı iki proses ile hassas döküm yapılabilir; katı kalıplama ve seramik kabuk yöntemi. Seramik kabuk yöntemi, son zamanlarda mühendislik uygulamalarında daha çok kullanılmaktadır. Günümüzde katı kalıplama ile hassas döküm yöntemi, çoğunlukla mücevher dökümünde ve diş protez dökümünde kullanılmaktadır ve mühendislik uygulamalarında sadece demirdışı metal alaşımları için kullanılmaktadır [14].

Bu çalışmada seramik kabuk yöntemi ile hassas döküm incelenecektir.

1.2.3.1 Model Malzemeleri

Hassas döküm için model malzemeleri fazla olmamakla beraber iki ana grupta toplanabilir, balmumu ve plastikler. Mumlar daha çok kullanılmaktadır. Plastik model ise(genellikle polistiren) ince seramik kalıp ile bağlantılı bir şekilde "Replicast CS" prosesinde sıkça kullanılır [14].



Şekil 1.9 Hassas döküm kademeleri [14].

Mumlar

Mum birçok hassas döküm modelinde temel malzeme olarak tercih edilir, fakat mum tanecikler içeren mumlar da kullanılır. Mumlar, kendi özelliklerini geliştirmek amacıyla plastik, antioksidan, reçine, kil, boya gibi malzemeler ile modifiye edilebilirler. En çok kullanılan mumlar, parafinler ve mikrokristalin mumlardır. Bunların ikisi, birbirlerinin özelliklerini tamamladıkları için genellikle birlikte kullanılır. Parafinlerin erime noktası 52 ile 68 °C arasında olanları daha çok kullanılmaktadır. Düşük maliyeti, her an kullanıma hazır oluşları, yüksek yağ oranına sahip olmaları ve düşük erime viskozitesine sahip olmaları parafin mumlarına geniş kullanım alanı açmıştır. Bununla beraber, gevrek oluşları ve yüksek çekme özellikleri nedeni ile uygulamada sınırlandırılmışlardır[14].

Mikrokristalin mumlar, plastik özellik gösterirler ve mum parçalarına sağlamlık kazandırır. Sert, kaliteli ve yumuşak, aşındırıcı özellikler elverişlidir. Mikrokristalin mumlar, parafinlerden yüksek bir erime noktasına sahiptirler. Diğer mumlar, ozocerite, candelilla, carnauba, balmumu, palmitic ve stearic asittir [14].

Mumlar sahip oldukları özelliklere göre fiyatlandırılırlar. Çeşitli özelliklere sahip olmak amacı ile kolayca parça haline getirilirler ve diğer ilave maddeler ile özellikleri geliştirilebilir. Mumların düşük erime noktaları ve düşük erime viskoziteleri onların enjekte edilmesini, birleştirilmesini, model salkımı oluşturmasını ve seramik kalıbı

bozmadan ortadan uzaklaştırılmasını kolaylaştırır. Bu özellikler, mumların düşük sıcaklıkta ve basınçta enjekte edilmesine ve düşük üretim maliyetine olanak verir [14].

Kullanılan ilave maddeler: katıksız (saf) mumların kullanışlı özellikleri çok fazla olmakla birlikte, iki önemli alanda özellikleri yetersiz kalır;

a) Dayanıklılık ve sertlik, özellikle kırılğan modellerin yapımında.

b) Boyutsal kontrol, özellikle model enjekte edilirken ve edildikten sonra, katının çekilmesi sonucunda yüzeyde meydana gelen oyuklar göz önünde bulundurulması gerekir.

Özelliklerin bu eksik kalan yönlerinin geliştirilmesi mum olmayan ilaveler ile yapılır. Mumların dayanıklılığı ve sertliği, yüksek moleküler ağırlığa sahip plastikler olan polietilen, etil selülöz, naylon, etilen vinil asetat ve etilen vinil akrelat ile iyileştirilir [14]. Yüzeyde oyuklara neden olan boyutsal çekilme, reçine ile azaltılabilir. Mum seçimi: Model mum malzemeleri, üretim şekline ve diğer istenilen özelliklere göre seçilir. Bunlar şu şekilde sıralanabilir [14];

Enjeksiyon: Yumuşama noktası, donma sınırı, detayları çoğaltmaya elverişlilik, yüzey, işlem süresi.

Yoketme, işlem ve model salkımı: Yağlayıcılık, dayanıklılık, sertlik, rijitlik, çarpmaya dayanıklılık, stabilite ve kaynak yapılabilme yeteneği.

Boyutsal kontrol: Isıl genleşme/büzülme, katı halde çekilme, oyuklanmaya eğilim, distorsiyon ve stabilite.

Kalıp yapımı: Dayanıklılık ve ıslanabilirlik.

Kalıbın mumdan arındırılması ve yakıp uzaklaştırma: Yumuşama noktası, viskozite, ısıl genleşme, ısıl difüzyon ve kül ihtivası.

Diğer: Maliyet, kullanılabilirlik, geri dönüşüm kolaylığı, zehir(toxik atığı) ve çevresel faktörler [14].

Plastikler

Mumlardan sonra en çok kullanılan model malzemesi plastiktir. En çok kullanılan plastik türü, genel amaçlı polistiren' dir. Polistirenin diğer plastiklerden ana avantajları, seri üretim ile kalıplamaya elverişli olması ve üretim esnasında meydana gelebilecek hasara karşı dayanıklılıktır.

Polistirenin dezavantajı ise, model yok edilirken kalıbın çatlamasına sebebiyet verir ve bu dezavantaj seramik kabuk yönteminde daha kötü' dür. Diğer plastikler; polietilen, naylon, etil selülöz ve selülöz asetat'tır. Diğer model malzemeleri; üre bazlı model malzemeler, suda çözünebilir model malzemeler, paradikloro-benzen ve naftalin bazlı model malzemeler, polistiren köpüğü gibi sıralanabilir [14].

1.2.3.2 Model Yapımı

Hassas döküm için model, istenen şekle sahip metal kalıplarda enjeksiyon yöntemi ile üretilir. Düşük sayıda model üretimi talaşlı imalat ile üretilebilir [14].

Mum Modellerin Enjeksiyonu

Mum modeller, genellikle nispeten düşük sıcaklıkta ve basınçta, ayrılabilen kalıplara amaca yönelik özel araçlarla enjekte edilerek üretilir. Model sıvı, sulu çamur, pasta veya katı şekilde enjekte edilebilir. Mum ekstrüzyonunda, katı durumda enjeksiyondan yararlanır. Sıvı mumlar yüksek sıcaklık ve düşük basınçta, katı durumdaki mumlar düşük sıcaklık ve yüksek basınçta enjekte edilir [14].

Mumu enjekte etmek için kullanılan ekipmanlar, basit ve ucuz da olabilir, sofistike ve pahalı da olabilir. Bu işlem pnömatik ve hidrolik makinalarda yapılır. Basit modeller genellikle düşük basınçla çalışan pnömatik enjeksiyon makinalarında üretilir. Yüksek sıcaklık talep eden, karışık şekilli, ve boyutsal tamlik istenen modeller hidrolik enjeksiyon makinalarında üretilir. Hidrolik makinalar, yüksek basınç sağlar ve büyük metal kalıplarında modelin üretilmesine imkan verir [14].

Plastik Modellerin Enjeksiyonu

Polistiren malzemedeki modeller, genellikle 177 ile 260⁰C sıcaklık ve 27,6 ile 138 Mpa basınçlarda standart plastik enjeksiyon makinalarında üretilirler. Plastik enjeksiyon makinaları hidrolik sistemle çalışır [14].

Modellerin Mekanik Üretimi

Az sayıda modele ihtiyaç duyulduğunda, modelin prototipinin çıkarılması veya deneysel araştırma için modeller direkt olarak makine ile üretilir.

Hassas döküm için modellerin mekanik üretimi; mum model, mumun aşınırıcı etkisindeki azlığı, düşük erime noktası ve yüksek akıcılığından dolayı birçok mekanik üretim şekli ile üretilebilme olanağı sunar. Modelin üretim yöntemi, maliyet, ekipman ömrü, imalat ömrü, model kalitesi, üretim verimi gibi parametreler gözönünde bulundurularak seçilir. Üretim metotları üç grupta incelenebilir; makine ile üretim, otomat(kopya) olarak şekil verme ve uygun kalıplarda döküm [14].

Makine ile üretim, günümüzde en çok kullanılan yöntemdir. Cnc (computer numeric control) talaşlı üretim tezgahları, erozyon(aşındırma ile üretim) tezgahları, bu üretim yönteminde kullanılan bazı tezgahlardır [14].

1.2.3.3 Model Salkım Üretimi

Büyük modellerin hassas dökümü ile üretimi tek tek yapılır, orta ve küçük büyüklükte olan modellerin hassas döküm ile üretimi, modellerin bir üzüm salkımı oluşturacak şekilde monte edilmesi ile ekonomik olarak üretilir. Uçakların türbin bıçakları 6 ile 30 parçadan oluşur, ancak daha küçük teknik donanım parçaları yüzlerce modelden oluşan salkım ile üretilebilir. Salkım üretimi büyük bir çoğunlukla manuel(el) ile üretilir [14].

Model Salkımları

Mum modeller, sıcak demir veya spatula kullanarak veya düşük bir gaz alevi kullanarak mum kaynak yöntemi ile salkıma monte edilebilirler. Salkım ile model arasına uygulanan mum çabucak erir ve model ile salkım birbirine doğru bastırılarak mumun tekrar katılması beklenir. Daha sonra birleşim yeri düzleştirilir. Manuel mum kaynak yöntemi büyük bir beceri gerektirir. Modeller eşit aralıklarda ve eksenel olarak eşit bir şekilde monte edilmelidir [14].

Polistiren modeller, ergitme kaynak yöntemi ile salkıma monte edilebilirler. Plastik birleşme ara yüzeyi ergitme ile yumuşatılır ve parçalar yapışana kadar birbirine bastırılır. Plastik salkıma mum model montesi kaynak yöntemi ile olur, bu yöntemde sadece mum eritilir.

Otomasyon ile salkım üretimi; salkım üretimi çoğunlukla manuel olarak yapılır, ancak bazı seri üretim yöntemleri geliştirilmiştir. Bir uygulamada, modelleri monte etmek için nozül kullanan robotlar kullanılır. Başka bir uygulamada modeller, çiftli(birbirine zıt) bir şekilde ısıtılmış bakır bıçaklar ve yay baskısı ile model salkımına otomatik olarak kaynak edilirler [14].

Salkım Dizaynı

Salkım dizaynında yapılacak olan hata ileride bütün prosesi etkileyebilir. Düşünülmesi gereken faktörler; montaj kolaylığı, bir seferlik üretimdeki parça sayısı, döküm yolluğuna dökülen metal oranı, dayanıklılık, kalıbın şekillendirilmesi ve kurutulmasındaki kolaylık, mum yok etme, sıvı metal akışı, ince kesitleri doldurma, geri çekilmeyi besleme, tane boyutu kontrolü ve şekli, seramik kabuğun kırılması, dökümden sonra parçaların kesilmesindeki kolaylık [14]. Yerine getirilmesi gereken üç temel şart vardır. Bunlar:

Boyutsal ölçüleri tam olan ve proses süresince yeterli dayanıklılığa sahip olan model salkım temini.

Metalurjik istekleri karşılama.

Kimyasal ve mekanik testler için ayrı bir örnek temini.

Bu şartların sonuçları tatmin edici olduğu sürece diğer faktörler sadece karlılığı etkiler. Proses, çok esnektir ve üreticilerin amaca ulaşabilmeleri için birçok yol mevcuttur. Tane kontrolünün kapalı olarak yapılmasını gerektiren parçalar, direkt katılaşması istenen parçalar veya tek kristalli döküm için genellikle dairesel salkımlar tercih edilir. Çünkü dairesel salkımlar, termal homojenlik sağlar. Ayrıca, zıt-yerçekimi dökümü, direkt döküm, merkezkaç(savurma) döküm yöntemleri de salkım dizaynında önemli rol oynar[14].

1.2.3.4 Seramik Kabuk Kalıbı Üretimi

Hassas kabuk kalıplar, model salkımın etrafına birkaç seramik kaplama uygulanarak üretilir. Her kaplama ince seramik katmandan oluşur. İlk önce model salkımı, seramik çamur banyosuna daldırılır. Sonra salkım, çamurdan çıkarılır ve fazla çamurun akması için biraz bekletilir, böylece daha homojen bir katman oluşturulur. Islak katman hemen adi seramik taneler ile sıvanır. Bu sıvama, seramik taneler içeren akışkan yataklarda yapılabildiği gibi tanelerin yüzeye serpilmesi ile de yapılabilir. Üst seramik katman iç yüzeyin şeklini alır ve modelin her detayını temsil eder. Bu katman ayrıca yapıya dayanıklılık kazandıran yapıştırıcı ihtiva eder. Sıva için kullanılan adi seramik taneleri, yüzeye uygulanan çamurun gereğinden fazlasının akmasını engeller ve yüzeyin çatlamasını ve çekilmesini engeller ayrıca katmanların yapışmasını sağlayarak kabuk kalınlığının hızlı bir şekilde oluşmasını sağlar. Her kaplama bir sonraki uygulanmadan önce sertleştirilmeye müsaittir. Bu sertleştirme kurutma, kimyasal dondurma veya bunların kombinasyonu ile yapılabilir. Kaplama, sıvama ve sertleştirme işlemleri kabuk kalınlığı elde edilene kadar tekrarlanır. En son kaplamaya seramik tanelerin kalıp yüzeyinde gevşek bir şekilde kalmaması için sıvama işlemi uygulanmaz [14].

Kalıp Refrakterleri

Seramik kabuk kalıpları için en bilinen refrakterler, silica bileşimindedir. Bunlar, saf silika, zirkon ve çeşitli alüminyum silikatlarıdır. Bu üç tipin çeşitli kombinasyonları birçok uygulamada kullanılır. Alumina, süper alaşımlarının dökümünde kullanılır. Alumina, ticari dökümlerde çok pahalı ve gereksiz olarak düşünülür. Silika, zirkon, alüminyum silikatlar ve alumina hem katman için hem de sıva için kullanılabilir. Diğer refrakterler(grafit, zirkonya, yitriya), reaktif alaşımlar için kullanılması tavsiye edilir.

Silika: Silika genellikle camısı silika formunda kullanılır, yani kuvars kumunun eritilmesi ve bunun camısı faza kadar katılaştırılması ile elde edilen silika formu olarak kullanılır. Bu form ezilip elendikten sonra sıva için üretilebilir. Silika oldukça düşük ısı genleşme katsayısına sahiptir dolayısı ile kalıp termal şoklara karşı dayanıklıdır. Ayrıca erimiş kostikte kolayca çözülebilir. Böylece kostik çözünme, kabuk malzemesinin döküm alanından uzaklaştırılmasını sağlar. Kuvars şeklinde kullanılan silika diğer silika ürünlerine göre daha ucuzdur. Ancak yüksek ısı genleşme katsayısına sahiptirler. Bu yüzden kuvars içeren yavaş bir şekilde ısıtılmalıdır [14].

Zirkon: Genellikle zirkon kumu şeklinde kullanılır ve kum şeklinde sıva için kullanılır. Fakat kullanımları ilk kaplama ile sınırlandırılmıştır çünkü diğer katmanların sıvanmasına yetecek kadar büyük taneler oluşturamaz. Ayrıca pudra ve calsine biçiminde çamurda kullanılırlar. Zirkon kumunun genel avantajı, yüksek refrakterlik özelliği, erimiş metalden kaynaklanan ıslaklığa karşı koyması, modelin şeklini kolaylıkla alması ve kullanışlılığı olarak sayılabilir [14].

Alüminyum silikatlar: Hassas döküm için alüminyum silikatlar ateş kilinin kalsinasyonu ile elde edilir. Alumina ihtivası arttıkça malzemenin refrakterliği ve maliyeti artar. Alüminyum silikat malzemeler, ezilir ve uygun büyüklüğe elendikten sonra çamurda toz şeklinde ve sıva için granül şeklinde kullanılmak üzere kurutulmuş peletlerden üretilirler [14].

Alumina: Boksit cevherinden Bayer prosesi ile üretilir. Alüminanın refrakterliği çok yüksektir. Kullanımı süper alaşımları dökümü ile sınırlandırılmıştır. Kullanılan cinsi, erime noktasının hemen altında kalsine edilerek yada elektikle eritme yöntemi kullanma sureti ile buharlaştırarak üretilir [14].

Yapıştırıcı Elemanlar

En çok kullanılan bağlayıcılar silika esaslıdır, ayrıca kolloidal silika, hidrolitik etil silikat ve sodyum silikat da kullanılır. Alumina ve zirkon kaplayıcılar bazen kullanılır [14].

Kolloidal silika: En çok kullanılan bağlayıcıdır. Soyum silikattan sodyum iyonlarının iyon değişimi ile alınması ile üretilir. Kolloidal silika genel amaçlı kullanımlar için idealdir. Dezavantajı, su bazlı olması nedeni ile kuruması yavaştır, özellikle kalıpta ulaşılamayan yerlerde ve maçalarda [14].

Etil silikat: Silikon tetraklorid ile etil alkolden kimyasal reaksiyon ile üretilir. Etil silikat'ın tek başına yapıştırıcı(bağlama) özelliği yoktur. Etil silikat, etil silikata bağlayıcısına hidroliz yoluyla dönüştürülür. Etil silikat, alkol bazı sayesinde, kolloidal silika'dan daha kısa zamanda kurur. Bununla beraber çok pahalı olma, kolaylıkla tutuşabilme ve çevresel tehditler gibi eksiklikleri vardır. Hızlı ve döndürme sureti ile daldırma uygulamalarında en iyi sonucu almak için bu bağlayıcı kullanılır. Etil silikat çamurlar jel şeklinde oldukları için, daldırma işlemi çabuk yapılır ve kuruma da çok kısa bir zamanda gerçekleşir. Diğer ilaveler: Islaticılar(sodyum alkil sülfat); buharlaşmayı engelleyen ilaveler(sulu silikon emülsyonu) [14].

Çamur Formülasyonu

Tablo 1.4 Üç Zirkon Çamurunun Formülasyonu ve Özellikleri [14].

Çamur	Bileşenler					Özellikler	
	Kolloidal silika(lt)	İlave su(lt)	Zirkon tozu(kg)	Islatma elemanı (cm ³)	Silika(kg)	Yoğunluk (g/cm ³)	Viskozite
1(b)	9,5	3,8	45	10		2,7-2,75	8-10
2 (c)	11,4		45	10		2,9-2,95	9-11
3(d)	9,5	3,8	41	10	4,5	2,65-2,7	9-11

Çamurun gerçek bileşim yüzdesi, kullanılan refrakter tozuna, yapıştırıcı tipi ve konsantrasyonuna, sıvı ilavelere ve istenen çamur viskozitesine göre belirlenir. Bileşim ağırlıkça yüzde olarak şöyledir; yapıştırıcı 5-10, sıvı 15-30, refrakter tozu 60-80. Çamur bileşimleri genellikle patentlidir ancak aşağıda zirkon çamurunun birkaç bileşimi Tablo 1.4'de verilmiştir; burada (b) çamuru genel amaçlı olarak, (c) çamuru yüksek dayanıma sahiptir ve ağır dökümlerde seramik kabuk kalıbı ile yüksek metal basınç uygulamalarında, (d) çamuru silika ile modifiye edilmiştir ve maça dökümlerinde kullanılır [14].

Çamurun Hazırlanması ve Kontrolü

Hazırlama: Çamurlar, sıvı yapıştırıcıya refrakter tozlarının ilavesi ile hazırlanır. İlave esnasında yeterli karıştırma yapılarak tozların aglomere haline gelmesi önlenmeli ve tozların disperse olması sağlanmalıdır. Başlangıçta, ıslatma eksikliğinden dolayı viskozite oldukça yüksek fakat karıştırma ile çamurun uygulanması için gerekli viskoziteye düşürülür. Karıştırma, toz partiküllerinin süspansiyon haline gelmemesi için devam ettirilmelidir. Döner tanklar ve pervaneli karıştırıcılar bu amaçla kullanılırlar [14].

Kontrol prosedürü: Çamurların kontrolü, dökümhanelere göre çeşitli şekillerde yapılır. Her dökümhanenin kendine özgü kontrol yöntemi vardır, burada kriter üretim hattıdır. En yaygın kontrol yöntemi, başlangıç bileşenlerinin ölçümü ve zirkon çamurunun ilk viskozitesi. Daha sonraki viskozite döner viskometre ile ölçülür. Kontrol edilen diğer parametreler, çamur sıcaklığı, yoğunluk ve pH. Bu değerlerin tespiti kolaydır. Gerçek çamur bileşiminin su içeriği, silica yapıştırıcı miktarı ve refrakter toz miktarının tespiti daha karışık bir prosesle ve uzun zamanda gerçekleştirilir. Bu tespit işlemi sık kullanılmaz, kullanılmasını nedeni kontrolden çok meydana hataların yok edilmesi içindir. Bitmiş seramik kabuklarının bazı özellikleri, ağırlık, kırılma modülü ve nüfuziyet gibi proses boyunca bir monitörden izlenebilir. Kabuğun sıcak yırtılmasını tespit etmek için kullanılan teçhizatlar endüstride test amacıyla değil araştırma amacı ile kullanılır [14].

Model Salkımın Kaplanmasına Hazırlık

Seramik çamura daldırmadan önce, model salkımı genellikle yüzeyde gevşek kalan mumun giderilmesi, kirin yok edilmesi ve yağlayıcı maddelerin giderilmesi için temizlenir. Temizleme, uygun çözültide model salkımını durulama ile başarılabilir. Örneğin, yağlayıcı maddenin sulu çözültisi gibi, burada çözücü, mumu aşındırmaz ancak mumun adhesif özelliğini arttıracak kadar aşındırıcı özelliği vardır. İlave durulama (su ile) temizleme maddesi uzaklaştırılır. Başka bir prosedürde model salkımı bir sıvının içine daldırılır burada çok ince bir oksit kaplama tabakası oluşur ve bu tabaka yüzeyi sararak ıslatır. Böylece salkım seramik çamuru tarafından ıslatılmış olur. Model salkımı genellikle daldırılmadan önce kurutulmaya elverişlidir. Kurutma bir soğuma etkisi oluşturur, bu da model salkımının boyutlarında istenmeyen kısalmalara neden olur [14].

Kaplama ve Kurutma

Model salkımın daldırma, kurutma ve sıvama işlemleri manuel, robotlarla veya mekanik olarak yapılır. Günümüz endüstrisi, daha homojen kaplama elde etmek için, daha büyük ürünler imal etmek için ve yüksek üretim hızı için bu işlemlerin gerçekleşmesinde robot kullanır. Ancak bazı durumlarda mekanik üretim ile daha hızlı üretim elde edilebilir (özellikle standart model salkımlarında). Çoğu daldırma işlemi havada yapılır.

Vakum altında daldırma işlemi pratik olmamakla beraber, dar girişlerin kaplanması ve hava kabarcıklarını oluşumunu eliminasyonunda etkilidir [14].

Temizlenmiş ve istenen özellikleri sağlamış model salkımı, esas seramik çamur banyosuna daldırılır ve döndürülür. Model salkımı, banyodan çıkarılır ve homojen bir kaplama olması için uygun hareketlerle çamur tankının üzerinde çamurun fazlasının akıtılması sağlanır. Daha sonra, sıva amaçlı parçacıklar uygulanır. Bu işlem bu parçacıkların yukarıdan çizgisel olarak düşürülmesi ile veya model salkımının bu parçacıkları içeren akışkan yatağa itilmesi ile gerçekleşir. Parçacıklar akışkan yatakta, yatağın altındaki poroz tabakadan geçen basınçlı havanın etkisinden dolayı kaynamış bir sıvı olarak davranır [14].

Genellikle ilk uygulanan çamur(model salkımının yüzeyindeki ilk kaplama tabakası), diğer kaplamalara göre daha iyi refrakter tozu içerir, yüksek viskozite ile uygulanır ve daha iyi sıva malzemesi ile uygulanır. bu karakteristikler, metal penetrasyonunu kolaylaştıran düz ve pürüzsüz kalıp oluşumunu sağlar [14].

İlk kaplama katmanının üzerindeki kaplamalar ki bunlar ilk katmanı koruma amacıyla uygulanırlar, ilk katmanın üzerine onun dayanıklılığını arttırmak ve gerekli kalıp kalınlığını elde etmek üzere formüle edilirler. Bazı durumlarda, yapılabilir üretilen parça büyüklüğü ve ağırlığına göre ilk kaplamamanın üzerine bir veya iki tane daha ilk kaplama yapılabilir [14].

Her kaplamadan sonra diğer kaplamaya geçmeden önce, kaplamadaki çamur kurutma ve katılaştırma ile sertleştirilir. Kontrollü sıcaklıkta oda sıcaklığında hava akımı ile kurutma en yaygın metod'tur. Kurutma genellikle açık askılarda ve konveyörlerde yapılır, kabinler ve tüneller bazen kullanılır. Kurutma işlemi, mumların yüksek ısı genleşme özelliğinden dolayı karmaşıktır. Eğer kurutma çok hızlı yapılırsa, soğuma etkisi, kaplama ıslak olduğu sürece, modelin kışalmasına neden olacaktır. Daha sonra kaplama sertleşip mukavemet kazanınca kuruma hızı düşeceğinden mum genişlemeye başlayacaktır. Bu da aslında kaplamayı çatlatır. Bu yüzden nem oranı %40 civarında tutulur. İdeal nem miktarı %50 olarak tavsiye edilir. Burada ana nokta, mum ile kurutma için kullanılan havanın sıcaklık farkı aşırı olmamalıdır. Tecrübeler bu sıcaklık farkının 4-6 °C olmasını gösterir [14].

Çamurun, kaplamadan sonra tamamen kurutulması şart değildir, fakat bu kaplamanın üzerine yapılacak olan diğer kaplamanın ilk kaplamayı sıyırıp atmaması için yeterli derecede kurutulması gerekir. Alternatif bir yöntem, kimyasal jelleştirme ile çamur sertleştirme yöntemidir. Bu yöntemde sertleştirme kurutma yapılmadan başarılabilir. Bu yöntem etil silikat yapıştırıcı malzemeleri ile başarılı sonuçlar verir. Kimyasal

jelleştirme yönteminde iki kaplama arasındaki zaman minimumdur. Kurutma işlemi yapılmayan kabuklar(kimyasal jelleştirme ile serleştirilen), diğerlerine göre daha zayıftır [14].

Modelin Bozulması

Bu işlem sırasında, kabuk kalıp birçok gerilmeye maruz kalır ve bu en sık karşılaşılan problemdir. Bu problem mum model ve kalıbı oluşturan refrakterin ısıl genleşme farklılığından ortaya çıkmaktadır. Kalıp ısıtıldığında bu genleşme farkları, kalıbı çatlatacak kadar hatta kalıbı yok edebilecek kadar büyük bir basıncın oluşmasına neden olur. Pratikte bu problemde, kalıba dışarıdan kalıbın dış yüzeyinin içeriye göre aşırı hızlı bir şekilde ısıtılması ile etkili bir şekilde kaçınılır. Böylece mumun yüzey katmanı çabuk bir şekilde, diğer mum modeller sıcaklığı arttırmadan önce, erir. Bu erimiş katman hem kalıptan uzaklaşır hem de kalıbın içine ıslatır, böylece kalıp içinde kalan diğer mumların genleşmesi için boş alan yaratır. Bazı durumlarda mum basıncını azaltmak için kabuğa delikler açılır[7]. Bu tekniklere rağmen kabuk hala yüksek gerilmelere maruzdur, bu yüzden kabuk mümkün olduğunca sağlam olmalı. Kabuk mum yok etme işleminden önce tamamen kurutulması tavsiye edilir. Birçok yöntem olmasına karşın sadece iki yöntem mumun yüzeyden eritilerek yok edilmesinde başarılı olmuştur; otoklav ile ortadan kaldırma ve yüksek sıcaklıkta kısa zamanda ortadan kaldırma [14].

Kalıbın Pişirilmesi ve Yakılması

Seramik kabuk kalıpları, nemi yok etme, içerde kalan model malzemesini ve herhangi organik artığın yakılarak uzaklaştırılma, seramiği sinterleme, kalıbı dökümden önce ön ısıtma amacı ile pişirilirler. Bazı durumlarda bu amaçlar bir tek yakma ile gerçekleştirilebilir. Diğer durumlarda ön ısıtma ikinci yakma ile yapılır. Bu kalıbın soğumasına, incelenmesine ve onarılmasına izin verir. Çatlak kalıplar özel çimento ile onarılabilir. Bu onarma işlemi çatlağı iyileştirmez ancak başarılı bir döküm yine de yapılabilir. Birçok kalıp, ön ısıtma sıcaklığı ile döküm sıcaklığı arasındaki farktan kaynaklanan sıcaklık düşüşünün minimum olması ve daha iyi besleme için seramik-fiber kompozit ile sarılırlar. Kalıp pişirme ve ön ısıtma işleminde, gazlı fırınlar kullanılır. Çoğu fırın konvansiyonel ateş tuğlaları ile izole edilmiştir. Bu işlemde önemli kriter iyi bir ısı sirkülasyonunun oluşturulmasıdır [14].

Yakma işlemi, 870-1095 °C arasında gerçekleştirilir. Birçok kalıp direkt olarak sıcak fırınlara yerleştirilir, ancak bazı kalıplar yakılması, düşük sıcaklıktaki bir fırında ve sıcaklık artışı çok yavaş olacak şekilde yapılmalıdır. Ön ısıtma sıcaklıkları parça dizimine ve döküm alaşımına göre belirlenir. En çok kullanılan ön ısıtma sıcaklık aralıkları; 150-540 °C alüminyum alaşımları için, 425-650 °C bakır esaslı alaşımlar için, 870-1095 °C çelikler ve süper alaşımlar için [14].

1.2.3.5 Ergitme Ve Döküm

Ergitme Araçları

Ergitme işlemi için günümüzde indüksiyon ocakları kullanılır. Bu ergitme şekli ucuz ve esnek. İndüksiyon ocakları, hassas dökümün belirli gereksinimlerini karşılamak üzere geliştirilmiştir. Bugün, kullanılan hassas dökümlerinde indüksiyon ile ergitme yöntemi kullanılır [14].

Hassas döküm için kullanılan indüksiyon ocaklarının kapasitesi, 7,7 ile 340 kg arasında değişmektedir. Ergitme hızı, genellikle 1,36 kg/dk'dır. Ancak bu hız, ergitme ve ergitme için güç uygulayan ünitenin büyüklüğüne göre değişebilir. İndüksiyon ocakları ile ergitme işlemi havada, inert atmosferde ve vakum altında yapılabilir. İndüksiyon ocakları çoğunlukla çelik, demir, kobalt ve nikel alaşımlarının, bazı durumlarda da bakır ve alüminyum alaşımlarının ergitilmesinde kullanılır.

Gaz alevi ile çalışan fırınlar ve elektrik resistanslı fırınlar, alüminyumun dökümünde kullanılır. Alüminyum ve bakır alaşımlarının dökümü için ergitme işlemi gaz ile çalışan fırınlarda tatmin edici sonuçlar verir [14].

Döküm Metotları

Havada ve vakum altında dökümlerin ikisi de hassas döküm yönteminde önemli yer tutar. Döküm işlemini çoğu yer çekimi yönünde yapılır.

Havada döküm alüminyum, magnezyum, bakır, altın, gümüş, platin, her çeşit çelik, düktil demir, kobalt ve nikel alaşımlarının hassas dökümünde kullanılır.

Vakumda döküm yöntemi temiz metal yüzeyi ve daha iyi özellikler temin eder, bundan dolayı havada dökülebilen bazı alaşımların vakumda dökülmesi tercih edilir. Fakat bu yöntemin genel kullanma amacı havada dökülemeyen titanyum, bazı bakır alaşımları ve refrakter metallerinin dökümü içindir.

Hassas dökümün en genel avantajı çok ince çeperlerin bile dökülmesine olanak sağlamasıdır. Bu avantaj sıcak kalıp kullanımından ileri gelmektedir. Ancak avantajları vakum ile döküm, basınç dökümü, merkezkaç döküm ve zıt yerçekimi dökümleri gibi belirli döküm yöntemleri ile artırılabilir [14].

Vakum yardımı ile döküm'de, kalıp açık bir kamaranın içine sadece kalıbın döküm yolluğunun girişi açıkta(hava ile temas halinde) kalacak şekilde yerleştirilir. Kalan yerler contalarla ortama kapatılmıştır. Kısmi vakum kamaraya ve kalıba uygulanır. Sıvı metal atmosfere açık olan döküm yolluğunun girişine dökülür ve vakum uygulanarak havanın poröz kalıbın çeperlerinden tahliyesi ve erimiş metale farklı basınçlar(detayları ve ince çeperleri doldurması için) oluşturulması sağlanır [14].

Bazı fırınlar aynı amaç için basınç uygulama mekanizması ile donatılmıştır. Sıcak kalıp, döküm yolluk girişi ile fırının girişi paralel olacak şekilde sabitlenir ve fırın çabuk bir şekilde dönüştürülerek(döküme) sıvı metal, kalıba dökülür, döküm esnasında sürekli bir şekilde sıkıştırılmış hava veya gaz kullanılarak elde edilen basınç uygulanır [14].

Merkezkaç dökümde, modeli döndürme sureti ile oluşturulan merkezkaç kuvvetler ile sıvı metalin ileri yürütülmesi ve döküm boşluklarının sıvı metal tarafından kolaylıkla doldurulması sağlanır. Diş protez hassas dökümü ile mücevher hassas dökümünde bu yöntem kullanılır [14].

Yer çekimine zıt döküm yöntemi ince kesitlerin doldurulmasında mükemmel bir döküm yöntemidir ve kullanımı hassas döküm ile sınırlı değildir.

1.2.3.6 Döküm Sonrası İşlemler

Döküm sonrası işlemler hassas döküm ile üretim maliyetinin %40 ile 50'sini oluşturur. Sade parçaların üretim rotası standart olmakla beraber çok özel parçaların üretimi maliyeti artırır. Örneğin hatalı döküm yapılmışsa, üretimi tamamlamadan önce erkenden ıskarta(hatalı döküm)'yı tespit etmek ve elimine etmek maliyeti etkiler, çünkü ekstra inceleme ve muayeneler yapılır. Maliyeti azaltmak için alternatif yollar aranmalıdır. Örneğin; alaşım tipinin istenen döküm özelliklerini karşılayıp karşılamadığının doğrulanması parçalar salkımdan alınmadan yapılabilir [14].

Kırma

Kabuk malzemesini bir kısmı soğuma esnasında dökülebilir ancak büyük ve önemli bir kısmı her zaman dökümün üzerinde kalır. Bu kalan kısımlar, bir titreşimli pnömatik çekiç kullanılarak veya elle kırılarak dökümden ayrılır. Gevrek alaşımlar özel dikkat gerektirir. İlk kaplamanın bazı kısımları bazen döküm yüzeyine yapışık olarak kalabilir.

Ayrıca kabuk malzemeni bir kısmı ceplerde veya parçalar arasında kalabilir. Bunlar ayrı bir operasyonla giderilir, genellikle shot blasting (atış ile patlatma) yöntemi ile. Kırma işlemi için mekanik kırma yerine bazen yüksek su basınçlı patlatma yöntemi kullanılır [14].

Kesme

Alüminyum, magnezyum ve bazı bakır alaşımları testere ile kesilerek salkımdan alınır. Diğer bakır alaşımları, çelik, düktil demir ve süper alaşımlar aşındırıcı mekanik teçhizatlarla kesilirler. Asetilen ile kesme aşındırıcı makinanın kesme bölgesine giremediği durumlarda kullanılan bir başka kesme yöntemidir. Bazı gevrek alaşımlar, eğer döküm girişinde uygun bir çentik açılırsa bir tokmak ile kolayca koparılabilir. Bazı keskin metal kalıplar ile kesme işlemi yapılabilir [14].

Isıl İşlem

Havada ve vakumda ısıl işlemi sıkça kullanılır. Vakumda ısıl işlem temiz, parlak bir yüzey elde etmek için paslanmaz çeliklere uygulanır. Parçalar ısıl işleme tabi tutulmadan önce kesinlikle yere düşürülmemeli, birbirine çarptırılmamalıdır [14].

Aşındırıcı Temizleme

Pnömatik ve merkezkaç vurma makinaları kullanılır. Metalik aşındırıcılar(çelik veya demir çakıl veya kıvılcımlar) ve seramik aşındırıcılar(silika kumu, alüminyum oksit, lal taşı) genellikle kullanılır. Sert ve köşeli alumina hızlı bir temizleme sağlar, pahalı fakat el ile kırma kullanılmış ise bu yöntem gereklidir. Alumina ile vurma yüzey hatalarının yok edilmesi ve yüzeyin açılmasında etkilidir. Ayrıca bu şekilde temizlenen yüzeyin muayenesi kolaylaşır. Metal ve cam parça atışı ile temizleme, parlak yüzey oluşturur. Temizleme için kullanılan aletler otomatik döner tabla veya tambur şeklindedir.

Başka bir aşındırıcı yöntem ile yüzey tamamlama işlemi'nde; dökümler koni, üçgen ve yıldız şekilli kimyasal ve sentetik yüzey aşındırıcı maddeler kullanılarak vibrasyonlu veya merkezkaç makinalarda temizleme işlemine tabi tutulurlar [14].

Çeşitli İşlemler

Sıcak izostatik presleme ile dökümlerin porozitesi elimine edilir, yorulma mukavemeti artırılır, duktilitesi artırılır ve dağılması azaltılır. Mekanik olarak işlem bazen hassas dökümden sonra istenebilir, ancak çoğu durumda mekanik şekil vermeye gerek duyulmaz. Mekanik işlem sadece ölçü tamlığının istendiği kısımlarda uygulanır. kaynak işlemi, onarım ve bağlantı amacı ile kullanılır. Ölçü tamlığını sağlamak için kullanılan bir işlem broşlamadır [14].

Hassas Döküm İle Üretimin Avantajı

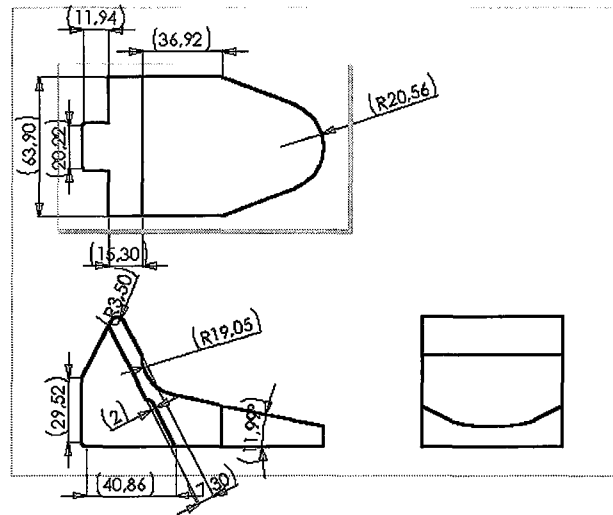
Karmaşık şekilli ve büyük parçalar üretilebilir,
Her çeşit alaşımın dökümü yapılabilir,
Boyutsal ölçü tamlığı,
Sağlamlık (mukavemetli döküm ürünü),
Geniş uygulama alanı (uçak motorları, uçakların yakıt sistemi, makine elemanları, havacılık; füzeler ve yer savunma sistemleri, tarım araçları, mekanik işlem ekipmanları, otomotiv, delme ekipmanları, optik ekipmanlar, bisiklet ve motosiklet, paketleme ekipmanları, kameralar, pnömatik ve hidrolik sistemler, pompalar, valfler, tel çekme ekipmanları, mücevher sanayi, el aletleri, silahlar, elektronik radar, elektrik ekipmanları, iletişim endüstrisi, dizel motorlar [14].

2. MALZEME VE YÖNTEM

Sonlu elemanlar yöntemi ile gerçekleştirilen çalışmaya konu olan parça uçaklarda kullanılan ve “Block ASSY ” olarak adlandırılan AlSi9Cu3 hassas döküm alaşımıdır. Alaşımın kimyasal bileşimi Tablo 2.1’ de verilmiştir. Parçanın teknik resim detayları ise Şekil 2.1’ de gösterilmiştir. Bölüm 1.2’ de teorik olarak açıklanmış olan ısı transferine dayalı soğuma modeline uygun olarak katılaşması simüle edilmiştir.

Tablo 2.1 AlSi9Cu3 hassas döküm alaşımının kimyasal bileşimi. [13]

Element	Ağırlıkça % Miktarı
Bakır	2.0-4.0
Magnezyum	0.5-1.5
Silisyum	8.5-10.5
Demir	1.2 maks.
Manganez	0.5 maks.
Nikel	1.0 maks.
Çinko	1.0 maks.
Kurşun	0.2 maks.
Kalay	0.1 maks.
Titanyum	0.2 maks.
Alüminyum	geriye kalan

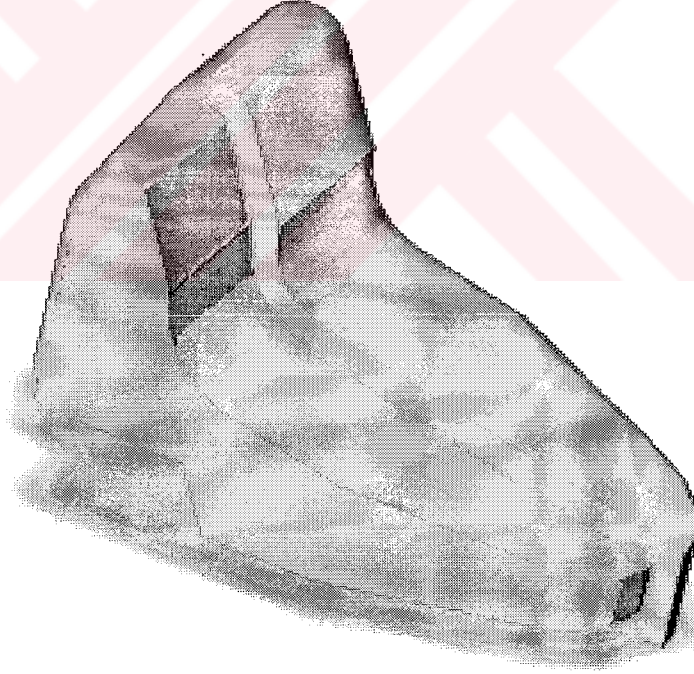


Şekil 2.1 Hassas olarak dökülecek parçanın standart 3 görünüşü (mm)

İki aşamadan oluşan simülasyon çalışmasının ilk aşamasında; termal analiz uygulanmış ve böylece katılaşma sırasındaki soğuma hızları tespit edilmeye çalışılmıştır. İkinci aşamada ise bağlantılı yapısal analiz gerçekleştirilmiştir. Termal analiz sonucu elde edilen verilerin, sınır ve yükleme koşulu olarak kullanıldığı bu aşamanın sonucunda , katılaşma sonucu döküm parçasında meydana gelen çekintilerin (deformasyonların) ve gerilmelerin yeri, şiddeti, yönü ve büyüklüklerinin belirlenmesi amaçlanmıştır[15,16].

2.1 Geometrik Modelin Oluşturulması

Bölüm 1.3' te anlatıldığı gibi Hassas Döküm Prosesi dökülecek döküm parçası ve bu parçaya uygun geometriye sahip seramik kalıp malzemesinden oluşmaktadır. Seramik kalıp ve hassas döküm parçasının geometrik katı modeli 3 boyutlu olarak "SOLIDWORKS2001 PLUS" yazılımı kullanılarak oluşturulmuştur. Burada hassas döküm kalıbının kalınlığı pratik uygulamalara dayanılarak 5 mm olarak alınmış ve parça ile seramik kalıbının 3D-geometrik modeli Şekil 2.2 de görüldüğü gibi hazırlanmıştır.



Şekil 2.2 Seramik kalıp ve hassas döküm parçasının 3 boyutlu geometrik modeli.

2.2 Malzeme modelinin oluşturulması

Model içinde iki farklı izotropik malzeme mevcuttur. Bunlar; a) Döküm parçası ve b) Seramik kalıptır. Sonlu Elemanlar Analizlerinin gerçekleştirilebilmesi için gerek döküm parçasının gerekse Zirkon-kumu seramik kalıbın sıcaklığa bağlı fiziksel malzeme özelliklerinin bilinir olması gerekmektedir. Bunlardan ısı transferi analizi için entalpi, termal iletkenlik, seramik kalıbın ısı kapasitesi, yoğunluğu konvektif film katsayısı gibi özellikler, bağlantılı yapısal analiz için ise termal genleşme, elastikiyet modülü, poisson oranı gibi mekanik malzeme özelliklerinin bilinmesi gerekmektedir.

2.2.1 Malzeme Özelliklerinin Belirlenmesi

Model içinde iki farklı izotropik malzeme mevcuttur. Bunlar; ; a) Döküm parçası ve b) Seramik kalıptır. Çözüm, ısı transferine dayalı katılaşma prensibi temelinde gerçekleştirildiğinden sıvı metalin katılaşma simülasyonu için ısı transferi ve katılaşma termodinamiği bilgilerine ihtiyaç duyulmaktadır.. Bu nedenle, hem seramik kalıbın hem de alüminyum alaşımının gerekli fiziksel özellikleri tanımlanmalıdır.

2.2.1.1 Döküm Alaşımının (AlSi9Cu3) Özellikleri

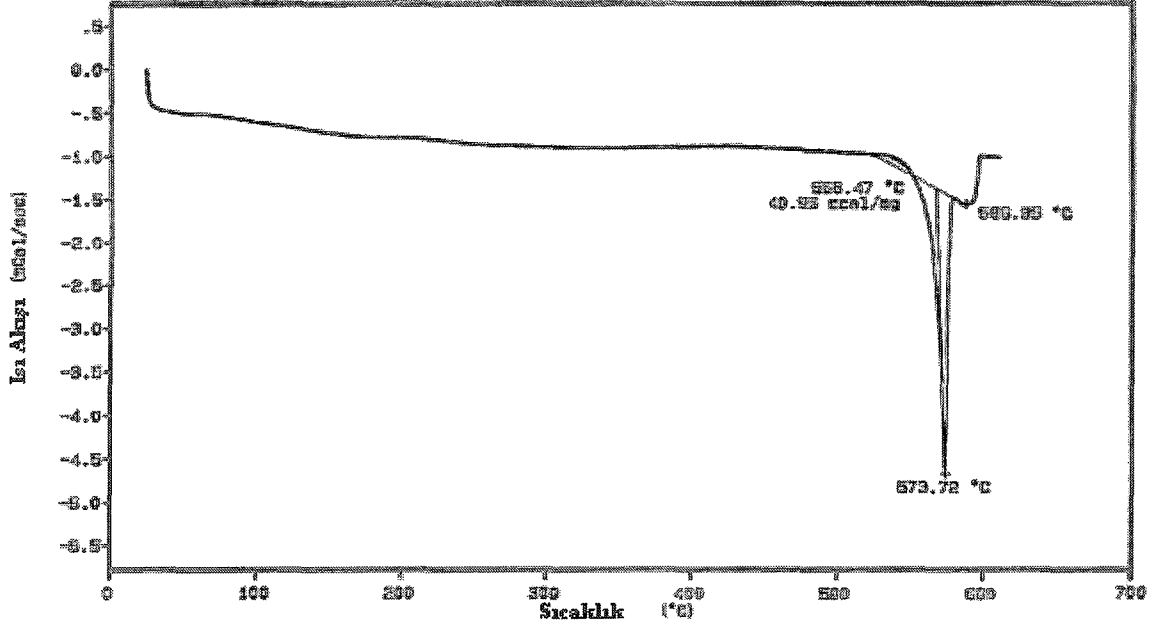
Sıvı metalin soğumasıyla birlikte katılaşmaya başlayan metalin fiziksel özellikleri sıcaklığın bir fonksiyonu olarak değişir. Bu özelliklerin en önemlileri, entalpi ve termal iletkenliktir. Sıcaklığa bağlı entalpi özelliğinin belirlenebilmesi için DSC (differential scanning calorimeter) yönteminden yararlanılmıştır.

DSC Yöntemi;

AlSi9Cu3 alaşımının sıcaklığa bağlı entalpi değerlerine ulaşabilmek için DSC yöntemi kullanılmıştır. Deney sırasında 6.5 mg AlSi9Cu3 numunesi Azot atmosferi altında (25 ml/dak) oda sıcaklığından alaşımın ergime sıcaklığının üzerine (610 °C' ye) 5.0 °C/dk hızla ısıtılmıştır. Deney sırasında her 2 saniyede bir veri alınmış ve AlSi9Cu3 alaşımından elde edilen DSC sonucu Şekil 2.3' te verilmiştir. Deneyle elde edilmiş olan ısı akışı-sıcaklık diyagramı AlSi9Cu3 alaşımına ait sıcaklığa bağlı entalpi değerlerinin hesaplanmasında kullanılmıştır.

$$\Delta H = \int_1^2 Cp dT \quad (2.1)$$

Bölüm 1.3' te açıklandığı üzere (2.1) formülüne göre entalpi değerlerine ulaşmak için Sıcaklığa bağlı olarak değişen Cp (sabit basınçta özgül ısı) değerlerinin bulunması gerekmektedir. Isı akışı-sıcaklık diyagramında Isıtma hızı ve ısı akışı bilgileri kullanılarak ΔH_{lat} değerlerine ulaşılmıştır. Entalpi değişimi-sıcaklık diyagramı şekil Şekil 2.3'te verilmiştir.



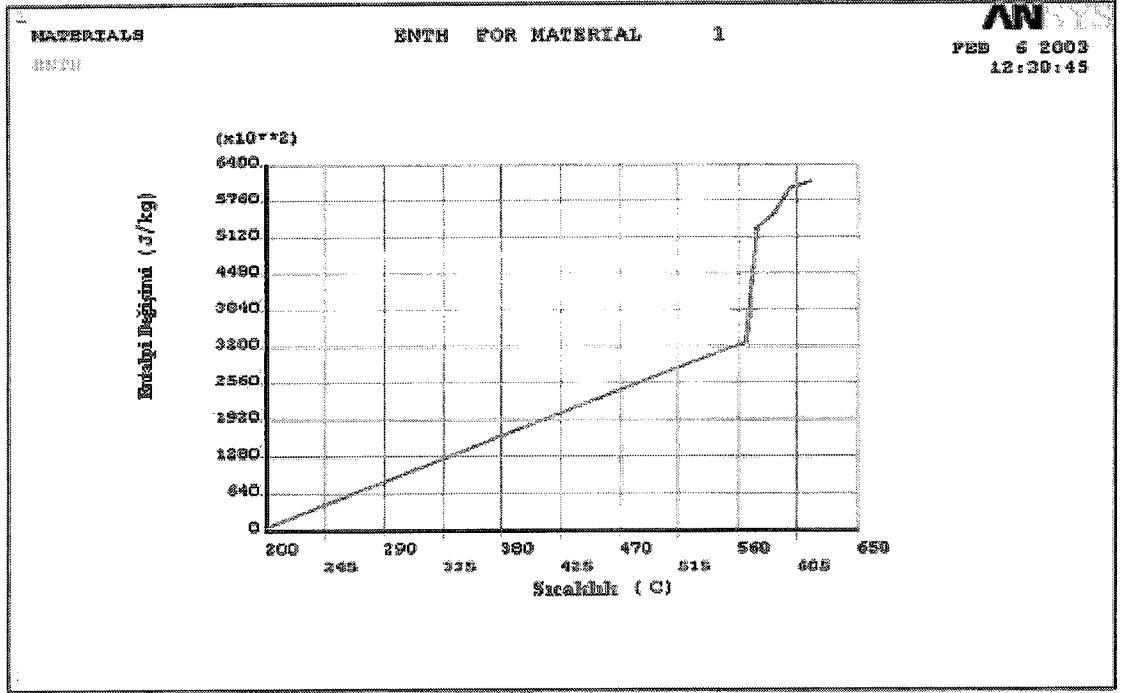
Şekil 2.3 AlSi9Cu3 alaşımından elde edilen ısı akışı-sıcaklık diagramı.

Alaşımın entalpisi sıcaklığın artmasıyla artar. Sıcaklık ötektik sıcaklığa ulaşınca denge diagramına göre $\alpha + \text{Si} \rightarrow \text{sıvı}$ reaksiyonu gereğince sıcaklık belli bir süre sabit kalır. Entalpi sıcaklığın artmasıyla artar, sıvı metalin tamamen katılaştığı noktada (Solidüs) sıcaklık sabit kalır, çünkü gizli erime ısısı açığa çıkar. Bu nedenle katılaşmanın gerçekleşmesi için gerekli enerji, sıvı metalin dönüşüm entalpisinden ortaya çıkar. Böylece, entalpideki değişim son katılma noktasında (solidüs) daha fazla artmaktadır. Katılma tamamlandıktan sonra tekrar aynı şekilde sıcaklık ile artar, artmaya devam eder. (Şekil 2.4)

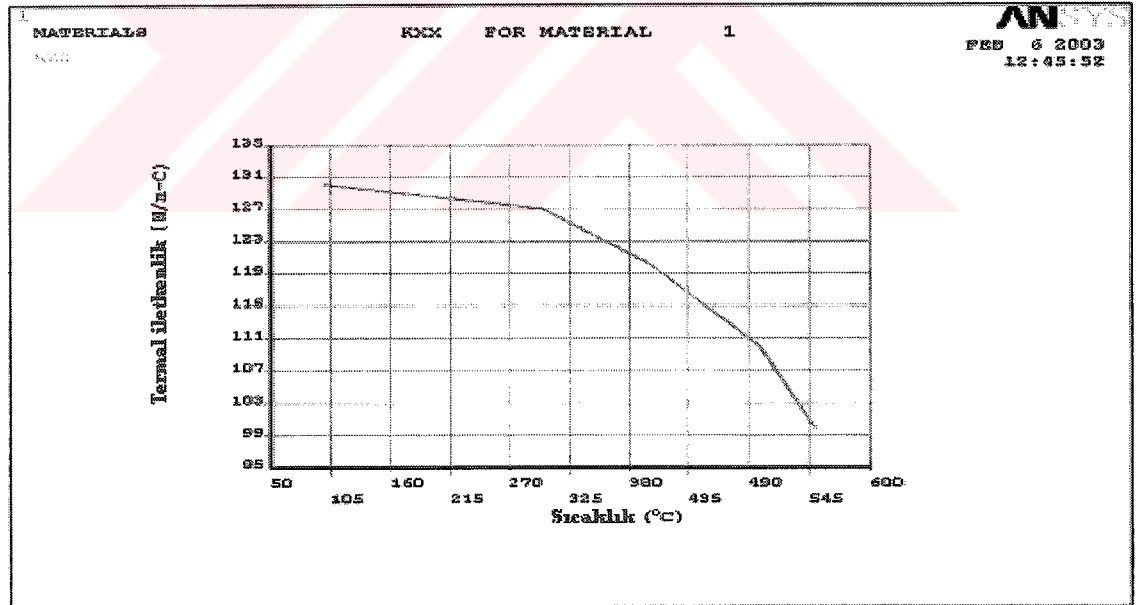
Döküm parçasına ait sıcaklığa bağlı ısı iletim özelliği Şekil 2.5' te verilmiştir.

Sıcaklığa bağlı başka bir özellik ısı genleşme katsayısıdır. Bu özellik sıvı metalin sıcaklığı ile doğru orantılıdır. (Şekil 2.6)

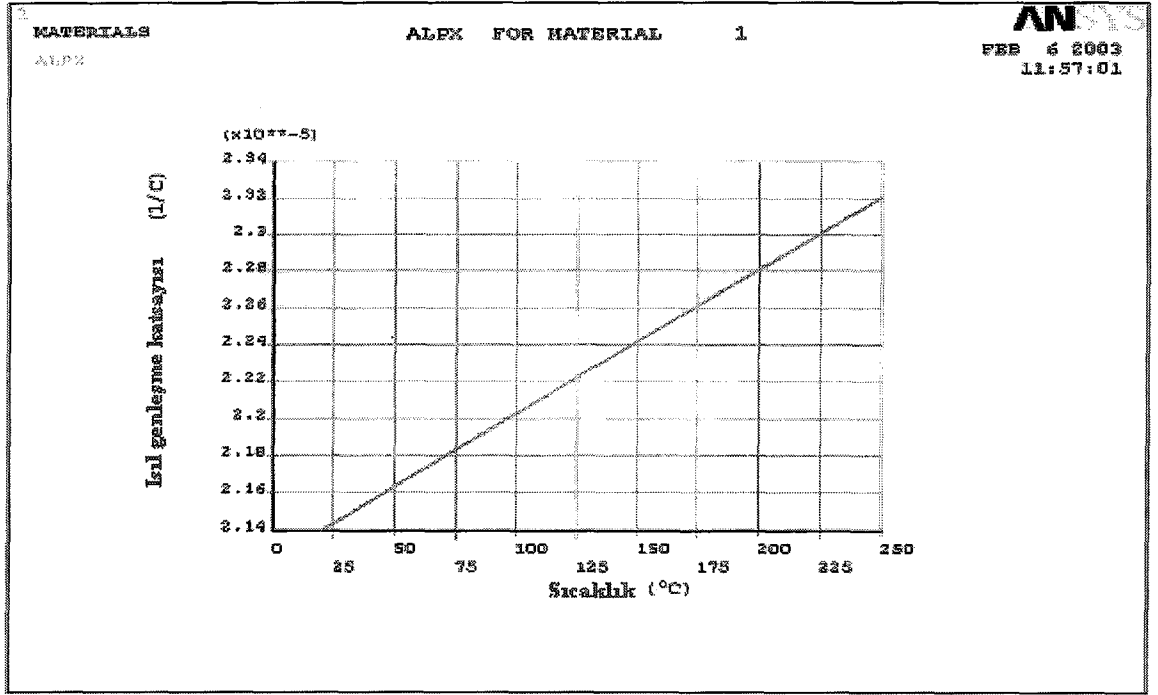
SE analizi için bir diğer önemli malzeme bilgisi de sıcaklıkla değişen elastisite modülüdür. Elastisite modülünün sıcaklıkla değişimi Şekil 2.7' te gösterilmiştir.



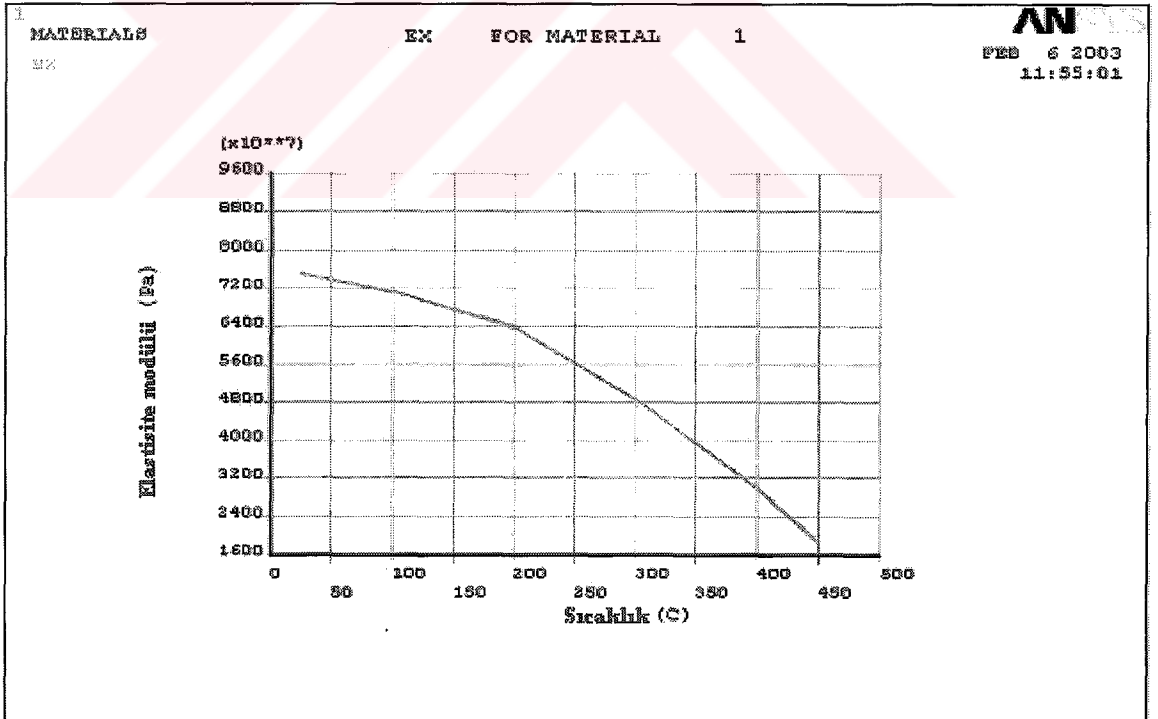
Şekil 2.4 Entalpi değişimi ile sıcaklık arasındaki ilişki.



Şekil 2.5 Termal iletkenlik ile sıcaklık arasındaki ilişki [13].



Şekil 2.6 Isıl genişleme katsayısı ile sıcaklık arasındaki ilişki [13].



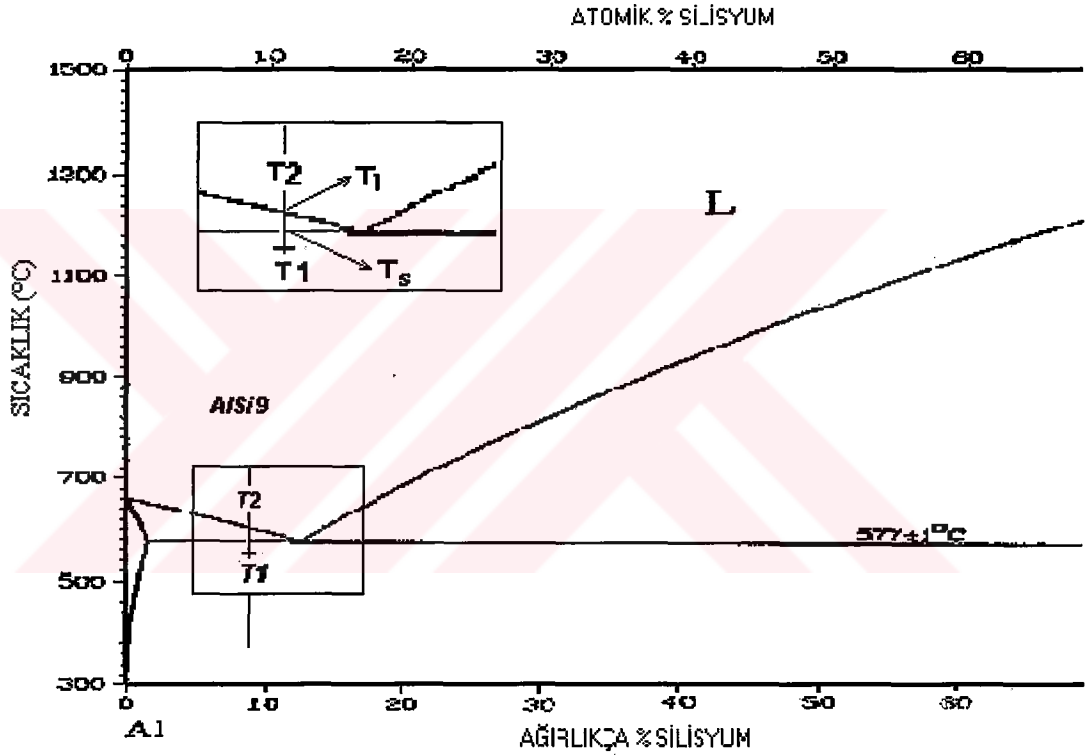
Şekil 2.7 Elastisite modülü ile sıcaklık arasındaki ilişki [13].

2.2.1.2 Seramik Kalıp Özellikleri (Zirkon Kumu)

Seramik kalıp sıcaklığı 40°C (oda koşulları) olduğundan herhangi bir faz dönüşümü gerçekleşmeyeceğinden dolayı seramik kalıbının (zirkon kumu) fiziksel özelliklerinin değişmeyeceği kabul edilmiştir.

Termal iletkenlik:	:1	W/mK(250°C 'de);
	:0,91	W/mK(400°C 'de);
	:0,84	W/mK(600°C 'de)
Yoğunluk	:4500	kg/m ³
Özgül ısı(c)	:750	J/kgK [14].

Al-Si



Şekil 2.8 AlSi Faz diyagramı.

Metal ve alaşımlarında Şekil 2.8 ' de görüldüğü gibi sıvı-katı faz dönüşüm aralığında bir sıcaklık intervali bulunmaktadır. Bu intervali sınırları, solidus (T_s) ve likidüs (T_l) olarak gösterilmiştir. AlSi9 alaşımı sıvı fazdan itibaren soğumaya bırakılırsa likidüs noktasındaki sıcaklığa erişildiğinde sıvı fazdan α ' nın ayrılması ötektik sıcaklığa kadar devam eder. Ötektik sıcaklığın çok çok az üzerindeki sıcaklıklarda kaldıraç kuralı ile hesaplanacak miktarda, oluşmuş α fazı ve arta kalan sıvı faz mevcuttur. Ötektik sıcaklıkta ise arta kalan sıvı fazı sıvı $\rightarrow \alpha + \text{Si}$ reaksiyonu gereği sabit sıcaklıkta katılaşır. Soğuma daha da geciktirilmiş olur. Dolayısıyla likidüs noktasıyla ötektik reaksiyonun tamamlandığı nokta arasında tüm sıvı faz katılaşmaktadır ve bu sırada tüm gizli erime ısıları açığa çıkmaktadır. Ötektik reaksiyonda tamamen katı hale gelen alaşım oda sıcaklığına kadar soğumaya devam etmektedir.

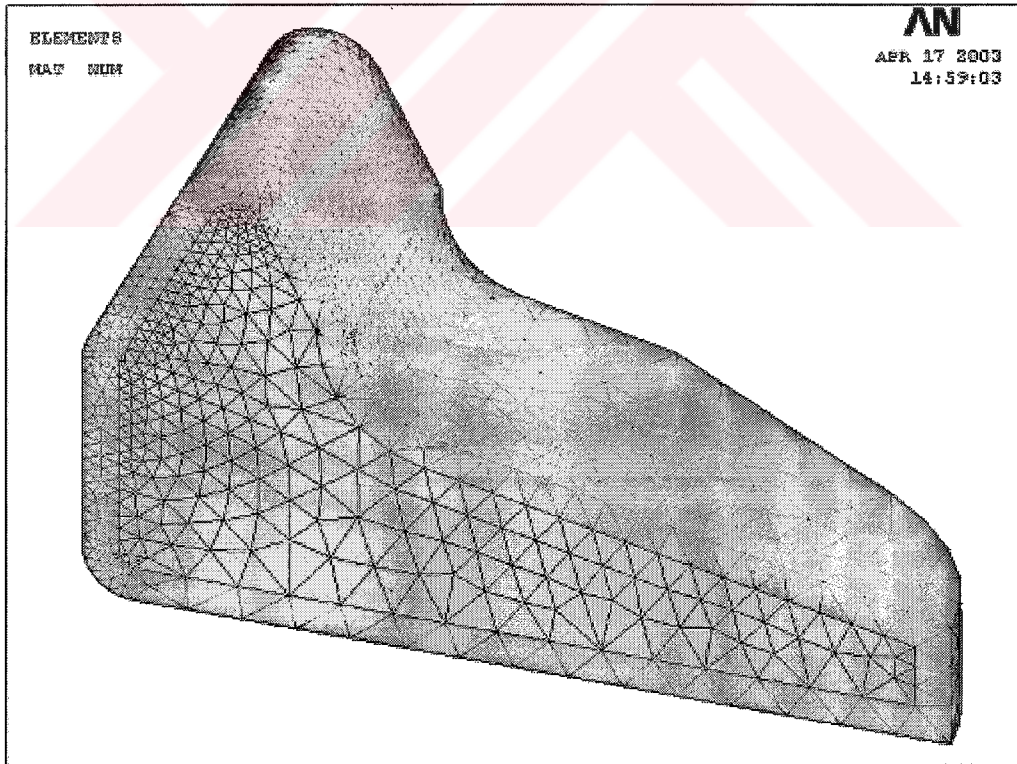
Şekil 2.8' deki gibi ötektik altı bir alaşımın T_1 'den T_2 ' ye kadar $T_1 < T_S < T_L < T_2$ sıcaklık intervali için T_S ve T_L arasındaki Mushyzone' da ki sıvı-katı değişiminin denklemi aşağıdaki şekilde özetlenebilir.

$$\Delta h_{(T_2-T_1)}^{\zeta} = h_{(T_2)}^{\zeta} - h_{(T_1)}^{\zeta} = v^S \rho^S \int_{T_1}^{T_S} C_p^S dT + h_{lat} + v^L \rho^L \int_{T_L}^{T_2} C_p^L dT \quad (2.2)$$

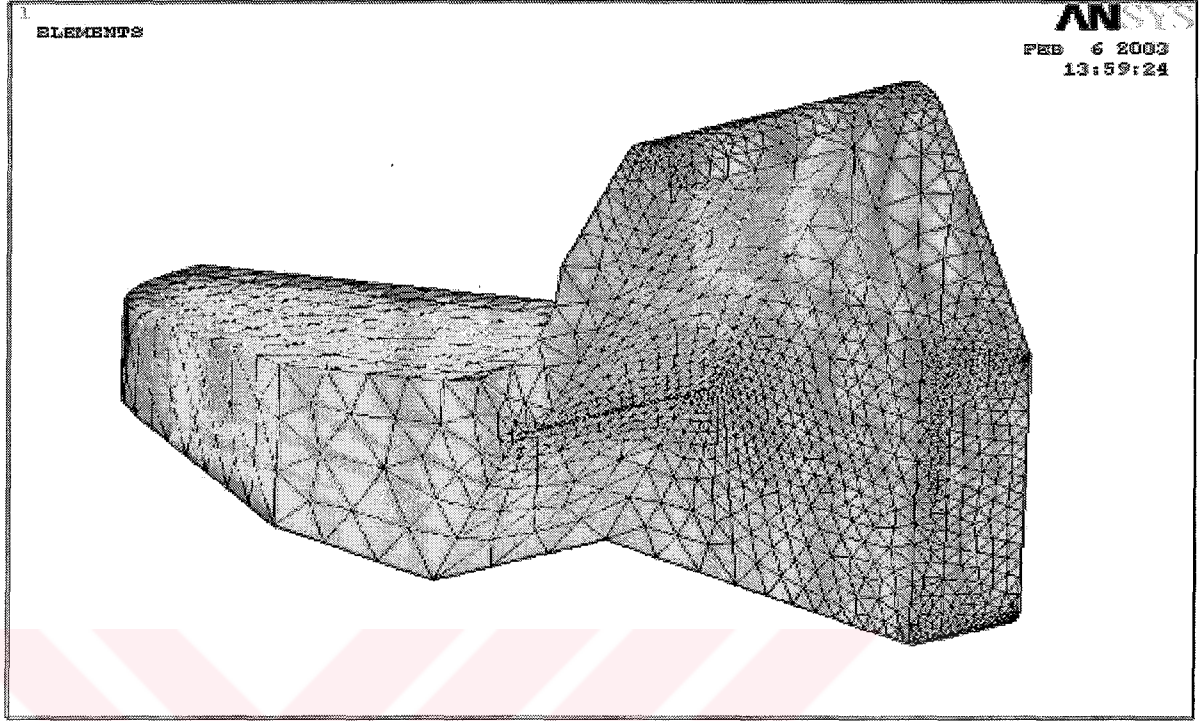
Burada v hacmi, ρ yoğunluğu, h_{lat} erime entalpisi veya gizli ısısı olarak ifade edilmektedir. Buradaki L ve S indisleri sırasıyla sıvı ve katı hali belirtmektedir. Buradaki alaşım entalpisi (h) sıcaklığa ve alaşımın bileşimine bağlıdır [7,9,10].

2.3 Sonlu Elemanlar Modelinin Oluşturulması

ANSYS 6.1 yazılımı kullanılarak 3D-geometrik katı modeli hazırlanmış ve malzeme özellikleri girilmiş olan parçanın sonlu elemanlar modeli oluşturulmuştur. Şekil 2.9 ve Şekil 2.10' da malzemenin sonlu elemanlar modeli. Tablo 2.2' de ise sonlu elemanlar modeline ilişkin bazı istatistikî bilgiler görülmektedir.



Şekil 2.9 Döküm parçası ve seramik kalıbın sonlu elemanlar modelinin önden görüntüsü.



Şekil 2.10 Döküm parçası ve seramik kalıbın sonlu elemanlar modelinin arkadan görüntüsü.

Tablo 2.2 Sonlu elemanlar modeline ilişkin istatistikî bilgiler.

	3D-Geometrik Model	
	Zamana bağlı termal analiz	Bağlantılı Yapısal Analiz
Nod Sayısı	7031	7031
Eleman Sayısı	35482	35482
Bilinmeyen Değişkenlerinin Tipi	Sıcaklık	Yer değiştirmeler (x,y,z)
Nod Başına Bilinmeyen Değişkenlerinin Sayısı	1	3
Bilinmeyen Değişkenlerinin Sayısı	1x7031	3x7031

3. BULGULAR

Döküm parçasının ve buna bağlı olarak faz dönüşümlerinin simüle edilmesi için zamana bağlı sıcaklık analizi yapılmıştır. Yapılacak termal analiz için sınır şartları ve uygulana kabuller şöyledir;

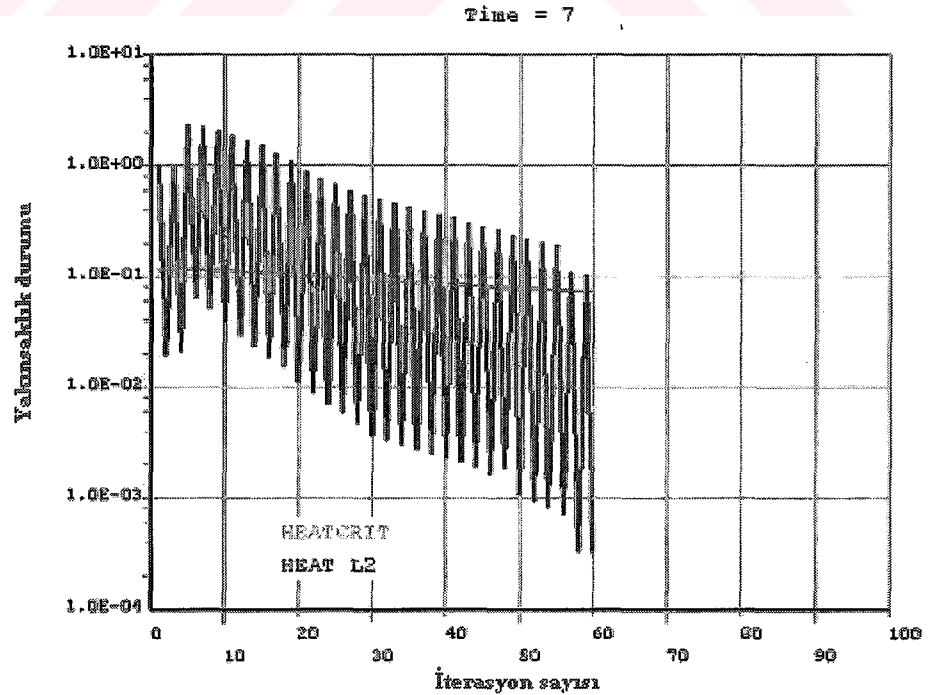
1. Zirkon kumu kalıbı, sıvı metal ile tam doldurulduğu varsayılmıştır. Bu noktada $t=0$ anında metalin soğumaya başladığı kabul edilmiştir. Bu sırada sıvı metalin sıcaklığı 640°C kabul edilmiştir. Öte yandan Zirkon kumu seramik kalıbının sıcaklığı ise 40°C kabul edilmiştir.

1 Zirkon kumu kalıbının iç yüzeyi ile metal yüzeyinin birebir örtüştüğü kabul edilmiştir.

2 Sıvı metalin sıcaklığından kaynaklanan ve kalıbı az da olsa etkilemesi beklenen radyasyon etkileri ihmal edilmiştir.

3 Seramik kalıbın dış yüzeyine kadar konduksiyonla taşınmış ısı $70 \text{ W/m}^2\text{K}$ ' lik serbest konveksiyonla havaya geçmiştir.

4 Tüm bu koşullar sonrasında zamana bağlı çözüm için zaman seçeneği belirlenmiş ve kalıbın kırılmadan serbest olarak metalin katılaşması yaklaşık 7 saat sürdüğü varsayılmıştır. Zira mevcut malzeme özellikleri ve yükleme şartları altında gerçekleştirilen deneme amaçlı çözümlerde yaklaşık 7 saatlik zaman periyodundaki çözüm Şekil 4.11' de görüldüğü gibi matrissel iterasyonların en yakınsak çözümü sağladığı belirlenmiştir.



Şekil 3.1 İterasyon grafiği.

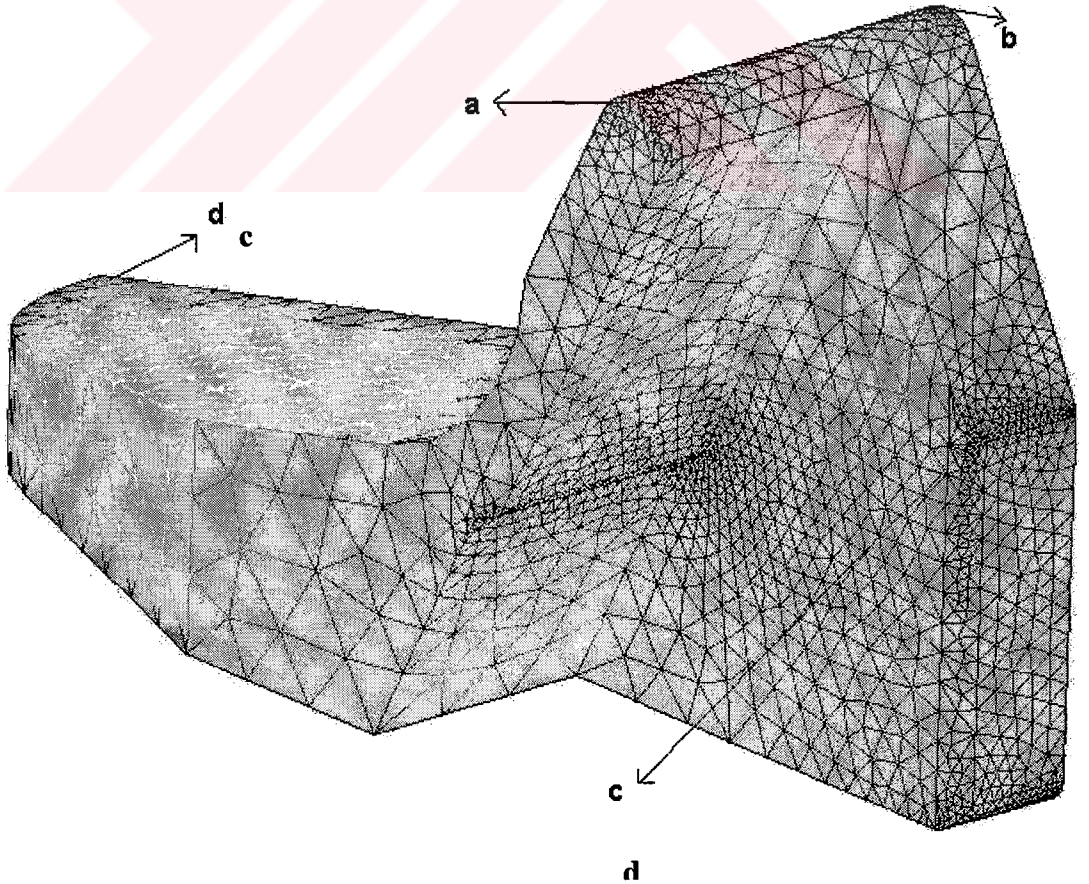
Çözümün gerçeğe uygunluğunun sınındığı en büyük aşama bu yakınsak çözümün elde edildiği aşamadır. Zira diğer durumlarda yakınsak çözüm elde edilememekte ve programlama aşamasının tekrar başına dönülerek hatanın nereden kaynaklandığının tespiti gerekmektedir.

3.1 Termal Analiz

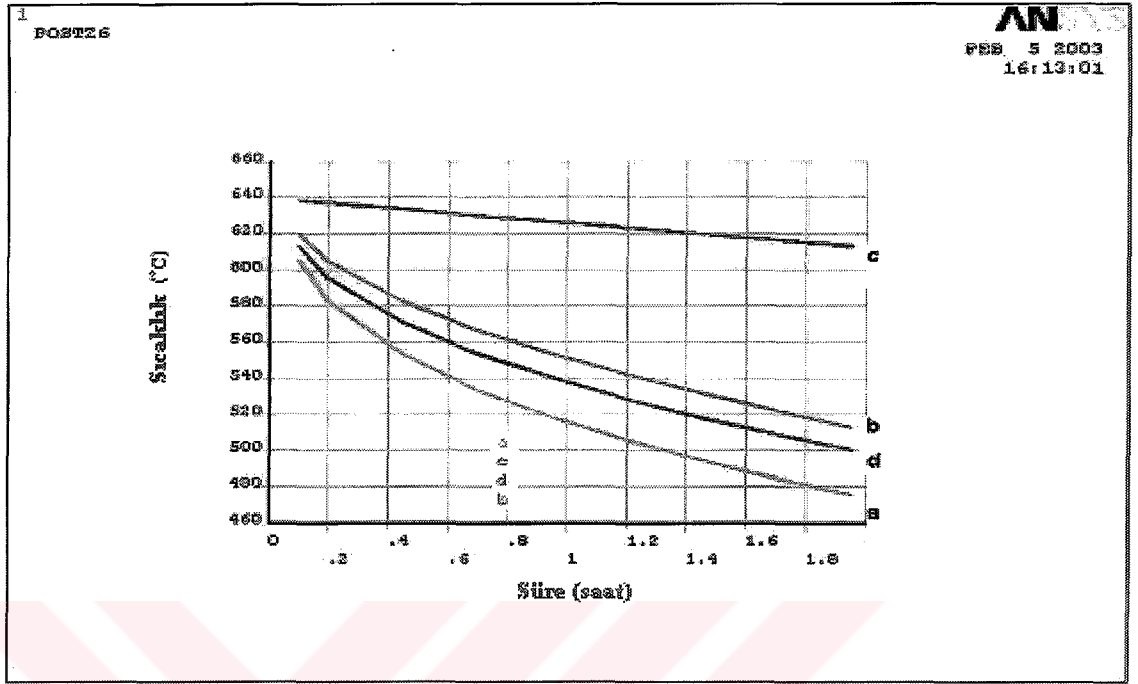
Zamana bağlı ısı transferi sonucunda Şekil 4.12-4.23 arasında görüldüğü gibi parçanın katılaşma & soğuma simülasyonları ilerleyen zaman dilimleri için gösterilmiştir. Döküm parçasının üzerinden istenilen noktaların seçilmesi ile bu noktaların soğuma süresi boyunca istenilen saatte kaç derecede olduğunun takibi mümkün olmaktadır. Şekillerden de görüldüğü gibi a, b, d noktaları c noktasından daha hızlı soğumaktadır. Bunun sebebi bu noktaların c noktasına göre daha kenar ve uç kesimde kaldıklarındandır. Döküm parçasında soğumanın en hızlı olduğu yerler parçanın kenar bölgeleridir.

Çözüme Windows 2000 platformunun kurulu olduğu Intel Pentium 4 işlemcili, 1.8 Ghz hız, 512 Mb Ram' e sahip bilgisayarın 4 saat boyunca "run" edilmesi sonucu ulaşılmıştır.

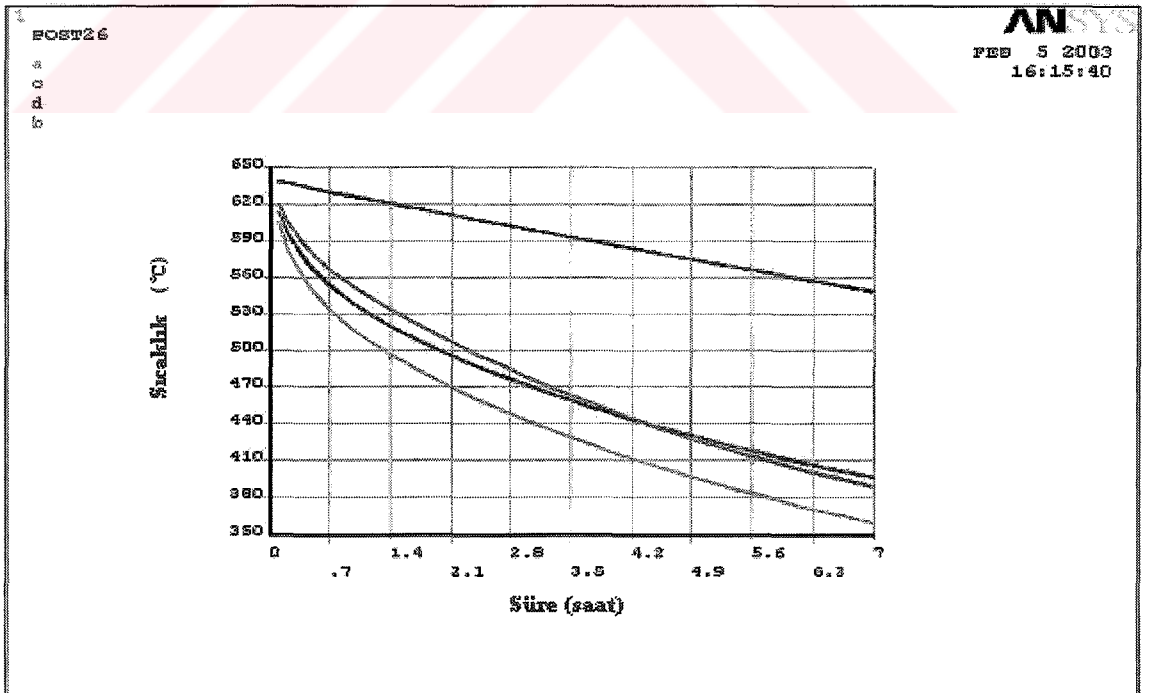
Çözümde elde edilen sonuçlar Şekil 3.2 ile 3.13 arasındaki şekillerde gösterilmiştir.



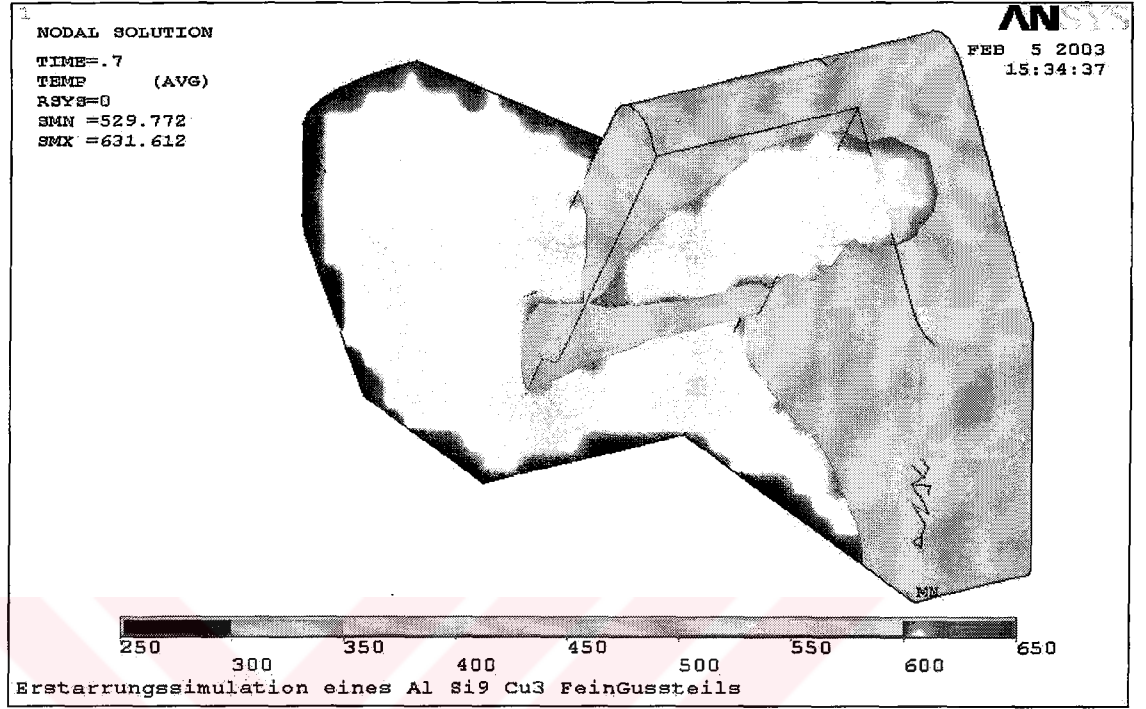
Şekil 3.2 AlSi9Cu3 Alaşım üzerinde tanımlanan noktalar.



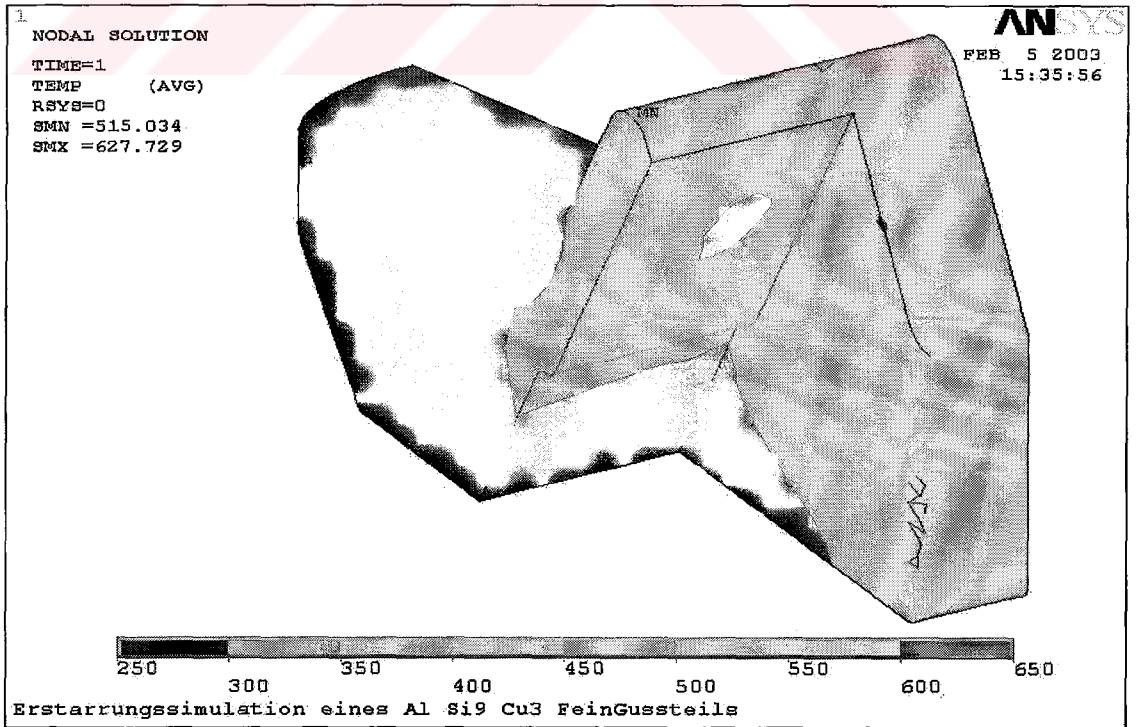
Şekil 3.3 AlSi9Cu3 Alaşımı üzerinde tanımlanan noktaların 2 saatlik sıcaklık dağılımı.



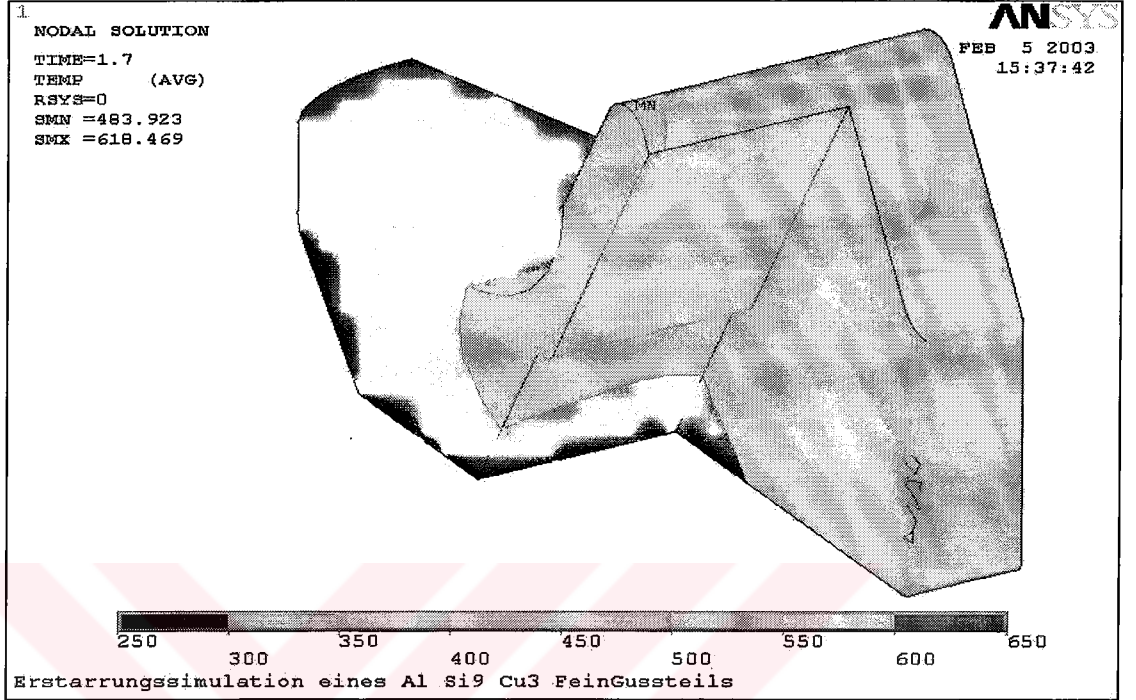
Şekil 3.4 AlSi9Cu3 Alaşımı üzerinde tanımlanan noktaların 7 saatlik sıcaklık dağılımı.



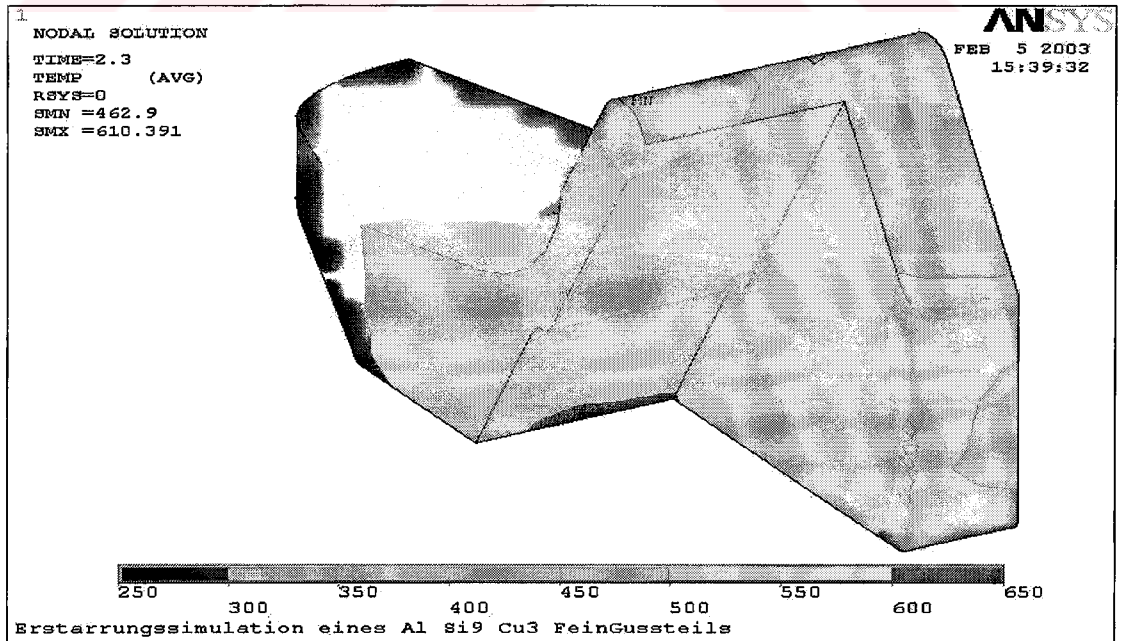
Şekil 3.5 Döküm parçasının dökümden 0,7 saat sonraki sıcaklık dağılımı (°C).



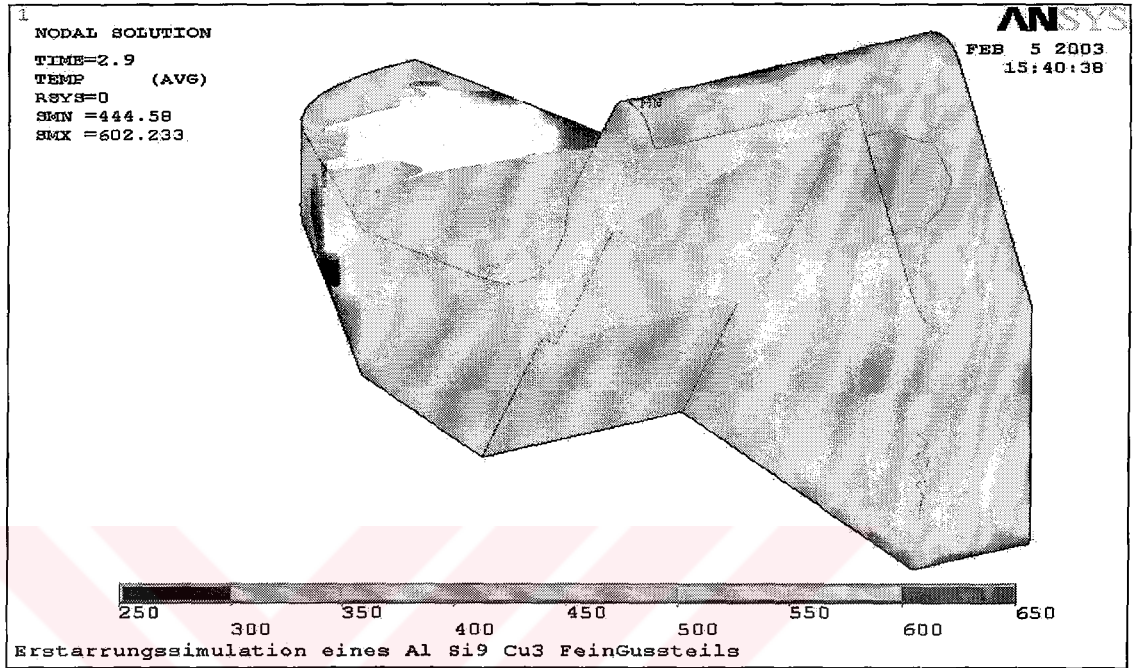
Şekil 3.6 Döküm parçasının dökümden 1 saat sonraki sıcaklık dağılımı (°C).



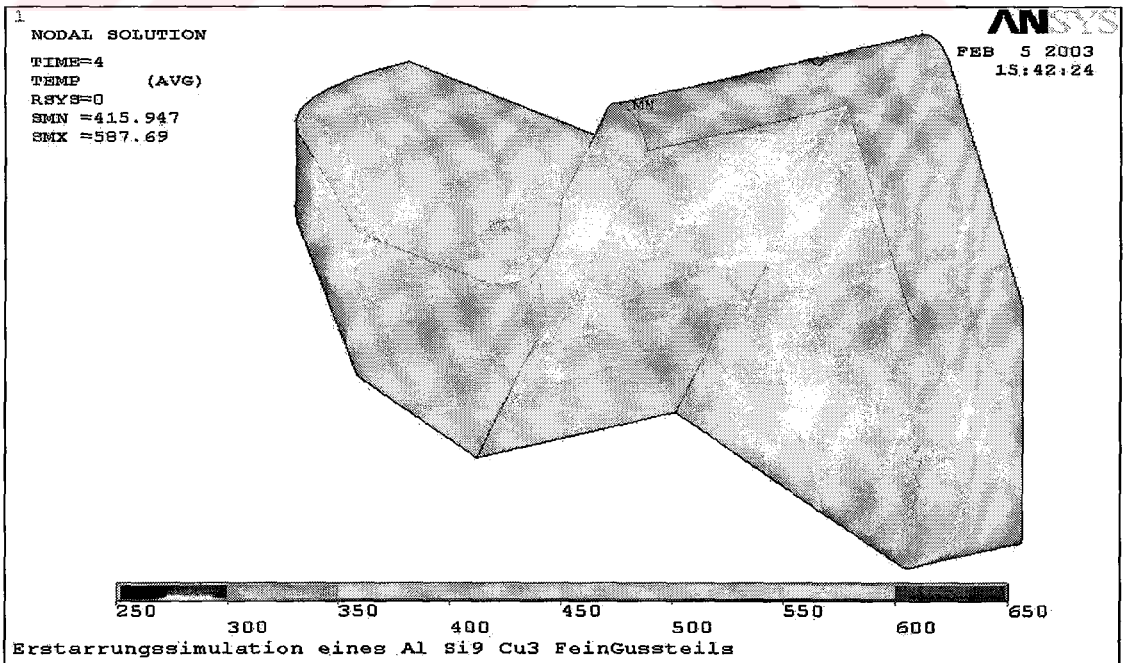
Şekil 3.7 Döküm parçasının dökümden 1,7 saat sonraki sıcaklık dağılımı (°C).



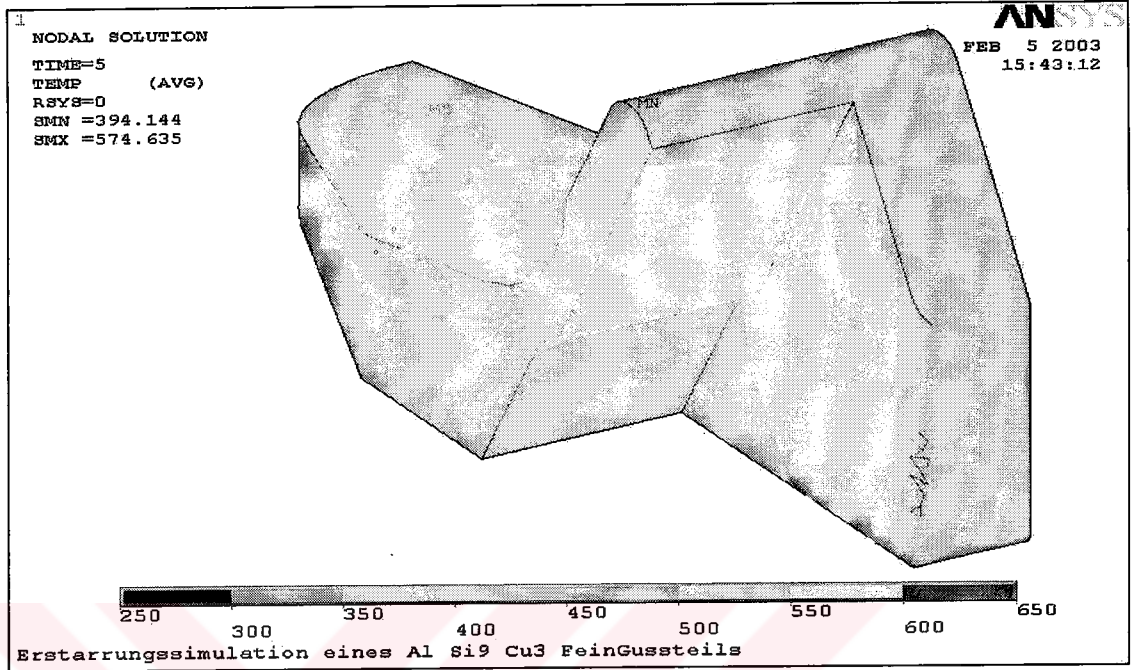
Şekil 3.8 Döküm parçasının dökümden 2,3 saat sonraki sıcaklık dağılımı (°C).



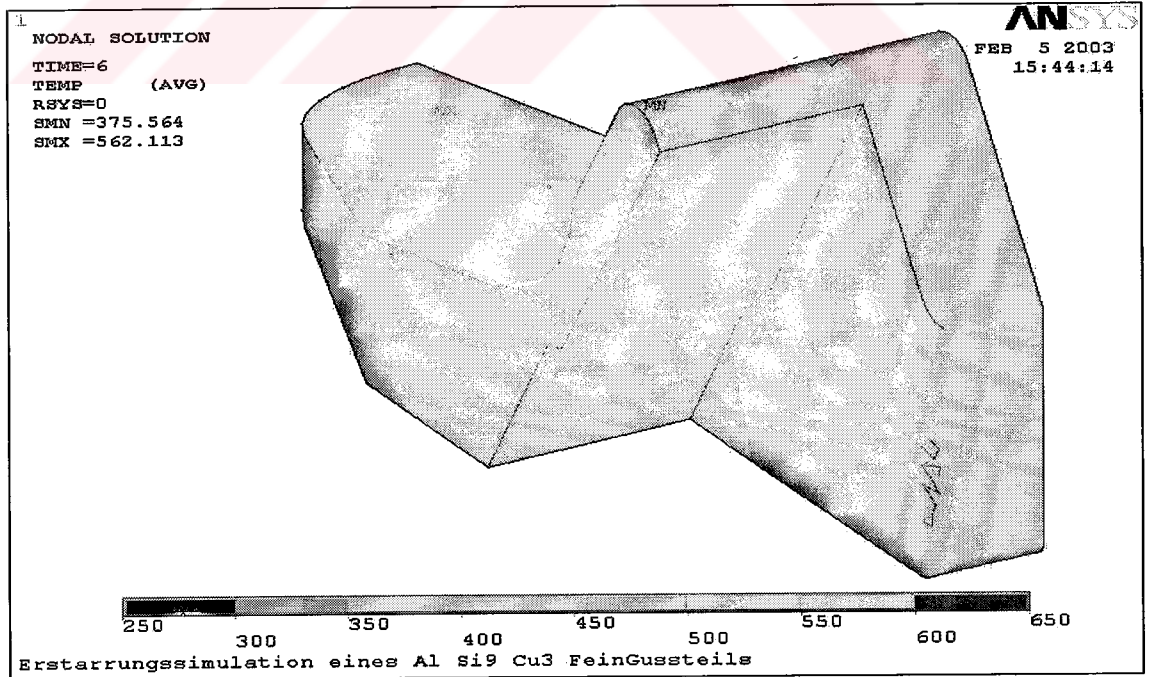
Şekil 3.9 Döküm parçasının dökümden 2,9 saat sonraki sıcaklık dağılımı (°C).



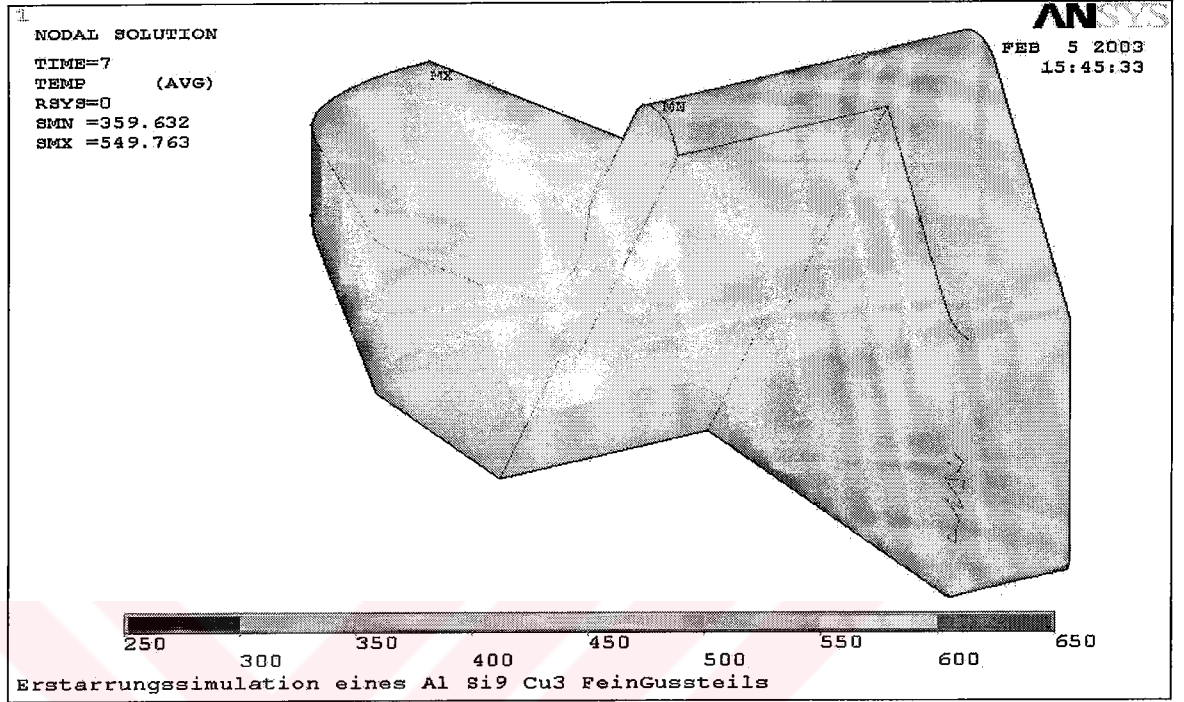
Şekil 3.10 Döküm parçasının dökümden 4 saat sonraki sıcaklık dağılımı (°C).



Şekil 3.11 Döküm parçasının dökümden 5 saat sonraki sıcaklık dağılımı ($^{\circ}\text{C}$).



Şekil 3.12 Döküm parçasının dökümden 6 saat sonraki sıcaklık dağılımı ($^{\circ}\text{C}$).

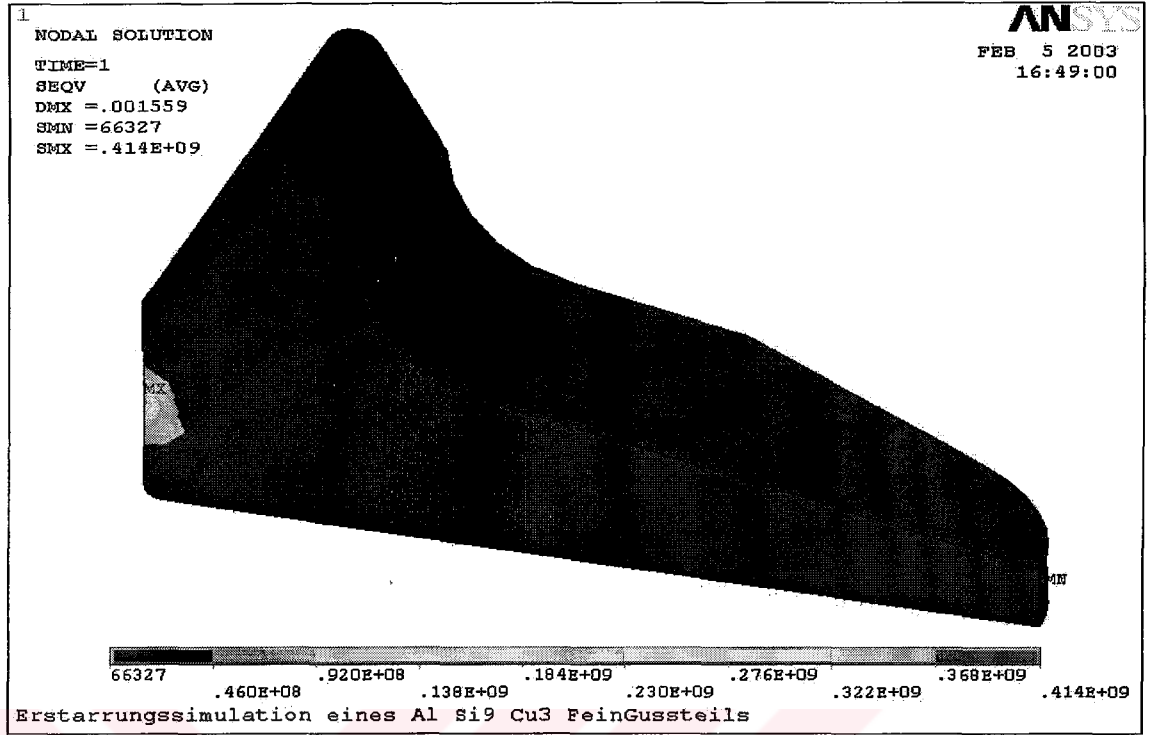


Şekil 3.13 Döküm parçasının dökümden 7 saat sonraki sıcaklık dağılımı (°C).

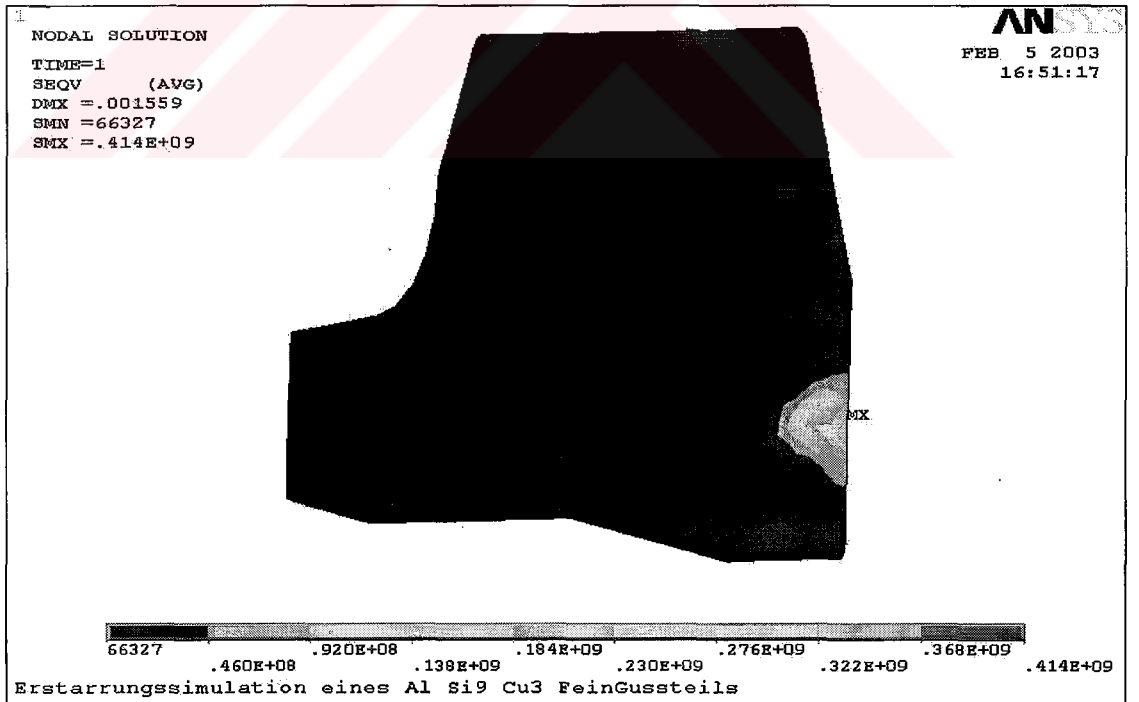
3.2 Bağlantılı Yapısal Analiz

Bağlantılı yapısal analiz ile mevcut ısı transferine bağlı ve katılaşma sonrası parçada oluşması beklenen çekinti (deformasyon) ve gerilme noktalarının tespit edilmesi amaçlanmaktadır. ANSYS programının ve Sonlu Elemanlar tekniklerinin bir avantajı olarak; bir önceki çözümden elde edilen zamana bağlı ısı transferi bilgisi aynı parçanın termo-mekanik özelliklerinin belirlendiği bağlantılı yapısal analizde sınır şartı olarak kullanılmaktadır.

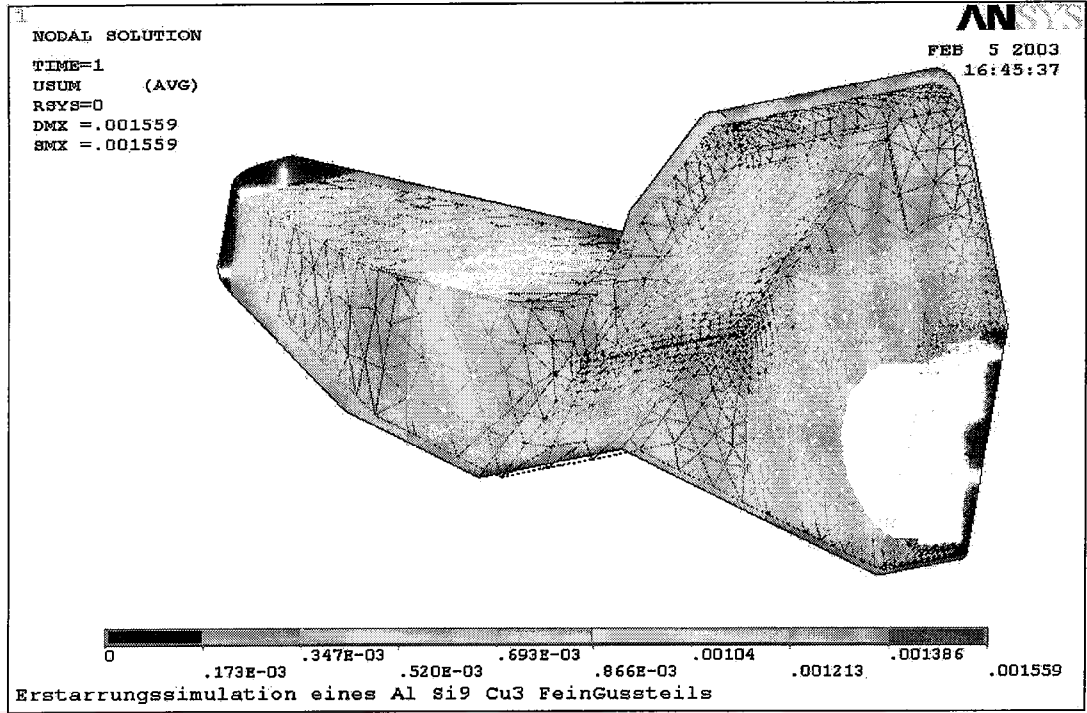
Aynı geometrik model ve Sonlu Elemanlar modelinin kullanıldığı bu ikinci aşama çözümde yegane farklılıklar şunlardır; termal eleman tipleri yapısal eleman tiplerine dönüştürülmüşlerdir. Malzeme modeli olarak malzemenin mekanik özellikleri dikkate alınmıştır. Isı transferi bilgisi şartının yanı sıra parçanın döküm yolluğuna bağlantılı olduğu kısım sabitlenerek hareket edemez ($u_x=0$, $u_y=0$, $u_z=0$) olduğu kabul edilmiştir. Yapılan Sonlu Elemanlar analizi sonucu Şekil 4.24' de ve Şekil 4.25' de gerilim dağılımı, Şekil 4.26 ve Şekil 4.27' de nodal yer değiştirme dağılımları elde edilmiştir.



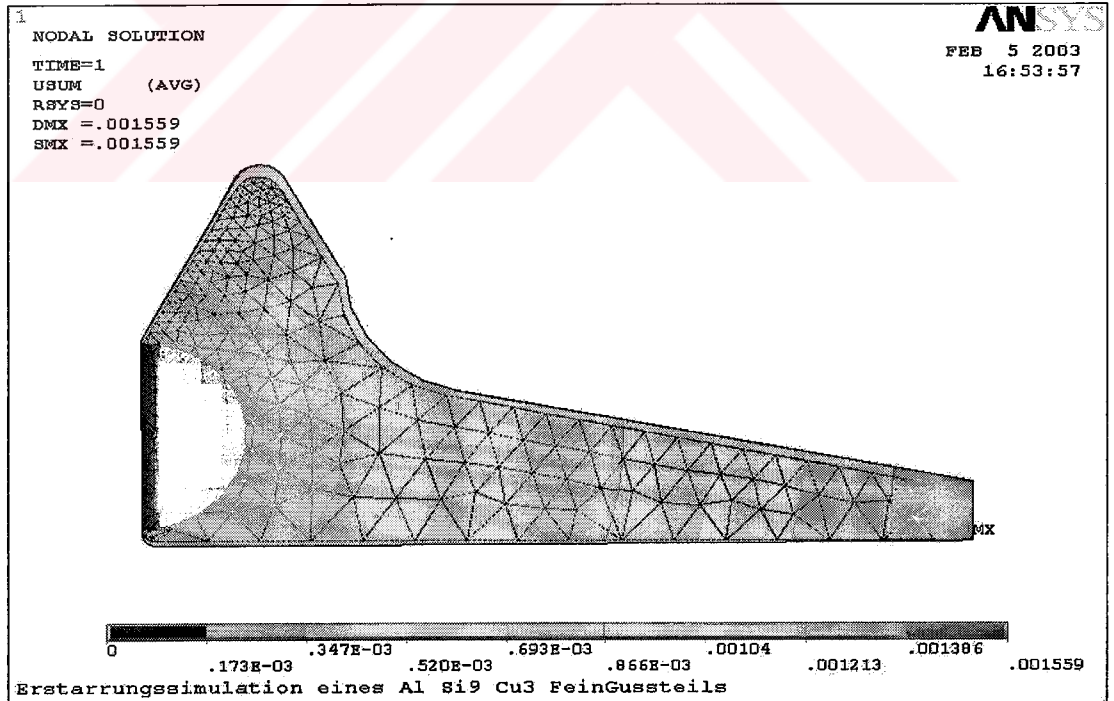
Şekil 3.14 Döküm parçasının döküm esnasında bağlantı bölgesindeki Von Mises Gerilim dağılımı (Önden görünüş) (Pa).



Şekil 3.15 Döküm parçasının döküm esnasında bağlantı bölgesindeki Von Mises Gerilim dağılımı(Arkadan görünüş) (Pa).



Şekil 3.16 Döküm parçasının sıcaklığa bağlı mekanik deformasyonu (Arkadan görünüş) (m).



Şekil 3.17 Döküm parçasının sıcaklığa bağlı mekanik deformasyonu(Önden görünüş) (m)

Şekil 4.25 ve Şekil 4.27'de görüldüğü gibi parçanın sabitlendiği bölgelerde doğal olarak en yüksek gerilim en düşük nodal yer değiştirme oluşmuştur.

4 SONUÇLAR VE İRDELEME

Zamana bağılı ısı transferi sonucunda Şekil 4.12-4.23 arasında görüldüğü gibi parçanın katılma & soğuma simülasyonları ilerleyen zaman dilimleri için gösterilmiştir. Döküm parçasının üzerinden istenilen noktaların seçilmesi ile bu noktaların soğuma süresi boyunca istenilen saatte kaç derecede olduğunun takibi mümkün olmaktadır. Şekillerden de görüldüğü gibi a, b, d noktaları c noktasından daha hızlı soğumaktadır. Bunun sebebi bu noktaların c noktasına göre daha kenar ve uç kesimde kaldıklarındandır. Döküm parçasında soğumanın en hızlı olduğu yerler parçanın kenar bölgeleridir.

Döküm katılma sırasında parçanın istenilen her bölgesinin değişik soğuma hızları bilgisi önemli olmakla birlikte deneysel olarak elde etmek neredeyse olanaksızdır. Döküm katılma simülasyonu, malzeme bilgisi, parça geometrisi ve döküm şartlarına bağlı olarak değişen soğuma hızlarının elde edilmesinde önemli yararlar sağlamaktadır. Zamana bağılı ısı transferi, sonlu elemanlar analizi kullanılarak bahsi geçen soğuma hızlarının simülasyonu gerçekleştirilebilmektedir. Tez çalışmasının örneğinde “Block ASSY” olarak adlandırılan bir AlSi9Cu3 alaşımlı bir uçak parçasının hassas döküm katılma simülasyonu ile soğuma yada katılma hızları belirlenmiş ve ilk katılma bölgelerinin yeri şiddetleri ile tahmin edilerek gerçeğe uygunluğu saptanmıştır.

Kalıp tasarımcılığı başta olmak üzere döküm katılma sonrası parçada meydana gelen veya gelebilecek çekintilerin, deformasyonların yerinin ve şiddetinin bilinmesi tasarım ve proses kontrol teknikleri açısından oldukça önemli bir konudur. Bağlantılı yapısal analizin eklenmesi ile gerçekleştirilen iki aşamalı sonlu elemanlar analizi yardımıyla parçanın her bir noktasının uğradığı deformasyonun şiddeti, yönü, miktarı kolayca tespit edilebilmektedir.

Deneysel data verilerinin kullanımı ile bilgisayar destekli yapılan bir çalışmada işçilik zaman ve enerji tasarrufu sağlanarak döküm parçasının imal kademelerinde önemli avantajlar elde edilebilmektedir.

6. KAYNAKLAR

- [1] ZIENKIEWICZ O.C.: 1975,*The Finite Element Method* (Carl Hanser Verlag, München).
- [2] BATHE K.-J.: 1986,*Finite-Elemente-Methoden*, Springer, Berlin,.
- [3] www.magma-soft.de
- [4] www.calcom.ch
- [5] ANSYS-Software Theory Manuel Book, Swanson Analysis Inc, Houston.
- [6] KAKAÇ S., YÜNCÜ H.: 1999, *Temel Isı Transferi*, Bilim Kitabevi, Ankara.
- [7] GROTH, C.; MÜLLER, G.:2000, *FEM für Praktiker-Temperaturfelder*, V:3, Expert Verlag, Renningen
- [8] WÄRMEATLAS :1991, “Berechnungblätter für den Wärmetübergang”, VDI-Verlag, Düsseldorf.
- [9] ÇENGEL A.Y.; BOLES M.A.:1989, *Thermodynamics : An Engineering Approach*, Mc Graw-Hill
- [10] YILMAZ S.: FEM, 2002, *Untersuchung des thermodynamischen und thermomechanischen Verhaltens bei der Erstarrung von einem Stahlgüßteil*, *Forschung im Ingenieurwesen* 67 (3), syf.117-122
- [11] ASM Handbook Comm.:1992, *ASM Handbook: Alloy Phase Diagrams*, V.13, ASM Int., USA.
- [12] ERDOĞAN M.: 2001, *Mühendislik Alaşımalarının Yapı ve Özellikleri (demir dışı alaşımalar)*, NobelYayın Dağıtım, Ankara.

- [13] ASM Handbook Comm.:1990, ASM Handbook : Properties and Selection : Nonferrous Alloys Special-Purpose Materials, V.2, ASM Int., USA
- [14] ASM Handbook Comm.:1992, ASM Handbook : Casting, V.15, ASM Int., USA.
- [15] YILMAZ S., ERZI E., ÖZKAN F.: 2003, ANSYS-Prozeße der Abkühlung- und gekoppelten Verformungsimulation über einen Feingusseispiel, 21th CAD-FEM Users Meeting 2003 : Int. Confr. On FEM Technonogy, 12-14 Kasım Berlin, (yayına kabul edilmiştir).
- [16] ERZI E., YILMAZ S.,: 2003, Incorporating the 2003 Fall Meeting of The Minerals & Materials Society (TMS) and The 45th Iron & Steel Society (ISS) Mechanical Working and Steel Processing Conference. 9-12 Kasım Chicago, Illinois, (yayına kabul edilmiştir).



ÖZGEÇMİŞ

1978 yılında Muğla' da doğdu. İlk ve orta öğrenimini İzmit' te tamamladıktan sonra 1997 yılında İstanbul Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Metalurji Mühendisliği Bölümüne girdi. 2001 yılında mezun oldu ve aynı yıl İstanbul Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı Malzeme Bilimi Programın' da Yüksek Lisansına başladı. Aralık 2001' de İ.Ü Mühendislik Fakültesi Metalurji ve Malzeme Bölümü Malzeme Bilimi Anabilim Dalı' na Araştırma Görevlisi olarak atanan Eray ERZİ, halen bu görevini sürdürmektedir.

