

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

SANTRİFÜJ POMPA FANLARININ DÖKÜM SİMÜLASYONU

DOKTORA TEZİ

Murat ÇOPUR

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Programı

AĞUSTOS 2014

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

SANTRİFÜJ POMPA FANLARININ DÖKÜM SİMÜLASYONU

DOKTORA TEZİ

**Murat ÇOPUR
(506862001)**

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Prof.Dr. M. Niyazi ERUSLU

AĞUSTOS 2014

İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü'nün **506862001** numaralı Doktora Öğrencisi **Murat ÇOPUR**, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “**SANTRİFÜJ POMPA FANLARININ DÖKÜM SİMÜLASYONU**” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarıyla sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Prof. Dr. M. Niyazi ERUSLU**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Prof. Dr. Gültekin GÖLLER**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Mehmet KOZ
Gelişim Üniversitesi

Prof. Dr. Cahit ENSARİ
Yalova Üniversitesi

Prof. Dr. Sebahattin GÜRMEN
İstanbul Teknik Üniversitesi

Teslim Tarihi : 17 Haziran 2014

Savunma Tarihi : 04 Ağustos 2014

ÖNSÖZ

Doktora çalışmalarımda karşılaştığım zorlukları aşmamda bana büyük destekler veren, yol gösteren değerli hocam Prof.Dr. M. Niyazi Eruslu'ya teşekkürlerimi borç bilirim.

Değerli fikirleriyle bana yol gösteren, tez izleme komitesinin değerli üyeleri Prof.Dr. Gültekin Göller ve Prof.Dr. Mehmet Koz'a teşekkürlerimi borç bilirim.

Çalışmalarım esnasında benim için değerlendirmeler yapan ve yardımlarını hiç esirgemeyen, Metalurji Yük. Müh. Ahmet Turan'a teşekkürlerimi sunarım

Model geliştirme aşamasında, bana hem teorik hem de literatür desteği veren Makine Mühendisi Dr. Yalın Kaptan'a teşekkür ederim.

Tez çalışmam boyunca, hep yanımda ve destek verici olarak bulunan Eşim Aynur ve Kızım Solmaz İdil'e, bugünlere gelmemde büyük fedakarlık ve pay sahibi olan, babama, anneme ve sevgili ağabeyime, şükran ve minnetlerimi sunarım.

Ağustos 2014

Murat ÇOPUR

Metalurji Yük. Müh.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	v
İÇİNDEKİLER	vii
KISALTMALAR	ix
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xi
ŞEKİL LİSTESİ.....	xiii
SEMBOL LİSTESİ.....	xix
ÖZET.....	xxi
SUMMARY	xxv
1. GİRİŞ	1
2. SONLU HACİMLER METODU	5
2.1 Kütleinin Korunumu – Süreklilik Denklemi	7
2.2 Değişim Hızı – Momentum ve Enerji	9
2.3 Üç Boyutta Enerji Denklemi	11
2.3.1 Yüzey kuvvetleri tarafından yapılan iş	11
2.3.2 Isı iletimi kaynaklı enerji akısı.....	13
2.3.3 Genel enerji denklemi	14
3. SONLU HACİMLER METODUNUN METALURJİK MODELLEMELERDE KULLANIMI	17
3.1 Katılma Düzeni ve Katılma Modelleriyle İlgili Literatür.....	17
3.2 Sonlu Hacimler Metodu Öncesi Modellemeler – Analitik Çözüm	20
3.3 Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) – Ansys CFX	23
3.3.1 Ön işlemci	24
3.3.2 Çözücü	25
3.3.3 Son işlemci.....	25
3.4 Ansys CFX Geçici Rejim (Transient) Modelleme	25
3.5 Değişken Yoğunluk ve Özgül Isıya Sahip Malzemelerin Modellenmesi	28
3.6 Geçici Rejim Zaman Adımı Hesabı	29
3.7 Sonuçları Açısından Ansys CFX ve Analitik Çözümün Mukayesesi	31
3.8 Isıl Özellikler.....	33
3.8.1 Entalpi	34
3.8.2 Yoğunluk.....	35
3.8.3 Isıl İletkenlik	38
3.9 Modelerde kullanılan çeliklerin ısııl özellikleri	41
3.10 Kalıp ve Maça	48
3.11 Modellemede kullanılan kalıp-maça malzemelerinin ısııl özellikleri	51
3.11.1 Yoğunluk – Sıcaklık (Yaş kum, Üretan, Kabuk).....	51
3.11.2 Özgül Isı – Sıcaklık (Yaş kum, üretan, kabuk).....	52
3.11.3 Isıl İletkenlik – Sıcaklık (Yaş kum, üretan, kabuk)	53
3.11.4 Aynı paketleme basıncında tane büyüklüğünün yoğunluğa etkisi.....	55
4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	57
4.1 Donanım ve Çözüm Karakteristikleri.....	58

4.2 Çalışma Alanları (Çözüm Bölgeleri).....	59
4.3 Ağ Yapısı (Mesh)	64
4.3.1 Fan ve besleyici.....	64
4.3.2 Soğutucu.....	66
4.3.3 Maça.....	68
4.3.4 Kalıp.....	68
4.4 Arayüzler	69
4.4.1 Fan-Maça arayüzü.....	70
4.4.2 Fan-Kalıp arayüzü.....	71
4.4.3 Kalıp-Fan-Maça-Soğutucu arayüzü	72
4.4.3.1 Soğutucu - Kalıp arayüzü	72
4.4.3.2 Maça - Kalıp arayüzü	73
4.5 Varsayımlar, Sınır Koşulları, Yakınsama ve Modeller	74
4.5.1 Varsayımlar ve Sınır Koşulları.....	74
4.5.2 Yakınsama Koşulu	75
4.5.3 Modeller	77
5. SONUÇLAR VE İRDELEMELER.....	79
5.1 Döküm sıcaklığının katılaşma süresine etkisi	79
5.1.1 Model 1. $T_{\text{döküm}} = 1973 \text{ K}$	80
5.1.2 Model 2. $T_{\text{döküm}} = 1923 \text{ K}$	92
5.1.3 Model 3. $T_{\text{döküm}} = 2023 \text{ K}$	97
5.2 Soğutucunun katılaşma süresine etkisi.....	109
5.2.1 Model 4. Küçük hacimli soğutucu	109
5.2.2 Model 5. Büyük hacimli soğutucu	115
5.3 Kalıp yoğunluğunu katılaşma süresine etkisi	123
5.3.1 Model 6. Kalıp: 20 AFS yaş kum.....	124
5.3.2 Model 7. Kalıp: 140 AFS yaş kum.....	126
5.4 Kalıp ve maça malzemesinin katılaşma süresine etkisi.....	129
5.4.1 Model 8. Kalıp ve maça : Kabuk	130
5.4.2 Model 9. Kalıp ve maça : Üretan (üretan reçine bağlı kum).....	132
5.5 Döküm alaşımının katılaşma süresine etkisi	136
5.5.1 Model 10, Fan alaşımı : AISI 304.....	136
5.5.2 Model 11, Fan alaşımı : AISI 316.....	138
6. GENEL SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRMELER	143
7. ÖNERİLER.....	147
KAYNAKLAR.....	149
EKLER.....	155

KISALTMALAR

AFS	: Amerikan Dökümcüler Derneği (American Foundrymen's Society)
AISI	: Amerikan Demir ve Çelik Enstitüsü (American Iron and Steel Institute)
BEM	: Sınır Elemanlar Metodu
BOKD	: Bakiye Ortalama Karekök Değeri (Residual-Root-Mean-Square)
DDR	: 2 kat hızlı ana bellek (Double Data Rate dynamic random access memory)
Div	: Diverjans
Gb	: Gigabit
Ghz	: Gigahertz
Grad	: Gradyan
HAD	: Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği
Hdd	: Sabit Disk (Hard Disc Drive)
Mb	: Megabit
Rpm	: Dosya formatı
SEM	: Sonlu Elemanlar Metodu
SHM	: Sonlu Hacimler Metodu
SFM	: Sonlu Farklar Metodu
SSD	: Katı hal sürücüsü (Solid State Drive)

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 3.1 : Modellemede kullanılan çeliklerin nominal kimyasal kompozisyonları.....	41
Çizelge 3.2 : AISI 1016 çeliğin hesaplanan ısı özellikleri	43
Çizelge 3.3 : AISI 304 çeliğin hesaplanan ısı özellikleri	45
Çizelge 3.4 : AISI 316 çeliğin hesaplanan ısı özellikleri	47
Çizelge 3.5 : Kalıp-maça malzemelerinin sıcaklığa bağlı yoğunluk değişim	52
Çizelge 3.6 : Kalıp-maça malzemelerinin sıcaklığa bağlı Özgül Isı değişimi.....	53
Çizelge 3.7 : Kalıp-maça malzemelerinin sıcaklığa bağlı ısı iletkenliğinin değişimi.....	54
Çizelge 4.1 : Çalışmada kullanılan donanımın özellikleri	59
Çizelge 4.2 : Çalışmada kullanılan çözüm karakteristikleri	59
Çizelge 4.3 : Model çalışma alanlarındaki düğüm ve hücre sayısı.....	69
Çizelge 4.4 : Modeller ve modellerdeki değişkenler	78
Çizelge 5.1 : Değişken döküm sıcaklığı.	79
Çizelge 5.2 : Değişken soğutucu hacmi (Diğer parametreler Model 1 ile aynıdır).....	109
Çizelge 5.3 : Değişken kalıp yoğunluğu (Diğer parametreler Model 1 ile aynıdır).....	124
Çizelge 5.4 : Değişken kalıp-maça malzemesi (Diğer parametreler Model 1 ile aynıdır).....	129
Çizelge 5.5 : Değişken döküm alaşımı. (Diğer parametreler Model 1 ile aynıdır).....	136

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1 :	Birim elemanın içine ve dışına doğru kütle transferi.....	8
Şekil 2.2 :	Birim elemanda x-yönündeki gerilme bileşenleri.....	11
Şekil 2.3 :	Isı akısının vektörel bileşenleri.....	13
Şekil 3.1 :	Uzun zaman adımlı modelleme grafiği [66].....	29
Şekil 3.2 :	Kısa (uygun) zaman adımlı modelleme grafiği [66].....	30
Şekil 3.3 :	AISI 1016 çelikteki sıcaklığa bağlı faz oranları.....	42
Şekil 3.4 :	AISI 304 çelikteki sıcaklığa bağlı faz oranları.....	42
Şekil 3.5 :	AISI 316 çelikteki sıcaklığa bağlı faz oranları.....	42
Şekil 3.6 :	AISI 1016 Çeliğin Entalpi ve Özgül Isı Grafiği.....	44
Şekil 3.7 :	AISI 1016 çeliğin yoğunluk grafiği.....	44
Şekil 3.8 :	AISI 1016 çeliğin ısı iletkenlik grafiği.....	44
Şekil 3.9 :	AISI 304 çeliğin entalpi ve özgül ısı grafiği.....	45
Şekil 3.10 :	AISI 304 çeliğin yoğunluk grafiği.....	46
Şekil 3.11 :	AISI 304 çeliğin ısı iletkenlik grafiği.....	46
Şekil 3.12 :	AISI 316 çeliğin entalpi ve özgül ısı grafiği.....	47
Şekil 3.13 :	AISI 316 çeliğin yoğunluk grafiği.....	48
Şekil 3.14 :	AISI 316 çeliğin ısı iletkenlik grafiği.....	48
Şekil 3.15 :	Aynı presleme basıncında kalıp-maça tane büyüklüğünün ve dağılımının kalıp-maça yoğunluğuna etkisi.....	50
Şekil 3.16 :	Yaş kum, ürethan ve Kabuk kalıp malzemelerinin sıcaklığa bağlı yoğunluk değişimi.....	52
Şekil 3.17 :	Yaş kum, ürethan ve Kabuk malzemelerinin sıcaklığa bağlı özgül ısı değişimi.....	53
Şekil 3.18 :	Yaş kum, ürethan ve kabuk malzemelerinin sıcaklığa bağlı ısı iletkenlik değişimi.....	54
Şekil 3.19 :	Kalıp-maça malzemelerinde tane büyüklüğünün yaş kum karışımları için yoğunluk düzeltme çarpanı.....	55
Şekil 3.20 :	20 AFS, 40 AFS ve 140 AFS tane boyutundaki kum için yoğunluğun sıcaklığa göre değişimi.....	56
Şekil 4.1 :	Ansys CFX modelleme akış şeması.....	58
Şekil 4.2 :	Model fan-kalıp-maça-büyük soğutucunun 2 boyutlu çizimi (mm).....	60
Şekil 4.3 :	Modelin 60 ⁰ 'lik segmentinin 3 boyutlu çizimi.....	61
Şekil 4.4 :	Fan çalışma alanının 360° geometrik çizimi.....	61
Şekil 4.5 :	Fan çalışma alanının 60 ⁰ geometrik çizimi.....	62
Şekil 4.6 :	Maça ve soğutucu çalışma alanlarının 60 ⁰ geometrik çizimi.....	62
Şekil 4.7 :	Fan, maça ve soğutucu çalışma alanlarının 60 ⁰ geometrik çizimi.....	63
Şekil 4.8 :	Kalıp, maça ve soğutucu çalışma alanlarının 60 ⁰ geometrik çizimi.....	63

Şekil 4.9 :	Fan ve besleyicinin ağ yapısı görünüşü.	64
Şekil 4.10 :	“Proximity” seçeneğiyle dar kanat kesitindeki en az üç hücreli ağ yapısı.	65
Şekil 4.11 :	“Inflation” seçeneğiyle fan çalışma alanı etrafında yaratılan 0,4 mm kesitli ince hücre katmanı.	66
Şekil 4.12 :	Küçük soğutucunun ağ yapısı görünüşü.	67
Şekil 4.13 :	Büyük soğutucunun ağ yapısı görünüşü.	67
Şekil 4.14 :	Maçanın ağ yapısı görünüşü.	68
Şekil 4.15 :	Kalıbın ağ yapısı görünüşü.	69
Şekil 4.16 :	Fan-maça arayüzü.	70
Şekil 4.17 :	Maça-fan arayüzü.	71
Şekil 4.18 :	Fan-kalıp arayüzü.	71
Şekil 4.19 :	Kalıp-fan-maça-soğutucu arayüzü.	72
Şekil 4.20 :	Soğutucu-kalıp arayüzü.	73
Şekil 4.21 :	Maça-kalıp arayüzü.	73
Şekil 4.22 :	0-100 saniye (0-200 adım) BOKD grafiği.	76
Şekil 4.23 :	0-7.200 saniye (0-14.400 adım) BOKD grafiği.	76
Şekil 5.1 :	t=0 sn. Fan-maça çalışma alanlarındaki sıcaklık dağılımı (Model 1).	80
Şekil 5.2 :	t=0 sn. Fan-maça-kalıp çalışma alanlarındaki sıcaklık dağılımı (Model 1).	81
Şekil 5.3 :	t=20 sn. Fan-maça çalışma alanlarındaki sıcaklık dağılımı (Model 1).	81
Şekil 5.4 :	t=45 sn. Fan-maça çalışma alanlarındaki sıcaklık dağılımı (Model 1).	82
Şekil 5.5 :	t=45 sn. Fan-maça-kalıp çalışma alanlarındaki sıcaklık dağılımı (Model 1).	82
Şekil 5.6 :	t=75 sn. Fan-maça çalışma alanlarındaki sıcaklık dağılımı (Model 1).	83
Şekil 5.7 :	t=75 sn. Fan-maça-kalıp çalışma alanlarındaki sıcaklık dağılımı (Model 1).	83
Şekil 5.8 :	t=120 sn. Fan-maça çalışma alanlarındaki sıcaklık dağılımı (Model 1).	84
Şekil 5.9 :	t=240 sn. Fan-maça çalışma alanlarındaki sıcaklık dağılımı (Model 1).	84
Şekil 5.10 :	t=360 sn. Fan-maça çalışma alanlarındaki sıcaklık dağılımı (Model 1).	85
Şekil 5.11 :	t=480 sn. Fan-maça çalışma alanlarındaki sıcaklık dağılımı (Model 1).	86
Şekil 5.12 :	t=480 sn. Fan-maça-kalıp çalışma alanlarındaki sıcaklık dağılımı (Model 1).	86
Şekil 5.13 :	t=515 sn. Fan-maça çalışma alanlarındaki sıcaklık dağılımı (Model 1).	87
Şekil 5.14 :	t=515 sn. Fan-maça-kalıp çalışma alanlarındaki sıcaklık dağılımı (Model 1).	87
Şekil 5.15 :	t=540 sn. Fan-maça çalışma alanlarındaki sıcaklık dağılımı (Model 1).	88
Şekil 5.16 :	t=540 sn. Fan-maça-kalıp çalışma alanlarındaki sıcaklık dağılımı (Model 1).	88

Şekil 5.17 :	t=565 sn. Fan-maça çalışma alanlarındaki sıcaklık dağılımı (Model 1).	89
Şekil 5.18 :	t=565 sn. Fan-maça-kalıp çalışma alanlarındaki sıcaklık dağılımı (Model 1).	89
Şekil 5.19 :	t=2400 sn. Fan-maça çalışma alanlarındaki sıcaklık dağılımı (Model 1).	90
Şekil 5.20 :	t=2400 sn. Fan-maça-kalıp çalışma alanlarındaki sıcaklık dağılımı (Model 1).	90
Şekil 5.21 :	t=7200 sn. Fan-maça çalışma alanlarındaki sıcaklık dağılımı (Model 1).	91
Şekil 5.22 :	t=7200 sn. Fan-maça-kalıp çalışma alanlarındaki sıcaklık dağılımı (Model 1).	91
Şekil 5.23 :	t=50 sn. Fan-maça çalışma alanlarındaki sıcaklık dağılımı (Model 2).	92
Şekil 5.24 :	t=50 sn. Fan-maça-kalıp çalışma alanlarındaki sıcaklık dağılımı (Model 2).	93
Şekil 5.25 :	t=352,5 sn. Fan-maça çalışma alanlarındaki sıcaklık dağılımı (Model 2).	93
Şekil 5.26 :	t=352,5 sn. Fan-maça-kalıp çalışma alanlarındaki sıcaklık dağılımı (Model 2).	94
Şekil 5.27 :	t=395 sn. Fan-maça çalışma alanlarındaki sıcaklık dağılımı (Model 2).	94
Şekil 5.28 :	t=395 sn. Fan-maça-kalıp çalışma alanlarındaki sıcaklık dağılımı (Model 2).	95
Şekil 5.29 :	t=2400 sn. Fan-maça çalışma alanlarındaki sıcaklık dağılımı (Model 2).	95
Şekil 5.30 :	t=2400 sn. Fan-maça-kalıp çalışma alanlarındaki sıcaklık dağılımı (Model 2).	96
Şekil 5.31 :	t=7200 sn. Fan-maça çalışma alanlarındaki sıcaklık dağılımı (Model 2).	96
Şekil 5.32 :	t=7200 sn. Fan-maça-kalıp çalışma alanlarındaki sıcaklık dağılımı (Model 2).	97
Şekil 5.33 :	t=102,5 sn. Fan-maça çalışma alanlarındaki sıcaklık dağılımı (Model 3).	98
Şekil 5.34 :	t=102,5 sn. Fan-maça-kalıp çalışma alanlarındaki sıcaklık dağılımı (Model 3).	98
Şekil 5.35 :	t=695 sn. Fan-maça çalışma alanlarındaki sıcaklık dağılımı (Model 3).	99
Şekil 5.36 :	t=695 sn. Fan-maça-kalıp çalışma alanlarındaki sıcaklık dağılımı (Model 3).	99
Şekil 5.37 :	t=745 sn. Fan-maça çalışma alanlarındaki sıcaklık dağılımı (Model 3).	100
Şekil 5.38 :	t=745 sn. Fan-maça-kalıp çalışma alanlarındaki sıcaklık dağılımı (Model 3).	100
Şekil 5.39 :	t=2400 sn. Fan-maça çalışma alanlarındaki sıcaklık dağılımı (Model 3).	101
Şekil 5.40 :	t=2400 sn. Fan-maça-kalıp çalışma alanlarındaki sıcaklık dağılımı (Model 3).	101
Şekil 5.41 :	t=7200 sn. Fan-maça çalışma alanlarındaki sıcaklık dağılımı (Model 3).	102

Şekil 5.42 :	$t=7200$ sn. Fan-maça-kalıp çalışma alanlarındaki sıcaklık dağılımı (Model 3).	102
Şekil 5.43 :	Fan kanat ve göbeğinin değişik döküm sıcaklıklarındaki katılma süreleri.	103
Şekil 5.44 :	Besleyici bölgesinde %100 sıvı ve sıvı+katı fazların katılma süreleri.	104
Şekil 5.45 :	$t= 30$ sn. ve 40 sn. Maça-fan çalışma alanları sıcaklık dağılımı ($T_{Döküm}= 1973$ K).	105
Şekil 5.46 :	$t= 50$ sn. ve 60 sn Maça-fan çalışma alanları sıcaklık dağılımı ($T_{Döküm}= 1973$ K).	106
Şekil 5.47 :	$t= 70$ sn. ve 75 sn. Maça-fan çalışma alanları sıcaklık dağılımı ($T_{Döküm}= 1973$ K).	106
Şekil 5.48 :	$t= 75$ sn. Fan çalışma alanı sıcaklık dağılımı ($T_{Döküm}= 1973$ K).	107
Şekil 5.49 :	$t= 75$ sn. Fan çalışma alanı sıcaklık dağılımı ($T_{Döküm}= 1973$ K).	107
Şekil 5.50 :	$t= 50$ sn. ve 55 sn. Fan çalışma alanı sıcaklık dağılımı ($T_{Döküm}= 1973$ K).	107
Şekil 5.51 :	$t= 60$ sn. ve 65 sn. Fan çalışma alanı sıcaklık dağılımı ($T_{Döküm}= 1973$ K).	108
Şekil 5.52 :	$t= 70$ sn. ve 75 sn. Fan çalışma alanı sıcaklık dağılımı ($T_{Döküm}= 1973$ K).	108
Şekil 5.53 :	$t=0$ sn. Fan-maça-küçük soğutucu çalışma alanlarındaki sıcaklık dağılımı.	110
Şekil 5.54 :	$t=35$ sn. Fan-maça-küçük soğutucu çalışma alanlarındaki sıcaklık dağılımı.	111
Şekil 5.55 :	$t=37,5$ sn. Fan-maça-küçük soğutucu çalışma alanlarındaki sıcaklık dağılımı.	111
Şekil 5.56 :	$t=60$ sn. Fan-maça-küçük soğutucu çalışma alanlarındaki sıcaklık dağılımı.	112
Şekil 5.57 :	$t= 25$ sn. ve 35 sn. Fan-küçük soğutucu çalışma alanları sıcaklık dağılımı ($T_{Döküm}= 1973$ K).	113
Şekil 5.58 :	$t= 40$ sn. ve $42,5$ sn. Fan-küçük soğutucu çalışma alanları sıcaklık dağılımı ($T_{Döküm}= 1973$ K).	113
Şekil 5.59 :	$t= 45$ sn. ve 50 sn. Fan-küçük soğutucu çalışma alanları sıcaklık dağılımı ($T_{Döküm}= 1973$ K).	114
Şekil 5.60 :	$t= 60$ sn. ve 70 sn. Fan-küçük soğutucu çalışma alanları sıcaklık dağılımı ($T_{Döküm}= 1973$ K).	114
Şekil 5.61 :	$t=40$ sn. ve $42,5$ sn. Fan-küçük soğutucu çalışma alanları sıcaklık dağılımı ($T_{Döküm}= 1973$ K).	115
Şekil 5.62 :	$t=0$ sn. Fan-maça-büyük soğutucu çalışma alanlarındaki sıcaklık dağılımı.	116
Şekil 5.63 :	$t=15$ sn. Fan-maça-büyük soğutucu çalışma alanlarındaki sıcaklık dağılımı.	116
Şekil 5.64 :	$t=25$ sn. Fan-maça-büyük soğutucu çalışma alanlarındaki sıcaklık dağılımı.	117
Şekil 5.65 :	$t=35$ sn. Fan-maça-büyük soğutucu çalışma alanlarındaki sıcaklık dağılımı.	117
Şekil 5.66 :	$t=515$ sn. Fan-maça-büyük soğutucu çalışma alanlarındaki sıcaklık dağılımı.	118
Şekil 5.67 :	$t=557,5$ sn. Fan-maça-büyük soğutucu çalışma alanlarındaki sıcaklık dağılımı.	119

Şekil 5.68 :	t=2400 sn. Fan-maça-büyük soğutucu çalışma alanlarındaki sıcaklık dağılımı.....	119
Şekil 5.69 :	t=7200 sn. Fan-maça-büyük soğutucu çalışma alanlarındaki sıcaklık dağılımı.....	120
Şekil 5.70 :	t=30 sn. Fan-büyük soğutucu çalışma alanları sıcaklık dağılımları ($T_{Döküm} = 1973$ K).....	120
Şekil 5.71 :	t=40 sn. Fan çalışma alanı sıcaklık dağılımları ($T_{Döküm} = 1973$ K).	121
Şekil 5.72 :	t=42,5 sn. Fan çalışma alanı sıcaklık dağılımları ($T_{Döküm} = 1973$ K).	121
Şekil 5.73 :	t=45 sn. Fan çalışma alanı sıcaklık dağılımları ($T_{Döküm} = 1973$ K).	121
Şekil 5.74 :	t=50 sn. Fan çalışma alanı sıcaklık dağılımları ($T_{Döküm} = 1973$ K).	122
Şekil 5.75 :	t=55 sn. Fan çalışma alanı sıcaklık dağılımları ($T_{Döküm} = 1973$ K).	122
Şekil 5.76 :	t=60 sn. Fan çalışma alanı sıcaklık dağılımları ($T_{Döküm} = 1973$ K).	122
Şekil 5.77 :	t=65 sn. Fan çalışma alanı sıcaklık dağılımları ($T_{Döküm} = 1973$ K).	123
Şekil 5.78 :	t=75 sn. Fan-maça çalışma alanlarındaki sıcaklık dağılımı (Kalıp 20 AFS yaş kum).	124
Şekil 5.79 :	t=515 sn. Fan-maça çalışma alanlarındaki sıcaklık dağılımı (Kalıp 20 AFS yaş kum).	125
Şekil 5.80 :	t=560 sn. Fan-maça çalışma alanlarındaki sıcaklık dağılımı (Kalıp 20 AFS yaş kum).	125
Şekil 5.81 :	t=75 sn. Fan-maça çalışma alanlarındaki sıcaklık dağılımı (Kalıp 140 AFS yaş kum).	126
Şekil 5.82 :	t=515 sn. Fan-maça çalışma alanlarındaki sıcaklık dağılımı (Kalıp 140 AFS yaş kum).	127
Şekil 5.83 :	t=560 sn. Fan-maça çalışma alanlarındaki sıcaklık dağılımı (Kalıp 140 AFS0 yaş kum).	127
Şekil 5.84 :	t=75 s. Fan-maça çalışma alanlarındaki sıcaklık dağılımı.	128
Şekil 5.85 :	t=560 s. Fan-maça çalışma alanlarındaki sıcaklık dağılımı.	128
Şekil 5.86 :	t=47,5 sn. Fan-maça çalışma alanlarındaki sıcaklık dağılımı (Kabuk kalıp ve maça).	130
Şekil 5.87 :	t=300 sn. Fan-maça çalışma alanlarındaki sıcaklık dağılımı (Kabuk kalıp ve maça).	130
Şekil 5.88 :	t=350 sn. Fan-maça çalışma alanlarındaki sıcaklık dağılımı (Kabuk kalıp ve maça).	131
Şekil 5.89 :	t=372,5 sn. Fan-maça çalışma alanlarındaki sıcaklık dağılımı (Kabuk kalıp ve maça).	132
Şekil 5.90 :	t=45 sn. Fan-maça çalışma alanlarındaki sıcaklık dağılımı (Üretan kalıp ve maça).	132
Şekil 5.91 :	t=300 sn. Fan-maça çalışma alanlarındaki sıcaklık dağılımı (Üretan kalıp ve maça).	133
Şekil 5.92 :	t=317,5 sn. Fan-maça çalışma alanlarındaki sıcaklık dağılımı (Üretan kalıp ve maça).	133
Şekil 5.93 :	t=345 sn. Fan-maça çalışma alanlarındaki sıcaklık dağılımı (Üretan kalıp ve maça).	134

Şekil 5.94 :	Kabuk ve ürethan kalıp-maça malzemelerinde son %100 sıvı fazın→ sıvı+katı faza dönüşme anındaki sıcaklık dağılımı.	135
Şekil 5.95 :	t=317,5 sn. 120 ⁰ fan-maça çalışma alanlarındaki sıcaklık dağılımı (Ürethan kalıp ve maça).	135
Şekil 5.96 :	t=102,5 sn. Fan-maça çalışma alanlarındaki sıcaklık dağılımı (Fan AISI 304).	136
Şekil 5.97 :	t=710 sn. Fan-maça çalışma alanlarındaki sıcaklık dağılımı (Fan AISI 304).	137
Şekil 5.98 :	t=840 sn. Fan-maça çalışma alanlarındaki sıcaklık dağılımı (Fan AISI 304).	138
Şekil 5.99 :	t=117,5 sn. Fan-maça çalışma alanlarındaki sıcaklık dağılımı (Fan AISI 316).	138
Şekil 5.100 :	t=785 sn. Fan-maça çalışma alanlarındaki sıcaklık dağılımı (Fan AISI 316).	139
Şekil 5.101 :	t=1020 sn. Fan-maça çalışma alanlarındaki sıcaklık dağılımı (Fan AISI 316).	140
Şekil 5.102 :	Fan-maça çalışma alanları dış kanatta %100 sıvı fazın→ sıvı+katı faza dönüşme anındaki sıcaklık dağılımı (AISI 304 ve 316).	140
Şekil 5.103 :	Fan-maça çalışma alanları dış kanatta sıvı+katı fazın→%100 katı faza dönüşme anındaki sıcaklık dağılımı (AISI 304 ve 316).	141
Şekil 5.104 :	Fan-maça çalışma alanları besleyici bölgesinde %100 sıvı fazın→sıvı+ katı faza dönüşme anındaki sıcaklık dağılımı (AISI 304 ve 316).	141
Şekil 5.105 :	Fan-maça çalışma alanları besleyici bölgesinde sıvı+katı fazın→%100 katı faza dönüşme anındaki sıcaklık dağılımı (AISI 304 ve 316).	141
Şekil 5.106 :	AISI 1016, AISI 304 ve AISI 316 fan-maça çalışma alanları dış kanat ve göbek/besleyici bölgelerinde katılma süreleri.	142

SEMBOL LİSTESİ

A	: Kalıp-Metal arayüzü
°C	: Santigrat derece
cal	: Kalori
cm	: Santimetre
C_i^φ	: i alaşım elemanının φ fazının içindeki kompozisyonu
$C_{p,k}$	: kalıp özgül ısısı
$C_{p,l}$	: Sıvı metalin özgül ısısı
$C_{p,ort}$	: Ortalama özgül ısı
f^φ	: φ fazının faz oranı
g	: Gram
G	: Gibbs Enerjisi
G^c	: Sementit fazın Gibbs Enerjisi
G^L	: Sıvı demirin Gibbs Enerjisi
G^α	: Ferrit fazın Gibbs Enerjisi
G^γ	: Östenit fazın Gibbs Enerjisi
h	: Özgül entalpi
h_0	: Toplam entalpi
h_f	: Katılaşma ısısı
h'_f	: Aşırı ısıtılmış metalin entalpisi
J	: Joule
k	: Isıl iletkenlik
K	: Kelvin
kg	: Kilogram
k_k	: Kalıp ısı iletkenliği
k_{ort}	: Ortalama ısı iletkenlik
k^φ	: φ fazının ısı iletkenliği
k_{Fe}^θ	: Saf demirin ısı iletkenliği
m	: Metre
P	: Basınç
q_i	: i yönündeki ısı akısı
S	: Katılaşan metalin kalınlığı
sn	: Saniye
S_E	: Enerji kaynağı
S_h	: Dış enerji kaynağı
t	: Zaman
T	: Sıcaklık
T_0	: Ortam sıcaklığı
T_m	: Metalin erime sıcaklığı
u	: Akışkanın x eksen yönündeki vektörel hızı
v	: Akışkanın y eksen yönündeki vektörel hızı
V	: Katılaşan metalin hacmi

w : Akışkanın z eksenî yönündeki vektörel hızı
 W : Watt
 $W_{sf,x}$: x-yönünde yüzey kuvvetleri tarafından yapılan iş
 $W_{sf,y}$: y-yönünde yüzey kuvvetleri tarafından yapılan iş
 $W_{sf,z}$: z-yönünde yüzey kuvvetleri tarafından yapılan iş
 ΣW_{sf} : Yüzey kuvvetleri tarafından yapılan toplam iş
 x_{ort} : Ortalama hücre boyutu
 α : Isıl yayınlılık
 δ_i : i yönünde birim eleman boyutu
 θ_i^φ : i alaşım elemanının φ fazının ısıl iletkenliğine etki sabiti
 μ_i^φ : i alaşım elemanının φ fazının yoğunluğuna etki sabiti
 ρ : Yoğunluk
 ρ_k : Kalıp yoğunluğu
 ρ_m : Katılaştan metalin yoğunluğu
 ρ_{ort} : Ortalama yoğunluk
 ρ^φ : φ fazının yoğunluğu
 ρ_{Fe}^θ : Saf demirin yoğunluğu
 τ : Gerilme
 ΔT_s : Aşırı ısıtma sıcaklık farkı ($T_{döküm} - T_m$)
 Δt : Geçici rejim çözüm zaman adımı

SANTRİFÜJ POMPA FANLARININ DÖKÜM SİMÜLASYONU

ÖZET

Santrifüj pompa fanları, pompaların temel iki karakteristiği olan debi ve basınç üzerinde çok önemli etkiye sahip kritik parçalardır. Günümüzde pompa fanları, hedeflenen debi ve basınç değerlerini sağlayacak şekilde Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) yazılımları kullanılarak tasarlanmaktadır. HAD yazılımları, fan kanatları üstünde akan sıvının basıncını dengeleyecek ve kayıpları minimuma indirecek fan geometrisini tasarlamak için kullanılan yazılımlardır. HAD kullanarak geliştirilen bu tasarımlar, genelde hedeflenen debi ve basınç kriterlerini sağlayan ancak kolay ve ekonomik döküm üretiminden uzak geometrilerdir. Döküm aşamasından önce ise pompa tasarım ve dökümhane mühendisleri, pompa tasarım kriterlerini kaybetmeden, fan döküm ekonomisini daha verimli hale getirecek küçük tasarım değişiklikleri üzerinde çalışmaktadırlar. Döküm verimini artırıp düşük maliyetli fan üretimini sağlayacak, bu küçük tasarım değişikliklerinin, besleyici sayısı ve hacminin bağlı olduğu katılaşma süresi ve düzenini nasıl etkilediğini bilmek önemlidir.

Bu sebepten, döküm geometrisi içinde katılaşma sınırlarının bilinmesi, doğru besleme yollarının ve besleyici sayısının belirlenmesi için bir gerekliliktir.

Katılaşma analizlerinde kullanılan, iki ve üç boyutlu ısı transfer denklemlerinin klasik ısı transfer yaklaşımlarıyla çözülmesinde karşılaşılan problemler, çözümü gittikçe artan bir şekilde daha gelişmiş analizler yapabilen Sonlu Farklar Metodu (SFM), Sonlu Elemanlar Metodu (SEM) ve Sonlu Hacimler Metodu (SHM) gibi sayısal metotlara kaydırmıştır. Bu tezde, AISI 1016, AISI 304 ve AISI 316 çelik döküm santrifüj pompa fanlarının katılaşması, sonlu Hacimler Metodu kullanan Ansys CFX yazılımı kullanılarak modellenmiştir.

Bütün sayısal analizlerde olduğu gibi, Ansys CFX ile yapılan katılaşma analizlerindeki hassasiyet, analizde kullanılan çelik ve model/maça malzemelerinin ısı özelliklerinin hassasiyetine (doğruluğuna) bağlıdır. Isıl özellikler, sıcaklık, kimyasal kompozisyon ve soğuma hızına bağlı olarak değişen özelliklerdir. Tezde, AISI 1016, AISI 304 ve AISI 316 çeliklerin 1 K/sn soğuma hızında belirlenmiş ısı özellikleri kullanılmıştır.

Tezde geliştirilen model, döküm parçalarda bulunması muhtemel metal-besleyici, maça, kalıp ve soğutucu (çil) gibi 4 ana çalışma alanı içermektedir. Ticari bir yazılım olan Pro-engineer'de çizilen 3 boyutlu fan tasarımı, Ansys CFX'e aktarılmıştır. Fan merkezi etrafında tam simetri sağlayabilmek amacıyla model silindirik şekilde tasarlanmıştır. Analiz süresini kısaltmak için ise 3 boyutlu model (fan, kalıp, maça ve soğutucu) fan merkezi etrafındaki simetriyi kullanarak $60^0/360^0$ 'lik segment halinde modellenmiştir. Isı transferinin meydana geleceği arayüzeyler olan çalışma alanlarının birbirleriyle temas, simetri ve dış ortama açık yüzeyleri modelin üç boyutlu geometrisi üzerinde belirlenmiştir. $60^0/360^0$ 'lik segmentlerin simetrik yüzeyleri, ısı transferinin olmadığı (adyabatik) yüzeyler olarak tanımlanmıştır.

Fan-besleyici, maça, kalıp, soğutucu çalışma alanlarını kapsayan ağ (mesh) Ansys CFX'in otomatik ağ oluşturma seçeneğiyle oluşturulmuştur. Ansys CFX'deki otomatik ağ oluşturma özelliği, birçok genel geometri için uygun ağ oluşumu sağlamasına rağmen, karmaşık fan ve maça geometrisine uygun ağ oluşturabilmek için Ansys CFX'in gelişmiş ağ oluşturma özellikleri de kullanılmıştır. Dar kesitlerde hacimli ve kalın kesitlere göre daha ince ağ oluşumunu sağlayan (minimum ağ katman sayısı 3 olacak şekilde) "Proximity" ve karmaşık geometrilerde (özellikle eğri ve bükümlü yüzeylerde) uygun ağ oluşturan "Curvature" özelliklerinden faydalanılmıştır. Ayrıca, $t=0$ anında, Fan-maça ve fan-kalıp arayüzelerindeki yüksek sıcaklık farkının, çözümde yakınsamayı önleyen etki yapmaması için, Ansys CFX'in "Inflation" özelliği, metal (fan) yüzeyinde 0,4 mm kalınlığında ince bir ağ katmanı oluşturmak amacıyla kullanılmıştır.

Başlangıç ve sınır koşulları Ansys CFX'in model kurulum (setup) modülüne girilmiştir. Modelde kullanılan Analiz tipi, geçici rejim (transient) analizidir. Geçici rejim analizlerinde, kullanan zaman adımı, çözümün yakınsaması için önemli bir parametredir. Modelde, 0,5 sn zaman adımı ve toplam 7200 sn uzunluğundaki analiz süresi, dolayısıyla 14400 analiz adımı seçilmiştir. Yakınsama kriteri olarak 1×10^{-4} değeri belirlenmiştir. 0,5 sn zaman adımıyla, çözümün yakınsadığı görülmüştür. Sıcaklık dağılımının bilgisayar hafızasına kaydedildiği zaman adımı olan monitör sıklığı 2,5 sn olarak belirlenmiştir.

Başlangıç koşulu olarak, $t=0$ anında, fan'ın döküm sıcaklığında, kalıp, maça ve soğutucunun ise 298 K'de olduğu ve bütün çalışma alanlarının uniform bir sıcaklığa sahip olduğu varsayılmıştır. Kalıbın dış yüzeylerinde konveksiyon ile ısı transferi gerçekleştiği varsayılmıştır. Dış yüzeylerdeki konveksiyon film katsayısının, katılaşma ve takip eden soğuma süresince sabit kalacağı varsayılmıştır.

Katılaşma öncesinde ve esnasında sıvı metal içinde oluşan konveksiyon tip ısı transferi ve metalin katılaşma ve soğuma esnasındaki çekmesi göz ardı edilmiştir. Sıvı metalden kalıp ve maçaya transfer olan ısı sebebiyle artan sıcaklığın kalıp ve maçada sebep olduğu ısıl genleşme, katı/sıvı fazlar ve kalıp-maça/metal arayüzelerindeki ısıl direnç göz ardı edilmiştir.

Tezde, 11 değişik model çalışılmıştır. Model 1, ana modeldir ve diğer modellerin tamamı Model 1'in parametrelerinin değiştirilmesiyle oluşturulmuşlardır. Model 1'de, $T_{Döküm}=1973$ K'dir. Kalıp ve maçayı oluşturan malzeme, yaş kum 40 AFS'dir. Model 1'de soğutucu kullanılmamıştır ve dökümü yapılan metal AISI 1016 çeliği olarak seçilmiştir.

Model 2 ve Model 3'te, döküm sıcaklığının, fan geometrisi içindeki farklı noktalarda katılaşma süresi üzerinde yapacağı etkiyi anlamak için sırasıyla 1923 K ve 2023 K'e değiştirilmiştir.

Model 4 ve Model 5'te, soğutucu kullanımı hariç bütün modelleme parametreleri Model 1 ile aynıdır. Soğutucunun katılaşma süresi ve sırasına olan etkisini değerlendirebilmek için, Model 4'te küçük, Model 5'te ise büyük soğutucu kullanılmıştır.

Kalıp yoğunluğunun katılaşma süresine olan etkisinin analiz edildiği modeller, Model 6 ve Model 7'dir. Bu modellerde, tüm parametreler kalıp yoğunluğu hariç, Model 1 ile aynıdır.

Model 8 ve Model 9'da, üretilen reçine bağlı kum (bundan sonra üretilen olarak anılacaktır) ve kabuk kalıp/maça malzemelerinin katılaşma üzerindeki etkileri analiz

edilmiştir. Kalıp/maça malzemeleri hariç, diğer tüm parametreler Model 1 ile aynı tutulmuştur.

Model 10 ve Model 11’de, döküm alaşımları AISI 304 ve AISI 316 olarak değiştirilmiş ve Model 1 ile alaşımlar hariç aynı döküm parametreleri kullanılarak yapılan analizlerde, kimyasal kompozisyon farkının, katılma süresi ve katılma sınırlarına olan etkisi incelenmiştir.

Döküm sıcaklığının katılma süresi üzerine etkisinin incelendiği Model 1, Model 2 ve Model 3’de, döküm sıcaklığı ile katılma süresi arasında doğrusal bir bağıntı olduğu görülmüştür. Ancak, döküm geometrisi içindeki farklı noktalardaki doğrusal bağıntıların farklı olduğu görülmüştür. Döküm sıcaklığında her 1 K artış, dış kanatlarda katılma süresini 0,525 sn uzatırken, fan göbeği/besleyici bölgesindeki katılma süresini 3,425 sn uzatmaktadır. İnce kesitlerde, döküm sıcaklığının katılma süresine etkisi kısıtlı olmaktadır.

Model 4 ve Model 5’te, küçük soğutucunun, döküm geometrisinin besleyiciden uzak noktalarından başlayıp besleyiciye doğru katılması beklenen yönlendirilmiş katılma süresini sağlayamadığı, aksine soğutucu kullanmadan elde edilen (Model 1) katılma süresini daha da bozduğu görülmüştür. Yönlendirilmiş katılma, ancak büyük soğutucu ile mümkün olabilmektedir.

Kalıp yoğunluğunun katılma süresi üzerine yaptığı etkinin çalışıldığı Model 6 ve Model 7’de, kalıp yoğunluğunun katılma süresi üzerindeki etkisinin çok kısıtlı olduğu anlaşılmıştır.

Üretan kalıp ve maça’nın modellendiği Model 8’de, fan göbeğinde çekinti riskinin yüksek olduğu görülmüştür. Model 9’da modellenen kabuk kalıp ve maçanın, çekinti riskini üretan kalıp ve maçaya göre azalttığı anlaşılmıştır.

Model 10 ve Model 11’de, AISI 304 ve AISI 316 paslanmaz çeliklerin modellendiği analizlerde, besleyici boyutunun paslanmaz çelikler için uygun olmadığı anlaşılmıştır. Mevcut besleyici boyutuyla, çekinti riskinin AISI 316 kalite çelikte AISI 304’e göre daha büyük olduğu görülmüştür.

Bu tezde, AISI 1016, AISI 304 ve AISI 316 çeliklerin yaş kum, üretan ve kabuk kalıp-maça içine yapılan dökümlerinin katılması ve devamında soğuması Ansys CFX kullanılarak 3 boyutta modellenmiştir. Fan, kalıp, maça ve soğutucuda izotermal sıcaklık dağılımları elde edilmiştir. Döküm sıcaklığının, soğutucu kullanımının, kalıp yoğunluğunun, değişik kalıp-maça malzemelerinin ve alaşımların katılma süresi ve düzenine olan etkilerini analiz edecek genel bir model oluşturulmuştur.

SOLIDIFICATION MODELLING OF CENTRIFUGAL PUMP IMPELLER

SUMMARY

Impellers which are the most critical parts of the centrifugal pumps have great impacts on the pump characteristics: Pressure head and flow. Today's pump design engineers use computational fluid dynamic programs in order to design efficient impellers for the targeted pressure heads and flows. Computational Fluid Dynamics programs are used to generate impeller geometries in order to balance the pressures of the fluids that flow over two sides of the blades of impellers. Thus, outcomes are often designs for the targeted pressure heads and flows, but far from cases of easy and economic casting process. In the successive works, pump design and the foundry engineers try to modify impeller geometries for economic casting without losing pump characteristics. So, it is important to know how a modification affects on the solidification happens during casting to determine the number of risers and their volumes in order to reach better casting yields and at the end, low cost casting. Furthermore, knowing the solidification order and contours enable foundry engineers to improve the manufacturability by modifying original casting designs, by employing chill or by changing the molding materials.

Thus, obtaining the solidification order and contours in cast geometries is a necessity to know the last location(s) to solidify in order to define the correct feeding path and the number of risers.

The most widely-used rule to design risers and their connections is well-known Chovorinov's rule which states that the solidification time of a semi-infinite slab is proportional to its volume to surface area ratio. Later, the Modulus Method was developed to design risers. Nevertheless, Modulus Method can only provide very rough estimation on solidification sequence as it does not take the change of the thermophysical properties with temperature.

Because of the complex problem encountered in solving two or three dimensional heat transfer equations by the classical heat transfer approach, the emphasis has shifted to the use of new approach, numerical methods such as Finite Difference Method (FDM), Finite Element Method (FEM) and Finite Volume Method (FVM). These numerical methods provide more accurate and sophisticated solutions to the solidification analysis. In this study, Ansys CFX program which uses FVM has been used to simulate the solidification of the centrifugal pump impeller made of AISI 1016, AISI 304 and AISI 316 steels.

In simulation of solidification performed by using FVM, the accuracy of the model depends on the correct values of thermophysical properties. These properties are functions of temperature, composition and cooling rate. Thus, for different alloys with different compositions, the thermophysical properties such as specific heat, thermal conductivity and density have to be defined at pre-defined cooling rate which is 1°C /s in this study. The required thermophysical data of AISI 1016, AISI

304 and AISI 316 steel as well as mold and core materials for accurate simulations were used as a function of temperature.

In the model, four different domains which are impeller, mold, core and chill were used to simulate the solidification. The model was created by using Pro-engineer, a design software. Later, the model was imported to Ansys CFX. The interfaces among four domains through which heat is transferred are specified in 3-D.

The complete model was designed in shape of a cylindrical model in order to ensure the complete symmetry. Later, the model in 3-D was segmented into 6 pieces ($60^\circ/360^\circ$) as symmetry parts. The segmentation is necessary to reduce the number of grids and run time accordingly. The symmetry planes (surfaces) were set to be adiabatic.

The automatic mesh was generated throughout the volume of each domain. The automatic mesh can provides accurate results for many geometries, however some specific features of Ansys CFX were employed to improve the mesh quality for accurate and converged solutions since the model geometry is very complex and temperature differences between metal/core and metal/mold interfaces are very high. The option of medium meshing size, proximity/curvature and inflation as advanced size functions of meshing were used to generate proper meshing for the model. After employing these specific features of Ansys CFX, the final mesh was generated for the model.

The initial and boundary conditions were entered into the setup section of Ansys CFX. The transient type of analysis which employs the solutions of second order backward Euler equations was used. Since the analysis is transient and time stepping is very important to achieve the converged solution, a time integration procedure was used to obtain solutions to the system equations at discrete point of time. In this study, 0,5 s time step, 7200 s total analysis time and consequently 14400 steps were used in the analysis. The convergence criterion (RRMS=Residual root mean square) is assigned as 1×10^{-4} . In order to reach such criterion, the number of iteration, called coefficient loop, in each time step was assigned as 1 for minimum and 15 for maximum. By using these convergency criteria and time stepping, the convergency was achieved in the analysis.

Conduction heat transfer was modeled. As being the initial conditions, metal was assumed to be at temperature of pouring as the other domains, mold, core and chill, were assumed to be at 298 K. Uniform temperature distribution at $t=0$ in all domains was assumed. In the analysis, the convection heat transfer phenomenon is also considered at the outer surfaces of the mold. Convection film coefficient values were considered to be constant during the solidification and subsequent cooling. Liquid and solid phases were considered as a single regime.

Convection type of heat transfers happened in the solidifying liquid metal and contraction of metal during cooling were disregarded. The mold and the core expansions because of temperature increase due to the heat transfer from metal to the mold and core and the interface resistance at liquid/solid phases and mold/metal domains were also disregarded.

Eleven different models were studied. The Model 1 is the basic model so that all other models are the modifications of the Model 1. In the Model 1, T_{Pouring} is 1973 K. The mold and the core are green sand - 40 AFS. Chill is not used and the metal is AISI 1016.

In the Model 2 and Model 3, the pouring temperature of the Model 1 was changed to 1923 K and 2023 K respectively in order to evaluate the effect of the pouring temperature on the solidification times of different parts of the impeller geometry.

In the Model 4 and Model 5, all parameters are the same as those of the Model 1 except for the use of chills. In the Model 4 and Model 5, small and big chills were used respectively in order to analyze the effects of chills on the solidification time and patterns (Solidification sequence).

The effects of the density of the mold materials were modeled in the Model 6 and the Model 7. In these models, the rest of parameters are the same as those of the Model 1.

In the Model 8 and the Model 9, the effects of the different molding media, chemically bonded urethane (hereinafter referred to as urathane) and shell, on the solidification time were analyzed. All other parameters are the same as those of the Model 1.

The Model 10 and the Model 11 were modeled to analyze the effect of the alloys on the solidification times and the contours. Except for the alloys, all parameters are the same as those of the Model 1.

In the Model 1 to Model 3, the effects of the pouring temperatures on solidification time were studied. The simulation result is that there is a linear relationship between the pouring temperature and the solidification time. As it is seen from the analysis, the effects of the pouring temperature are different in different parts of the impeller geometry. In every 1 K increase in pouring temperature, the solidification times become longer 0,525 s in exterior blades and 3,425 s in the impeller hub/riser. The pouring temperature has minor effect in the thinner geometries.

In Model 4 and Model 5, the analysis shows that the small chill has no positive effect on the solidification to ensure the directional solidification from the outer parts towards the riser. Rather, small chill worsens the pattern of the solidification. The directional solidification can be achieved by using the big chill. Thus, for each application, there is an optimum chill size to create the directional solidification. This optimum chill should be studied separately for each case and geometry.

In the Model 6 and the Model 7, the effect of the mold density on the solidification time was studied. It is shown that the mold density has very small effect on the solidification time.

In the model 8 in which urethane mold and core were modeled, it is seen that the possibility of shrinkage is high within the impeller hub. But the possibility of the shrinkage is reduced by using shell mold and core as it was modeled in the Model 9.

In the models of 10 and 11, the effects of the alloys in the solidification were studied. As it is concluded, the riser size is not proper for the casting of the impellers made of AISI 304 and AISI 316. However, the possibility of shrinkage is higher in the impeller hub made of AISI 316.

This study presents three-dimensional simulation of transient heat transfer within an impeller, made of AISI 1016, AISI 304 and AISI 316 steels, poured and solidified in green sand, shell and urethane mold and core medium, by using ANSYS CFX. The 3-D solidification contours of the impeller as well as isothermal lines in core and mold media have been obtained. The effects of pouring temperature, use of different chills, density of the mold, different mold/core materials and different alloys on the

solidification times were studied and a standard model for the analysis of solidification by using Ansys CFX was developed.

1. GİRİŞ

Dünyada kullanımı en yaygın pompa tipi olan santrifüj pompalar, başta sulama olmak üzere, şehir içme suyu şebekelerinde su basıncının yetersiz olduğu durumlarda hidroforlarda, yiyecek içecek endüstrilerinde ve kimya-petrokimya-hidrometalurji tesislerinde proses pompaları olarak kullanılmaktadırlar.

Santrifüj pompalar, elektromekanik makineler olup, çok sayıda parçanın birleştirilmesiyle üretilmektedirler. Bir pompa, motor ve pompa kafası olarak iki ana bölüme ayrılmaktadır. Pompa kafası ise fan ve salyangozdan meydana gelmektedir. Pompanın performansını belirleyen ana parça, pompa fanıdır. Fan geometrisindeki küçük değişiklikler, pompa performansını önemli ölçüde etkilemektedir. Bu sebepten, tasarım açısından pompa fanına verilen önem büyüktür. Genel tabirle, pompa tasarımı, pompa fanının tasarımıdır.

Pompa fanı, hem pompanın tüm karakteristiklerini etkilediği hem de aşınmaya maruz kaldığı için özel bir öneme sahiptir. Pompanın kullanım yeri ve fan boyutuna göre pompa fanı, pik demir veya sfero dökme demir, paslanmaz çelik, bronz, cam elyafı plastik malzeme gibi değişik malzeme gruplarından üretilmektedir.

Son 50 yıla kadar, deneysel formüllerle ve firma tecrübeleriyle tasarlanan pompa fanları, gelişen nümerik analiz teknikleri, çözüm programları ve bilgisayar teknolojileri sayesinde günümüzde Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) (Computational Fluid Dynamics) yazılımları ile tasarlanmaktadır. HAD yazılımlarının tasarım çıktıları ve hedeflenen fiili debi-basınç karakteristikleri arasında çok yakın sonuçlar elde edilebilmektedir.

Sonlu Elemanlar Metodu (SEM) veya Sonlu Hacimler Metodu (SHM) prensiplerine göre çalışan hesaplamalı akışkanlar yazılımları, fan kanat eğrisini ve bu eğrinin akışkanda meydana getireceği basınç kayıplarını hesaplamakta ve bu basınç kayıplarını minimize edecek kanat formunu tasarlamaktadır. Daha sonra tasarlanan bu kanat formu, proje mühendislerine girdi olarak verilmekte ve proje mühendislerinden üretilebilir bir tasarım için HAD tarafından yaratılan forma en

yakın formun imalat resimlerinin çizilmesi istenmektedir. HAD tarafından yaratılan ve en verimli pompa fanının hedeflendiği ilk form, döküm teknolojisi tarafından üretilmeyecek seviyede karmaşık geometriden oluşabilmektedir. Proje mühendisleri bu formun üretilabilir hale getirebilmesi için dökümhane mühendisleri ve model-maça imalatçıları ile bir dizi değerlendirme sonrasında mutabakata varmakta, HAD tasarımına en yakın ama aynı zamanda üretilabilir bir geometrinin oluşturulmasına gayret edilmektedir. Ortaya çıkan tasarım; HAD tarafından yaratılan tasarıma en yakın geometride ve üretilabilir olmalıdır.

HAD tasarımı sonucunda ortaya çıkan geometrinin üretilabilirliği, çoğu zaman mühendislik disiplinleri arasında tartışma konusu olmakta ve ortaya çıkan tasarım ya gerekli pompa performansından uzak ya da üretilabilirlik açısından sorunlu ve pahalı bir bileşen olarak ortaya çıkabilmektedir.

Fan tasarımının üretilabilirlik açısından en önemli sorunlardan biri, aynı zamanda fan üretiminde dökümhanelerde en sık karşılaşılan hata, katılaşma çekmesi ve buna bağlı olarak sıcak yırtılmadır. Problem, besleyici tarafından katılaşma süresince sağlanan sıvı metalin, döküm geometrisinde son katılaşmanın meydana geldiği noktalara yeterince ulaşmaması halinde meydana gelmektedir. Bu sebepten, döküm geometrisinde en son katılaşan metalin konumu ve geometrideki oluşan katılaşma düzeninin bilinmesi, sık karşılaşılan katılaşma çekmesi problemini ortadan kaldırabilecek bilgi seviyesine ulaşmak demektir.

Fan dökümü gibi karmaşık geometriye sahip döküm parçalarda birden fazla besleme yolu bulunur. Her besleme yoluna bir besleyicinin, doğru noktadan ve doğru hacimde bağlanması bir gerekliliktir. Ancak, birçok durumda, döküm geometrisi çok sayıda besleyiciyi döküm parçasına bağlamayı, maça kullanımını artırması, kalıplama ekipmanlarındaki limitli yer (boşluk), döküm sonrasında besleyicilerin döküm parçasından temizlenme maliyetleri ve döküm verimi (ekonomisi) açılarından zor hatta imkansız kılmaktadır. Günümüzün yüksek enerji maliyetleri ve yoğun rekabet koşulları göz önüne alındığı zaman, üretimi kolay döküm parçalarının tasarlanmasının çok önemli olduğu açıktır. Döküm geometrisi ne şekilde ve nasıl değişirse, döküm veriminin ne kadar arttığı bilgisi önemlidir. Bazen fan geometrisindeki küçük tasarım değişiklikleri, döküm ekonomisine büyük katkıda bulunmaktadır. Bu neden ile döküm yapılmadan, orijinal fan geometrisindeki katılaşma düzeninin bilinmesi ve fan geometrisindeki küçük tasarım değişikliklerinin

katılaşma düzenini nasıl etkilediğinin tahmin edilmesi, daha sonraki üretim aşamalarındaki hataları azaltması bakımından önemlidir.

Bu çalışmada, Sonlu Hacimler Metodu (SHM) kullanan ticari bir HAD yazılımı olan Ansys CFX kullanılarak, eksenel fan geometrisindeki katılaşma düzeni üzerinde, aşırı ısıtmanın, soğutucu kullanımının ve kalıp yoğunluğunun etkilerinin belirlenmesi hedeflenmiştir. Ayrıca, sabit geometri, döküm sıcaklığı ve kalıp malzemelerinin kullanıldığı çalışmalarda, değişik metal alaşımlarının katılaşma düzenleri incelenmiş, aynı besleyici boyutunda, değişik alaşımların katılaşma çekmesi problemine olan yatkınlıkları modellenmiştir. Ansys CFX temel olarak akışkan analizleri için kullanılan bir ticari yazılımdır. Bu yazılımın aynı zamanda tasarlanan fandaki katılaşma düzeninin elde edilmesi için de kullanılması, firmalar için ilk yatırım maliyetlerini düşürmekte, ayrıca HAD hesaplamalarıyla elde edilen geometrinin hazır üç boyutlu çizim olarak ısı transferi modülüne aktarılması, modelleme aşamasındaki mühendislik çalışmalarını da azaltmaktadır.

Çalışmada, uygulamada görülen fan geometrisi ve döküm teknolojisi açısından bu geometriyi üretmek için kullanılan fan modeli, kalıp (derece), maça kutusu ve soğutucu gibi dört temel döküm unsuru modellenmiştir. Ayrıca, metal alaşımları, maça ve kalıp malzemeleri için ısı özelliklerinin sıcaklığa bağlı fonksiyonları Ansys CFX'e girdi olarak kullanılmıştır.

Son olarak modellerin çıktıları 3 boyutlu model üzerinde, fan, fan-maça, fan-maça-kalıp ve fan-maça-kalıp-soğutucu olarak 60° ve 120°'lik kesitlerde incelenmiş ve yorumlanmıştır.

2. SONLU HACİMLER METODU

Mühendislik sistemlerinin çözümünde kullanılan sayısal metotlar 20. yüzyılın başından başlayarak, adım adım gelişmiş, günümüzde yüksek hızlı işlemcilerin ve bilgisayarların grafik özelliklerinin gelişmesiyle, bütün mühendislik disiplinlerinde çözülmesi zor problemlerde yaklaşım metotları olarak çözüm ve tasarım aracı olmuşlardır [1].

Günümüzde mühendislik uygulamalarında kullanılan sayısal metotlar 4 ana grupta toplanmaktadır:

- Sonlu Farklar Metodu (SFM) (Finite Difference Method)
- Sonlu Elemanlar Metodu (SEM) (Finite Element Method)
- Sınır Eleman Metodu (BEM) (Boundary Element Method)
- Sonlu Hacimler Metodu (SHM) (Finite Volume Method)

Sayısal metotlar özellikleri açısından gösterdikleri farklılıklarla mühendislik uygulamalarının ihtiyaçlarına göre farklı konularda diğer metotlara göre daha uygun olabilmektedirler (Çizelge 2.1).

Çizelge 2.1 : Sayısal metotların mukayeseli tablosu [2].

	SFM	SEM	BEM	SHM
Ayrıklaştırma	Prizmatik Ağ	İzoparametrik Ağ	İzoparametrik Ağ	İzoparametrik Ağ
Çalışma Alanı	Düzenli	Düzensiz	Düzensiz	Düzensiz
3-Boyutlu Problemlere	Az Uygun	Uygun	En Uygun	Uygun
Heterojen çalışma alanı uygulamalarına	Uygun	En Uygun	Az Uygun	En Uygun
Sınır Koşullarının uygulanması	Az Uygun	Uygun	Uygun	Uygun
Gerekli veri miktarı	Az	En Fazla	Fazla	En Fazla
Cebirsel denklemlerin katsayı matris tipi	Bant	Bant	Tam Dolu	Bant
Uygulaması	En Kolay	Zor	Kolay	Zor

Momentum, ısı ve kütle transferi gibi olayların çözüm denklemleri, kısmi diferansiyel denklemlerdir. Bu denklemler 19. Yüzyılda türetilmiş ancak genel analitik çözümleri de şu ana kadar geliştirilememiştir.

Hızlı dijital bilgisayarların geliştirilmesi, akışkanlar mekaniği ve ısı transferi gibi tasarıma yönelik mühendislik problemleri ve bu problemlerin çözümü üzerinde etkili olmuştur. Geçmişte, akış ve ısı transferi problemlerinin çözümü deneysel metotlar kullanılarak yüksek maliyetlerle elde edilmiştir. Son 50 yılda çözümler daha ziyade sayısal metotlara kaymış ve geliştirilen yeni metotlarla çözümler yeterince hızlı, düşük maliyetli ve doğru sonuç verir hale gelmiştir.

1900'lerin başından itibaren bilinen en eski ve temel sayısal metot olan Sonlu Farklar Metodu (SFM) kullanılarak basit geometriler için probleme bağlı kısmi diferansiyel denklemlerin çözümleri geliştirilmiştir. Ancak, akış ve ısı transferinin üç boyutta ve karmaşık geometrilerde incelenmesi gibi problemlerin çözümü için daha ziyade teorik (analitik) çözümler, deneysel metotlar veya bu iki metodun karışımı kullanılmıştır. Yüksek hafıza kapasiteli ve hızlı bilgisayarların endüstride kullanılmaya başlamasıyla birlikte, karmaşık üç boyutlu geometriler için sayısal metotların 1960'lardan sonra gittikçe artan oranda Sonlu Elemanlar Metodu (SEM) ve Sonlu Hacimler Metoduna (SHM) kaydığı görülmektedir.

Harekete ait herhangi bir fiziksel değişkenin (sıcaklık, basınç, momentum, vb) değeri SFM veya SEM gibi metotlarda düğüm noktaları veya yüzey üzerinde tanımlanırken, SHM'da fiziksel değişkenin değeri çalışma alanında (domain) yaratılan kontrol hacimlerde tanımlanmaktadır.

SHM, özellikleri belirli akış problemleri için, kısmi diferansiyel denklemlerin belirli sınır koşullarında, bir set eş zamanlı cebirsel denklem modeline çevrilmesi ve bu denklem setinin çözülmesiyle sonuca varmaktadır. Bu genel eş zamanlı cebirsel denklem seti aşağıdaki gibi gösterilmektedir.

$$[\mathbf{K}]\{\mathbf{U}\} = \{\mathbf{F}\} \Longrightarrow \{\mathbf{U}\} = [\mathbf{K}]^{-1} \{\mathbf{F}\} \quad (2.1)$$

K : Özellik (properties - stiffness matrix)

U : Hareket (behaviour – unknown vector matrix)

F : Eylem (action – source vector matrix)

Özellik, hareket ve eylem için değişik ana dallarda değişik örnekler verilebilmektedir (Çizelge 2.2).

Çizelge 2.2 : Sayısal metotlarda özellik, hareket ve eylem için çözüm örnekleri [3].

	Özellik [K]	Hareket {U}	Eylem {F}
ELASTİK	Sertlik/Rijitlik	Deformasyon	Kuvvet
ISIL	Isıl İletkenlik	Sıcaklık	Isı Kaynağı
AKIŞKAN	Viskozite	Hız	Cisim Kuvveti
ELEKTROSTATİK	Dielektrik Sabiti	Potansiyel	Elektrik Yükü

Bu çalışma kapsamında, Şekil 2.1’de açıklanan örneklerden ısısal kısım kullanılmaktadır. Çözüm denklemi, denklem 2.3’de gösterilmiştir.

$$\{U\} = [K]^{-1} \{F\} \Longleftrightarrow \{Sıcaklık\} = [Isıl İletkenlik]^{-1} \{Isı Kaynağı\} \quad (2.2)$$

$$\{Sıcaklık\} = [Isıl İletkenlik]^{-1} \{Entalpi\} \quad (2.3)$$

Sonlu Hacimler Metodunun çözümde kullandığı kütlelerin korunumu, momentum ve ısı transferi denklemleri, 2.4 – 2.37 denklemlerinde açıklanmıştır.

2.1 Kütlelerin Korunumu – Süreklilik Denklemi

Birim hacimli bir elemanda kütlelerin korunumu denklemini yazmak için, öncelikle bu eleman için kütle balansı denklemini yazmak gerekmektedir [1].

$$\begin{array}{lcl} \text{Birim elemanda} & & \text{Birim elemanın} \\ \text{kütlelerin artış} & = & \text{içine/dışına net} \\ \text{hızı} & & \text{akış hızı} \end{array} \quad (2.4)$$

Birim eleman içindeki kütlelerin değişim hızı denklemi;

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \delta_x \delta_y \delta_z) = \frac{\partial \rho}{\partial t} \delta_x \delta_y \delta_z \quad (2.5)$$

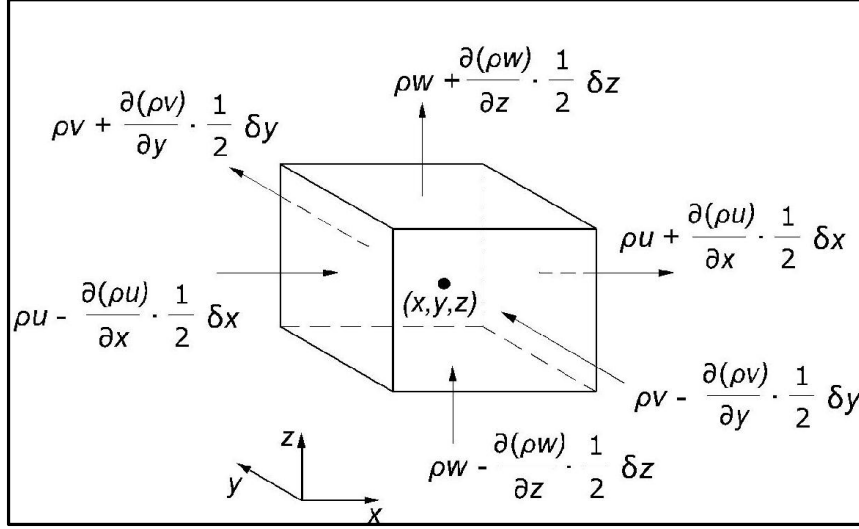
2.5 denkleminde

t = Zaman

ρ = Yoğunluk

$\delta_x, \delta_y, \delta_z$ = x, y ve z yönünde birim eleman boyutu

Birim elemanın yüzey alanlarından, eleman içine veya dışına net akış hızının denklemi, denklem 2.6'da verilmiştir. Net akış hızı, akışın elemanın yüzeyine dik hızının, yoğunluğun ve birim eleman yüzey alanının birbirleriyle çarpımına eşittir. Pozitif terimler elemanın içine giren, negatif terimler elemandan dışarıya çıkan akışı temsil etmektedir (Şekil 2.1).



Şekil 2.1 : Birim elemanın içine ve dışına doğru kütle transferi.

Buna göre,

$$\begin{aligned}
 & \left[\rho u - \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} \frac{1}{2} \delta_x \right] \delta_y \delta_z - \left[\rho u + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} \frac{1}{2} \delta_x \right] \delta_y \delta_z \\
 & + \left[\rho v - \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} \frac{1}{2} \delta_y \right] \delta_x \delta_z - \\
 & \left[\rho v + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} \frac{1}{2} \delta_y \right] \delta_x \delta_z + \left[\rho w - \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} \frac{1}{2} \delta_z \right] \delta_x \delta_y \\
 & - \left[\rho w + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} \frac{1}{2} \delta_z \right] \delta_x \delta_y = \frac{\partial \rho}{\partial t} \delta_x \delta_y \delta_z
 \end{aligned} \tag{2.6}$$

Denklem 2.6'da

ρ = Yoğunluk

u, v, w = x, y ve z yönlerinde akış hızı bileşeni

$\delta_x, \delta_y, \delta_z$ = x, y ve z yönünde bizim eleman boyutu

$$\begin{aligned}
& -2 \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} \frac{1}{2} \delta_x \delta_y \delta_z - 2 \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} \frac{1}{2} \delta_x \delta_y \delta_z - 2 \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} \frac{1}{2} \delta_x \delta_y \delta_z \delta_z \\
& = \frac{\partial \rho}{\partial t} \delta_x \delta_y \delta_z
\end{aligned} \tag{2.7}$$

$$-\frac{\partial(\rho u)}{\partial x} \delta_x \delta_y \delta_z - \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} \delta_x \delta_y \delta_z - \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} \delta_x \delta_y \delta_z = \frac{\partial \rho}{\partial t} \delta_x \delta_y \delta_z \tag{2.8}$$

$$-\delta_x \delta_y \delta_z \left(\frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} \right) = \frac{\partial \rho}{\partial t} \delta_x \delta_y \delta_z \tag{2.9}$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \left(\frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} \right) = 0 \tag{2.10}$$

Denklem 2.10 vektör formda yazılırsa denklem 2.11 elde edilmektedir.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho \vec{U}) = 0 \quad \text{veya} \quad \frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{U}) = 0 \tag{2.11}$$

Denklem 2.11, üç boyutlu, kararsız, kütleinin korunumu veya süreklilik denklemidir [1].

2.2 Değişim Hızı – Momentum ve Enerji

Bir partikülün, herhangi bir özelliğindeki (momentum, enerji, vb) zamana bağlı değişim Lagrange yaklaşımı (Lagrangian approach) ile ifade edilmektedir. Lagrange yaklaşımına göre, bir partikülün her özelliği, bulunduğu pozisyonun (x, y, z) ve zamanın bir fonksiyonudur. Bu partikülün birim kütleinin herhangi bir özelliği ϕ olsun, buna göre ϕ zamana bağlı türevi,

$$\frac{D\phi}{Dt} = \frac{\partial \phi}{\partial t} + \frac{\partial \phi}{\partial x} \frac{\partial x}{\partial t} + \frac{\partial \phi}{\partial y} \frac{\partial y}{\partial t} + \frac{\partial \phi}{\partial z} \frac{\partial z}{\partial t} \tag{2.12}$$

$$\frac{\partial x}{\partial t} = u, \quad \frac{\partial y}{\partial t} = v, \quad \frac{\partial z}{\partial t} = w \tag{2.13}$$

$$\frac{D\phi}{Dt} = \frac{\partial\phi}{\partial t} + u \frac{\partial\phi}{\partial x} + v \frac{\partial\phi}{\partial y} + w \frac{\partial\phi}{\partial z} = \frac{\partial\phi}{\partial t} + grad\phi$$

Birim hacimdeki partikülün ϕ özelliğinin değişim hızı $D\phi /Dt$ 'nin yoğunlukla çarpılmasıyla elde edilir. Buna göre

$$\rho \frac{D\phi}{Dt} = \rho \left[\frac{\partial\phi}{\partial t} + U \cdot grad\phi \right] \quad (2.14)$$

Kütlenin korunumunu genel bir özellik için yazacak olursak,

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} + div(\rho\phi U) &= \rho \left[\frac{\partial\phi}{\partial t} + U \cdot grad\phi \right] + \phi \left[\frac{\partial\rho}{\partial t} + div(\rho\vec{U}) \right] \\ &= \rho \frac{D\phi}{Dt} \end{aligned} \quad (2.15)$$

$$\left[\frac{\partial\rho}{\partial t} + div(\rho\vec{U}) \right] = 0 \text{ (Denklem 2.11)}$$

Bu durumda, denklem 2.15'in sözel ifadesi olan denklem 2.16'daki gibidir [1].

Birim elemanda		Birim elemanın		Partikülde	
ϕ 'nin artış	+	dışına ϕ 'nün	=	ϕ 'nin artış	(2.16)
hızı		net akış hızı		hızı	

Özet olarak, bir partikül için momentumun üç bileşen ve enerji denklemleri Çizelge 2.3 de tablolanmıştır.

Çizelge 2.3 : Birim hacimli sıvı partiküldeki momentum bileşenleri ve enerji denklemi [1].

x - momentum	u	$\rho \frac{Du}{Dt}$	$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + div(\rho u \vec{U})$
y - momentum	v	$\rho \frac{Dv}{Dt}$	$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + div(\rho v \vec{U})$
z - momentum	w	$\rho \frac{Dw}{Dt}$	$\frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + div(\rho w \vec{U})$
enerji	E	$\rho \frac{DE}{Dt}$	$\frac{\partial(\rho E)}{\partial t} + div(\rho E \vec{U})$

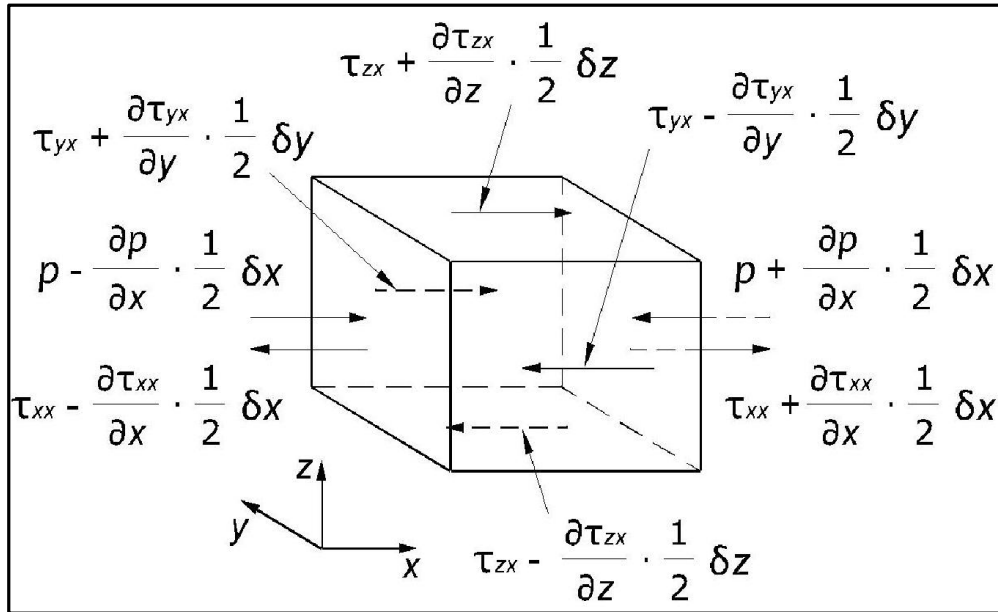
2.3 Üç Boyutta Enerji Denklemi

Bu çalışmada kullanılan 3 boyuttaki enerji denklemi, termodinamiğin 1. kanunundan türetilen denklemdir. Bu kanun özet olarak “Bir sıvı partikülün enerji değişim hızı, bu sıvı partiküle ilave edilen ısı enerji hızı ve bu sıvı partikülü tarafından yapılan işin toplamına eşittir” şeklinde ifade edilebilir. Bu açıklamanın denklem halinde yazımı (2.17) numaralı denklemde görülebilmektedir [1].

Sıvı partikülün	Sıvı partiküle	Sıvı partikülde	
enerji artış	= ilave edilen net	+ yapılan işin	
hızı	ısı hızı	net hızı	(2.17)

2.3.1 Yüzey kuvvetleri tarafından yapılan iş

Yüzey kuvvetleri tarafından birim eleman içindeki bir partikül üzerinde yapılan işin hızı, kuvvetin, kuvvet yönündeki hız bileşeniyle çarpımına eşittir.



Şekil 2.2 : Birim elemanda x-yönündeki gerilme bileşenleri.

x-yönündeki yüzey kuvvetleri tarafından yapılan iş:

$$\begin{aligned}
W_{sf,x} = & \left[\left(Pu - \frac{\partial(Pu)}{\partial x} \frac{1}{2} \delta_x \right) - \left(\tau_{xx}u - \frac{\partial(\tau_{xx}u)}{\partial x} \frac{1}{2} \delta_x \right) \right. \\
& - \left(Pu + \frac{\partial(Pu)}{\partial x} \frac{1}{2} \delta_x \right) + \left(\tau_{xx}u + \frac{\partial(\tau_{xx}u)}{\partial x} \frac{1}{2} \delta_x \right) \Big] \delta_y \delta_z \\
& + \left[- \left(\tau_{yx}u - \frac{\partial(\tau_{yx}u)}{\partial y} \frac{1}{2} \delta_y \right) \right. \\
& + \left(\tau_{yx}u + \frac{\partial(\tau_{yx}u)}{\partial y} \frac{1}{2} \delta_y \right) \Big] \delta_x \delta_z \\
& + \left[- \left(\tau_{zx}u - \frac{\partial(\tau_{zx}u)}{\partial z} \frac{1}{2} \delta_z \right) \right. \\
& + \left(\tau_{zx}u + \frac{\partial(\tau_{zx}u)}{\partial z} \frac{1}{2} \delta_z \right) \Big] \delta_x \delta_y \\
& = \left[\frac{\partial(u(-P + \tau_{xx}))}{\partial x} + \frac{\partial(u\tau_{yx})}{\partial y} + \frac{\partial(u\tau_{zx})}{\partial z} \right] \delta_x \delta_y \delta_z
\end{aligned} \tag{2.18}$$

Denklem 2.18’de

$W_{sf,x}$ = x-yönünde yüzey kuvvetleri tarafından yapılan iş

P = Basınç

τ = Gerilme

Benzer şekilde y- ve z-yönündeki kuvvetler yazılırsa

$$W_{sf,y} = \left[\frac{\partial(v\tau_{xy})}{\partial x} + \frac{\partial(v(-P + \tau_{yy}))}{\partial y} + \frac{\partial(v\tau_{zy})}{\partial z} \right] \delta_x \delta_y \delta_z \tag{2.19}$$

$$W_{sf,z} = \left[\frac{\partial(w\tau_{xz})}{\partial x} + \frac{\partial(w\tau_{yz})}{\partial y} + \frac{\partial(w(-P + \tau_{zz}))}{\partial z} \right] \delta_x \delta_y \delta_z \tag{2.20}$$

Denklem 2.19 ve denklem 2.20’de

$W_{sf,y}$ = y-yönünde yüzey kuvvetleri tarafından yapılan iş

$W_{sf,z}$ = z-yönünde yüzey kuvvetleri tarafından yapılan iş

Birim hacimdeki yapılan toplam iş, denklem 2.18, denklem 2.19 ve denklem 2.20’in toplamının birim hacim olan $\delta_x \delta_y \delta_z$ ‘e bölünmesiyle elde edilir. Basınç ihtiva eden terimler bir araya toplanır ve denklem vektör formunda yazılırsa,

$$-\frac{\partial(uP)}{\partial x} - \frac{\partial(vP)}{\partial y} - \frac{\partial(wP)}{\partial z} = -div(P\vec{U}) \tag{2.21}$$

Yüzey kuvvetlerince toplam yapılan iş;

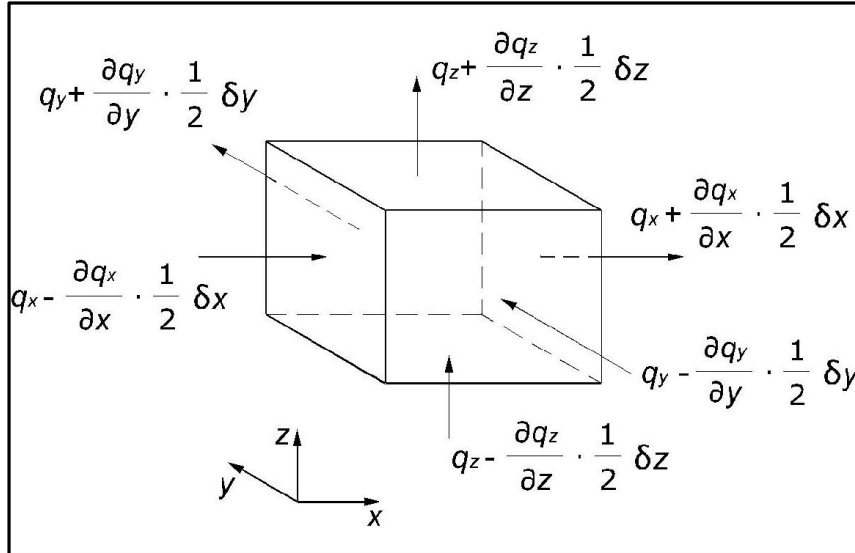
$$\begin{aligned}\Sigma W_{sf} = & [-div(P\vec{U})] \\ & + \left[\frac{\partial(u\tau_{xx})}{\partial x} + \frac{\partial(u\tau_{yx})}{\partial y} + \frac{\partial(u\tau_{zx})}{\partial z} + \frac{\partial(v\tau_{xy})}{\partial x} + \frac{\partial(v\tau_{yy})}{\partial y} \right. \\ & \left. + \frac{\partial(v\tau_{zx})}{\partial z} + \frac{\partial(w\tau_{xz})}{\partial x} + \frac{\partial(w\tau_{yz})}{\partial y} + \frac{\partial(w\tau_{zz})}{\partial z} \right] \quad (2.22)\end{aligned}$$

Denklem 2.22’de

ΣW_{sf} = Yüzey kuvvetleri tarafından yapılan toplam iş

2.3.2 Isı iletimi kaynaklı enerji akısı

Şekil 2.3’deki ısı akısı olan vektör q , x-yönünde, y-yönünde ve z-yönünde $q_x q_y q_z$ bileşenlerine sahiptir.



Şekil 2.3 : Isı akısının vektörel bileşenleri.

Partikülün x-yönündeki net ısı transfer hızı, W (Batı) yüzeyinden partiküle giren ısı ile E (Doğu) yüzeyinden partikülden çıkan ısı arasındaki farka eşittir.

$$\left[\left(q_x - \frac{\partial q_x}{\partial x} \frac{1}{2} \delta_x \right) - \left(q_x + \frac{\partial q_x}{\partial x} \frac{1}{2} \delta_x \right) \right] \delta_y \delta_z = - \frac{\partial q_x}{\partial x} \delta_x \delta_y \delta_z \quad (2.23)$$

Aynı şekilde y-yönündeki ve z-yönündeki net ısı transfer hızları

$$\left[\left(q_y - \frac{\partial q_y}{\partial y} \frac{1}{2} \delta_y \right) - \left(q_y + \frac{\partial q_y}{\partial y} \frac{1}{2} \delta_y \right) \right] \delta_x \delta_z = - \frac{\partial q_y}{\partial y} \delta_x \delta_y \delta_z \quad (2.24)$$

$$\left[\left(q_z - \frac{\partial q_z}{\partial z} \frac{1}{2} \delta_z \right) - \left(q_z + \frac{\partial q_z}{\partial z} \frac{1}{2} \delta_z \right) \right] \delta_x \delta_y = -\frac{\partial q_z}{\partial z} \delta_x \delta_y \delta_z \quad (2.25)$$

Denklem 2.23, denklem 2.24 ve denklem 2.25 toplanıp birim hacme bölünerek, partiküle akan ısıнын toplamı bulunur.

$$-\frac{\partial q_x}{\partial x} - \frac{\partial q_y}{\partial y} - \frac{\partial q_z}{\partial z} = -\text{div } q \quad (2.26)$$

Fourier'in ısı iletimiyle ilgili kanununda, ısı akısı sıcaklık gradientine bağlıdır. Buna göre,

$$q_x = -k \frac{\partial T}{\partial x}, \quad q_y = -k \frac{\partial T}{\partial y}, \quad q_z = -k \frac{\partial T}{\partial z}$$

q_x = x-yönünde birim alandaki ısı akısı (Heat flux) (J/(m²))

k = Isıl İletkenlik (Thermal conductivity) (J/m)

T = Sıcaklık (Temperature) (°C)

X = Mesafe (Distance) (m)

Denklemleri vektör formunda yazarsak

$$\vec{q} = -k \text{ grad } T \quad (2.27)$$

Denklem 2.26 ve denklem 2.27'i birlikte yazarak (2.28) numaralı denklemdeki halini almaktadır.

$$-\text{div } \vec{q} = \text{div}(k \text{ grad } T) \quad (2.28)$$

2.3.3 Genel enerji denklemi

Bir partikülün üç boyuttaki toplam enerji denklemi denklem 2.22 ve denklem 2.28'un toplamıdır.

$$\begin{aligned}
\rho \frac{DE}{Dt} = & [-div(P\vec{U})] \\
& + \left[\frac{\partial(u\tau_{xx})}{\partial x} + \frac{\partial(u\tau_{yx})}{\partial y} + \frac{\partial(u\tau_{zx})}{\partial z} + \frac{\partial(v\tau_{xy})}{\partial x} \right. \\
& + \frac{\partial(v\tau_{yy})}{\partial y} + \frac{\partial(v\tau_{zy})}{\partial z} + \frac{\partial(w\tau_{xz})}{\partial x} + \frac{\partial(w\tau_{yz})}{\partial y} \\
& \left. + \frac{\partial(w\tau_{zz})}{\partial z} \right] + div(k grad T) + S_E
\end{aligned} \tag{2.29}$$

Denklem 2.29’da

S_E = Enerji kaynağı

Burada E terimi, partikülün İç enerjisi (ısı enerjisi) olan “i” ve partikülün kinetik enerjisinin toplamıdır. Kinetik enerji = $\frac{1}{2} (u^2 + v^2 + w^2)$ olarak gösterilir.

$$E = i + \frac{1}{2} (u^2 + v^2 + w^2) \tag{2.30}$$

$$\begin{aligned}
\rho \frac{D \left[\frac{1}{2} (u^2 + v^2 + w^2) \right]}{Dt} \\
= -\vec{U} \cdot grad P + u \left(\frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} \right) \\
+ v \left(\frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} \right) + w \left(\frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} \right) \\
+ \vec{U} \cdot S_M
\end{aligned} \tag{2.31}$$

Denklem 2.29’den denklem 2.31’i çıkartarak denklem 2.32 elde edilir.

$$\begin{aligned}
\rho \frac{Di}{Dt} = & -p div \vec{U} + div(k grad T) + \tau_{xx} \frac{\partial u}{\partial x} + \tau_{yx} \frac{\partial u}{\partial y} + \tau_{zx} \frac{\partial u}{\partial z} \\
& + \tau_{xy} \frac{\partial v}{\partial x} + \tau_{yy} \frac{\partial v}{\partial y} + \tau_{zy} \frac{\partial v}{\partial z} + \tau_{xz} \frac{\partial w}{\partial x} + \tau_{yz} \frac{\partial w}{\partial y} \\
& + \tau_{zz} \frac{\partial w}{\partial z} + S_i
\end{aligned} \tag{2.32}$$

Denklem 2.32’de $S_i = S_E - \vec{U} S_M$.

Denklem 2.32’ü entalpi terimini içerecek şekilde yeniden yazarsak

$h = i + P/\rho$ ve $h_0 = h + 1/2 (u^2 + v^2 + w^2)$ denklemlerini özgül enerji formülünde birleştiresek,

$$h_0 = i + P/\rho + 1/2 (u^2 + v^2 + w^2) = E + P/\rho \quad (2.33)$$

Denklem 2.33'ü denklem 2.29'da yerine koyar ve yeniden düzenlersek,

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho h_0)}{\partial t} + \text{div}(\rho h_0 \vec{U}) - \frac{\partial P}{\partial t} \\ = \text{div}(k \text{ grad } T) \\ + \left[\frac{\partial(u\tau_{xx})}{\partial x} + \frac{\partial(u\tau_{yx})}{\partial y} + \frac{\partial(u\tau_{zx})}{\partial z} + \frac{\partial(v\tau_{xy})}{\partial x} \right. \\ + \frac{\partial(v\tau_{yy})}{\partial y} + \frac{\partial(v\tau_{zy})}{\partial z} + \frac{\partial(w\tau_{xz})}{\partial x} + \frac{\partial(w\tau_{yz})}{\partial y} \\ \left. + \frac{\partial(w\tau_{zz})}{\partial z} \right] + S_h \end{aligned} \quad (2.34)$$

Denklem 2.34'i yeniden düzenlersek, 3 boyutta genel enerji denklemi entalpi terimi için elde edilmiş olur [1].

$$\frac{\partial(\rho h_0)}{\partial t} - \frac{\partial P}{\partial t} + \text{div}(\rho h_0 \vec{U}) = \text{div}(k \text{ grad } T) + \text{div}(\vec{U} \cdot \tau) + S_h \quad (2.35)$$

veya “Del” operatör kullanarak aynı denklemi yeniden yazarsak

$$\frac{\partial(\rho h_0)}{\partial t} - \frac{\partial P}{\partial t} + \nabla(\rho h_0 \vec{U}) = \nabla(k \nabla T) + \nabla(\vec{U} \cdot \tau) + S_h \quad (2.36)$$

Denklem 2.35 ve 2.36, üç boyutta genel ısı transfer denklemleridir ve analitik çözümü henüz başılamamıştır. Çözüm sayısal yaklaşım metotlarıyla yapılabilmektedir. Karmaşık geometriler, ısı-fiziksel özelliklerin sıcaklığa göre değiştiği pratik koşullar, ancak sayısal metotlarla benzeştirme yöntemleriyle ve yaklaşım metotlarıyla çözülebilmektedir.

3. SONLU HACİMLER METODUNUN METALURJİK MODELLEMELERDE KULLANIMI

Dökümhane teknolojisi son yıllarda hatasız ve yüksek verimde döküm parça üretimi için, deneysel sonuçlar, analitik çözümler, sayısal metotlar gibi farklı yöntemlerle modellemeler yapmakta ve deneme-yanılma metodu gibi pahalı yöntemlerden uzaklaşmaktadır. Bu bölümde, analitik çözüm ve sonlu hacimler metotları (sayısal metot) açıklanmıştır.

3.1 Katılaşma Düzeni ve Katılaşma Modelleriyle İlgili Literatür

Fanlar gibi karmaşık geometriye sahip olsalar dahi her döküm parçası L, T ve X kesitler, çıkıntı (boss) ve pervaz (rib) gibi basit geometrilerin birleşiminden oluşmaktadır. Dökümlerde bu basit geometrilerin incelenmesi soğuma sırası (solidification order) denilen katılaşma düzeninin belirlenmesinde önemli rol oynamaktadır. Katılaşma düzeninin belirlenmesi, döküm parçalarında en sık görülen ve dökümhane ekonomisini en fazla etkileyen sıcak yırtılma ve katılaşma çekmesi dediğimiz hata türlerinin dökümlerde oluşmasının önlenmesinde, dökümhane mühendislerine çok önemli bilgiler aktarmaktadır. Sıcak yırtılma ve çekinti boşluğu, karmaşık geometrilerde soğuma hızındaki farklılıklarından dolayı döküm parçalarındaki köşelere yakın yerlerde meydana gelmektedir. Bu hataların geleneksel yollarla nasıl önleneceği ve çözüm yolları besleyici hacmi, sayısı, yer, çil ve fin kullanım teknikleri literatürde mevcuttur [4-16]. Doğal olarak bu tekniklerin tamamı, döküm parçası içinde son katılaşma noktasının veya noktalarının doğru belirlenmesi halinde çözüm üretmektedirler.

Uygun besleyici ve yolluk tasarımı konusundaki ilk önemli çalışma Chvorinov tarafından yapılmıştır. Chvorinov, sonuçları çok kullanılan bu ünlü çalışmasında, yarı-sonsuz kütükte katılaşma sürelerini incelemiş ve katılaşma süresinin yarı-sonsuz kütüğün hacmi ile doğru, yüzey alanı ile ters orantılı olduğunu bulmuştur. Chvorinov, çalışmasını saf metaller üzerinde yapmasına rağmen, katılaşması bir sıcaklık aralığında olan ikili ve üçlü alaşımlar için de sıkça kullanılmaktadır [17].

Chvorinov kuralı daha sonra basit kavisler (eğrilik) içeren döküm parçaları için revize edilmiştir [18, 19]. Basit geometriler için Adams ve Taylor tarafından geliştirilen ilk analitik denklemin sonuçlarının; Caine (1949) tarafından yapılan fiziki gözlemlere göre, özellikle kuma dökülen çelik parçalarda deneysel sonuçlarla gayet uyumlu olduğu görülmüştür [20].

Döküm geometrisinin ve döküm hızının katılma süresi üzerindeki etkisi Loper ve LeMahieu'nun deneysel çalışmasında gösterilmiştir. Besleyici hacmi, şekli ve bölgesinin belirlenmesinde kullanılan en etkili metotlardan olan "Modulus Metodu" Wlodawer tarafından geliştirilmiştir [8]. Bu metot, daha sonra Heine ve çalışma arkadaşları tarafından daha da detaylandırılmıştır [21-23].

Loper ve Kotschi, modulus metodu kullandığı bir dizi çalışmada, basit geometrilerde katılma düzenini belirlemişlerdir [24, 25]. Bu çalışmaların devamında, karmaşık geometrilerde karşılaşılan ıraksak ve yakınsak ısı transferi konusunda da çalışılmış ve bu geometrilerin soğuma düzenine etkisi incelenmiştir [26, 27]. Loper, Kotchi ve Çopur (1986) çalışmalarında, sık kullanılan döküm geometrilerindeki katılma düzenini mikro bilgisayar ile Modulus yöntemi kullanarak modellemişlerdir. Bu çalışmayla, basit geometrilerdeki katılma düzeni çok hızlı ve kabul edilebilir bir doğrulukta elde edilmiştir [28].

Döküm endüstrisine ve dökümhane mühendislik metotlarına çok katkıda bulunmasına rağmen yukarıda özetlenen çalışmaların tamamı, basit geometriler için geliştirilen metotlardır ve deneysel sonuçları içermektedirler. Pratikte karşılaşılan döküm geometrileri karmaşık ve çözümler bu kadar basit değildir. Bu sebepten, yeni yaklaşımların ortaya çıkması kaçınılmaz olmuştur.

Kompleks döküm geometrilerde karşılaşılan ısı transferi çözümlerinin 3-Boyutlu oluşu, analitik çözümleri genelde imkansız kılmaktadır. Bu sebepten, gelişen bilgisayar kapasite ve hızına da bağlı olarak SFM/SEM (Sonlu Farklar ve Sonlu Elemanlar metotları) (FDM/FEM: Finite Difference Method/Finite Elements Method) gibi yeni metotlar geliştirilmiş ve göreceli olarak hızlı çözümler elde edilmiştir [29]. Bu nümerik çözümlerde 2 veya 3 boyutlu geometrilerde yaklaşım çözümleri kullanılmaktadır. Bu metotlar, basit Chvorinov modulus metoduna göre daha gelişmiş çözümler sunmasına rağmen, metal, kalıp, kullanılan çil ve diğer yardımcı malzemeler (endotermik-ekzotermik malzemeler) için ısı yayınma

katsayısı, yoğunluk ve diğer fiziksel özellikler hakkında bilgi sahibi olunmasını gerektirmektedir. Son 20 yılda yapılan çalışmalarla bu eksik önemli ölçüde giderilmiş ve endüstrinin kullanımına sunulmuştur.

SFM metodu kullanılarak basit geometrilerde katılaşmayı inceleyen Pehlke, bu yolla ilk besleyici tasarımını da yapmıştır [30-34]. SFM ve SEM için gereken fiziksel özelliklerin belirlenmesi için yapılan çalışmalarda, değişik presleme kuvvetleri (ramming) ve değişik ilave katkı malzemeleri sonucunda ortaya çıkan kalıp yoğunluğu ve ısı iletkenlik değerleri Rao ve William tarafından [35], değişik kalıp malzemelerinin ısı emme kapasiteleri ise Sanders ve Doelman tarafından [36] incelenmiştir. Söz konusu çalışmalar çok genel ve özgün sonuçlar ortaya çıkarmamasına rağmen, değişik kalıplama teknik ve kalıp malzemelerinin ısı absorpsiyon kapasitelerini anlamamıza yardımları büyük olmuştur.

Stoehr, kum kalıp içine dökülen parçanın döküm tasarımını SFM kullanarak incelemiş ve döküm parçası üzerindeki ağ oluşumu ve karmaşık geometrileri soğuma karakteristiğini bozmadan basitleştirme konularında önemli ipuçları vermiştir [37]. Hardley ve Bobcock çalışmalarında kum kalıpların termal özelliklerini incelemiş, değişik kalıp malzemeleri ve nem oranlarındaki ısı iletkenliği grafik halinde verilmiştir [38]. Wray, katılaşılan çelikte sıcaklığa bağlı değişen mekanik ve fiziksel özellikleri incelemiştir [39].

Stoehr ve ark. döküm kalıbını 2 boyuta basitleştirerek kalıptaki metal akış ve dolum modelini çalışmışlardır [40]. Domanus ve ark. çalışmalarında 2 boyutlu olarak döküm ve besleyici dolum süresi ve modelini aynı zamanda da katılaşmayı incelemişlerdir [41].

Aleksandrov ve ark. Çalışmalarında V şeklindeki döküm parçasında katılaşmayı 3 boyutlu olarak incelemişlerdir [42]. Parlona ve Mossi ise kum ve seramik kalıp içinde saf demirin katılaşma modelini 2 boyutta incelerken Ansys paket programını kullanmışlardır [43]. Literatürde ısı transferi ve akış problemlerini inceleyen çok sayıda özgün makale mevcuttur [44-63]. Bu çalışmalarla nümerik metotlar için gereken ısı özellikler açıklanmış, kullanılmış ve deneysel olarak da doğrulukları gösterilmiştir. Bu çalışmalardan en özgün olanı, Miettinen tarafından yapılmış olan çalışmadır [60]. Bu çalışmada, geliştirilen bir algoritma ile değişik kompozisyondaki metal malzemeler için yoğunluk, entalpi ve ısı iletkenlik hesaplanmaktadır.

Hesaplanan değerlerin, özellikle düşük karbonlu çelikler için deneysel sonuçlar ile çok iyi uyum gösterdiği gözlemlenmiştir. Bu tür çalışmalarla, endüstride ısı değerleri belirleme zorluğu yaşayan mühendislere büyük kolaylık sağlanmıştır. Isıl zelliklerin bilinmesi sayesinde, uygun ticari paket programların, geçerli sınır koşulları verilmek suretiyle, katılaşma gibi çok özel bir alanda da kullanılabileceği konusunda genel bir fikir oluşmuştur. Başlangıçta her farklı tasarım için ayrı yazılan SFM/SEM kodları daha sonra geliştirilen paket programlarla, kullanımları daha kolay hale gelmiştir. Zaman içinde bilgisayarların grafik özellikleri ve işlemci hızlarının artmasıyla birlikte, analiz edilecek parçayı özellikle akış problemleri için üç boyuta incelemeyi olanaklı hale getiren Sonlu Hacimler Metodu kullanan paket programlar ve onların hızlı sonuçları dökümhane ekonomisine önemli katkılarda bulunacaktır. SFM/SEM/SHM ile ilişkili çok sayıda kitap ve makale literatürde sunulmaktadır [1-3,64-72].

3.2 Sonlu Hacimler Metodu ncesi Modellemeler – Analitik zm

SHM öncesinde analitik çözüm, deneysel gözlemler ve deneysel gözlemlere bağlı geliştirilen grafikler, modulus metodu, daha sonra sonlu farklar metodu ve sonlu elemanlar metodu gibi çeşitli araçlar kullanılmıştır. Ancak, deneysel sonuçların hakim olduğu grafikler hariç, sayısal metotlar dışındaki metotların hemen hemen tamamı analitik çözüme dayalı olarak geliştirilmiştir. Bu sebepten analitik çözümün sayısal metotlar hariç diğer metotlarda temel özellik olma durumu söz konusudur.

Analitik çözümde, çözüm öncelikle sonlu kütle (finite body) için geliştirilmiş ve daha sonra yarı-sonsuz kütlelere (semi-infinite body) uygulanmıştır. Kum kalıba yapılan dökümlerde, dökümü yapılan metal, kum kalıp malzemesine göre çok daha iyi iletkenidir. Bundan dolayı, katılaşma hızı, metalin ısı özelliklerinden ziyade kalıbın ısı özelliklerine bağlıdır ve metalin ısı iletkenliğinin pratikte katılaşma hızı üzerinde hemen hemen hiçbir etkisi yoktur. Kum kalıplarda, kalıbın dış yüzeyi katılaşma esnasında hiç ısınmamaktadır. Yani tüm katılaşma ısısı, kalıp tarafından dış havaya transfer edilmek yerine, kalıp malzemesinin kendisi tarafından emilmektedir [14].

Bu durumda, kalıbın katılaşma esnasında ortaya çıkan Q kadar gizli ısıyı t kadar zamanda emeceğini düşünerek,

$$Q = \int_0^t A \cdot q_{(at\ x=0)} \cdot dt = \frac{A \cdot k_k \cdot (T_m - T_0)}{\sqrt{\pi \cdot \alpha}} \int_0^t \frac{dt}{\sqrt{t}} Q$$

$$= \frac{2 A \cdot k_k \cdot (T_m - T_0)}{\sqrt{\pi \cdot \alpha}} \sqrt{t} \quad (3.1)$$

V hacmindeki metalin tamamen katılaşması için, bu hacmin sahip olduğu tüm gizli ısının ortamdan uzaklaştırılması gerekir. Buna göre

$$Q = \rho_m \cdot V \cdot h_f \quad (3.2)$$

Her iki denklemi eşitleyecek olursak,

$$\frac{2 A \cdot k \cdot (T_m - T_0)}{\sqrt{\pi \cdot \alpha}} \sqrt{t} = \rho_m \cdot V \cdot h_f$$

$$\sqrt{t} = \frac{\rho_m \cdot V \cdot h_f}{2 A \cdot k_k \cdot (T_m - T_0)} \sqrt{\pi \cdot \alpha} \text{ denklemde } \alpha = \frac{k_k}{\rho_k \cdot C_{p,k}} \text{ yerine koyarsak,}$$

$$t = C \cdot \left(\frac{V}{A}\right)^2 \text{ olur. Denklem de C sabiti}$$

$$C = \frac{\pi}{4} \left(\frac{\rho_m h_f}{T_m - T_0}\right)^2 \left(\frac{1}{\rho_k \cdot C_{p,k} \cdot k_k}\right)$$

veya

$$\frac{V}{A} = \text{Katılaşan Metal kalınlığı} = S = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \underbrace{\left(\frac{T_m - T_0}{\rho_m h_f}\right)}_{\text{Metal Etkisi}} \underbrace{\sqrt{\rho_k C_{p,k} k_k}}_{\text{Kalıp Etkisi}} \sqrt{t} \quad (3.3)$$

Metal Etkisi Kalıp Etkisi

veya

$$t = \text{Katılaşma süresi} = \frac{\pi}{4} \left(\frac{\rho_m h_f}{T_m - T_0}\right)^2 \left(\frac{1}{\rho_k C_{p,k} k_k}\right) \left(\frac{V}{A}\right)^2 \quad (3.4)$$

Denklem 3.3 ve denklem 3.4'de

S = Katılaşan metalin kalınlığı (cm)

V = Katılaşan metalin hacmi (cm³)

A = Kalıp-metal metal yüzey alanı (cm²)

T_m = Metalin ergime sıcaklığı (°C)

T₀ = Ortam sıcaklığı (kalıp sıcaklığı) (°C)

ρ_m = Metalin yoğunluğu (g/cm³)

h_f = Metalin gizli ısısı (Katılaşma ısısı)(cal/g)

ρ_k = Kalıp yoğunluğu (g/cm³)

$C_{p,k}$ = Kalıp özgül ısısı {Cal/[(g)(°C)]}

k_k = Kalıp ısı iletkenliği {Cal/[(cm)(°C)(sn)]}

t = katılaşma süresi (sn)

Denklem 3.3 ve denklem 3.4’de, döküm sıcaklığının metalin tam ergime sıcaklığında olacağı varsayılmıştır. Eğer aşırı ısıtma (superheat) varsa, denklem 3.3’deki, h_f teriminin $h'_f = h_f + C_{p,l}\Delta T_s$ denklemi ile yer değiştirmesi gerekir. $C_{p,l}$ sıvı metalin özgül ısısı, ΔT_s ise °C birimli aşırı ısıtmadır [14].

Denklem 3.3, döküm dünyasında çok bilinen Chvorinov kuralı olarak geçmektedir. Denklem sonuçları açısından, döküm veya kalıbın herhangi bir parçasının ısı olarak doymuş olmadığı durumlarda (maça, iç köşeler ve konkav yüzeyler gibi) pratikle uyumlu sonuçlar vermektedir [14-17].

Chvorinov kuralı pratikte çok kullanılmasına rağmen, karmaşık şekiller için değiştirilmeye ihtiyaç duyulmaktadır. Belirlenen iki boyutsuz (dimensionless) parametrelerle bu hassasiyet sağlanmaktadır. Bu parametreler,

$$\beta = \frac{V/A}{\sqrt{\alpha \cdot t}} \quad (3.5)$$

$$\gamma = \left(\frac{T_m - T_0}{\rho' \cdot h_f} \right) \rho_k \cdot C_{p,k} \quad (3.6)$$

Şeklinde belirlenir. Literatürde değişik basit şekiller için β ve γ değerlerinin verildiği grafikler mevcuttur. Ancak, çıkan sonuçlardan, eğer döküm konturu ihmal edilirse, katılaşma zamanında oluşacak sapmanın %40-%50 mertebelerine vardığı görülmektedir [14].

Bu nedenle pratik uygulamaları tam yansıtmayan varsayımlar ve basit şekillerin hesaplanabileceği analitik çözümlerin, fan dökümü gibi, metal, kalıp, maça ve soğutucunun bulunduğu ve her birisinin çok karmaşık geometrilere sahip olduğu, katılaşma esnasında birbirlerini değişik şekillerde etkiledikleri durumları hesaplamaları ve doğru katılaşma süreleri vermeleri imkansız görünmektedir [14,17].

3.3 Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) – Ansys CFX

Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği, akışkanlar mekaniği, ısı transferi ve bu iki konuyla ilgili tüm fiziksel olayları içeren sistemlerin analizini kapsamaktadır. Geliştirilen ticari paketler, gerek akademik alanda gerekse de endüstride gittikçe artan bir oranda kullanılmaktadır [1,3]. HAD ticari paket programları

- Uçak aerodinamiği
- Gemi hidrodinamiği
- İçten yanmalı motorlar ve gaz tribünleri
- Pompalar ve akış
- Isı transferi
- Elektrik ve elektronik devre soğutma sistemleri
- Kimyasal prosesler
- HVAC (Isıtma, Havalandırma ve Soğutma)
- Hidroloji

alanlarında yoğun olarak kullanılmaktadır.

İlk 1960’larda uçak endüstrisinde başlayan kullanım, daha sonra HAD programlarının ticari hale gelmesiyle hızla diğer alanlara da yayılmıştır.

İlk yatırım maliyetine (donanım ve yazılım) ilave olan yıllık bakım ücretleriyle çok ucuz bir yatırım olmamakla birlikte, deneysel masrafları minimuma indirmesi sebebiyle, HAD kullanımı gittikçe artmaktadır.

HAD temel olarak, akış problemini çözen nümerik bir algoritma ile yapılandırılmış kodlar toplamıdır. Çözüm sonrasında, sonuçları görsel olarak inceleyebilmek için her HAD ticari paket programı gibi Ansys’de kullanıcı uyumlu ara yüzlere sahiptir. Bütün HAD paket yazılımlarında olduğu gibi Ansys CFX’de de üç ana kısım bulunmaktadır; Ön işlemci (Pre-processor), çözücü (solver) ve son işlemci (post-processor) [1].

3.3.1 Ön işlemci

Kullanıcıların, uyumlu ara yüzeylerle, akış probleminin verilerini (geometri, malzeme özellikleri ve sınır koşullar) yazılıma girildiği bölümdür. Bu veriler, yazılım tarafından çözücünün istediği format ile depolanır ve çözücüye uygun formatta aktarılır. Bu bölümün ana kısımları;

- Çalışma alanı geometrisinin belirlenmesi veya bu çalışmada olduğu gibi başka yazılımda çizilmiş geometrinin HAD'a aktarılması,
- Ağ yapısının oluşturulması,
- Modellenecek fiziksel olayın seçimi,
- Çalışma alanlarının fiziksel özelliklerinin belirlenmesi ve yazılıma girilmesi,
- Çalışma alanlarının uygun sınır koşullarının belirlenmesi ve yazılıma girilmesidir.

Bir akış probleminin (hız, basınç, sıcaklık, vb) çözümü her bir hücredeki düğümlerde elde edilir. Çözümün doğru olması, çalışma alanlarında yaratılan ağ yapısındaki hücre sayısı ile doğru orantılıdır. Genel olarak daha fazla hücre sayısı (daha küçük hücre boyutu) daha doğru sonuçlar üretir. Çözüm için gereken bilgisayar kapasitesi ve yazılımın çözümleme zamanı ise artan hücre sayısı ile artar. Yani, daha küçük hücre boyutu, yazılımın çalışması için gereken bilgisayar kapasitesini ve çözümleme zamanını artırmaktadır. Genelde en uygun çözüm, büyük sapma ve varyasyonların olduğu çalışma alanlarında küçük hücre, daha kararlı özelliklerin bulunduğu kısımlarda ise daha büyük hücreler üreterek elde edilir. Ticari HAD yazılımlarında, kullanıcıların kolay çözüm elde etmesi için otomatik ağ yapısı oluşturma özellikleri bulunmaktadır. Ancak, bu özellik basit geometriler ve özellik varyasyonlarının çok farklı olmadığı alanlarda kullanılır. Karmaşık geometri ve fiziksel olaylarda, uygun ağ yapısı için kullanıcının otomatik ağ yapısı oluşturma durumuna müdahale etmesi beklenir. Bu çalışmada, çalışma alanları üstünde Ansys'in otomatik ağ yapısı oluşturma fonksiyonları kullanılmış, ancak daha sonra değişik çalışma alanlarındaki ısı dağılımı gibi karışık fiziksel olayları modelleyebilmek için Ansys'in "Proximity" ve $t=0$ anında kalıp-maça çalışma alanları ve metal çalışma alanı arasındaki sıcaklık farkını çözebilmek için Ansys'in "Inflation" özellikleri kullanılmıştır. Bu konuda

detaylı bilgi bölüm 4.4.1’de verilmiştir. Bir modellemede harcanan zamanın önemli kısmı ön işlemci bölümünde harcanmaktadır.

3.3.2 Çözücü

Ansys CFX’de çözücü aşağıdaki algoritmik adımları takip etmektedir.

- Çalışma alanı içinde yaratılmış bütün kontrol hacimlerindeki akışkana ait tüm korunum denklemlerinin bütünleştirilmesi,
- Bütünleştirilmiş denklemlerin cebirsel denklem sistemleri haline getirilmesi,
- Cebirsel denklemlerin iteratif metot ile çözülmesi.

3.3.3 Son işlemci

Genel sonuçların tablo haline getirildiği veya grafik analizler olarak kullanıcıya sunulduğu bölümdür.

- Çalışma alanlarının,
- Çizgisel veya renkli katılaşma sınırlarının,
- 2 Boyut veya 3 Boyutta görsellerin,
- Çalışma alanlarının ayrı ayrı veya bir bütün halinde tetkiklerinin

sunulduğu kısımdır.

3.4 Ansys CFX Geçici Rejim (Transient) Modelleme

Ansys CFX’de ısı transfer modellemesi, modellenecek kütlenin sıvı veya katı olmasına ve ısı transfer modelinin sürekli rejim (steady state) veya geçici rejim (transient) olmasına göre farklılıklar göstermektedir.

Genel anlamda Ansys CFX tarafından çözümlenen enerji taşınım denklemi, denklem 3.7’de gösterilmektedir [60].

$$\underbrace{\frac{\partial(\rho \cdot h_0)}{\partial t}}_{\text{Geçici Rejim (Transient)}} - \underbrace{\frac{\partial P}{\partial t} + \nabla(\rho \cdot U \cdot h_0)}_{\text{Taşınım (Convection)}} = \underbrace{\nabla(k \nabla T)}_{\text{Isı İletimi (Conduction)}} + \underbrace{\nabla(U \cdot \tau)}_{\text{Viskoz İş (viscous Work)}} + \underbrace{S_h}_{\text{Enerji Kaynağı (Energy Source)}} \quad (3.7)$$

Denklemde,

ρ = Yoğunluk

P = Basınç

U = Vektörel Hız

h_o = Toplam Entalpi

k = Isıl iletkenlik

T = Sıcaklık

τ = Gerilme

Denklem 3.7, enerji dengesinde bulunması muhtemel bütün bileşenleri kapsayan denklem 2.36'ya eşittir.

Sıvı ortamlar için tüm enerji bileşenleri bu genel denklem (3.7) içinde mevcuttur. Enerji kaynağı ise modellenecek olaya göre değişmektedir ancak bu çalışmanın kapsamında çalışılan modellerde, dış enerji kaynağı sıfırdır çünkü döküm sonrasındaki soğumada, malzemenin enerjisinin kalıp malzemeleri tarafından emilmesi ve oradan da taşınımıyla dış ortama verilmesi modellenmektedir, dış bir ısı kaynağı yoktur.

Yüksek sıcaklıklardaki katılaşma fiziğine ait tüm ısıl özelliklerin belirlenmemiş olması, döküm parçası katılaşıırken görülen tüm fiziksel ve kinetik etkileri hesaba alan modellemeyi zorlaştırmaktadır. Bazı katılaşma verileri saf metaller için geliştirilse bile, ikili veya üçlü alaşım sistemlerinde katılaşma fiziğinin çok karmaşık oluşu ve sıvı fazdan katı faza geçişteki sıcaklığa bağlı %sıvı ve %katı oranlarının aynı zamanda soğuma hızına da bağlı olması, endüstride yapılan çalışmalarda bazı yaklaşım metodlarını kullanmayı ön plana çıkarmıştır. Katılaşma esnasında sıvı+katı faz içinde katı parçacıkların yüzmeleri, katı ve sıvı parçacıklar arasındaki yoğunluk farkından sıvı ve katı metalin yer çekimi etkisiyle hareket etmeleri, katılaşma esnasında ilerleyen katı faz yüzeyinin sıvı faz içinde ilerlemesi esnasında sebep olduğu alaşım elemanı atom yığılmaları/azalmaları (segregasyon), dallantılar arası akışlar (interdendritic flow) v.b. gibi fiziksel olayların her birisi önemlidir. Ancak, bu çalışmada yaratılan modele bu fiziksel olaylar dahil edilmemiştir. Katılaşmanın asıl ve en önemli motor gücünün, kalıp malzemesinin ısı emme gücü ve parça geometrisi olduğu kesindir (8, 10-12, 14-17, 19-22, 24-27, 30, 32, 43, 44).

Modelde, kum kalıp ve içine dökülen metalin doğal taşınım ile soğuması ve kum kalıbın dış yüzeyindeki konveksiyon tip ısı transferi çalışılmıştır.

CFX ısı transferinde değişik modelleme yöntemleri kullanabilmektedir. Bunlar,

1. İzotermal model: İdeal gazlar için kullanılan bu modellemede, ısı transfer denklemleri çözülmez, sadece akışkanın yüksek sıcaklık özellikleri belirlenir.
2. Isıl enerji modeli: Sıcaklıkla değişen yoğunluğun etkisi ihmal edilerek, enerji denklemleri çözülen bu model, sabit özgül ısı (specific heat) ve düşük hızlı akışkanlarda kullanılmaktadır.
3. Toplam enerji modeli: Bu modelleme, entalpi üzerine kurulmuştur.

Bu çalışmada, toplam enerji modeli kullanılmıştır.

Dökümlerdeki ısı transferinin tam değerlendirilmesi için döküm sonrasındaki soğuma esnasında sıvı → sıvı+katı → katı faz değişikliklerinin tamamı süresince ısı-kütle transferi ve momentum denklemlerinin çözümü gerekmektedir. Ancak, birçok uygulamada, sadece doğal taşınım ile ısı transferi dikkate alınarak ve sıvı-katı rejimlerini tek bir çalışma alanı olarak modellenerek, yeterli hassasiyette sonuçlar elde edilmektedir [63]. Bu basitleştirilmiş modelin sahip olduğu kısmi diferansiyel denklem, denklem 3.8’de belirtilmiştir.

Modelde, metal çalışma alanındaki (domain) sıvı ve katı fazlar, tek faz olarak kabul edilmiş ve katılaşma esnasında metalin atmak zorunda olduğu katılaşma ısısının (latent heat), zamana bağlı olarak kalıp malzemesi tarafından emilmesi modellenmiş ve çalışma alanlarındaki sıcaklık dağılımı zamana bağlı olarak elde edilmiştir [68].

$$\underbrace{\frac{\partial}{\partial t} (\rho(T) C_p(T) T)}_{\text{Geçici (Transient)}} = \underbrace{\nabla(k(T) \nabla T)}_{\text{Isı İletimi (Conduction)}} \quad (3.8)$$

Denklem 3.8’de,

ρ = Yoğunluk – sıcaklığın fonksiyonu

C_p = Özgül ısı – sıcaklığın fonksiyonu

k = Isıl iletkenlik – sıcaklığın fonksiyonu

T = Sıcaklık

Sürekli rejim (steady state) tanım olarak zaman içinde sıcaklık değişim hızının sabit kalmasıyla oluşan modeldir. Ancak, gerçek yaşamda hemen hemen bütün durumlarda görülen ısı transfer tipinde, sıcaklık değişim hızı sabit değildir, zamanla değişir ki bu tip ısı transferi geçici rejim ısı transferidir.

Önemsiz bileşenlerin ihmal edilebileceği ve kararlı ısı transferi modellemesinin gerçek duruma yakın sonuçlar çıkardığı her durumda, kararlı ısı transferi modellemesi, bu tür modellemenin daha kolay olması, kısa zaman alması ve bilgisayar çalışma zamanları (maliyeti) hesaba alındığı zaman kullanılması gereken model olduğu açıktır. Ancak, modellemenin de mümkün olduğunca gerçek duruma yakın olması ve çok daha hassas sonuçlar çıkarması karşılığında modelleme maliyeti arasında bir dengenin de bulunması gerekmektedir [67, 68].

Metalin soğuması ve ısıtılması gibi kompleks modellerde, metalin sahip olduğu özgül ısının fonksiyonu ve faz değişimleri esnasında metal tarafından emilen veya salıverilen katılma ısı (latent heat), parça geometrisi ve kalıp malzemelerinin ısı emme kabiliyeti (termal difüzyon) zamana bağlı sıcaklık değişimini sabit kılmamaktadır ve soğuyan metalin modellendiği çalışmalarda kullanılması gereken ısı transfer modeli süreksiz (transient) tip ısı transfer modelidir [67, 68].

3.5 Değişken Yoğunluk ve Özgül Isıya Sahip Malzemelerin Modellenmesi

Sıcaklığa ve basınca bağlı olarak değişen özellikleri modele katmak için $h = (T, P)$ çizelgesi oluşturulmaktadır. Bu çizelge yoğunluk (ρ) ve özgül ısının (C_p) integralinden hesaplanmaktadır [67].

$$dh = C_p dt + \frac{1}{\rho} \left[1 + \frac{T}{P} \left(\frac{\partial P}{\partial T} \right)_P \right] dP \quad (3.9)$$

Üst ve alt sıcaklık/basınç limitleri için entalpi tablosu formül 3.10'a göre hesaplanmaktadır. $(P_1 T_1)$ koşulundan $(P_2 T_2)$ noktasına bir değişim olduğu zaman, entalpi'deki değişim genel bir formülle (Denklemler 3.10) iki terim halinde, birinci terim sabit basınç ve ikinci terim sabit sıcaklık durumlarında geçerli olacak şekilde, hesaplanmaktadır.

$$h_2 - h_1 = \int_{T_1}^{T_2} C_p dT + \int_{P_1}^{P_2} \frac{1}{\rho} \left[1 + \frac{T}{P} \left(\frac{\partial P}{\partial T} \right)_P \right] dP \quad (3.10)$$

CFX'in, (3.10) numaralı formülle verilen integralin hesaplaması için yoğunluk ve özgül ısı değerlerinin kısmi diferansiyel formunda yazılması gerekir. Buna göre,

$$\left. \frac{\partial}{\partial P} \right|_T \left(\frac{\partial h}{\partial T} \right)_P = \left. \frac{\partial}{\partial T} \right|_P \left(\frac{\partial h}{\partial P} \right)_T \quad (3.11)$$

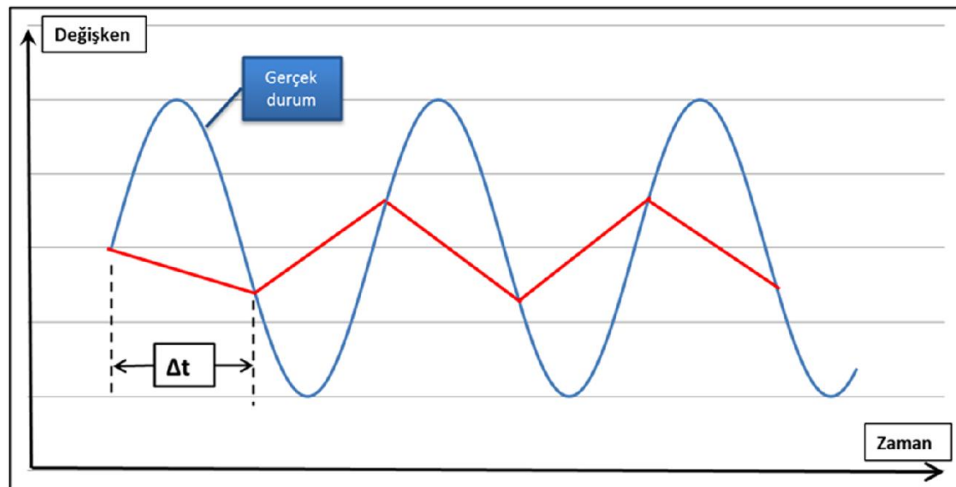
Formül (3.11), formül (3.10) içinde yerine koyulduğu zaman,

$$\left(\frac{\partial C_p}{\partial P} \right)_T = \frac{1}{\rho^2} \left[T \left(\frac{\partial^2 P}{\partial T^2} \right)_P - \left(1 + \frac{T}{P} \right) \left(\frac{\partial P}{\partial T} \right)_P + 1 \right] \quad (3.12)$$

(3.12) numaralı formül elde edilir [67].

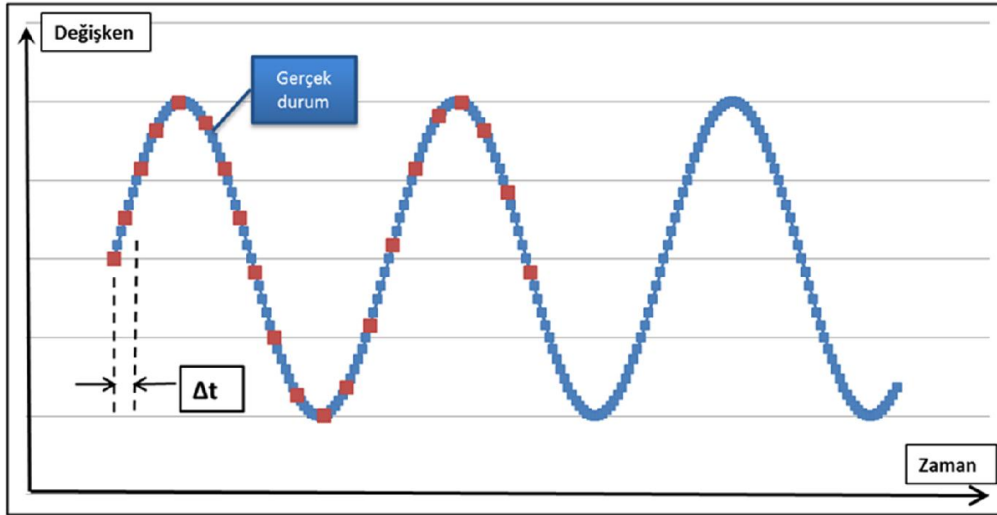
3.6 Geçici Rejim Zaman Adımı Hesabı

Modelleme olarak daha karmaşık ve bilgisayar çalışma süresi daha uzun olan süreksiz ısı transfer denklemleri, SHM ile çözülürken, bütün ağ düğümlerindeki sıcaklık değişimini içeren matris, her zaman adımı için çözülmemektedir. Ayrıca, çözümün yakınsaması için verilen limit değere çözümü yaklaştırmak için, her zaman adımı kendi içinde iterasyonlara tabi tutulmaktadır. Çözümün yakınsaması için zaman adımları mümkün olduğunca küçük tutulmalıdır ancak daha küçük adım daha uzun bilgisayar çalışma süresi demektir. Bu sebepten, bir kaç deneme yaptıktan sonra, çözüm sonuçlarına bakarak adımlama daha hassas bir şekilde belirlenmektedir.



Şekil 3.1 : Uzun zaman adımlı modelleme grafiği [66].

Zaman adımı büyük tutuldukça çözüm süresi kısalmışken, bir değişkeni gerçeğe yakın bir şekilde modelleme şansı azalmaktadır. Bazı çözüm noktaları, gerçek çözüm üzerinde olsalar dahi, bir çözüm seti olarak gerçek durumdan uzak olacaktırlar. Şekil 3.1'deki örnekte, gerçek fiziksel olay bir sinüzoidal harekettir. Zaman adım Δt , büyük olursa çözüm kırmızı çizgilerle belirlenen adımlar olmakta ve gerçek fiili duruma göre sapma büyük olmaktadır. Ancak, daha küçük zaman adımlarının kullanıldığı Şekil 3.2'de, gerçek fiziksel olay tamamıyla modellenmiş olur. Modelin kurucusu, zaman adımı hesaplamak için önerilen basit denklemleri kullanarak ilk bilgisayar çalışması için bir tahminde bulunabilir. Bu zaman adımının yakınması üzerine çalışma zamanı ve analiz edilen olayın model sonuçlarının gerçek fiziksel olaylara olan yakınlığını irdeleyerek, zaman adımını kısa veya uzun olarak yeniden ayarlayabilir.



Şekil 3.2 : Kısa (uygun) zaman adımlı modelleme grafiği [66].

Ansys CFX programı, modelin ilk kurulma aşamasında zaman adımını belirlemek için önerdiği hesap biçimi denklem 3.13'de gösterilmiştir [67].

$$\Delta t = \frac{\Delta x_{ort}^2 \cdot \rho_{ort} \cdot C_{p,ort}}{4 \cdot k_{ort}} \quad (3.13)$$

Bu formülden hesaplanan Δt tavsiye edilen zaman adımını (iteration time step) vermektedir. Denklemden,

$$\Delta t = \text{Zaman adımı (sn)}$$

$$k_{ort} = \text{Ortalama ısı iletkenlik [W/(m K)]}$$

$$x_{ort} = \text{Ortalama hücre uzunluğu (m)}$$

ρ_{ort} = Ortalama yoğunluk (kg/m³)

$C_{p,ort}$ = Ortalama özgül ısı [J/(kg K)=(W.sn)/(kg K)]

3.7 Sonuçları Açısından Ansys CFX ve Analitik Çözümün Mukayesesi

Sonuçları açısından Ansys CFX, analitik metot ve sonuçların gösterimi birbirleriyle mukayese edilebilir değildir. Ancak, bu çalışmada kullanılan Ansys CFX (HAD) ve analitik çözümün temel farklılıkları aşağıda özetlenmiştir.

- Analitik yöntem genelde iki boyutlu ve simetri sebebiyle iki boyuta indirgenebilen üç boyutlu veya çok basit üç boyutlu geometriler için kullanılırken, Ansys CFX üç boyutlu karmaşık geometriler için çözüm sağlayabilmektedir.
- Analitik metot, döküm geometrisindeki yüzey şekil farklılıklarını dikkate almamaktadır. Analitik metot için modül hesaplamasında kullanılacak toplam yüzey alanı önemlidir ve bu alanın içbükey veya dışbükey olması önem taşımaz. Ancak, yüzey geometrisi katılma düzeninde önemli etkilere sahiptir. Ansys CFX, çözümde yüzey geometrilerini hesaba almaktadır.
- Analitik metot toplam geometri için genel sonuçlar verirken, Ansys CFX, model geometrisindeki bölgesel noktalar için de çözüm sağlayabilmektedir.
- Endüstriyel uygulamalarda kalıp, birden fazla bölümden meydana gelebilir. Kalıp geometrisinin, kalıp ve maça gibi, malzeme ve dolayısıyla ısı özellikleri açısından birbirinden farklı ve katılma düzenine farklı etkileri olan bölümlerden meydana gelme durumu pratikte sık karşılaşılmaktadır. Bu durumda analitik metot ya esas olan kalıp malzemesini hesaba almakta ya da kalıp ve maçanın ortalama değerleriyle çözüm vermektedir. Ancak, Ansys CFX’de birden fazla kalıp bölümünün ayrı malzemeler olarak modellenenebilmesine ve her malzeme grubuna ayrı ısı özellikleri atanabilmesine imkanı vermektedir.
- Analitik metot sadece katılma süresini hesaplamaktadır. Ansys CFX ise geometri içinde herhangi bir noktada zamana bağlı soğuma grafiklerini verebilmektedir. Bu çalışma kapsamında olmasa da, bu bilgi özellikle modeldeki bazı noktalarda çok hızlı soğuma potansiyeli olup olmadığını anlamak için de önemlidir. Bir geometrik noktanın, hızlı veya yavaş soğuma

durumlarında, metalurjik yapısal değişikliklerin nasıl gelişeceğini de tahmin etmek açısından önemli bilgi sağlamaktadır.

- Isıl özellikler (yoğunluk, entalpi/özgül ısı, ısı iletim katsayısı) sıcaklığın bir fonksiyonudur. Analitik metotta, bu ısı özellikler sabit (sıcaklığa göre değişmez) kabul edilmektedir. Ansys CFX’de ise ısı özellikler, sıcaklığın bir fonksiyonu olarak belirlenir ve çözüm esnasında çözüm yapılan ağ hücrelerinde ilgili sıcaklığa karşılık gelen ısı özellikler hesaba alınır.
- Analitik metotta, katılaşmanın (saf metallerde olduğu gibi) sabit sıcaklıkta meydana geldiği varsayımı ile çözüm yapılmaktadır. Bu varsayım düşük alaşımlı çelikler için geçerli olsa dahi günümüz teknolojisinde yüksek alaşımlı çeliklerin ve dökme demirlerin büyük yoğunlukla kullanıldığı durumlarda geçerliliğini yitirmektedir. Katılaşmanın bir sıcaklık aralığında olduğu ikili veya üçlü alaşım sistemleri, analitik çözüm tarafından modellenememektedir. Ansys CFX, katılaşmanın sıcaklık aralığında olduğu durumları, özgül ısının sıcaklığın fonksiyonu olarak girildiği modellerle hesaplayabilmektedir.
- Analitik model zamana bağlı bir çözüm sağlayamaz iken Ansys CFX geçici rejim analizine imkan vermektedir.
- Analitik model, matematik olarak çözümü vermesine rağmen, Ansys CFX grafik özellikleri sebebiyle çözümü son işlemci kısmında üç boyutlu olarak vermektedir. Her bir çalışma alanında görsel olarak elde edilecek sonuçlar, hem fiziksel olayı algılamak hem de sonuçları irdelemek açısından önemlidir. Geometride bazı hassas noktalar, görsel olarak büyütülebilmekte ve sonuçlar daha detaylı incelenebilmektedir.
- Analitik metot, diğer analizler için girdi sağlayamaz iken, bu çalışma kapsamında olmasa dahi, Ansys CFX analiz çıktılarını, Ansys Structural modülüne aktararak, gerektiği anlarda, bu modüldeki mukavemet ve benzeri hesapları yapabilmesine olanak sağlamaktadır. Bu durum, özellikle orijinal tasarımın, besleyici verimini artırmak hedefiyle, katılaşma düzenini yönlendirme durumlarında, değişen orijinal tasarımın mukavemet hesaplarının kontrolü açısından da önemlidir.

- Analitik modelin uygulaması kolay ve hızlıdır. Ansys CFX için ilk model kurulumu 1-2 gün süre almaktadır.
- Analitik modelin matematiği basit ve uygulaması kolaydır. Ancak, Ansys CFX’de kullanılan sonlu hacimler metodu yüksek matematik bilgisi gerektirmektedir. Kullanılan ticari yazılımlarla bu gereksinim önemini yitirse de Ansys CFX’deki modellerin kurulumu yazılım üstünde detay bilgisini gerektirmektedir.
- Analitik modelde sonuç oldukça hızlı olarak elde edilirken, Ansys CFX’de süreksiz analiz, modeldeki çalışma alanı sayısı, ağ yapısının inceliği veya iriliği, yakınsama için kısa zaman aralığı ve zaman aralığındaki iç iterasyonlar, çalışma süresini uzatmakta veya kısaltmaktadır. Bu çalışmada, bilgisayar çalışma süreleri yaklaşık 12 saat olmuştur.
- Analitik modelde ilk yatırım sıfırdır. Ansys CFX kullanım bedeli ve gerekli donanımdaki bir bilgisayar önemli yatırım gerektirmektedir [66-69].

3.8 Isıl Özellikler

Bölüm 3.2’de açıklandığı gibi, analitik çözümler sadece kalıbın veya metalin ısı olarak doymuş olmadığı basit geometrilere kullanılabilir doğrulukta sonuçlar üretmektedirler. Ancak, günümüzde döküm teknolojisiyle üretilen parçaların büyük çoğunluğu basit geometriye sahip değildir. Ayrıca yine önemli çoğunluğunda metal, kalp ve maça kombinasyonlarının içine dökülmektedir ki maça zaten başlı başına ısının doymuş olduğu kalıp parçasıdır. Bu sebepten, döküm parçalarındaki ısı transferi analizleri, artık analitik çözümler yerine SEM veya SHM kullanılarak yapılmaktadır.

Her iki sayısal metot da, doğru sonuçlar vermesi için, uygun ağ yapısı oluşumuna ve doğru ısı malzeme özelliklerine ihtiyaç duymaktadır. Sadece en basit ısı transferi denklemlerinin çözümünde bile analize ilave edilecek her değişik malzeme için (her domain için) ısı iletkenlik, yoğunluk ve özgül ısı bilgilerine ihtiyaç duyulmaktadır.

Alaşımlarda, ısı özelliklerin ya modelde hazır malzeme kataloğundan kullanılması veya ayrıca hesaplanarak modele dahil edilmesi gerekir ki; Bu çalışmada ayrıca hesaplanarak modele dahil edilmişlerdir. Bunlara ilave olarak soğumanın katı hal

içinde devam ettiği durumlarda, katı hal fazlarında da değişiklikler olmaktadır. Katı hal faz ısı özelliklerinin de modele katılması gereklidir [60].

Bütün soğuma eğrisi üzerindeki tüm katı fazların ve sıvı fazın ısı özelliklerinin belirlenmesi ve belirli bir sıcaklıkta bu faz oranlarını hesaba katılarak, o belirli sıcaklıktaki ısı özelliklerin hesaplanması doğru sonuçlar için zaruridir.

Tüm bu karmaşıklığa ilave olarak, alaşımların soğuma hızları, katı-sıvı, katı-katı faz oranlarını etkilemekte ve değiştirmektedir. Ancak, cebri soğutmanın olmadığı kum dökümlerde soğuma hızının doğal iletim olduğu varsayılabilir.

Doğru bir analiz için gereken tüm ısı özelliklerin her bir alaşım için ölçülmesi oldukça zahmetli ve maliyetli bir iştir. Bu sebepten, günümüzde gittikçe daha fazla kullanılan yaklaşım metotlarıyla, ısı özelliklerin belirlendiği hesaplamalı yollar mevcuttur. Genel bir soğuma hızına sabitlenmiş formüllerle, gerekli ısı özellikler hesaplanabilmektedir.

3.8.1 Entalpi

Entalpi bir sistemin sahip olduğu toplam enerjinin göstergesidir. Eğer sistem sabit basınç altında ise, entalpideki değişim (artış) sistemin sahip olduğu ısı enerjisinin artışına veya entalpi'deki azalış sistemin sahip olduğu ısı enerjisinin azalışına karşılık gelmektedir. Entalpideki değişim sadece ısıya bağlı değildir, basınca da bağlıdır.

$$\frac{d(\Delta h)}{dT} = \Delta C_p \quad (3.14)$$

$$\Delta h_{T_2}^0 = \Delta h_{T_1}^0 + \int_{T_1}^{T_2} [\sum C_{p,reaksiyon \text{ ürünleri}} - \sum C_{p,reaktantlar}]dT \quad (3.15)$$

Döküm prosesinde kimyasal reaksiyondan ziyade, metalin ısıtılması veya soğutulması söz konusu olduğu için kimyasal bir tepkime yoktur ve denklem basitçe

$$\Delta h_{T_2}^0 = \Delta h_{298K}^0 + \int_{298K}^{T_2} C_p dT \quad (3.16)$$

Şekline girer. Klasik termodinamikte, bir sistemin molar entalpi ve molar özgül ısısı aşağıdaki gibi ifade edilebilir [60].

$$h = G - T \left(\frac{\partial G}{\partial T} \right) p \quad (3.17)$$

$$C_p = -T \left(\frac{\partial^2 G}{\partial T^2} \right) p \quad (3.18)$$

Denklemdaki G, sistemin Gibbs Enerjisidir.

Ferrit (α -Ferrite), östenit (γ -Austenite), sementit (c-Cementite) ve sıvı (L-Liquid) fazlar içeren bir faz karışımının molar Gibbs Enerjisi,

$$G = f^L G^L + f^\alpha G^\alpha + f^\gamma G^\gamma + f^c G^c \quad (3.19)$$

olarak ifade edilir. Denklemdaki f^φ faz oranlarını, G^φ ise o fazın Molar Gibbs Enerjisini temsil etmektedir. G^φ 'nin hesaplanma metodu Miettinen (1997) tarafından etraflıca açıklanmıştır [60].

Karışımın (Solution) Gibbs Özgür Erki hesaplandıktan sonra denklem 3.17 ve denklem 3.18 yardımıyla, h ve C_p ve denklem 3.20 kullanılarak da katılma ısısı (latent heat) hesaplanır.

$$L = h(T_{sıvı}) - h(T_{katı}) - \int_{T_{katı}}^{T_{sıvı}} C_p dT \quad (3.20)$$

$h(T_{sıvı}) = T_{sıvı}$, sıvılaşma sıcaklığındaki (Liquidus) entalpi

$h(T_{katı}) = T_{katı}$, katılma sıcaklığındaki (Solidus) entalpi

Entalpi ya denklem 3.17 kullanılarak doğrudan veya 3.18 kullanılarak özgül ısının sıcaklık aralığında entegre edilmesiyle hesaplanabilir. ANSYS CFX paket programı, belli sıcaklıklardaki C_p değerlerini entalpi hesaplamasında kullanmaktadır [68].

3.8.2 Yoğunluk

Ferrit (α -Ferrite), östenit (γ -Austenite), sementit (c-Cementite) ve sıvı (L-Liquid) fazlar içeren bir faz karışımının yoğunluğu

$$\rho = \frac{1}{\frac{f^L}{\rho^L} + \frac{f^\alpha}{\rho^\alpha} + \frac{f^\gamma}{\rho^\gamma} + \frac{f^c}{\rho^c}} \quad (3.21)$$

olarak ifade edilir[60].

Denklemdaki f^φ ve ρ^φ sırasıyla φ fazının faz oranını ve yoğunluğunu göstermektedir. Faz φ da bulunan çok alaşımlı bir çeliğin yoğunluğu olan ρ^φ , denklem 3.22 kullanarak yaklaşık olarak hesaplanır.

$$\rho^\varphi = \rho_{Fe}^\varphi + \sum \mu_i^\varphi C_i^\varphi \quad (3.22)$$

Denklemden, ρ_{Fe}^φ saf Demirin yoğunluğunu, μ_i^φ çelik içindeki i alaşım elemanının yoğunluğa olan etkisini, C_i^φ ise i alaşım elemanının çelik içindeki ağırlık yüzdesini ifade etmektedir [60].

Hesaplama zor olan kısım, her bir alaşım elemanının her bir faz yoğunluğuna olan etkisini ölçmek veya hesaplamaktır. Saf Demirin ve Fe-C iki elemanlı (Binary) sistemin yoğunluğu Jablonka ve arkadaşları tarafından [61] çalışılmıştır. Bu çalışmada, saf Demirin yoğunluğu ve karbonun etkisi denklem 3.23 ve denklem 3.24'de verilmiştir.

$$\rho_{Fe}^L = 8319,49 - 0,835T \quad (3.23)$$

$$\mu_C^L = -83,19 + 0,00835T \quad (3.24)$$

Denklemlerde ρ_{Fe}^L ve T , sırasıyla kg/m^3 ve $^\circ\text{C}$ olarak ifade edilmektedir.

Önemli alaşım elemanları olan Si, Mn, Cr, Mo ve Ni'in yoğunluğa olan etkileri, Fe-X ikili (binary) sistemlerinde ideal karışım koşulları olduğu varsayılarak, aşağıdaki denklemlerle ifade edilebilmektedir [60].

$$\mu_{Si}^L = -53,58 + 0,00155T \quad (3.25)$$

$$\mu_{Mn}^L = -17,21 + 0,00135T \quad (3.26)$$

$$\mu_{Cr}^L = -14,77 + 0,00535T \quad (3.27)$$

$$\mu_{Mo}^L = 10,21 + 0,00835T \quad (3.28)$$

$$\mu_{Ni}^L = 12,72 - 0,00325T \quad (3.29)$$

Tüm denklemleri, denklem 3.22 içine yerleştirdiğimiz zaman,

$$\begin{aligned} \rho_{Fe}^L = & 8319,49 - 0,835T + (-83,19 + 0,00835T)C_c \\ & + (-53,58 + 0,00155T)C_{Si} \\ & + (-17,21 + 0,00135T)C_{Mn} \\ & + (-14,77 + 0,00535T)C_{Cr} \\ & + (10,21 + 0,00835T)C_{Mo} + (12,72 - 0,00325T)C_{Ni} \end{aligned} \quad (3.30)$$

Denklem 3.30 kullanarak ilgili alaşım elemanları içeren bir sıvı çeliğin yoğunluğu yaklaşık olarak hesaplanabilmektedir.

Sıvı çelikte kullanılan formüllerin benzeri formüller yardımıyla Ferrit (α -Ferrite) , östenit (γ -Austenite), sementit (c-Cementite) fazlarının sıcaklık ve alaşım elemanlarına bağlı olan yoğunlukları aşağıdaki denklemlere hesaplanmaktadır. Jablonka ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmalar, ferrit ve östenit'in saf demir ve Fe-C ikili sisteminde yoğunlukları aşağıdaki denklemlerle verilmiştir [60].

$$\rho_{Fe}^{\alpha} = 7875,96 - 0,297T - 5,62 \cdot 10^{-5}T^2 \quad (3.31)$$

$$\mu_C^{\alpha} = -206,35 + 0,00778T + 1,472 \cdot 10^{-6}T^2 \quad (3.32)$$

$$\rho_{Fe}^{\gamma} = 8099,79 - 0,506T \quad (3.33)$$

$$\mu_C^{\gamma} = -118,26 + 0,00739T \quad (3.34)$$

Sementit ise karbonca doymuş bir faz olduğu için yoğunluk denklemi diğer alaşım elemanlarının varlığına bağlı olmadan verilmiştir [60].

$$\rho^c = 7686,45 - 0,0663T - 3,12 \cdot 10^{-4}T^2 \quad (3.35)$$

Sementit saf demirin karbonca doymuş fazıdır. Yüksek alaşımlı çeliklerde, demir atomunun alt kristal yapı (sublattice) içinde oturacağı pozisyonların, alaşım elemanı atomları tarafından işgal edilmesi durumunda, sementit fazın yoğunluğunun değişmesi kesindir. Ancak, yine de denklem 3.35 pratik uygulamalarda kullanılabilecek doğrulukta sonuçlar üretmektedir.

Diğer alaşım elemanlarının da etkilerinin görüldüğü ana fazlar olan ferrit ve östenitde, karbon haricindeki diğer alaşım elemanlarının da etkisinin hesaba alındığı yoğunluk denklemleri aşağıdaki gibidir [60].

$$\begin{aligned} \rho^\alpha = & 7875,96 - 0,2970T - 5,62 \cdot 10^{-5}T^2 + (-206,35 + 0,00778T \\ & + 1,472 \cdot 10^{-6}T^2)C_C^\alpha + (-8,58 + 1,229 \cdot 10^{-3}T \\ & + 0,852 \cdot 10^{-7}T^2 + 0,018367C_{Cr}^\alpha)C_{Cr}^\alpha + (-0,22 \\ & - 0,470 \cdot 10^{-3}T - 1,855 \cdot 10^{-7}T^2 + 0,104608C_{Ni}^\alpha)C_{Ni}^\alpha \\ & - 36,86C_{Si}^\alpha - 7,24C_{Mn}^\alpha + 30,78C_{Mo}^\alpha \end{aligned} \quad (3.36)$$

$$\begin{aligned} \rho^\gamma = & 8099,79 - 0,5060T + (-118,26 + 0,00739T)C_C^\gamma + (-7,59 \\ & + 3,422 \cdot 10^{-3}T - 5,388 \cdot 10^{-7}T^2 - 0,014271C_{Cr}^\gamma)C_{Cr}^\gamma \\ & + (1,54 + 2,267 \cdot 10^{-3}T - 11,26 \cdot 10^{-7}T^2 \\ & + 0,062642C_{Ni}^\gamma)C_{Ni}^\gamma - 68,24C_{Si}^\gamma - 6,01C_{Mn}^\gamma \\ & + 12,45C_{Mo}^\gamma \end{aligned} \quad (3.37)$$

3.8.3 Isıl İletkenlik

Çeliklerde ısı iletkenlik, her katı fazın ayrı ayrı hesaplanması şeklinde değil, katı ve sıvı fazlar genel olarak hesaplanmaktadır. Tüm katı fazlar, bir ortak katı faz olarak hesaplanmaktadır [60]. Bu durumda, ısı iletkenlik için 2 ana fazın olduğu ve bu fazların oranlarının toplamının 1 olduğu söylenebilir.

$$f^{k=katı} + f^{s=sıvı} = 1 \quad (3.38)$$

$$f^s = 1 - f^k \quad (3.39)$$

$$k = (1 + A_{(karışım)})f^s k^s + (1 - f^s)k^k \quad (3.40)$$

k^k ve k^s sırasıyla katı ve sıvı fazların ısı iletkenlikleri ve $A_{(karışım)}$ sıvı hal taşınımının ısı iletkenlik üzerindeki etkisini ifade etmektedir.

Çok alaşımlı bir sistemde, katı ($\varphi = katı$) ve sıvı ($\varphi = sıvı$) çeliğin termal iletkenliği denklem 3.41'de ifade edilmiştir [60].

$$k^\varphi = k_{Fe}^\theta + \sum \theta_i^\varphi C_i^\varphi \quad (3.41)$$

Denklemdaki k_{Fe}^θ , θ_i^φ ve C_i^φ , sırasıyla saf demirin termal iletkenliğini, i alaşım elemanın termal iletkenlik üzerindeki etkisini ve i alaşım elemanın ağırlık yüzdesini ifade etmektedir.

Yüksek sıcaklıklarda alaşım elemanlarının sıvı çeliğin termal iletkenliği üzerine etkilerinin az olduğu ölçümlerle belirlenmiştir [39].

$$k_{Fe}^{sıvı} = 35 \text{ [W/(m K)]} \quad (3.42)$$

Denklemler 3.42 aynı zamanda düşük alaşımlı çeliklerin sıvı faz termal iletkenliği olarak da kullanılabilir.

Paslanmaz çelikler literatürde daha fazla çalışıldığı için, regresyon analizleriyle aşağıdaki formüller türetilmiştir.

$$\theta_{Cr}^{sıvı} = -0,3574 \quad (3.43)$$

$$\theta_{Mo}^{sıvı} = -0,5116 \quad (3.44)$$

$$\theta_{Ni}^{sıvı} = -0,0014 \quad (3.45)$$

Tüm denklemler, denklem 3.41'de yerine koyulduğu zaman, denklem 3.46 elde edilir.

$$k^{sıvı} = 35 - 0,3574C_{Cr}^s - 0,5116C_{Mo}^s - 0,0014C_{Ni}^s \quad (3.46)$$

Formülün çıkardığı sonuçlar ve deneysel ölçümler oldukça benzeşmektedirler [60].

Katı çeliğin termal iletkenliğini hesaplamak sıvı çeliğe göre daha karmaşıktır ve bütün bir soğuma sıcaklık aralığında tek formül uygun sonuçlar üretememektedir. Bu sebepten, belli sıcaklık aralıklarında değişik formüller kullanılmaktadır.

Ana yapısı östenitik olan yüksek alaşımlı çeliklerde, ısı iletkenlik herhangi bir düzensizlik göstermeden artan sıcaklıkla birlikte azalmaktadır. Ancak, yapıda artan Ferrit oranıyla birlikte, oda sıcaklığından başlayarak 1000°C'ye kadar, katı çeliğin termal iletkenliği artmaktadır. 1000°C'den sonra yeniden düşmeye devam etmektedir.

Saf demirin östenitik yapıda olduğu durumlar için geliştirilen denklem aşağıdaki gibidir. Bu denklem östenitik çelikler için düşük ve yüksek sıcaklıklar için ve yüksek ve düşük alaşımlı çelikler için geçerlidir.

$$\begin{aligned} k^{katı} = & 20,76 - 0,009T - 3,2627C_C^k + (0,0124 - 2,204 \cdot 10^{-4}T \\ & + 1,078 \cdot 10^{-7}T^2 + 0,7822 \cdot 10^{-4}C_{Cr}^k \\ & - 1,741 \cdot 10^{-7}T \cdot C_{Cr}^k)C_{Cr}^k + (-0,5860 \\ & + 8,354 \cdot 10^{-4}T - 1,368 \cdot 10^{-7}T^2 + 1,067 \cdot 10^{-2}C_{Ni}^k \\ & - 1,504 \cdot 10^{-5}T \cdot C_{Ni}^k)C_{Ni}^k - 0,7598C_{Si}^k - 0,1432C_{Mn}^k \\ & - 0,2222C_{Mo}^k \end{aligned} \quad (3.47)$$

Saf demirin ferritik yapıda olduğu durumlar için genel bir denklem yoktur. Belli sıcaklık aralıklarında farklı denklemler kullanılmaktadır.

$$\begin{aligned} k^{katı}(400 \text{ } ^\circ\text{C}) = & 50,3 - 13,67C_C^k + 52,45C_C^{k^2} - 6,863C_{Si}^k \\ & + 1,409C_{Si}^{k^2} - 3,996C_{Mn}^k + 0,188C_{Mn}^{k^2} - 3,199C_{Cr}^k \\ & + 0,141C_{Cr}^{k^2} - 3,307C_{Mo}^k + 3,174C_{Mo}^{k^2} - 1,251C_{Ni}^k \\ & + 0,014C_{Ni}^{k^2} \end{aligned} \quad (3.48)$$

$$\begin{aligned} k^{katı}(200 \text{ } ^\circ\text{C}) = & 63,5 - 20,70C_C^k + 9,612C_C^{k^2} - 17,45C_{Si}^k \\ & + 6,060C_{Si}^{k^2} + 0,419C_{Mn}^{k^2} - 4,812C_{Cr}^k + 0,216C_{Cr}^{k^2} \\ & - 9,745C_{Mo}^k + 8,388C_{Mo}^{k^2} - 2,305C_{Ni}^k + 0,040C_{Ni}^{k^2} \end{aligned} \quad (3.49)$$

$$\begin{aligned}
k^{katı}(25\text{ }^{\circ}\text{C}) = & 80,5 - 45,03C_C^k + 21,85C_C^{k^2} - 31,69C_{Si}^k + 11,57C_{Si}^{k^2} \\
& - 15,32C_{Mn}^k + 0,959C_{Mn}^{k^2} - 8,091C_{Cr}^k + 0,452C_{Cr}^{k^2} \\
& - 4,674C_{Mo}^k + 0,204C_{Mo}^{k^2} - 3,780C_{Ni}^k + 0,084C_{Ni}^{k^2}
\end{aligned} \tag{3.50}$$

3.9 Modellerde kullanılan çeliklerin ısı özellikleri

Literatür taramalarındaki örneklerde, döküm parçalarındaki katılaşma modellemelerinde genelde sıcaklığa bağlı özgül ısı veya entalpi değerleri kullanılmasına rağmen, modellerde yoğunluk ve termal iletkenlik değerleri sabit olarak kullanılmıştır. Bu çalışmada özgül ısı, yoğunluk ve ısı iletkenlik değerlerinin tamamı sıcaklığın fonksiyonu olarak kullanılmıştır. Bu tür örneklerde, genelde ısı malzeme özellikleri, ticari veri kapsamında görülmekte ve literatürde açık yayınlamalar yapılmamaktadır. Miettinen (1997) yılında yayınladığı makale ile ısı özelliklerin hesaplanabilmesini sağlayan bir yazılımı tanıtmış ve deneysel olarak ölçülmemiş bazı alaşımlar için ısı özelliklerin hesaplanabilmesinin ve modellemelerde kullanmanın önünü açmıştır.

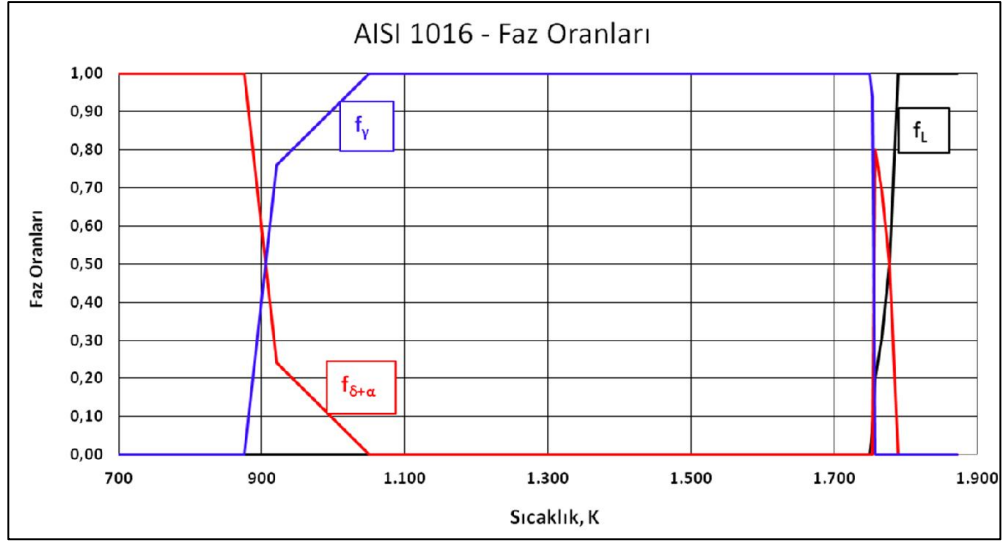
Modelin doğru hesaplama yapabilmesi için gereken ikinci şart ise kalıp-maça malzemelerinin ısı özelliklerinin de sıcaklığın fonksiyonu olarak belirlenmesidir ki bu çalışmada bu yöntem kullanılmıştır.

Çalışmada kullanılan alaşımlar ve bu alaşımların nominal kompozisyon yüzdeleri Çizelge 3.1’de tablo halinde listelenmiştir.

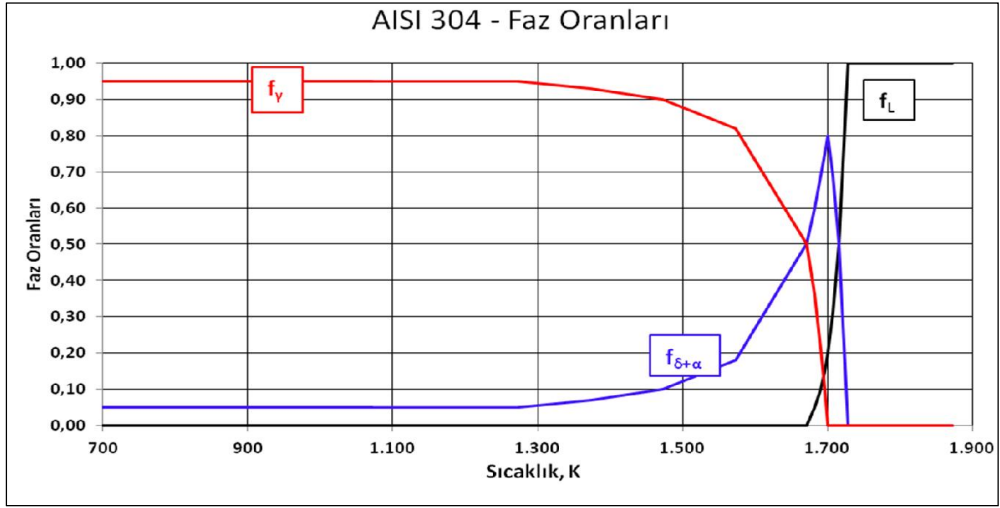
Çizelge 3.1 : Modellemede kullanılan çeliklerin nominal kimyasal kompozisyonları.

Çelik	%C	%Si	%Mn	%Cr	%Mo	%Ni	%N
AISI 1016	0,16	0,30	0,80	-	-	-	-
AISI 304	0,04	0,50	1,50	18,00	0,30	9,20	0,04
AISI 316	0,04	0,50	1,50	17,00	2,60	12,00	0,04

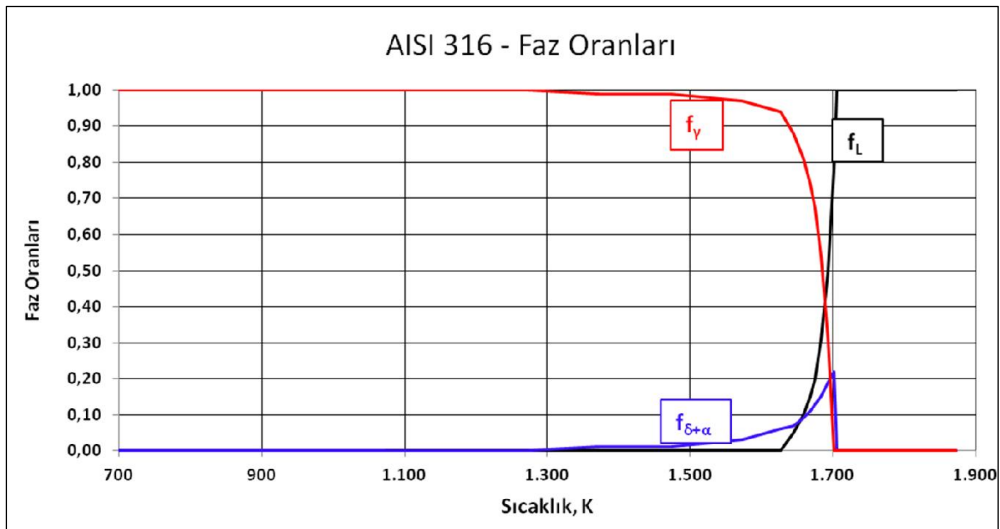
AISI 1016, AISI 304 ve AISI 316 çelikler için Miettinen (1997) tarafından yapılan hesaplamalara göre soğuma aralığındaki faz oranı grafikleri Şekil 3.3, Şekil 3.4 ve Şekil 3.5’de gösterilmiştir. Faz oranları hesaplamalarında, 1°C/sn soğuma hızı esas alınmıştır [60].



Şekil 3.3 : AISI 1016 çelikteki sıcaklığa bağlı faz oranları.



Şekil 3.4 : AISI 304 çelikteki sıcaklığa bağlı faz oranları.



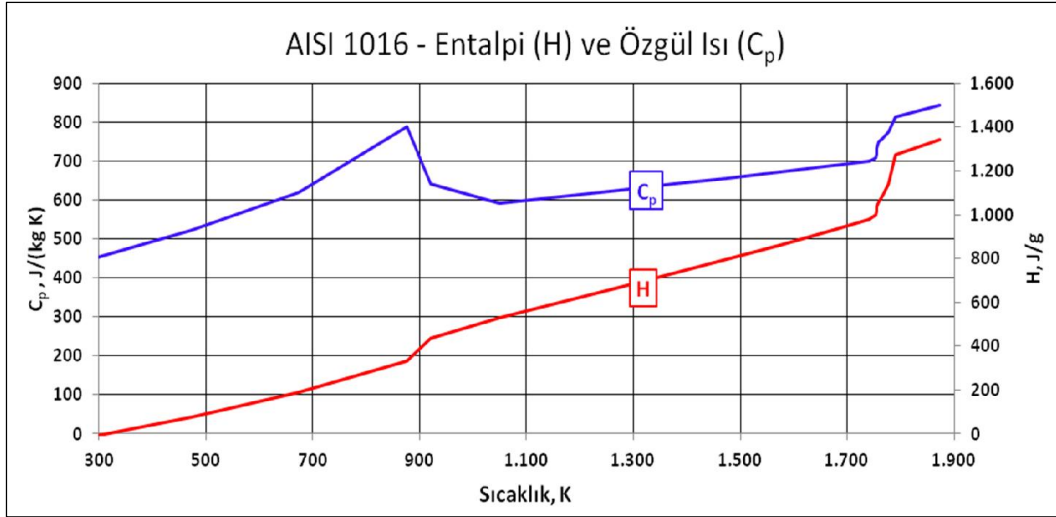
Şekil 3.5 : AISI 316 çelikteki sıcaklığa bağlı faz oranları.

Miettinen (1997) tarafından geliştirilen metot ile hesaplanan faz oranlarına bağlı hesaplanan entalpi / özgül ısı, yoğunluk ve termal iletkenlik değerleri AISI 1016, AISI 304 ve AISI 316 çelikler için Çizelge 3.2, Çizelge 3.3 ve Çizelge 3.4'de tablo halinde listelenmiştir.

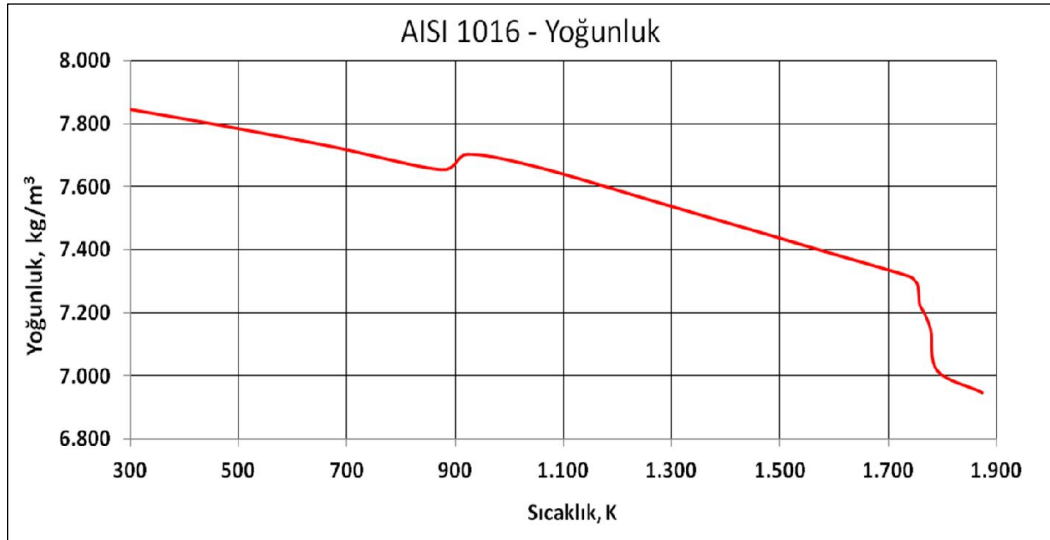
Çizelge 3.2 : AISI 1016 çeliğin hesaplanan ısı özellikleri [60].

T °C	T K	H J/g	C _p J/(g K)	C _p J/(kg K)	ρ kg/m ³	K W/(m K)	Faz Oranları		
							f _L	f _{δ+α}	f _γ
1.600	1.873	1.342	0,844	844	6.947	35,00	1,00	0,00	0,00
1.517	1.790	1.273	0,813	813	7.016	35,00	1,00	0,00	0,00
1.505	1.778	1.143	0,774	774	7.142	34,46	0,50	0,50	0,00
1.494	1.767	1.088	0,758	758	7.195	34,12	0,31	0,69	0,00
1.485	1.758	1.057	0,749	749	7.223	33,87	0,20	0,80	0,00
1.483	1.756	1.036	0,734	734	7.249	33,70	0,15	0,51	0,34
1.482	1.755	1.016	0,719	719	7.273	33,55	0,10	0,23	0,67
1.480	1.753	1.000	0,707	707	7.292	33,42	0,06	0,00	0,94
1.477	1.750	994	0,705	705	7.298	33,35	0,00	0,00	1,00
1.467	1.740	977	0,699	699	7.314	33,12	0,00	0,00	1,00
1.400	1.673	929	0,688	688	7.349	32,49	0,00	0,00	1,00
1.300	1.573	861	0,672	672	7.399	31,59	0,00	0,00	1,00
1.200	1.473	795	0,656	656	7.450	30,69	0,00	0,00	1,00
1.100	1.373	730	0,641	641	7.500	29,80	0,00	0,00	1,00
1.000	1.273	667	0,625	625	7.551	28,90	0,00	0,00	1,00
777	1.050	531	0,591	591	7.663	26,89	0,00	0,00	1,00
648	921	435	0,641	641	7.703	32,48	0,00	0,24	0,76
603	876	332	0,789	789	7.654	34,55	0,00	1,00	0,00
400	673	189	0,619	619	7.727	43,31	0,00	1,00	0,00
200	473	76	0,522	522	7.793	49,59	0,00	1,00	0,00
25	298	-9	0,454	454	7.846	53,72	0,00	1,00	0,00

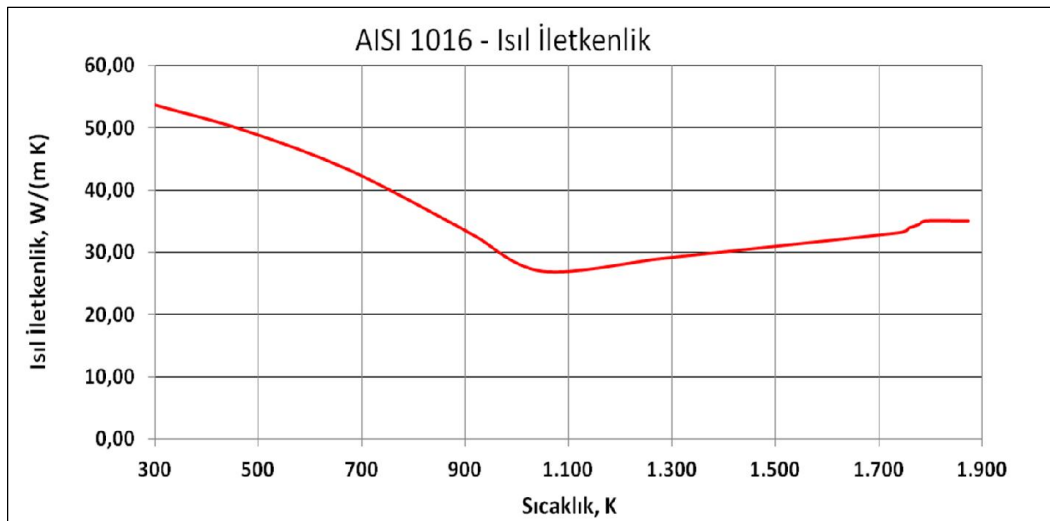
Çizelge 3.1'de bulunan değerler Miettinen (1997) tarafından 1°C/sn soğuma hızı esas alınarak hesaplanmış değerlerdir. Çizelge 3.1'de tablolanmış verilerle çizilen entalpi ve özgül ısı grafikleri, literatürdeki düşük alaşımlı çelikler üzerinde yapılan deneysel çalışmalar sonunda bulunan entalpi ve özgül ısı ile mukayese edildiği zaman iyi bir uyumun olduğu da görülmüştür [60].



Şekil 3.6 : AISI 1016 Çeliğin Entalpi ve Özgöl Isı Grafiği.



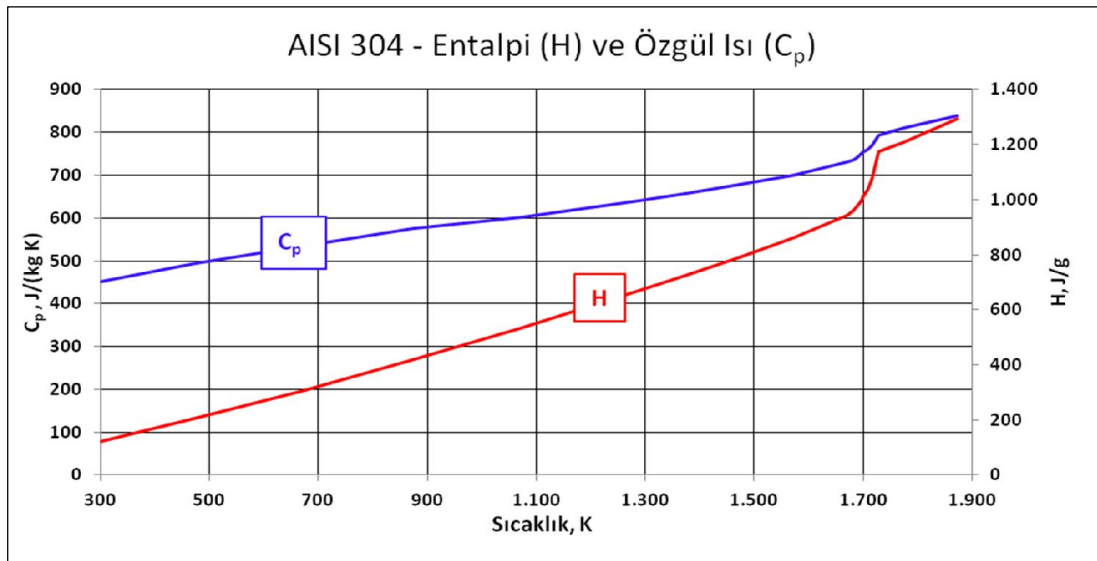
Şekil 3.7 : AISI 1016 çeliğin yoğunluk grafiği.



Şekil 3.8 : AISI 1016 çeliğin ısı iletkenlik grafiği.

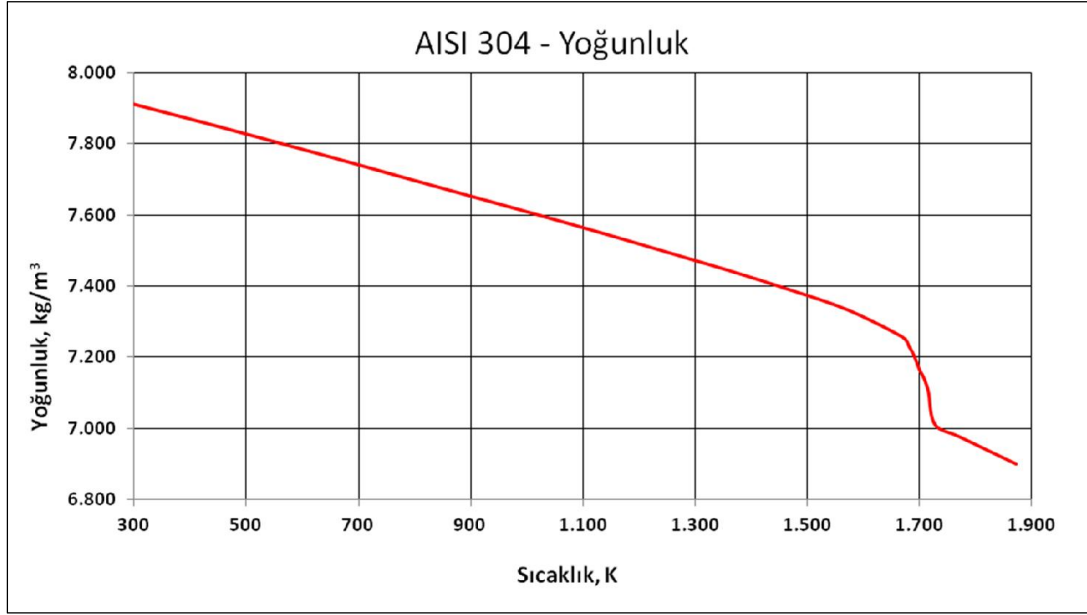
Çizelge 3.3 : AISI 304 çeliğin hesaplanan ısı özellikleri [60].

T °C	T K	H J/g	C _p J/(g K)	C _p J/(kg K)	ρ kg/m ³	K W/(m K)	Faz Oranları		
							f _L	f _{δ+a}	f _γ
1.600	1.873	1.292	0,839	839	6.900	28,40	1,00	0,00	0,00
1.500	1.773	1.209	0,809	809	6.976	28,40	1,00	0,00	0,00
1.455	1.728	1.173	0,793	793	7.011	28,40	1,00	0,00	0,00
1.443	1.716	1.077	0,769	769	7.105	31,10	0,50	0,50	0,00
1.435	1.708	1.036	0,760	760	7.143	32,10	0,31	0,69	0,00
1.428	1.701	1.014	0,754	754	7.163	32,57	0,20	0,80	0,00
1.423	1.696	997	0,749	749	7.184	32,79	0,15	0,75	0,10
1.418	1.691	982	0,744	744	7.204	32,96	0,10	0,69	0,21
1.409	1.682	961	0,737	737	7.230	33,11	0,05	0,60	0,36
1.398	1.671	942	0,730	730	7.256	33,18	0,00	0,50	0,50
1.300	1.573	862	0,701	701	7.333	31,92	0,00	0,18	0,82
1.200	1.473	791	0,678	678	7.388	30,60	0,00	0,10	0,90
1.100	1.373	724	0,658	658	7.438	29,31	0,00	0,07	0,93
1.000	1.273	659	0,638	638	7.485	28,03	0,00	0,05	0,95
800	1.073	535	0,602	602	7.577	25,50	0,00	0,05	0,95
600	873	419	0,576	576	7.665	23,04	0,00	0,05	0,95
400	673	308	0,534	534	7.753	20,62	0,00	0,05	0,95
200	473	205	0,495	495	7.839	18,26	0,00	0,05	0,95
25	298	122	0,451	451	7.912	16,24	0,00	0,05	0,95

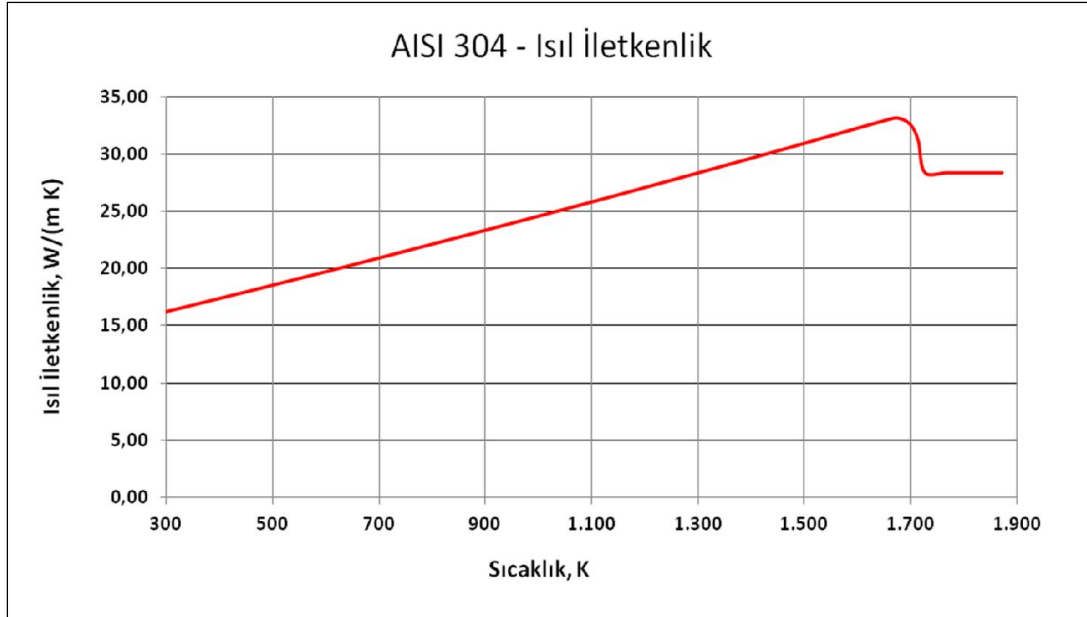


Şekil 3.9 : AISI 304 çeliğin entalpi ve özgül ısı grafiği.

Paslanmaz çelikler için hesaplanan entalpi ve özgül ısı değerleri, deneysel sonuçlarla mukayese edildiği zaman uyumun düşük alaşımlı çeliklerde elde edilen uyumdan daha az olduğu görülmüştür. Hesaplamalarla elde edilen entalpi değerleri, deneysel sonuçlara göre % 10 civarında daha yüksek iken, hesaplanan özgül ısı değerlerinin deneysel sonuçlara göre % 0-7 civarında düşük olduğu gözlenmiştir (Miettinen, 1997).



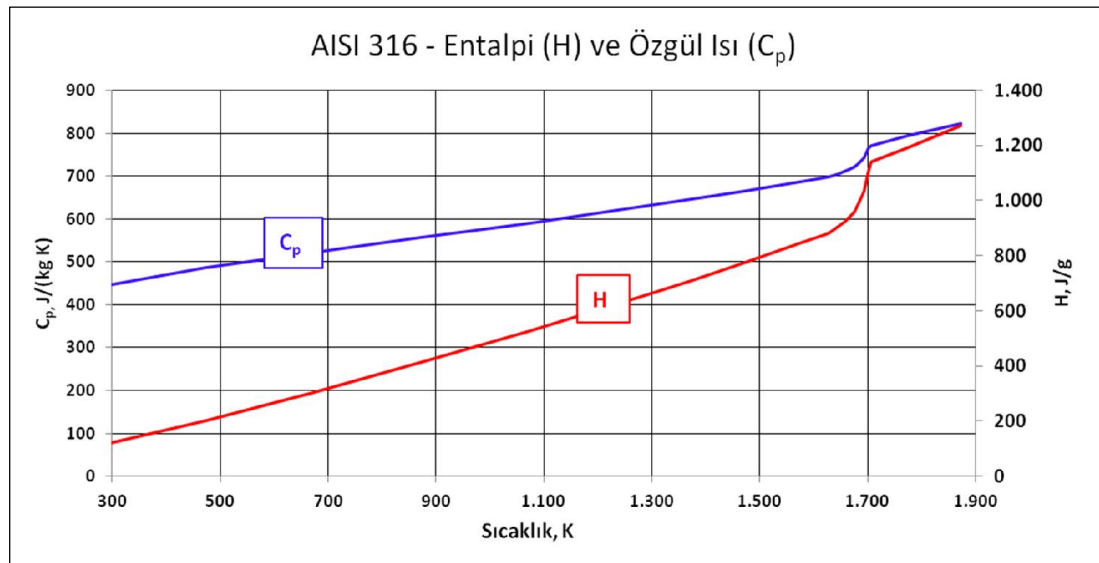
Şekil 3.10 : AISI 304 çeliğin yoğunluk grafiği.



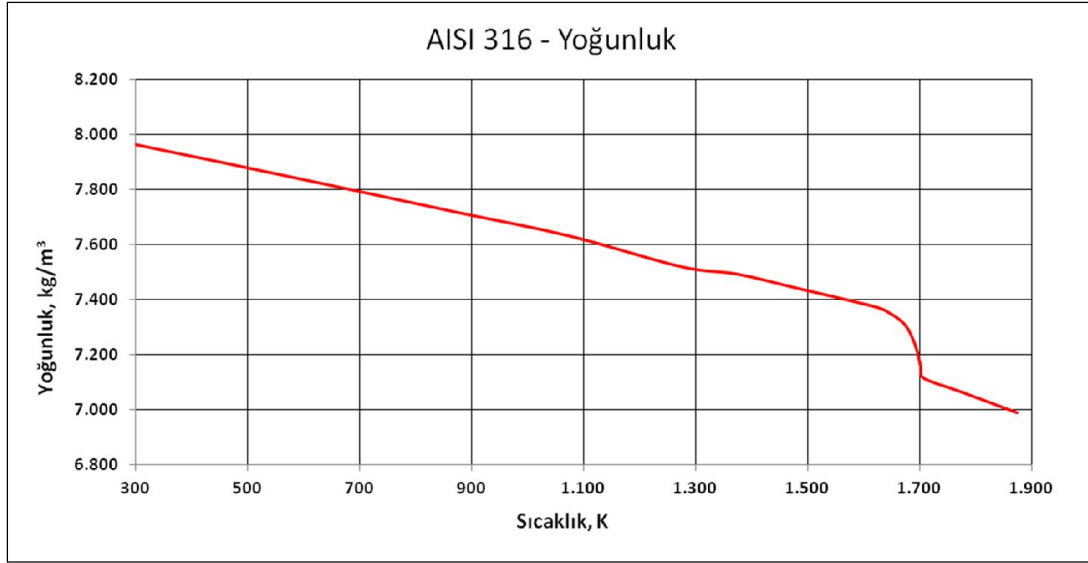
Şekil 3.11 : AISI 304 çeliğin ısı iletkenlik grafiği.

Çizelge 3.4 : AISI 316 çeliğin hesaplanan ısı özellikleri [60].

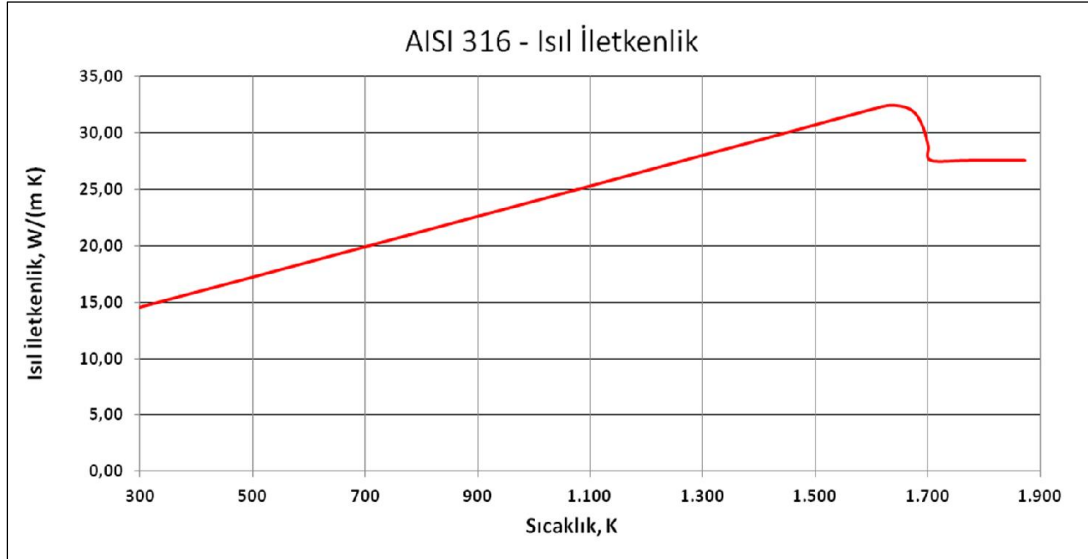
T °C	T K	H J/g	C _p J/(g K)	C _p J/(kg K)	ρ kg/m ³	K W/(m K)	Faz Oranları		
							f _L	f _{δ+α}	f _γ
1.600	1.873	1.273	0,823	823	6.987	27,58	1,00	0,00	0,00
1.500	1.773	1.192	0,795	795	7.063	27,58	1,00	0,00	0,00
1.433	1.706	1.140	0,772	772	7.113	27,58	1,00	0,00	0,00
1.428	1.701	1.099	0,763	763	7.153	28,87	0,78	0,22	0,00
1.420	1.693	1.035	0,743	743	7.222	30,39	0,50	0,19	0,31
1.410	1.683	986	0,729	729	7.273	31,43	0,31	0,15	0,54
1.402	1.675	959	0,721	721	7.301	31,91	0,20	0,13	0,67
1.395	1.668	942	0,716	716	7.317	32,15	0,15	0,11	0,74
1.386	1.659	926	0,712	712	7.332	32,32	0,10	0,09	0,81
1.372	1.645	905	0,706	706	7.350	32,45	0,05	0,07	0,88
1.354	1.627	883	0,699	699	7.368	32,44	0,00	0,06	0,94
1.300	1.573	844	0,687	687	7.396	31,74	0,00	0,03	0,97
1.200	1.473	776	0,666	666	7.444	30,37	0,00	0,01	0,99
1.100	1.373	711	0,646	646	7.492	29,01	0,00	0,01	0,99
1.000	1.273	647	0,627	627	7.519	27,66	0,00	0,00	1,00
800	1.073	525	0,59	590	7.631	24,94	0,00	0,00	1,00
600	873	412	0,556	556	7.717	22,24	0,00	0,00	1,00
400	673	304	0,522	522	7.804	19,54	0,00	0,00	1,00
200	473	203	0,487	487	7.890	16,85	0,00	0,00	1,00
25	298	121	0,446	446	7.964	14,51	0,00	0,00	1,00



Şekil 3.12 : AISI 316 çeliğin entalpi ve özgül ısı grafiği.



Şekil 3.13 : AISI 316 çeliğin yoğunluk grafiği.



Şekil 3.14 : AISI 316 çeliğin ısı iletkenlik grafiği.

3.10 Kalıp ve Maça

Kalıp ve maça, döküm prosesinde, dökümü yapılan esas metal parçadan sonra, prosesin parametrelerini ve sonuç olarak da kalitesini etkileyen en temel iki parçadır. Kalıp ve maça, döküm şekline bağlı olarak değişik malzemelerden imal edilebilirler. Bu çalışmada tüm modellemelerde kum kalıp ve maça kullanılmıştır. Kum kalıp veya maça terimi genel bir terimdir çünkü kum kalıpların kendi içinde, silis kumu, zirkon, olivin gibi çeşitleri vardır. Her tip kumun ısı özellikleri ve maliyeti farklıdır. Ekonomik döküm için en uygun kum kalıp veya maçayı en ucuz alternatiften üretmek esastır.

Döküm prosesinde katılaşma esnasında aşırı ısıtmanın (superheat) ve katılaşma ısıısının (latent heat) döküm parçasından ısı transferiyle uzaklaştırılması gerekmektedir. Katılaşma esnasında, döküm-kalıp-maça kombinasyonlarında tüm ısı transferi tipleri (iletim, taşınım, radyasyon) az veya çok rol oynamaktadır. Ancak, katılaşma üzerinde etkili en temel mekanizma, kalıbın ve maçanın, döküm parçasındaki aşırı ısı ve katılaşma ısıısını, doğal taşınım ile kalıp içine emmesidir. Yani metal katılaşp soğurken, kalıp ve maça ısınmaktadır. Kum malzemesinin ısı yalıtım özelliği düşünülürse, kalıp içinden tüm ısının kalıp dışına ısı iletim yoluyla aktarılması ve kalıbın dış yüzeyinden taşınım ve radyasyon ile dış ortama atılması pratikte karşılaşılan durum değildir. Kum kalıbın dış yüzeyi, döküm parçasının tamamen katılaşp soğumasından sonra bile, dış ortam sıcaklığına yakın bir sıcaklıkta kalmaktadır. Metalden uzaklaştırılan tüm ısı, kalıp ve maça tarafından absorbe edilmektedir. Bu sebepten kum dökümlerde, kalıp ve maçanın ısı iletkenlikleri katılaşma üzerinde önemli etkiye sahiptir [14-16].

Kalıbın veya maçanın ısı emme kapasite hızı olarak da tarifleyeceğimiz ısı yayınlılık (Heat diffusivity) yoğunluğun bir fonksiyonudur [16].

$$\begin{aligned} \text{Isıl Yayınlılık} &= (K_{\text{kalıp/maça}}) \cdot (\rho_{\text{kalıp/maça}}) \cdot (C_{p\text{kalıp/maça}}) \\ K_{\text{kalıp/maça}} &= \text{Kalıp malzemesinin ısı iletkenliği, } \left[\frac{W}{(m \cdot K)} \right] \\ \rho_{\text{kalıp/maça}} &= \text{Yoğunluk, } \left(\frac{kg}{m^3} \right) \\ C_{p\text{kalıp/maça}} &= \text{Kalıp malzemesinin özgül ısı, } \left[\frac{J}{(kg \cdot K)} \right] \end{aligned} \quad (3.51)$$

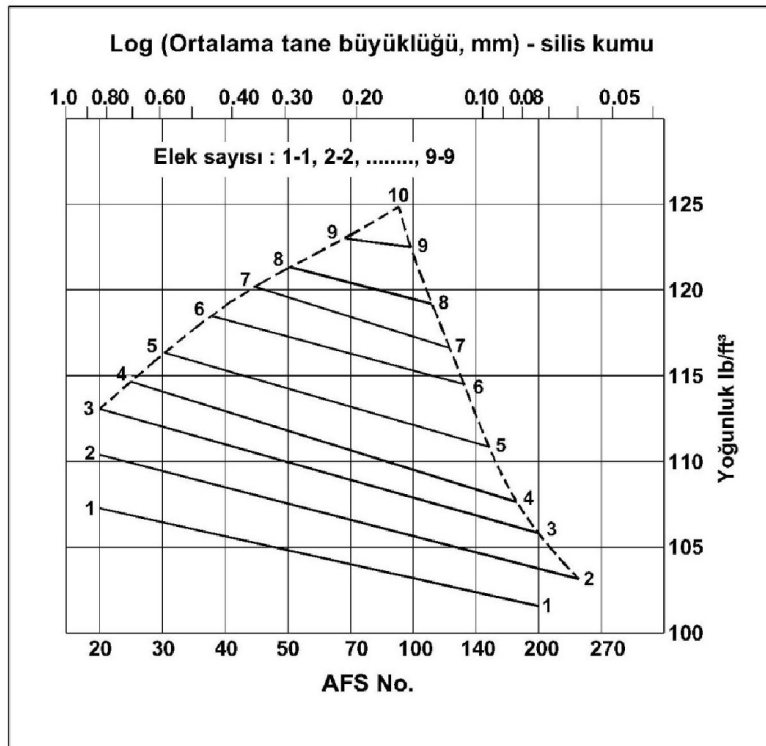
Kalıp ve maça malzemesinin esas kum olsa dahi, kalıp ve maçanın kolay şekil alması, döküm esnasında artan ortam sıcaklığında şeklini koruyabilmesi, kalıp boşluğu içinde hapsolan gazların atılabilmesi için gaz geçirgenliği gibi özelliklere sahip olması beklenir. Bu özellikler, kalıp kumu ve yapılan ilavelerle sağlanmaktadır. Kuma yapılan bu ilavelerin önemlileri, su, kil, silika tozu, tahıl artığı, plastik agrega, bağlayıcılar ve kimyasallardır. Bu sebepten, kalıp ve maça için ısı özelliklerinden bahsederken, her bir malzemenin ayrı bu özellikleri yerine, toplamda bu malzemelerin karışımı olan kalıp malzemesinin toplam özelliklerinden bahsedilir ki, bu özelliklere yığın özellikleri denir.

Kalıp ve maça malzemelerinin, ısı absorpsiyon kapasitesi olarak tarif edilen ısı yayınlılık özelliğini etkileyen unsurlardan ısı iletkenlik ve özgül ısı değerleri,

malzemede toplam olarak yığın için ölçülmektedir. Bu özellikler her bir tip kalıp-maça malzemesi için prosesle ilgili olarak fazla değişmeyen özelliklerdir. Ancak, yığın yoğunluğu sonuçta, kalıp-maça imal yöntemlerinin proses parametrelerine ve kalıp-maça malzemesinde kullanılan kumun fiziksel özelliklerine çok bağlıdır. Bu özellikler kalıp kumunun tane büyüklüğü, tane büyüklük dağılımı, paketleme basıncı gibi yığının fiziksel özellikleridir.

Kalıp malzeme yoğunluğunun (partikül veya bulk) artmasıyla, ısı yayınlılık artmaktadır. Tane büyüklüğünün ve tane dağılımının kalıp yoğunluğuna direk etkisi vardır. Sabit elek sayısında, kalıp-maça malzemesi içinde daha büyük tane boyutu, daha yoğun kalıp-maça malzemesi oluşturmaktadır. Kalıp yoğunluğundaki bu artış, kalıp paketleme basıncı ile de doğrudan alakalıdır. Aynı tane büyüklüğünde, kalıp paketleme basıncı artarsa, yığın (bulk) yoğunluğu da artmaktadır. Tane boyutu küçüldükçe, yığın içindeki tanelerin hacim/yüzey oranları da düşmektedir ki, bu da ısı transferi için daha fazla engel ve daha fazla arayüzey demektir.

Bu çalışmada sadece belirli kalıp ve maça malzemelerinin katılma sürelerine etkileri incelenecektir. Bunun yanında kalıp yoğunluğunun ve yoğunluğa bağlı olarak ısı yayınlılığın katılma sürelerine etkisi de modellenmiştir.



Şekil 3.15 : Aynı presleme basıncında kalıp-maça tane büyüklüğünün ve dağılımının kalıp-maça yoğunluğuna etkisi [15].

3.11 Modellemede kullanılan kalıp-maça malzemelerinin ısı özellikleri

Literatürde değişik kalıp ve maça malzemeleri için yapılan çok çalışma olmasına rağmen, ısı ve fiziksel özellikler genelde her malzeme için sabit değerler olarak verilmektedir. Ancak, bu özelliklerin sıcaklığın bir fonksiyonu olduğu kesindir. Tez kapsamında kullanılan yaş kum (40 AFS silis kumu: %94, bentonite: %5, tahıl artığı: %1), üretan reçine bağlı kum (Bu tezde “Üretan” olarak anılacaktır) ve kabuk maça-kalıp malzemeleri için ısı verileri derlenmiştir [62].

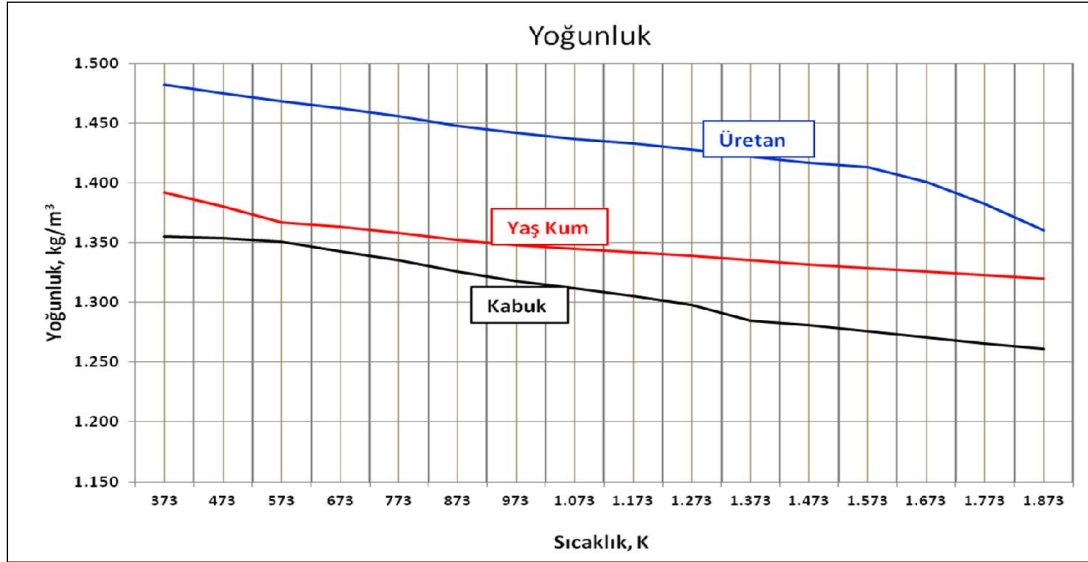
Bu çalışmada, Keil, Rodriguez ve Ramrattan'ın (1999) değişik kalıp malzemeleri için sıcaklığa bağlı olarak belirledikleri entalpi-özellik ısı, yoğunluk, ısı iletkenlik değerleri kullanılmıştır. Keil ve arkadaşları (1999) çalışmalarında değişik kalıp-maça malzemeleri için ısı değerleri yayınlamışlardır, ancak bu çalışma kapsamında sadece pratikte en fazla kullanılan yaş kum, üretan ve kabuk kalıp-maça malzemeleri için modellemeler yapılmıştır.

3.11.1 Yoğunluk – Sıcaklık (Yaş kum, Üretan, Kabuk)

Yaş kum, üretan ve kabuk kalıp-maça malzemeleri için yoğunluğun sıcaklığa göre değişimi Çizelge 3,5’de verilmiştir. Üretan, oda sıcaklığında yoğunluğu en yüksek malzeme olmasına rağmen, artan sıcaklıkla birlikte yoğunluğu en fazla düşen malzemedir. Yaş kum ise oda sıcaklığında en düşük yoğunlukta olmasına rağmen, üretan ve kabuk kalıp-maça malzemelerine göre sıcaklıktan daha az etkilenmektedir [62].

Çizelge 3.5 : Kalıp-maça malzemelerinin sıcaklığa bağlı yoğunluk değişimi [62].

T °C	T K	Yoğunluk, kg/m ³		
		Yaş Kum	Üretan	Kabuk
22	295	1.404	1.488	1.357
100	373	1.392	1.482	1.355
200	473	1.380	1.475	1.354
300	573	1.367	1.468	1.351
400	673	1.363	1.462	1.343
500	773	1.358	1.456	1.335
600	873	1.352	1.448	1.326
700	973	1.348	1.442	1.318
800	1.073	1.345	1.437	1.312
900	1.173	1.342	1.433	1.305
1.000	1.273	1.339	1.428	1.298
1.100	1.373	1.335	1.422	1.285
1.200	1.473	1.332	1.417	1.281
1.300	1.573	1.329	1.413	1.276
1.400	1.673	1.326	1.401	1.271
1.500	1.773	1.323	1.382	1.266
1.600	1.873	1.320	1.360	1.261



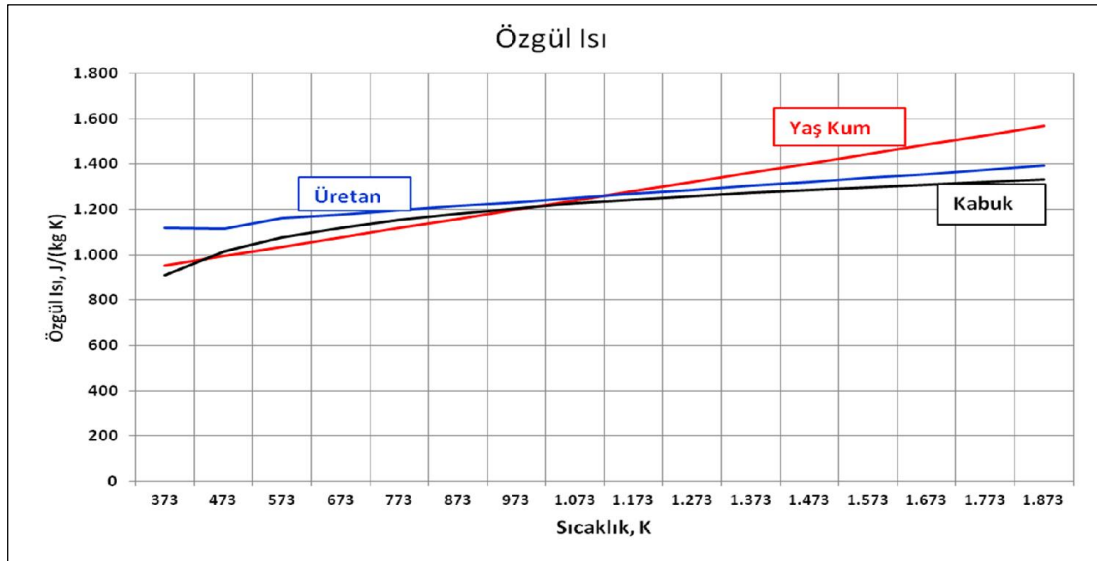
Şekil 3.16 : Yaş kum, üretan ve kabuk kalıp malzemelerinin sıcaklığa bağlı yoğunluk değişimi.

3.11.2 Özgül Isı – Sıcaklık (Yaş kum, üretan, kabuk)

Özgül ısının sıcaklığa göre değişimi Çizelge 3.6’da verilmiştir. Katılaşmanın meydana geldiği yüksek sıcaklıklarda, yaş kum özgül ısısı en yüksek malzemedir. Oda sıcaklığına yakın sıcaklıklarda ise yaş kum üretan’a göre daha düşük özgül ısıya sahiptir [62].

Çizelge 3.6 : Kalıp-maça malzemelerinin sıcaklığa bağlı Özgül Isı değişimi [62].

T °C	T K	Özgül Isı, J/(kg K)		
		Yaş Kum	Üretan	Kabuk
22	295	0	0	790
100	373	953	1.118	910
200	473	994	1.114	1.015
300	573	1.035	1.160	1.076
400	673	1.076	1.178	1.120
500	773	1.117	1.196	1.154
600	873	1.158	1.214	1.181
700	973	1.198	1.232	1.205
800	1.073	1.239	1.250	1.225
900	1.173	1.280	1.268	1.243
1.000	1.273	1.321	1.285	1.259
1.100	1.373	1.362	1.303	1.273
1.200	1.473	1.403	1.321	1.286
1.300	1.573	1.444	1.339	1.298
1.400	1.673	1.485	1.356	1.310
1.500	1.773	1.526	1.374	1.320
1.600	1.873	1.567	1.392	1.330



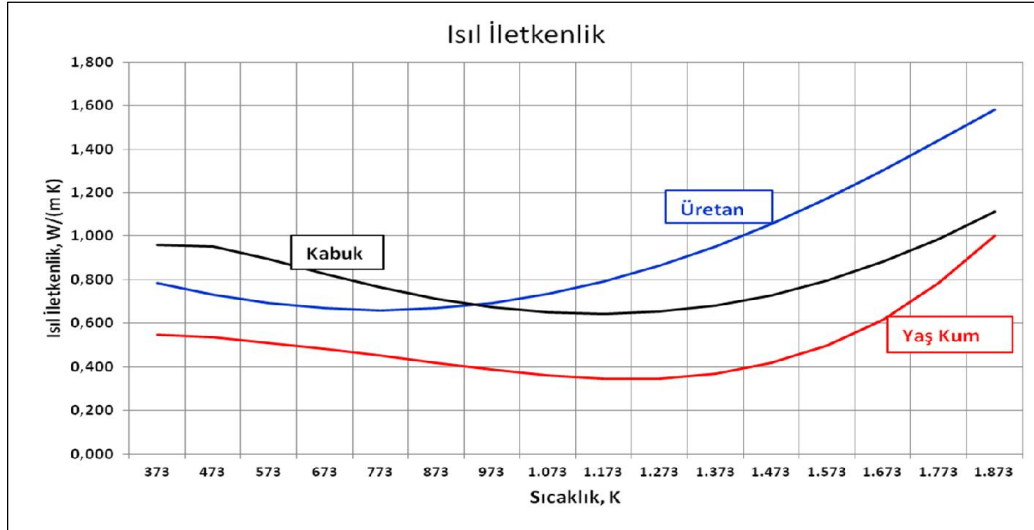
Şekil 3.17 : Yaş kum, üretan ve kabuk malzemelerinin sıcaklığa bağlı özgül ısı değişimi.

3.11.3 Isıl İletkenlik – Sıcaklık (Yaş kum, üretan, kabuk)

Isıl iletkenliğin sıcaklığa göre değişimi Çizelge 3.7’de verilmiştir. Katılaşmanın meydana geldiği yüksek sıcaklıklarda ısı iletkenliği en yüksek kalıp-maça malzemesi üretandır. [62]

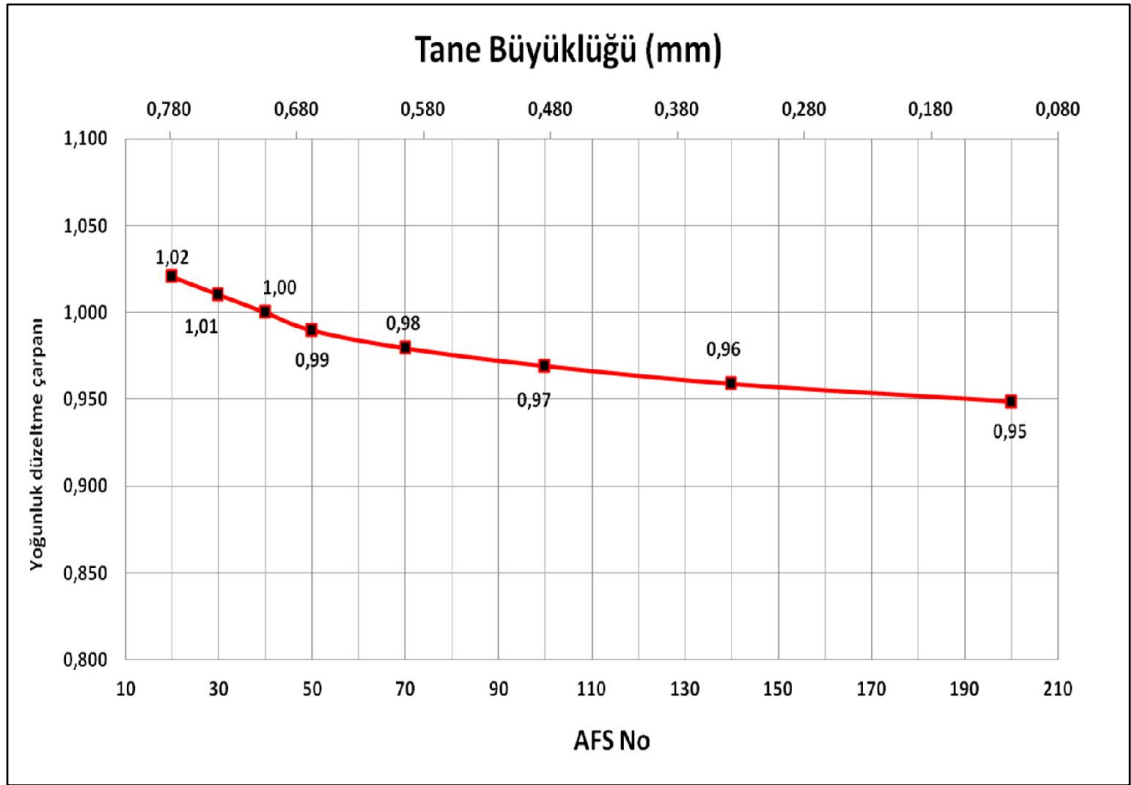
Çizelge 3.7 : Kalıp-maça malzemelerinin sıcaklığa bağlı ısı iletkenliğinin değişimi [62].

T °C	T K	Isıl İletkenlik, W/(m K)		
		Yaş Kum	Üretan	Kabuk
22	295	0,000	0,000	0,918
100	373	0,548	0,785	0,961
200	473	0,535	0,732	0,950
300	573	0,511	0,693	0,894
400	673	0,484	0,668	0,827
500	773	0,452	0,660	0,764
600	873	0,418	0,668	0,711
700	973	0,386	0,691	0,672
800	1.073	0,360	0,733	0,649
900	1.173	0,347	0,790	0,643
1.000	1.273	0,347	0,863	0,654
1.100	1.373	0,369	0,951	0,680
1.200	1.473	0,417	1,054	0,729
1.300	1.573	0,497	1,175	0,796
1.400	1.673	0,618	1,303	0,882
1.500	1.773	0,783	1,439	0,988
1.600	1.873	1,001	1,582	1,113



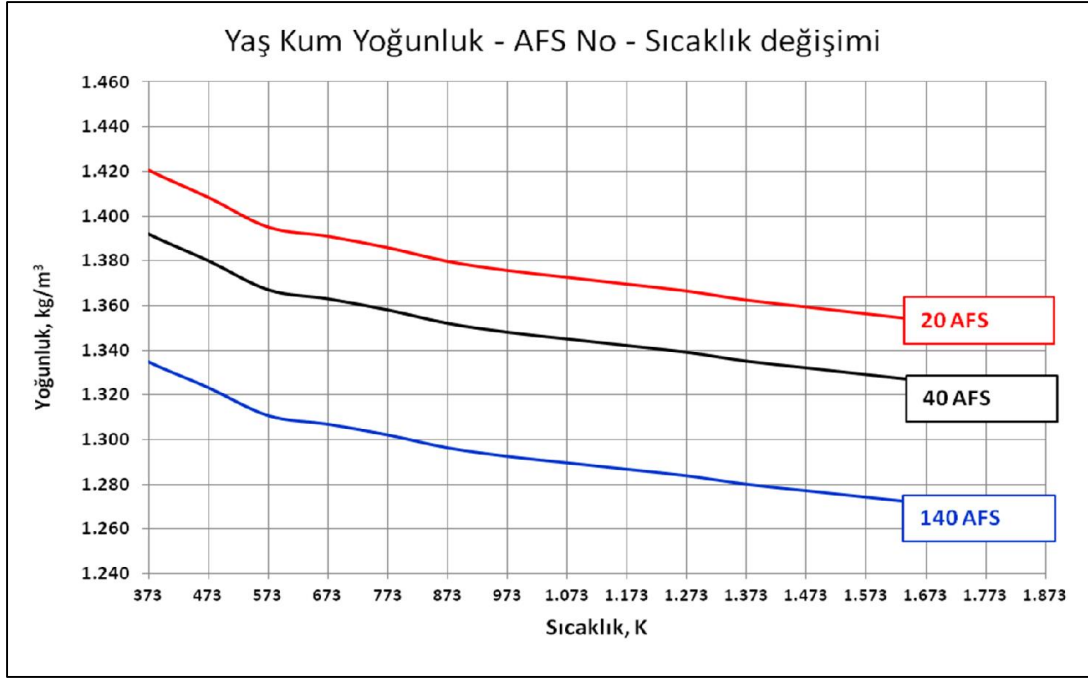
Şekil 3.18 : Yaş kum, üretan ve kabuk malzemelerinin sıcaklığa bağlı ısı iletkenlik değişimi.

3.11.4 Aynı paketleme basıncında tane büyüklüğünün yoğunluğa etkisi



Şekil 3.19 : Kalıp-maça malzemelerinde tane büyüklüğünün yaş kum karışımları için yoğunluk düzeltme çarpanı.

Yapılan modellemelerde, 40 AFS (Amerikan Foundrymen's Society) referans noktası olarak alınmıştır. Bulunan yoğunluk-sıcaklık değerleri 40 AFS içindir. Daha sonra, 20 AFS ve 140 AFS değerlerindeki yoğunluğu hesaplamak için Şekil 3.19 kullanılarak, yoğunluklar düzeltme faktörleri ile çarpılmıştır. Farklı tane boyutundaki malzemelerin sıcaklıktan etkilenme dereceleri de farklı olacaktır. Ancak, bu etki göz ardı edilmiştir. Farklı yaş kum numuneleri için sıcaklığa bağlı yoğunluk grafiği Şekil 3.20'de verilmiştir.



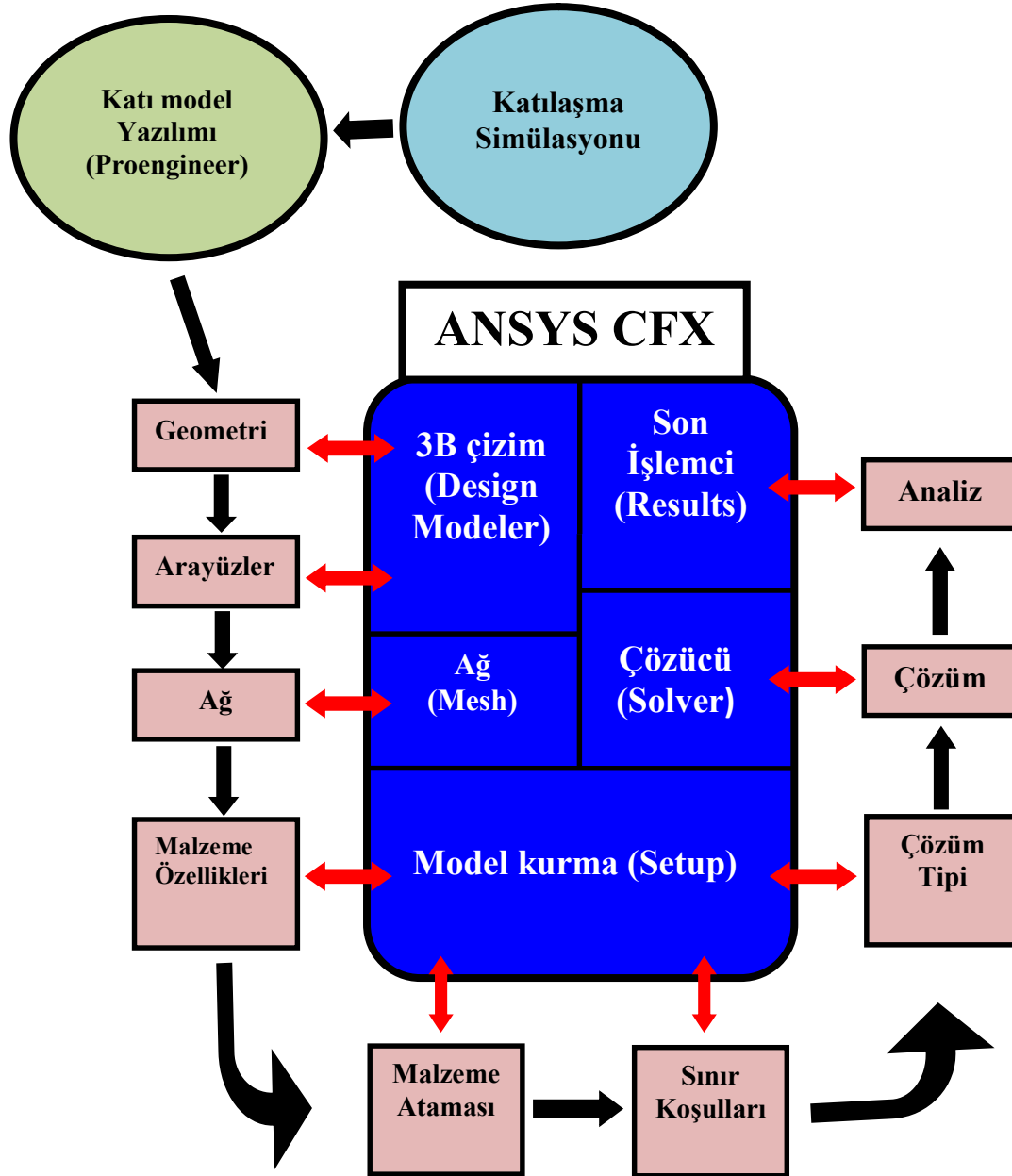
Şekil 3.20 : 20 AFS, 40 AFS ve 140 AFS tane boyutundaki kum için yoğunluğun sıcaklığa göre değişimi.

4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Model kurulumunda aşağıdaki adımlar atılmıştır (Şekil 4.1).

1. Modellenecek geometrinin yaratılması:
2. Modellenecek fan, kalıp, maça ve soğutucu geometrilerinin 3 Boyutlu çizimlerinin Pro-engineer yazılımında hazırlanması.
3. Çalışma alanlarının birbiri ile etkileşen ara yüzeylerinin belirlenmesi:
4. Modellenen geometri içinde bulunan tüm değişik malzeme ve sınır koşuluna sahip çalışma alanlarının (domains) ısı transfer ara yüzeylerinin (interface) belirlenmesi.
5. Ağ yapısının oluşturulması (mesh):
6. Çalışma alanı ve ara yüzeylerdeki ısı transferine bağlı olarak otomatik ağ oluşturulması. “Proximity-Inflation” özellikleri kullanılarak, gerekli yerlerde, modele ve sınır koşullarına uygun son ağ yapısının yaratılması.
7. Malzeme özellikleri:
8. Her çalışma alanı için malzemelerin ve ısı özelliklerinin belirlenmesi ve Ansys’in malzeme özellikleri kütüphanesine girilmesi.
9. Malzeme ataması:
10. Her çalışma alanı için tanımlı malzemelerden atama yapılması.
11. Sınır koşulları:
12. Sınır koşullarının (başlangıç koşulları ve ısı transfer tipi) belirlenmesi ve Ansys set-up modülüne girilmesi.
13. Çözüm tipi seçimi:
14. Çözüm için süreksiz çözüm seçilmesi ve sıcaklık dağılımlarının hangi yüzeylerde zamana bağlı olarak gözlemlenmek istenildiğinin belirlenmesi.
15. Çözüm:

16. Yakınsak çözümün elde edilmesi.
17. Sonuçların incelenmesi:
18. Son işlemcinin grafik özellikleri kullanılarak çözümlerin incelenmesi.



Şekil 4.1 : Ansys CFX modelleme akış şeması.

4.1 Donanım ve Çözüm Karakteristikleri

Çalışmada kullanılan bilgisayar donanımı, Ansys'in önerdiği özellikler doğrultusunda belirlenmiştir (Çizelge 4.1).

Çizelge 4.1 : Çalışmada kullanılan donanımın özellikleri.

İşlemci	Intel® Core™ i5-2310 Processor – 4 Cores (6M Cache, up to 3.20 GHz)
Bellek	16 GB 1333 Mhz DDR3 Kingston Ram
Sabit Disk	120 GB SSD Disk + 320 GB 7200 Rpm 16Mb Sata2 Hdd
Ekran Kartı	PNY Nvidia Quadro 600 1GB DDR3 128 Bit PCI-e x16
Mainboard	Intel P H67 chipset system

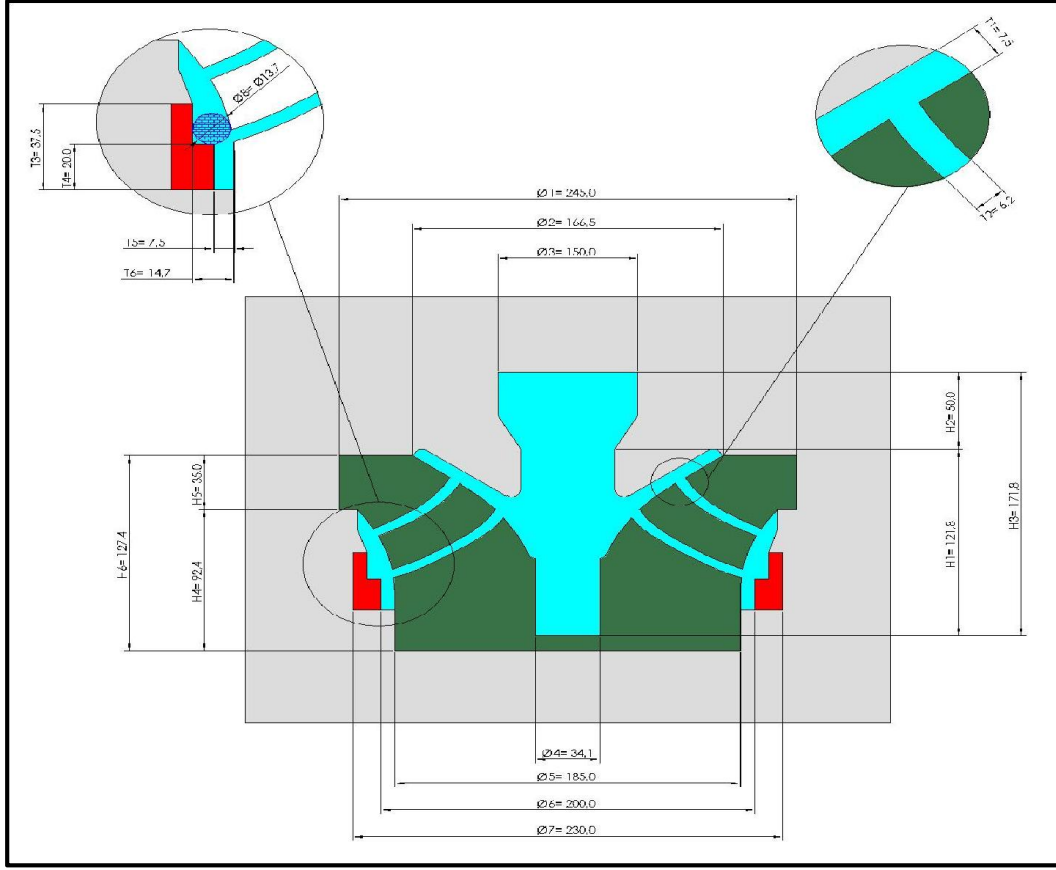
Çalışmada kullanılan çözüm karakteristikleri Çizelge 4.2’de verilmiştir.

Çizelge 4.2 : Çalışmada kullanılan çözüm karakteristikleri

Analiz tipi	Süreksiz (Transient)
Doğal taşınım tipi	Duvar (Wall)
Toplam zaman adımı	7.200 sn.
Zaman adım aralığı	0,5 sn.
Zaman aralığındaki maksimum döngü	15
Yakınsama kriteri	1×10^{-4}
Monitör	Tüm arayüzlerde sıcaklık
Monitör sıklığı	2,5 sn.
Program çalışma süresi (Run-time)	~ 12 saat

4.2 Çalışma Alanları (Çözüm Bölgeleri)

Çalışmada kullanılan ana model, dış çapı 300 mm, yüksekliği 172 mm ve besleyici çapı 150 mm olan aksel fan, kalıp, maça ve soğutucudan oluşmaktadır (Şekil 4.1). Modellenen geometri, endüstride üretilmiş fan geometrisidir.

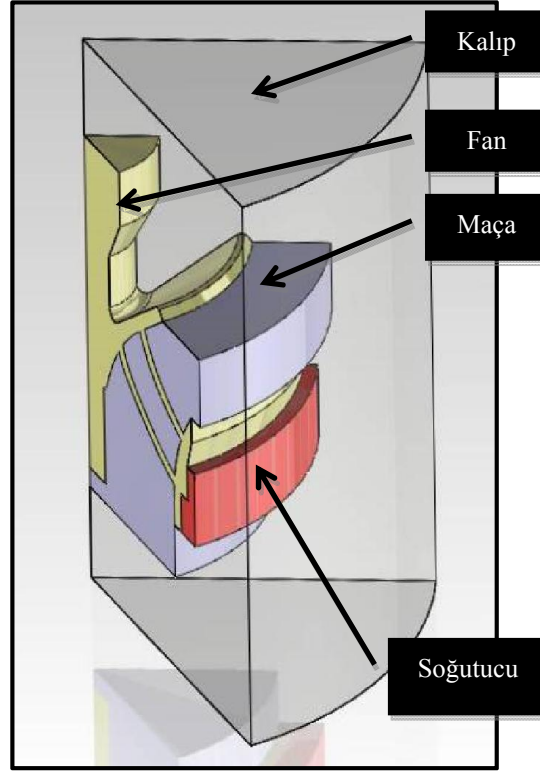


Şekil 4.2 : Model fan-kalıp-maça-büyük soğutucunun 2 boyutlu çizimi (mm).

Genel yaklaşım olarak, çözüm süresini kısaltabilmek için modelde simetri varsa uygun segmentasyon ile ana geometrinin tamamını temsil edecek bir parça geometrinin kullanılması esas olması sebebi ile bu çalışmada da 360^0 fan geometrisi yerine 60^0 fan geometrisi kullanılmıştır. Taranan literatür örneklerinin tamamındaki örneklerde, geometrinin elverdiği durumlarda, çözüm süresini kısaltabilmek için simetrik segmentasyon yapıldığı da gözlemlenmiştir.

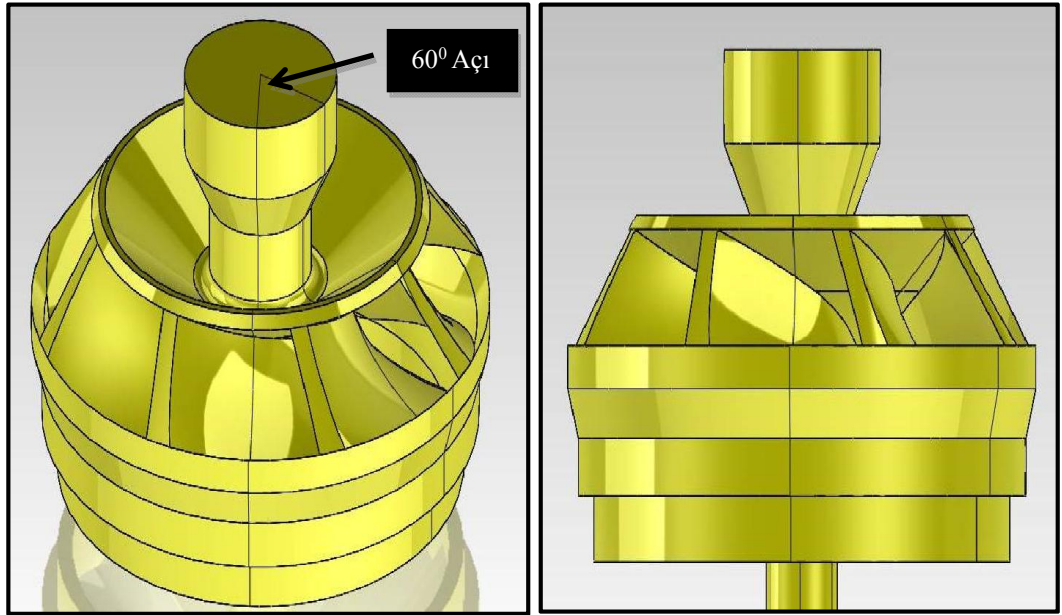
Bu çalışmada da esas hedef fandaki soğuma düzeninin elde edilmesidir. Fan geometrisinde kullanılan 60^0 segmentasyon, tüm model (kalıp, maça ve soğutucu) için de kullanılmıştır. Ancak, endüstride kullanılan kalıplar, dikdörtgen veya kare kesittedir ve kalıbın simetri eksenini de köşegenidir. Yani normal koşullarda, kalıp için simetri segmentasyonu köşegenlerden yapılır ve simetrik parça sayısı iki dir. Bu çalışmada, segmentasyonu tüm modelde kullanabilmek için, kalıp da silindirik prizma geometrisinde modellenmiştir. Bu sayede, fan, maça, soğutucu ve kalıp bir bütün olarak 60^0 'lik 6 simetrik parça halinde modellenilebilmiş ve çözüm bu parçaların biri üzerinde elde edilmiştir. Daha sonra, son işlemcinin geometrik özellikleri kullanılarak her biri 60^0 'lik segment olan 6 parça bir araya getirilerek, komple fan

(360⁰) çözümlü elde edilmiştir. Şekil 4.2’de, modelin 3 boyutlu 60⁰ ‘lik geometrik parçası görülmektedir.

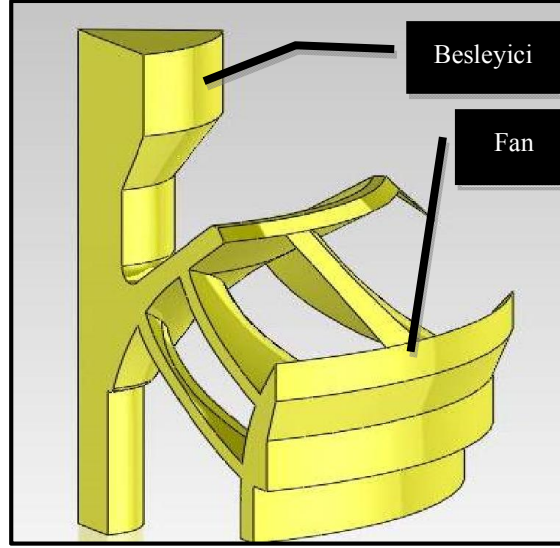


Şekil 4.3 : Modelin 60⁰’lik segmentinin 3 boyutlu çizimi.

Şekil 4.3 ve Şekil 4.4’de, fan çalışma alanının 3 boyutlu 360⁰ ve 60⁰ derecelik geometrik şekilleri gösterilmektedir.

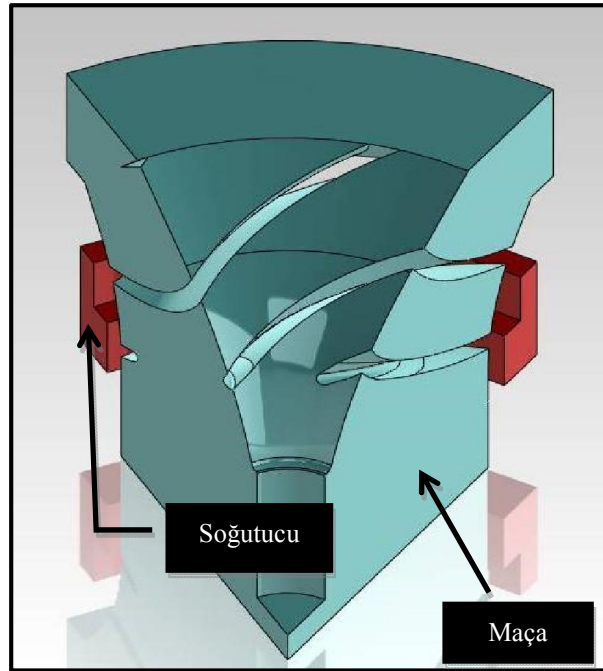


Şekil 4.4 : Fan çalışma alanının 360° geometrik çizimi.

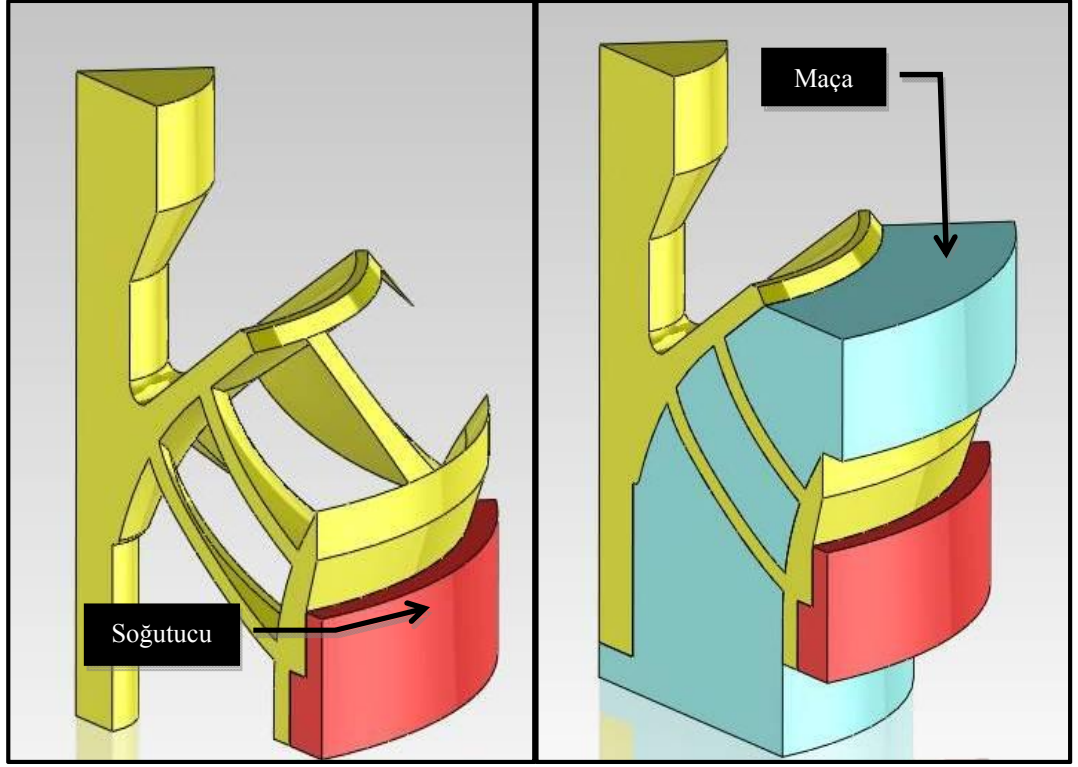


Şekil 4.5 : Fan çalışma alanının 60⁰ geometrik çizimi.

Aksiyel fan gibi karmaşık fan geometrilerinde, fan geometrisinin maçasız imalatı imkansızdır. Ayrıca, döküm teknolojisinde, soğuma düzeninin uygun elde edilmesi ve bölgesel hızlı katılaşma sağlayabilmek için soğutucu (çil) kullanımı da oldukça yaygındır. Genelde, çelik veya bakırdan imal edilen soğutucularda, yüksek ısı iletkenlik istenmektedir. Bu çalışmada, endüstride uygulaması sık görülen soğutucu ve fanın geometrisindeki karmaşıklık sebebiyle zaten kullanılması gereken maça, ayrı çalışma alanları olarak modele dahil edilmişlerdir. Şekil 4.5 ve Şekil 4.6’da maça, soğutucu ve fan çalışma alanları gösterilmiştir.

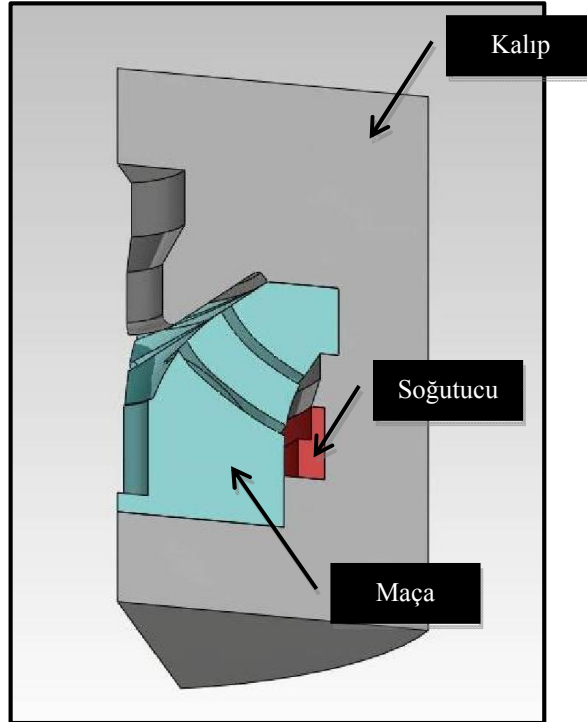


Şekil 4.6 : Maça ve soğutucu çalışma alanlarının 60⁰ geometrik çizimi.



Şekil 4.7 : Fan, maça ve soğutucu çalışma alanlarının 60^0 geometrik çizimi.

Fan-besleyici, maça ve soğutucu bir ayrı çalışma alanları modellendikten sonra, tüm çalışma alanlarını kuşatan kalıp çalışma alanı modellenmiştir. Modeldeki, kalıp, maça ve soğutucu geometrileri şekil 4.7’de gösterilmiştir.



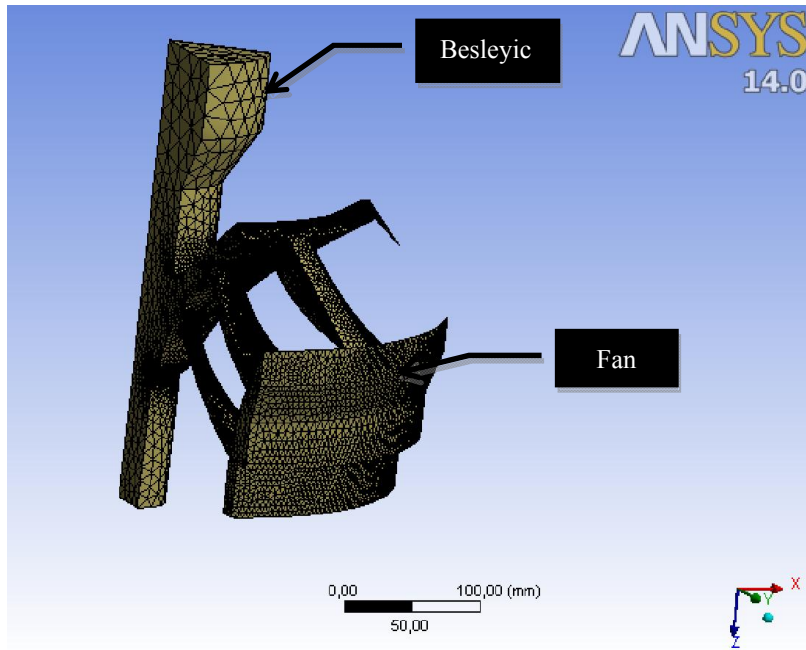
Şekil 4.8 : Kalıp, maça ve soğutucu çalışma alanlarının 60^0 geometrik çizimi.

4.3 Ağ Yapısı (Mesh)

Nümerik analizlerde (modelleme) en önemli adımlardan birisi çalışma alanlarının küçük elemanlara ayrılarak ağ yapısının oluşturulmasıdır.

4.3.1 Fan ve besleyici

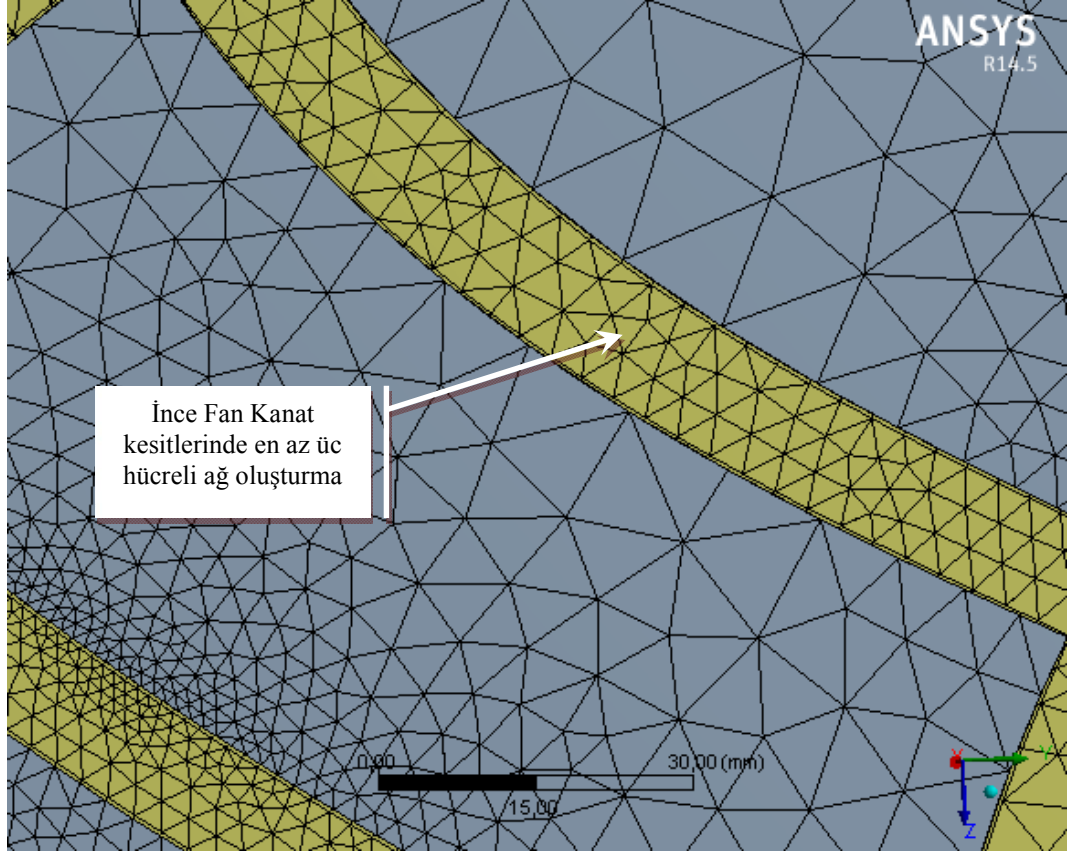
Fan ve besleyici birbirlerine besleyici boynu ile bağlı oldukları için aynı çalışma alanı olarak modellenmiştir (Şekil 4.8). Bu çalışmada fan için AISI 1016, AISI 304 ve AISI 316 çelikleri kullanılmıştır.



Şekil 4.9 : Fan ve besleyicinin ağ yapısı görünüşü.

Ansys CFX tarafından otomatik seçeneğiyle oluşturulan ağ yapısının, döküm uygulamalarına göre özelleştirilmesi gerekmektedir. Otomatik ağ oluşumunda, özellikle dar kesitlerde, Ansys her çalışma alanı sınırına bir düğüm (node) koymaktadır. Böylelikle, ince kesitlerdeki ağ, tek elamanla oluşturulmaktadır. Özellikle, ince kesitlerde, çözümün hassas ve katılma yüzeyinin doğru hesaplanabilmesi ve çözümün yakınsaması için, fan model geometrisindeki ince kesitleri için Ansys'in "Proximity and Curvature" seçeneği kullanılmıştır. Bu çalışmada Ansys'in ince kesitlerde en az 3 düğüm noktası (node) olacak şekilde ağ yapısı oluşturması hedeflenmiştir. Ayrıca, "Curvature" öndeğeri olarak 18° kabul edilmiştir ki, bu bir yarım dairelik geometrinin (180°), bir ongen şekline benzeştirilmesini sağlamaktadır [65, 66].

Şekil 4.9’da Ansys CFX’de kullanılan “Proximity and curvature” seçeneğiyle otomatik oluşturulan ağ yapısı üzerinde yapılan değişiklik görülmektedir.

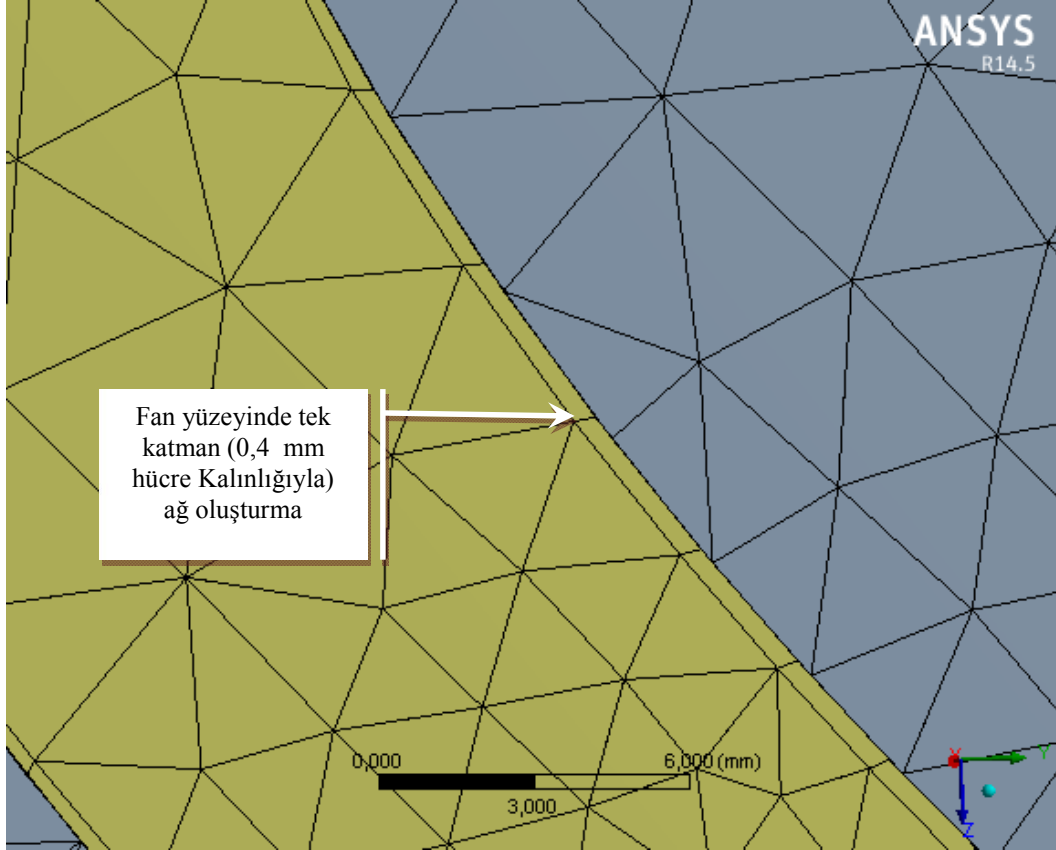


Şekil 4.10 : “Proximity” seçeneğiyle dar kanat kesitindeki en az üç hücreli ağ yapısı.

Ayrıca, kum (kalıp+maça) ve metal (fan) arasında $t=0$ anında sıcaklık farkı ($\Delta T = T_{\text{metal(fan)}} - T_{\text{kalıp/maça/soğutucu}}$) modelde kullanılan döküm sıcaklıklarına bağlı olarak, $1.650 \text{ K} - 298 \text{ K} = 1.352 \text{ K}$ veya $1.700 \text{ K} - 298 \text{ K} = 1402 \text{ K}$ veya $1.750 \text{ K} - 298 \text{ K} = 1.452 \text{ K}$ olmaktadır. İki komşu elemandan, kalıp (kum) tarafındaki eleman 298 K iken fan (metal) tarafındaki eleman aşırı ısıtma ile birlikte 1.650 , 1.700 ve 1.750 K olarak modellenmiştir. Bu büyük sıcaklık farkı, çözüm esnasında yakınsamayı önlemekte ve programın hatalı sonuçlar üretmesine sebep olmaktadır. Bu durumu önlemek için özellikle fan çevresindeki ağ yapısında büyük sıcaklık varyasyonlarını daha kolay hesaplayabilecek daha ince ağ yapısı yönünde değişiklik yapmak gerekmektedir. Ansys CFX’de bulunan “Inflation” opsiyonu ile fanın yüzey alanı çevresindeki tüm ağ yapısı daha küçük boyuta getirilmektedir. Çalışmada tek katman (Single Layer) ve ağ kalınlığı olarak $0,4 \text{ mm}$ (Cell Thickness) kullanılmış ve yakınsak çözümler elde edilmiştir. Bu konuda diğer bir yöntem bütün geometriyi çok ince ağ ile donatmaktır. Ancak, bu durumda gereksiz yerlerde de çok ince ağ yapısı

kullanılacağı için programın çözümleme zamanı daha da uzayacak ve çözüm dosyaları gereksiz yere çok daha büyük olacaktır.

Şekil 4.10’da Ansys CFX’de kullanılan “Inflation” seçeneğiyle otomatik oluşturulan ağ yapısı üzerinde yapılan değişiklik görülmektedir.



Şekil 4.11 : “Inflation” seçeneğiyle fan çalışma alanı etrafında yaratılan 0,4 mm kesitli ince hücre katmanı.

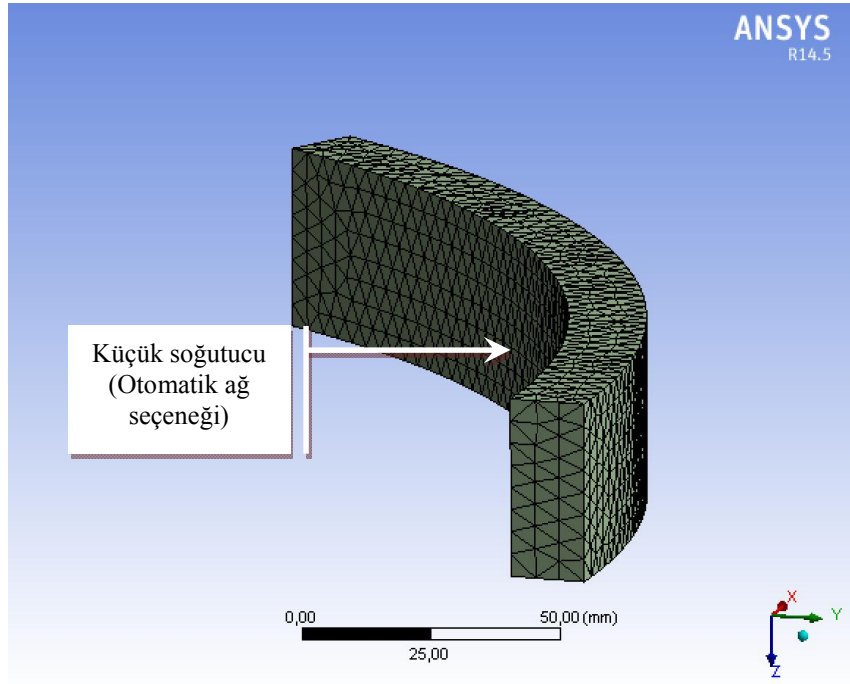
4.3.2 Soğutucu

Modelde iki tip soğutucu kullanılmıştır: Küçük soğutucu ve büyük soğutucu. Her iki soğutucu geometrisinin katılaşma üzerindeki etkileri ayrı ayrı incelenmiştir.

Küçük soğutucu için otomatik ağ seçeneğiyle ağ oluşumu yapılmıştır. Şekil 4.11’de görülen küçük soğutucunun malzemesi AISI 1016 çeliği ve $t=0$ anındaki sıcaklığı ($T_{\text{Soğutucu}}$) 298 K dir.

$$\text{Küçük soğutucu hacim} = V_{k.\text{soğ}} = 122,33 \text{ (cm}^3/60^0 \text{ kesit)} \times 6 = 733,98 \text{ cm}^3$$

$$\text{Küçük soğutucu ağırlık} = W_{k.\text{soğ}} = 733,98 \text{ cm}^3 \times 7,846 \text{ gr/ cm}^3 = 5.758,80 \text{ g}$$

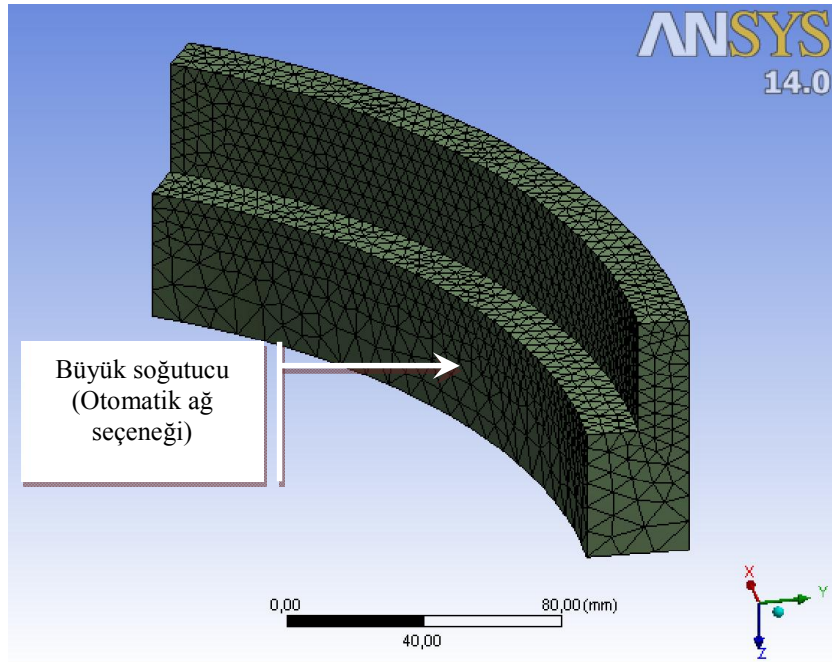


Şekil 4.12 : Küçük soğutucunun ağ yapısı görünüşü.

Büyük soğutucu için otomatik ağ seçeneğiyle ağ oluşumu yapılmıştır. Şekil 4.12’de görülen büyük soğutucunun malzemesi AISI 1016 çeliği ve $t=0$ anındaki sıcaklığı ($T_{\text{Soğutucu}}$) 298 K dir.

$$\text{Büyük soğutucu hacim} = V_{b.\text{soğ}} = 392,50 \text{ (cm}^3/60^0 \text{ kesit)} \times 6 = 2.355,00 \text{ cm}^3$$

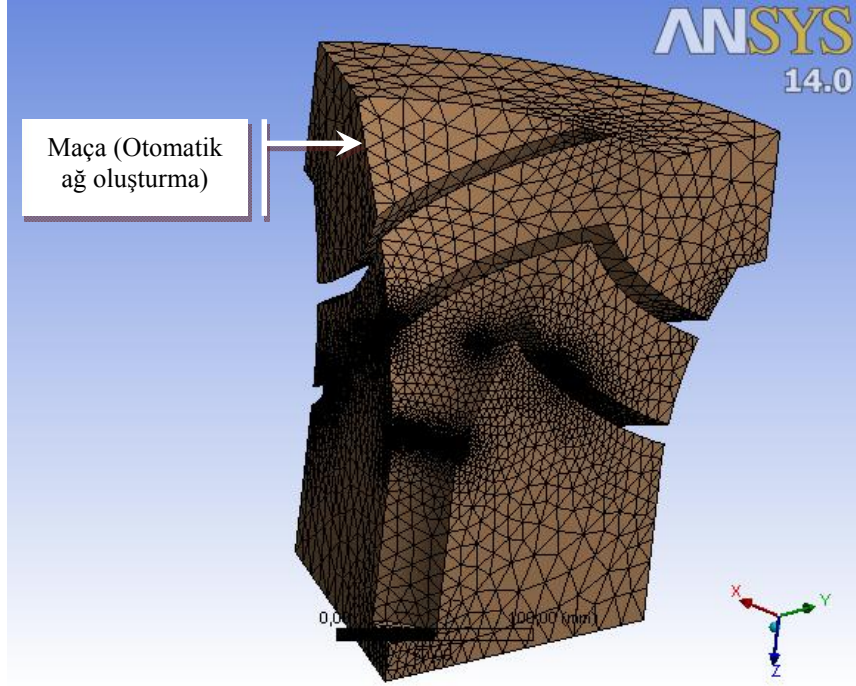
$$\text{Büyük soğutucu ağırlık} = W_{b.\text{soğ}} = 2.355,00 \text{ cm}^3 \times 7,846 \text{ gr/ cm}^3 = 18.477,33 \text{ g}$$



Şekil 4.13 : Büyük soğutucunun ağ yapısı görünüşü.

4.3.3 Maça

Bu çalışmada yaş kum (S50), ürethan ve kabuk maça kullanılmıştır. Bu üç tip maça için de sıcaklığa bağlı ısı özellikler bölüm 3.11’de açıklanmıştır. Değişik modellemelerin tamamında, $t=0$ anında maça sıcaklığı ($T_{Maça}$) 298 K’dir (Şekil 4.13).

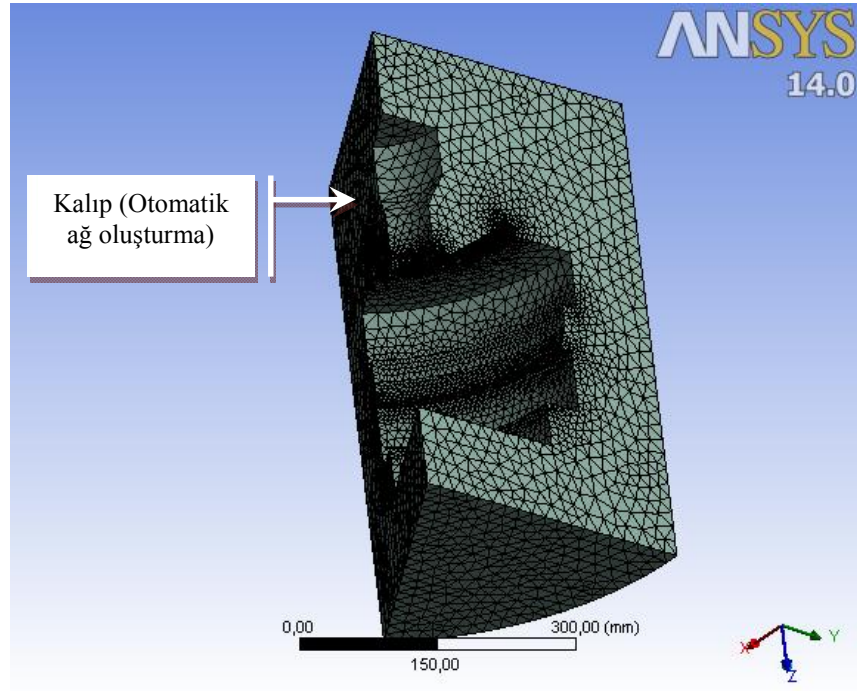


Şekil 4.14 : Maçanın ağ yapısı görünüşü.

4.3.4 Kalıp

Bu çalışmada kalıp kumunun katılma zamanı üzerindeki etkisini görmek için kalıp malzemesi olarak Yaş kum (20 AFS, 40 AFS ve 140 AFS), ürethan ve kabuk malzemeleri kullanılmıştır. Kalıp malzemesi tiplerinin sıcaklığa bağlı ısı özellikleri Bölüm 3.8’de açıklanmıştır. Bütün kalıp tiplerinde kalıp kumu sıcaklığı $t=0$ anında ($T_{Kalıp}$) 298 K’dir.

Ağ oluşturma sonrasında üretilen toplam düğüm sayısı 146.962 ve hücre (eleman) sayısı 683.891’dir. Çalışma alanlarına göre dağılım ise Çizelge 4.3’de gösterilmiştir. Çalışmanın esas hedefi olan metal içindeki ısı transferi ve fan-maça geometrilerindeki karmaşıklığa bağlı olarak, fan-maça’daki düğüm ve hücre sayısı diğer çalışma alanlarına göre oldukça fazladır.



Şekil 4.15 : Kalıbın ağ yapısı görünüşü.

Çizelge 4.3 : Model çalışma alanlarındaki düğüm ve hücre sayısı.

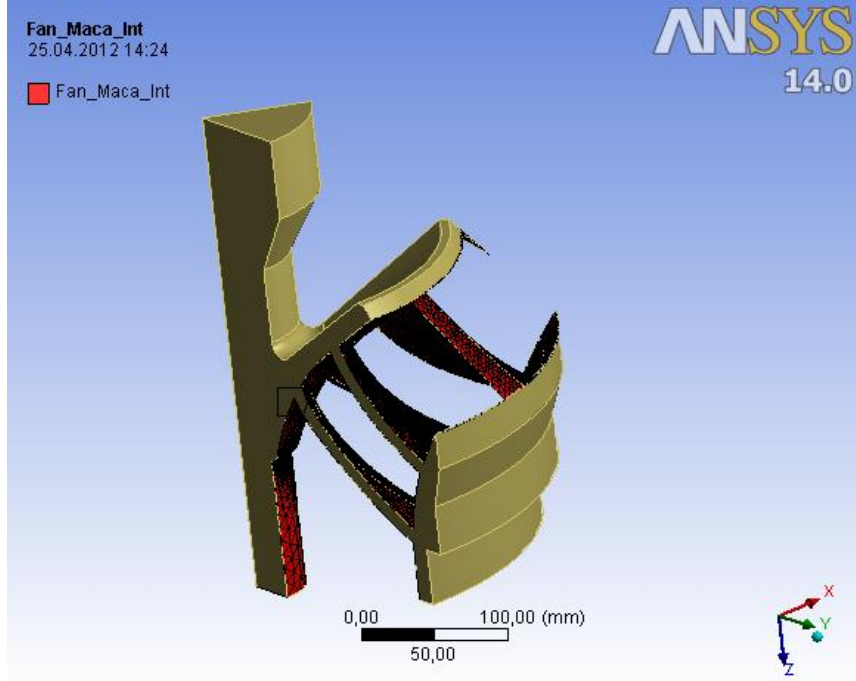
Çalışma Alanı	Düğüm Sayısı (Ad)	Hücre (Eleman) Sayısı (Ad)
Fan	69.901	282.588
Maça	50.860	269.424
Kalıp	22.521	115.350
Soğutucu	3.690	16.529
TOPLAM	146.962	683.891

4.4 Arayüzler

Modelde kullanılan çalışma alanlarının birbirleriyle ısı transferi açısından etkileşim alanlarının belirlendiği kısım modelin temel kısımlarından birisidir. Her çalışma alanının kendisine komşu çalışma alanlarıyla olan temas yüzeylerinin, ayrı ayrı belirlenip isimlendirilmesi gerekmektedir. Bu aşama, model kurulumunun en zaman alıcı ve karmaşık işlemidir. Bu adımda, kullanıcının, 3 boyutlu görüş yeteneğine ve tecrübeye sahip olması gereklidir. Bu çalışmadaki tüm çalışma alanları üstündeki arayüzler Şekil 4.15 – Şekil 4.20 arasında gösterilmiştir.

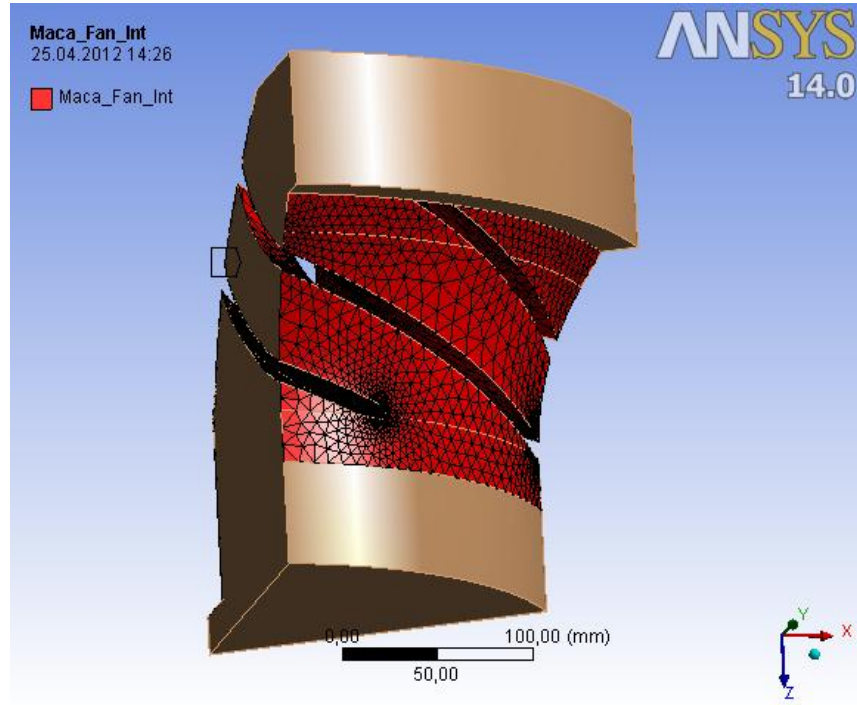
4.4.1 Fan-Maça arayüzü

Fan-Maça-Fan arayüzü, 35 değişik yüzeyden meydana gelmektedir. Fanın ve maçanın birbiriyle temas yüzleri olup, fan-maça arasında ısı enerjinin akacağı alan belirlenmektedir.



Şekil 4.16 : Fan-maça arayüzü.

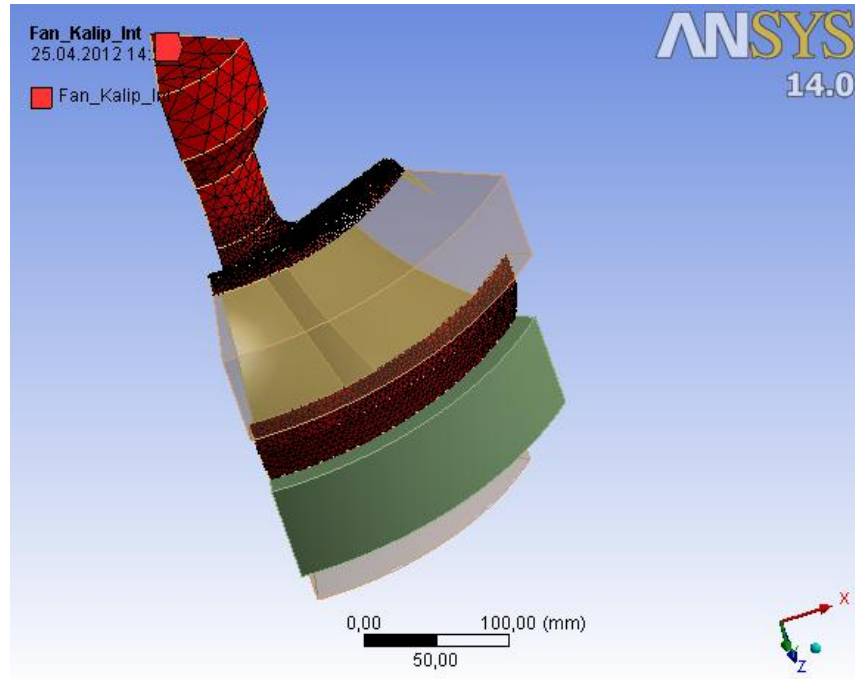
Fan-maça arayüzüne karşılık gelen arayüz, maça-fan arayüzüdür. Bu arayüzde de fan-maça arayüzünde olduğu gibi 35 adet yüzey bulunmaktadır.. Bu aşamada, Ansys CFX'in üç boyuttaki geometri yeteneği, ve belli çalışma alanlarını yüzey seçimi esnasında transparan yapma özelliği, yüzeylerin tamamının doğru bir şekilde seçilebilmesini sağlamaktadır.



Şekil 4.17 : Maça-fan arayüzü.

4.4.2 Fan-Kalıp arayüzü

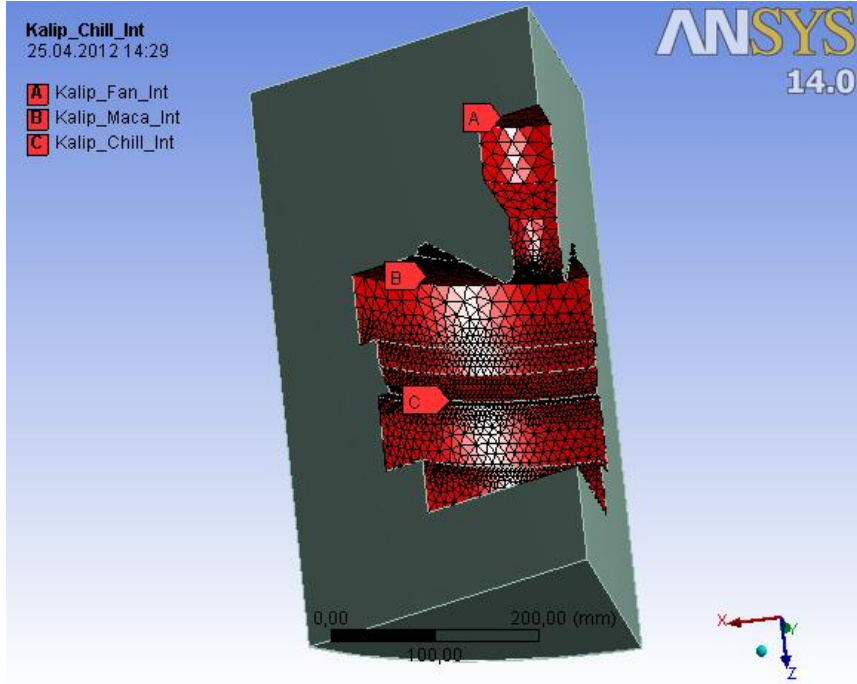
Kırmızı renkli olan fan-kalıp-fan arayüzü, 11 değişik yüzeyden meydana gelmektedir. Fan-kalıp arayüzü ile ilgili seçim yaparken, maça ve soğutucu dışındaki tüm arayüzeyler seçilmiştir.



Şekil 4.18 : Fan-kalıp arayüzü.

4.4.3 Kalıp-Fan-Maça-Soğutucu arayüzü

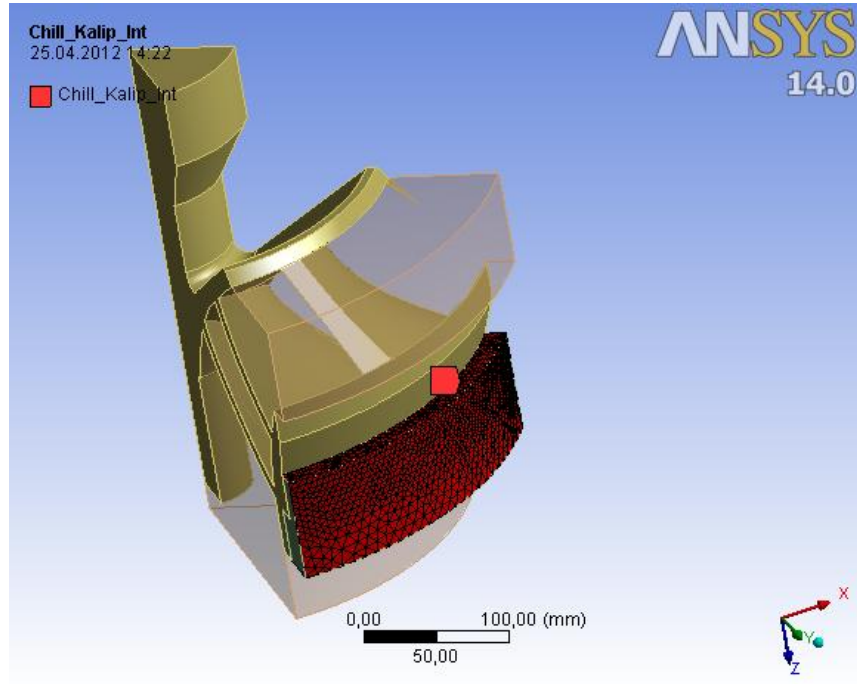
Fan-Kalıp-Fan ara yüzü, 11 yüzey, kalıp-maça-kalıp arayüzü, 5 yüzey ve kalıp-soğutucu-kalıp arayüzü, 3 yüzey olmak üzere, kalıp-fan-maça arayüzleri, toplamda 19 değişik yüzeyden meydana gelmektedir. Model kurulumunda, kalıp-maça, kalıp-fan ve kalıp-soğutucu arayüzleri ayrı ayrı belirlenip, ayrı ayrı isimlendirilmişlerdir.



Şekil 4.19 : Kalıp-fan-maça-soğutucu arayüzü.

4.4.3.1 Soğutucu - Kalıp arayüzü

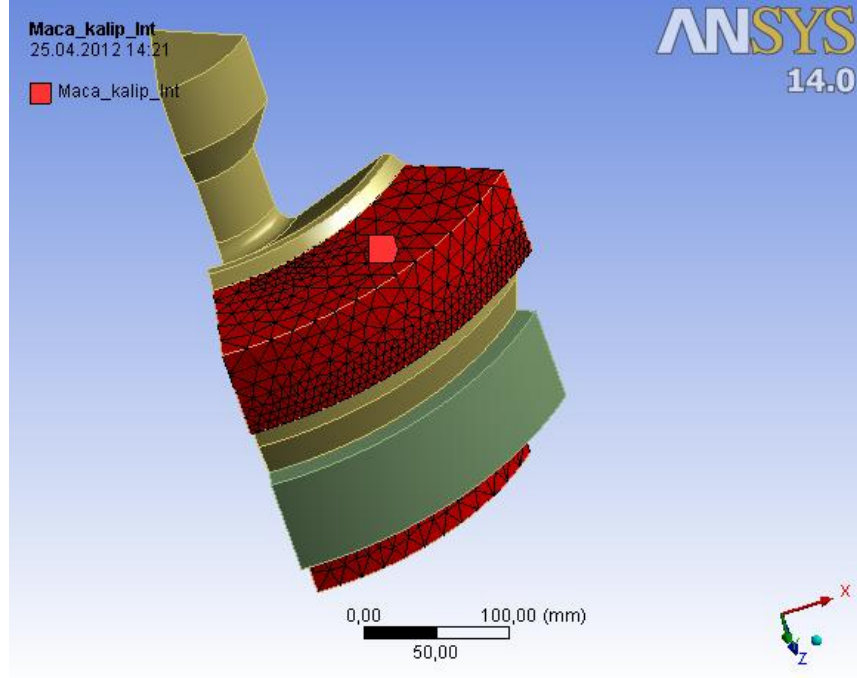
Soğutucu-Kalıp-Soğutucu arayüzü, Bölüm 4.5.3’de bahsedildiği gibi 3 yüzeyden oluşmaktadır.



Şekil 4.20 : Soğutucu-kalıp arayüzü.

4.4.3.2 Maça - Kalıp arayüzü

Maça-Kalıp-Maça arayüzü, 4.2.3’de bahsedildiği gibi 5 yüzeyden oluşmaktadır.



Şekil 4.21 : Maça-kalıp arayüzü.

4.5 Varsayımlar, Sınır Koşulları, Yakınsama ve Modeller

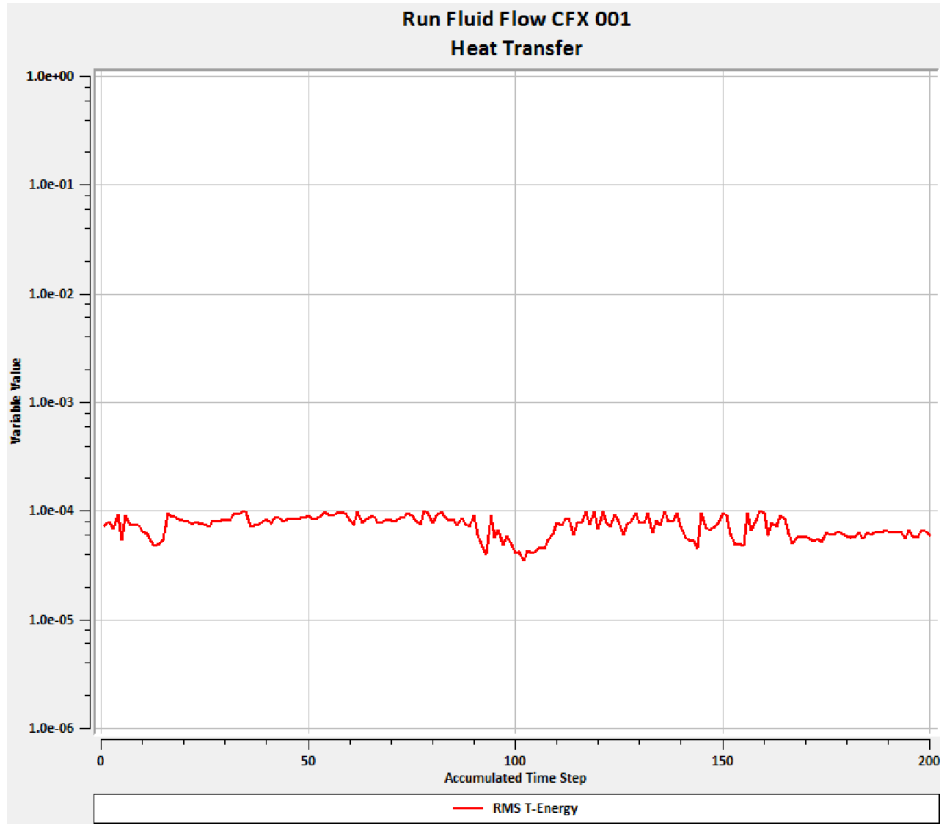
4.5.1 Varsayımlar ve Sınır Koşulları

1. $t=0$ anında metal, kalıp, maça ve soğutucunun uniform bir sıcaklığa sahip olduğu varsayılmıştır. Sınır koşulu olarak, $t=0$ anında, $T_{\text{metal}} = T_{\text{ergime+aşırı ısı}}$ olurken, $T_{\text{kalıp}}, T_{\text{maça}}, T_{\text{soğutucu}} = 298 \text{ K}$ 'dir.
2. Sıvı-katı rejimleri tek bir çalışma alanı (single domain) olarak modellenmiştir.
3. Katılaşma esnasındaki sıcaklık değişiminden ötürü olması beklenen konveksiyon ve sıvı metal hareketi göz ardı edilmiştir. Metal, kalıp, maça ve soğutucuda oluşan ısı transferinin sadece doğal taşınım mekanizması ile olacağı varsayılmıştır.
4. Soğuma esnasında kalıp/metal, maça/metal, soğutucu/metal arasındaki katılaşma çekmeleri sebebiyle oluşacak olan hava aralıkları göz ardı edilmiştir. Soğuma esnasında metal ile ortak yüzeyi bulunan tüm çalışma alanları arayüzlerinde ayrılma olmayacağı varsayılmıştır.
5. Maça, kalıp ve soğutucu malzemelerinde, metalden (fan) ısı akışı esnasında artan sıcaklıklarıyla birlikte olması gereken ısıl genleşmeleri göz ardı edilmiştir.
6. Katılaşma yüzeyi ve sıvı metal arasındaki yüzeyde oluşan ısıl direnç göz ardı edilmiştir.
7. Alt – üst kalıp yüzeyi konveksiyon film katsayısı, $5,75 \text{ W/m}^2\text{K}$ olarak alınmıştır [68].
8. Yan kalıp yüzeyi konveksiyon film katsayısı, $11,5 \text{ W/m}^2\text{K}$ olarak alınmıştır [68].
9. Endüstriyel uygulamalarda dereceler, üretilecek parçanın boyutlarıyla orantılı olarak kare veya dikdörtgen prizma şeklindedir. Ancak, tam simetriyi sağlayabilmek için, bu çalışmada kalıp derecesinin ve dolayısıyla kalıp şeklinin silindirik hacimli olduğu varsayılmıştır.

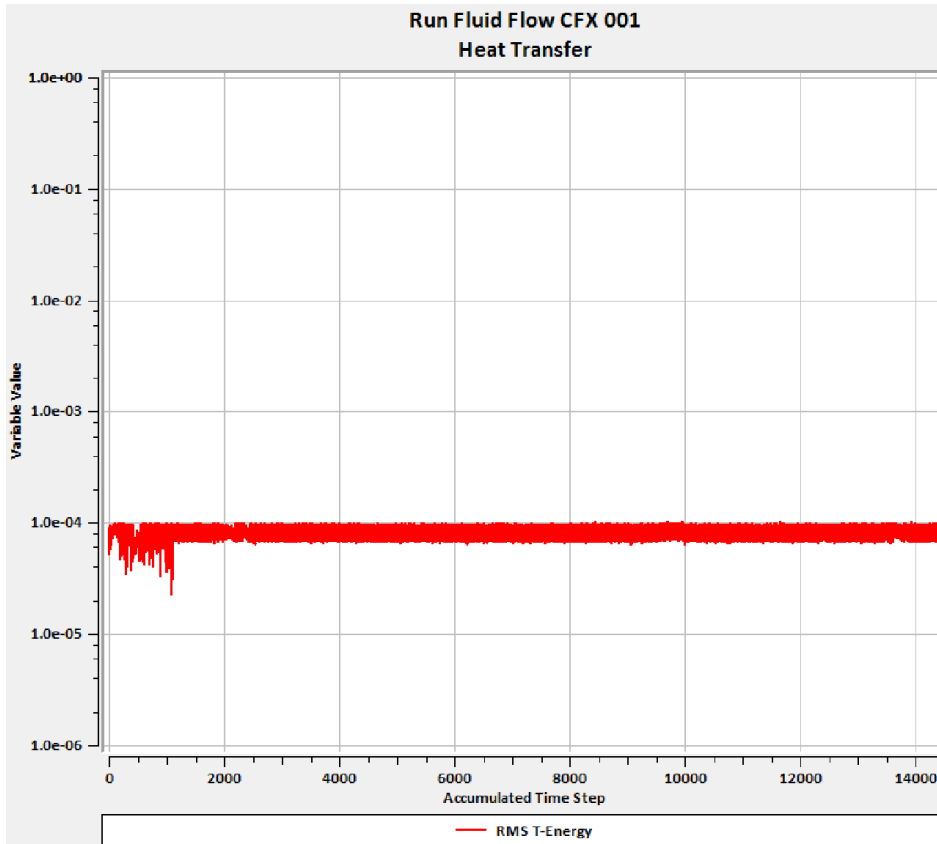
4.5.2 Yakınsama Koşulu

Süreksiz analizler (Transient analysis) İkinci dereceden geriye doğru Euler denklem (Backward Euler Equations) çözümü gerektirmektedir. Süreksiz analizlerde, çözümün yakınsaması kontrol edilmesi gereken bir unsurdur. Ansys CFX, özel bir algoritma kullanarak, çözümün istenen yakınsama kriteri (convergence criteria) göre kontrolünü yapmaktadır. Buna göre sistem denklemleri, düğüm noktalarında değişen zaman göre çözülmekte ve yeni hesaplanan değerler bir sonraki iterasyon için düğümlerde güncellenmektedir. Her zaman adımındaki iterasyonlar sonrasında sistem denklemlerinden hesaplanan BOKD (Bakiye-ortalama-Karekök-Değeri = Residual-Root-Mean-Square), yakınsama kriteriyle mukayese edilmektedir. Şayet, hesaplanan BOKD, yakınsama kriterine eşit veya daha küçük ise daha fazla iterasyon yapılmamakta ve bir sonraki zaman adımına geçilmektedir [67].

Bu çalışmada yakınsama kriteri olarak 1×10^{-4} hedeflenmiştir. Bu yakınsama kriterine ulaşmak için her bir zaman adımındaki iç iterasyonlar için maksimum iterasyon sayısı 15 olarak belirlendi ve zaman adımı 0,5 saniye atanarak, yakınsama kriteri olan $BOKD \leq 1 \times 10^{-4}$ kriteri test edildi. Şekil 4.21 ve Şekil 4.22, Ansys CFX tarafından üretilen yakınsama grafiklerini $t = 0 - 100$ saniye (0-200 adım) ve $t = 0 - 7200$ saniye (0-14.200 adım olarak göstermektedir. Şekillerden de görüldüğü gibi her zaman adımı için maksimum 1×10^{-4} yakınsama kriteri elde edilmiştir.



Şekil 4.22 : 0-100 saniye (0-200 adım) BOKD grafiği.



Şekil 4.23 : 0-7.200 saniye (0-14.400 adım) BOKD grafiği.

4.5.3 Modeller

Döküm endüstrisinde, parça üretim ekonomisini etkileyen en önemli kriter döküm verimliliğidir. Döküm verimliliği denklem 6.1 ile hesaplanmaktadır [15].

$$Döküm\ verimliliği = \frac{Parçanın\ ağırlığı\ (kg)}{Bu\ parçayı\ üretmek\ için\ dökülen\ metal\ (kg)} \quad (6.1)$$

Parçanın net ağırlığı üzerine temel olarak besleyici ve yolluk ilavesiyle döküm parçasını elde etmek için gereken toplam metal bulunur. Çoğu zaman besleyici(ler) döküm parçası üzerinde döküm verimliliğini düşüren önemli etkindir ve dökülmesi gereken toplam metalin de önemli ağırlığını oluşturmaktadır. Soğuma sonrasında besleyici(ler) ve yolluk sistemi mekanik veya ısı yolla döküm parçasından ayrılırlar ve tekrar ergitilerek kullanılırlar. Günümüzdeki enerji maliyetleri hesaba alınırsa, her bir dökümde tekrar tekrar ergitilerek dökülen faydasız kısım olan besleyici ve yolluğun döküm ekonomisine olan olumsuz etkileri anlaşılmaktadır.

En küçük boyutta ve en küçük sayıdaki besleyici ile yapılan döküm, en yüksek döküm verimliliğine ve en ucuz parça maliyetine sahiptir.

Besleyici büyüklüğü ve sayısı ise döküm geometrisine doğrudan bağlıdır. Bu sebepten her döküm parçası incelenmeli ve minimum hacimde ve sayıda besleyici için bir çeşit optimizasyon yapılmalıdır. Döküm parçasındaki katılma düzeninin elde edilmesi besleyici sayısını, katılma süresinin elde edilmesi ise besleyici şeklini ve hacmini belirlemektedir. Besleyiciler, döküm parça ile birbirine bağlı olmaları sebebiyle geometrik olarak bir bütündürler. Yani, döküm parçası ve besleyici bir bütün olarak soğumaktadır. Bu sebepten katılma düzeni döküm parçası ve besleyici için bir bütün olarak elde edilmektedir. Toplam geometrinin (döküm+besleyici) sahip olduğu soğuma düzeni, tasarım mühendisine parçanın metal çekmesi ve/veya sıcak yırtılma riskleri konusunda önemli bilgiler vermektedir. Gerekğinde tasarım mühendisi, döküm verimliliğini artıracak şekilde döküm geometrisini değiştirmekte böylece hem kalite sorunları azalmakta hem de döküm daha ekonomik yapılmaktadır.

Tezde, değişik döküm parametrelerinin, katılma süresi ve katılma düzenine olan etkileri incelendi (Çizelge 4.4).

Model 1-2-3’de, aşırı ısıtmanın (döküm sıcaklığının) katılaşma süresine olan etkisi, Model 4-5’de, Model 1’in parametreleri sabit tutularak, soğutucu ve soğutucu büyüklüğünün katılaşma süresi ve düzenine olan etkileri incelendi. Model 6-7’de kalıp kumu yoğunluğunun, Model 8-9’da değişik kalıp ve maça malzemesinin, Model 10-11’de AISI 304 ve AISI 316 çeliklerin katılaşma süresi ve düzenine olan etkileri incelenmiştir.

Çizelge 4.4 : Modeller ve modellerdeki değişkenler.

Model	Kalıp	Maça	Döküm Sıcaklığı (K)	Soğutucu	Döküm Alaşımı
1	Yaş kum 40 AFS	Yaş kum 40 AFS	1.973	Yok	AISI 1016
2	Yaş kum 40 AFS	Yaş kum 40 AFS	1.923	Yok	AISI 1016
3	Yaş kum 40 AFS	Yaş kum 40 AFS	2.023	Yok	AISI 1016
4	Yaş kum 40 AFS	Yaş kum 40 AFS	1.973	Küçük	AISI 1016
5	Yaş kum 40 AFS	Yaş kum 40 AFS	1.973	Büyük	AISI 1016
6	Yaş kum 20 AFS	Yaş kum 40 AFS	1.973	Yok	AISI 1016
7	Yaş kum 140 AFS	Yaş kum 40 AFS	1.973	Yok	AISI 1016
8	Üretan	Üretan	1.973	Yok	AISI 1016
9	Kabuk	Kabuk	1.973	Yok	AISI 1016
10	Yaş kum 40 AFS	Yaş kum 40 AFS	1.973	Yok	AISI 304
11	Yaş kum 40 AFS	Yaş kum 40 AFS	1.973	Yok	AISI 316

5. SONUÇLAR VE İRDELEMELER

Katılaşma süresi değişik döküm sıcaklıklarında, değişik maça ve kalıp malzeme ve değişik metaller için eksenel pompa fanı için modellenmiştir. Modelde, değişik çalışma alanlarının döküm sonrasındaki soğuma esnasında katılaşma düzenleri ve katılaşma düzenine soğutucunu etkisi incelenmiştir. Yapılan modelleme sonrasında çıkan sonuçlar, genel döküm teknolojisindeki bilgilerle uyumu da gözlemlenmiştir.

Bu çalışmada kullanılan Ansys CFX paket yazılımı, genel olarak akışkanlar dinamiği için kullanılsa dahi, ısı akış problemlerini de çözebilecek kapasitededir. Yazılım aslında pompa üreticileri tarafından hem pompa tasarımında hem de üretilecek pompanın fan dökümünün katılaşma düzeninin tahmininde kullanılabilmektedir.

Her bir modelde 14.400 hesap adımı ve 2.880 monitörlenmiş analiz bulunmaktadır. Ancak, tezde sadece katılaşma için önemli zaman sürelerindeki analizler irdelenmiştir.

5.1 Döküm sıcaklığının katılaşma süresine etkisi

Çizelge 5.1 : Değişken döküm sıcaklığı.

Model	Kalıp	Maça	Döküm Sıcaklığı (K)	Soğutucu	Döküm Alaşımı
1	Yaş kum 40 AFS	Yaş kum 40 AFS	1.973	Yok	AISI 1016
2	Yaş kum 40 AFS	Yaş kum 40 AFS	1.923	Yok	AISI 1016
3	Yaş kum 40 AFS	Yaş kum 40 AFS	2.023	Yok	AISI 1016

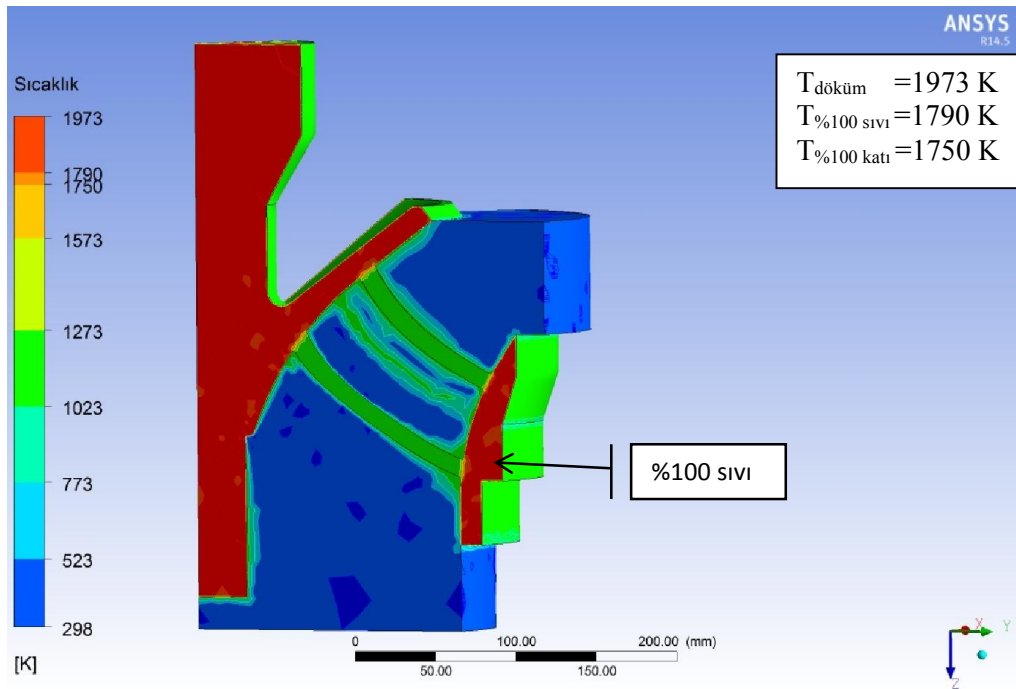
Döküm sıcaklığının katılaşma sürelerine etkisini incelemek için, kalıp, maça ve döküm alaşımının bütün özellik ve sınır koşulları sabit tutulup sadece döküm sıcaklığı değişken olarak kullanıldı. Bu durumun incelendiği ilk üç modelde kalıp ve maça malzemesi için yaş kum ve döküm alaşımı AISI 1016 çeliği seçilmiştir. Daha sonra her bir modelde tek değişken olarak döküm sıcaklığı, 1973 K, 1923 K ve 2023 K olarak değiştirilmiştir. Ansys CFX'in çözümünden sonra, son işlemcide, fan-maça ve fan-maça-kalıp çalışma alanları içindeki zamana bağlı sıcaklık değişimi

incelenmiştir. Tüm resimlerde, 1790 K'den daha sıcak bölgeler %100 sıvıdır ve koyu kırmızı renkle gösterilmiştir. 1790 K – 1750 K aralığındaki turuncu renk, sıvı+katı fazı temsil etmektedir. 1750 K'den daha düşük sıcaklıklar açık turuncudan mavi renge kadar %100 katı fazı göstermektedir.

Önemli sıcaklıklarda çalışma alanlarının analiz sonrasındaki sıcaklık dağılımlarını gösteren resimler üretilmiştir. Önemli sıcaklıklar, kanatlardaki katılaşma süreleri ve besleyici-göbek geometrisindeki katılaşma süresi, sıvı faz ve sıvı+katı fazın geometri içindeki dağılımı incelenmiştir (Şekil 5.1 - Şekil 5.52).

Normal şartlar altında, AISI 1016 çeliğin döküm sıcaklığı 1923 K olmasına rağmen, hem aşırı döküm sıcaklığının etkisini görmek hem de ince kesitlerde katılaşma düzenini ve sıvı+katı fazın geometrik şekli ve büyüklüğünü incelemek için yüksek sıcaklıklarda analizler yapılmıştır.

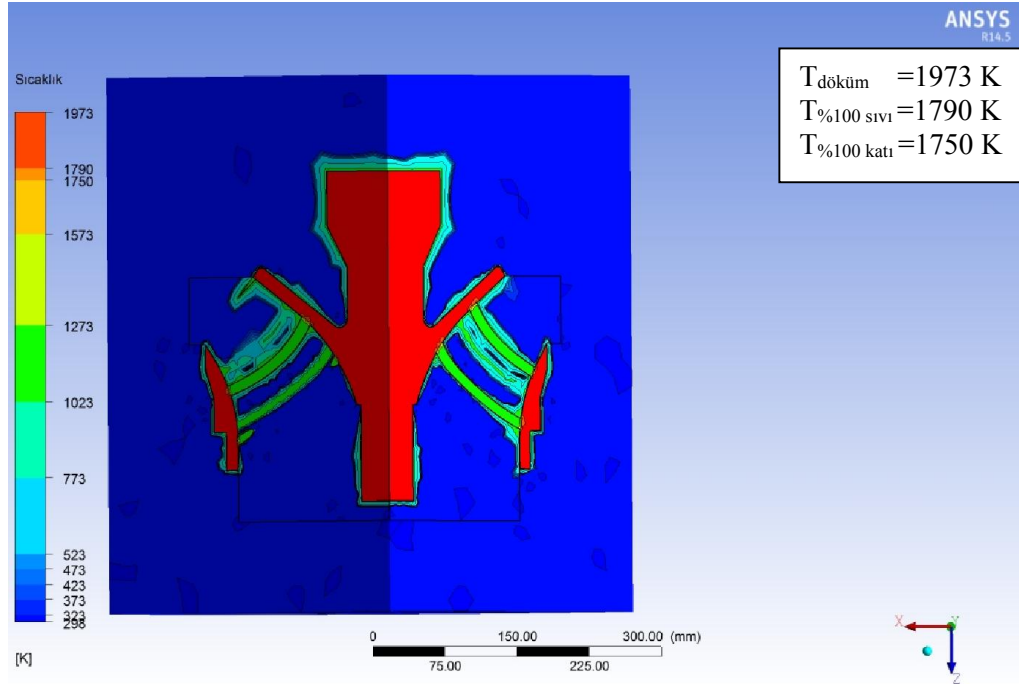
5.1.1 Model 1. $T_{\text{döküm}} = 1973 \text{ K}$



Şekil 5.1 : $t=0$ sn. Fan-maça çalışma alanlarındaki sıcaklık dağılımı (Model 1).

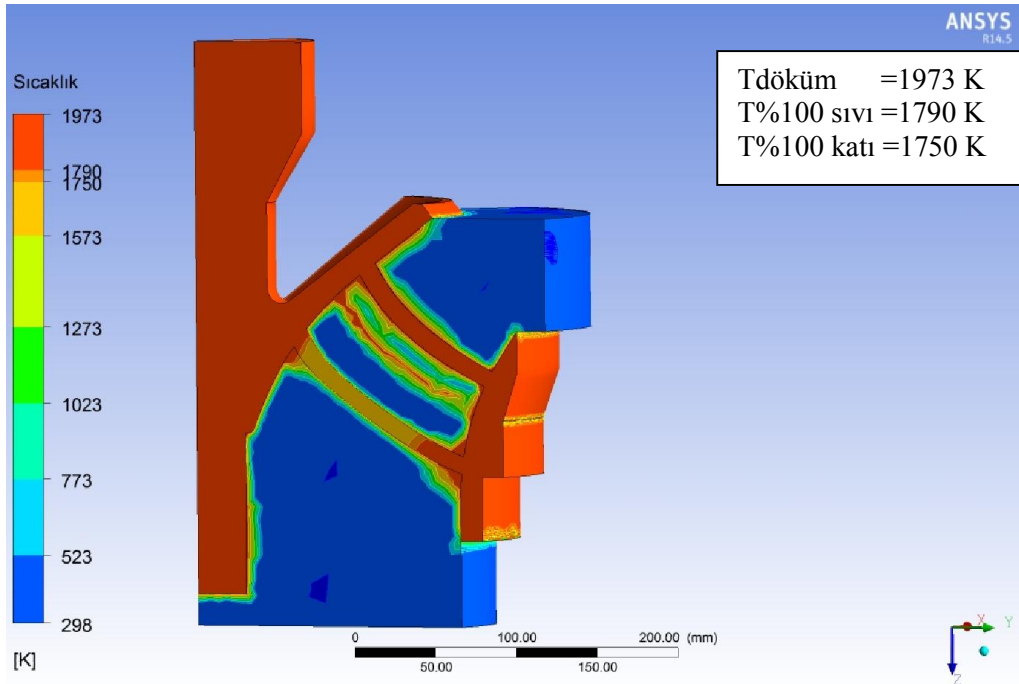
$t=0$ anında, soğumanın en başında, döküm yüzeyinin tamamında, çok ince bir cidarda yüzey sıcaklığı 1.273 K – 1.023 K seviyesine inmekte ve katı bir yüzey kabuğu oluşmaktadır. Daha sonra, çok kısa zaman içinde, metalin iç ısı bu kabuk yüzeyi ertirmektedir. $t=0$ anındaki bu durum, pratikte gözlenmesi mümkün olmayan bir simülasyondur. Kabuğun ergimesi saniyelerden kısa zaman almaktadır. Ancak,

sayısal analizlerde, zaman adımının 0,01 saniye mertebesine ayarlanmasıyla, model incelenebilmektedir (Şekil 5.1).



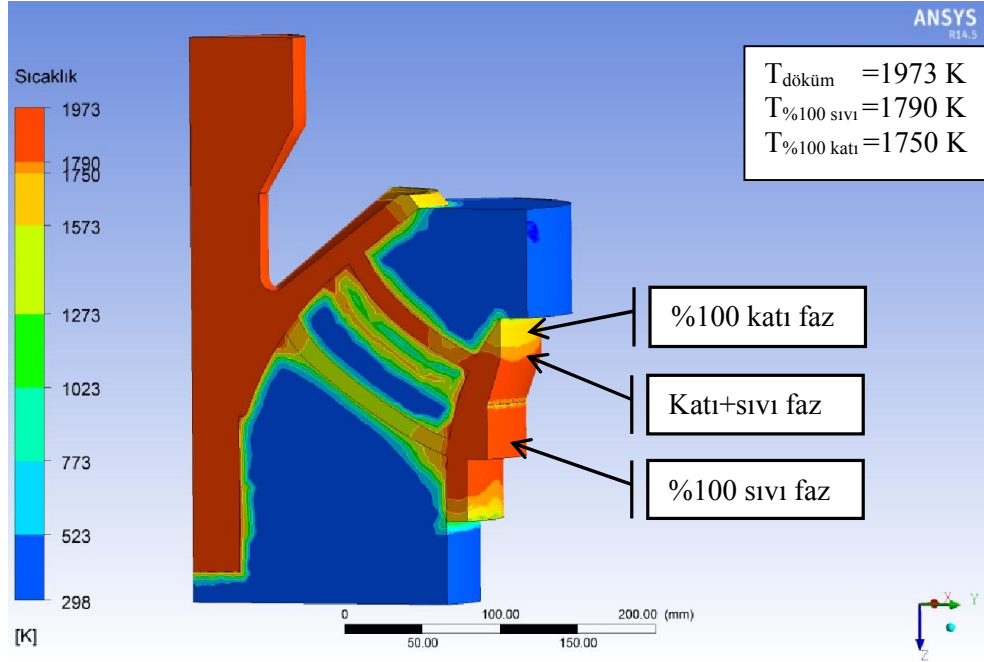
Şekil 5.2 : $t=0$ sn. Fan-maça-kalıp çalışma alanlarındaki sıcaklık dağılımı (Model 1).

Şekil 5.2, $t=0$ anında fan+maça+kalıp çalışma alanlarındaki sıcaklık dağılımını göstermektedir. Kalıp çalışma alanının tamamı oda sıcaklığındadır (298 K).



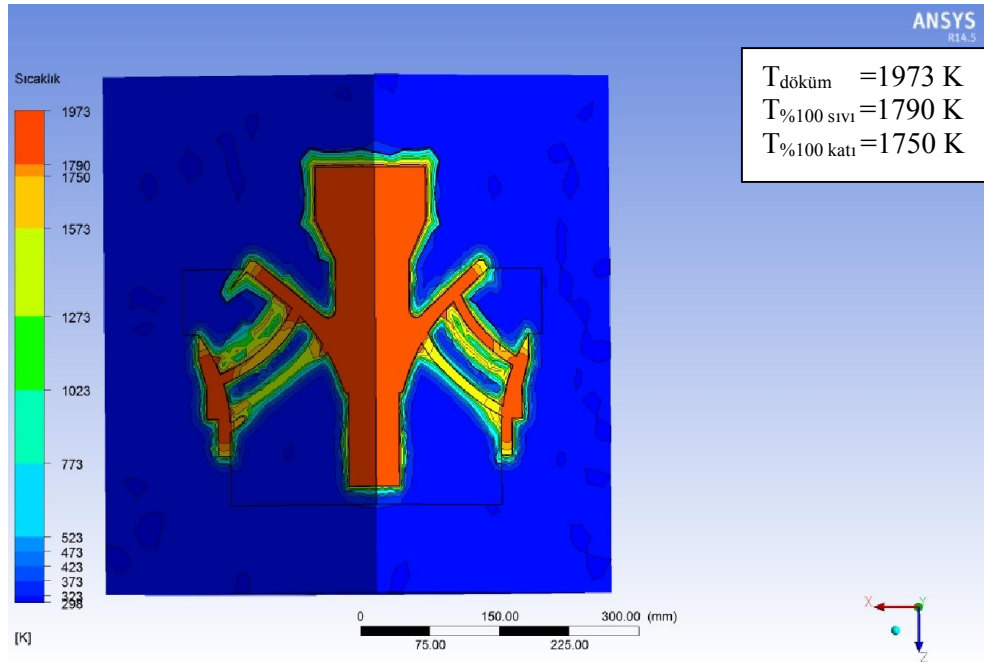
Şekil 5.3 : $t=20$ sn. Fan-maça çalışma alanlarındaki sıcaklık dağılımı (Model 1).

$t=20$ saniye zaman adımıdaki, sıcaklık dağılımına bakıldığı zaman, $t=0$ anındaki katı kabuğun yeniden ergidiği ve ince kanat kısımlarında katılaşmanın başladığı görülmektedir (Şekil 5.3).



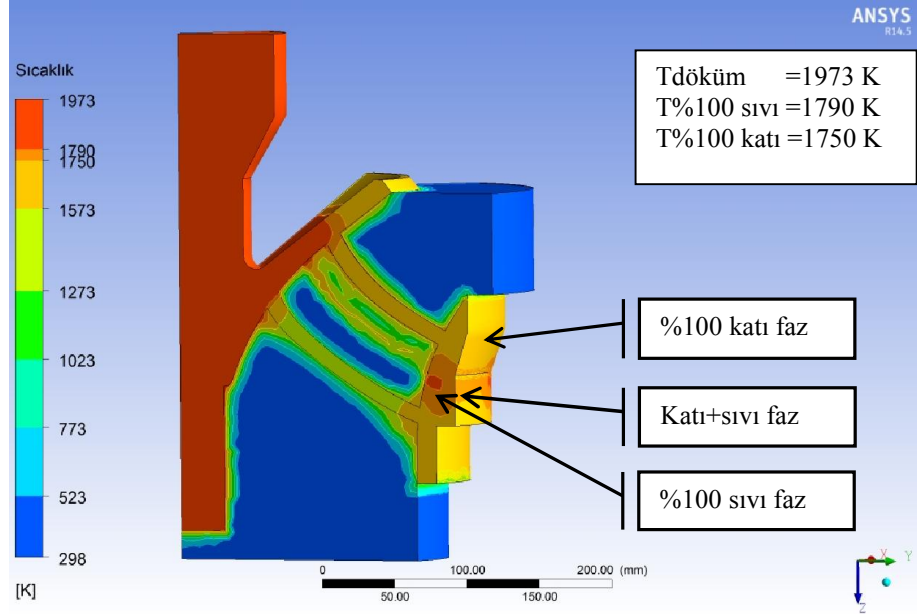
Şekil 5.4 : $t=45$ sn. Fan-maça çalışma alanlarındaki sıcaklık dağılımı (Model 1).

$t=45$ saniyede, dış fan kanadının uç kısımlarında sıvı+katı fazı (1.790 K – 1.750 K) ve katı faz oluşmuştur (Şekil 5.4).



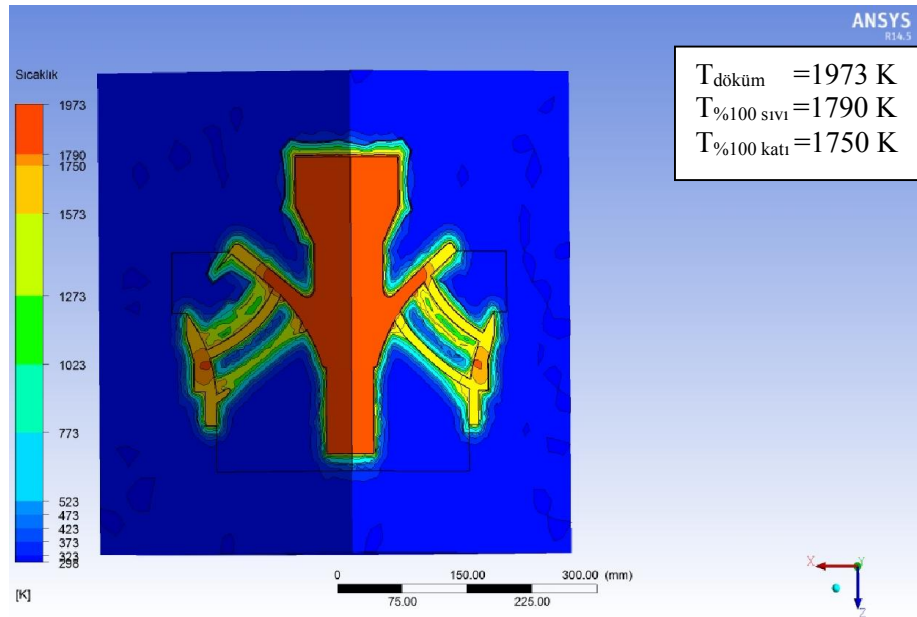
Şekil 5.5 : $t=45$ sn. Fan-maça-kalıp çalışma alanlarındaki sıcaklık dağılımı (Model 1).

$t=45$ saniyede, kanatlarda katılaşma başlamıştır. Fan katılaşıp soğurken, ısıyı emen kalıp ve maçanın, ısınmaya başladığı görülmektedir. Bu zaman diliminde, sıcaklık izotermi biribirine çok yakındır ki kısa mesafede daha yüksek sıcaklık gradyanını göstermektedir (Şekil 5.5).



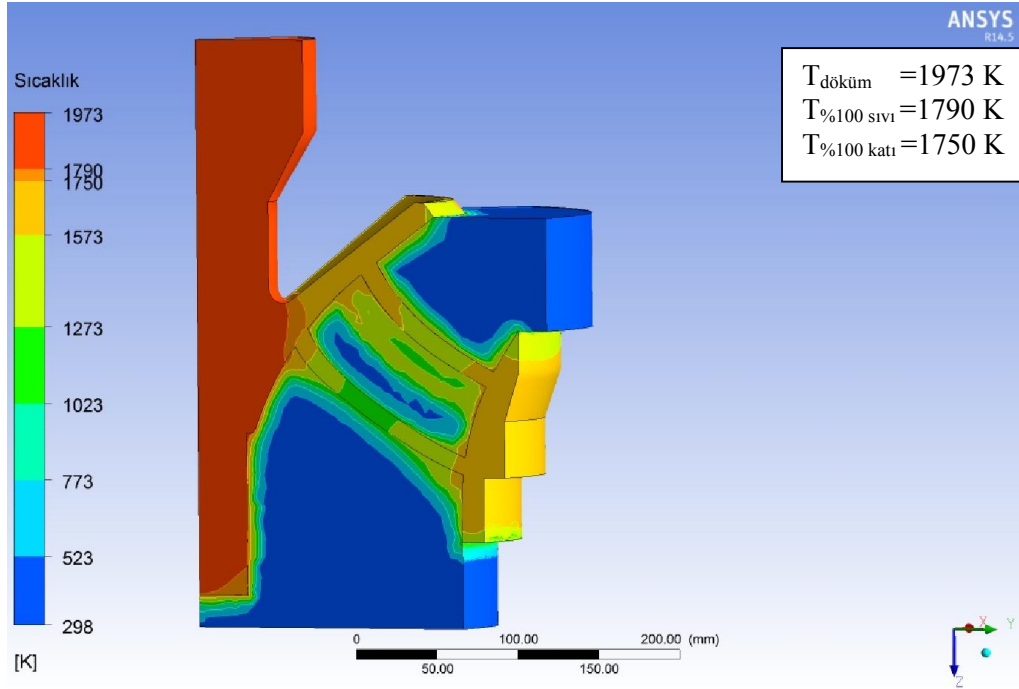
Şekil 5.6 : $t=75$ sn. Fan-maça çalışma alanlarındaki sıcaklık dağılımı (Model 1).

$t=75$ saniyede, dış fan kanadı tamamen katılaşmıştır. Sadece kanadın orta kısmındaki hacimli bölge sıvı ve sıvı+katı faza sahiptir. Merkezdeki besleyici ile bağ tamamen kopmuştur (Şekil 5.6).



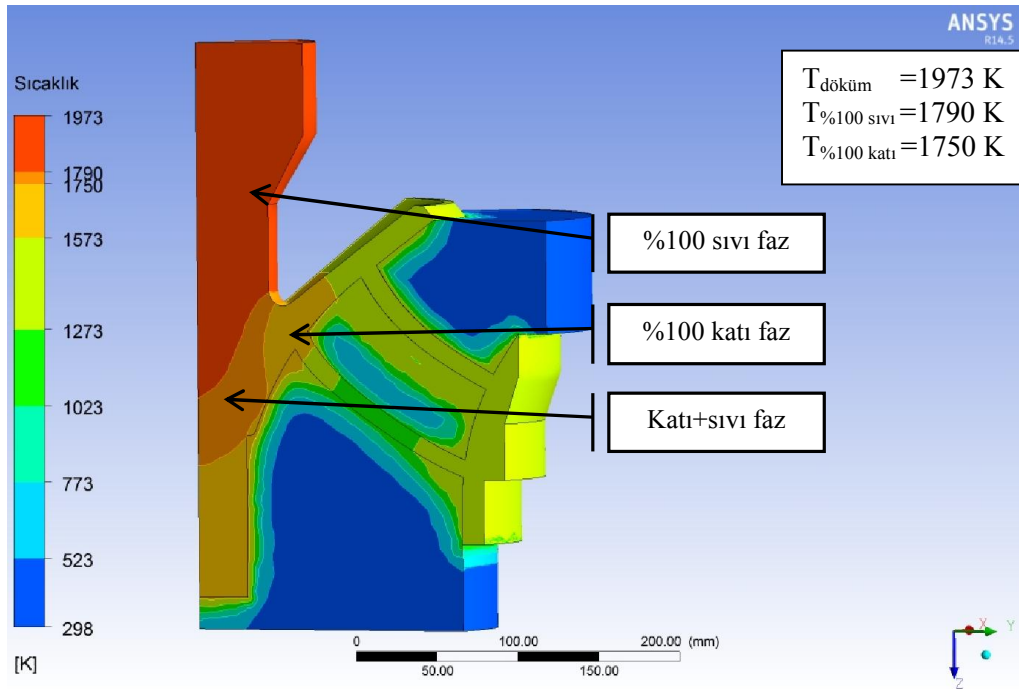
Şekil 5.7 : $t=75$ sn. Fan-maça-kalıp çalışma alanlarındaki sıcaklık dağılımı (Model 1).

$t=75$ saniyede, dış kanatta katılaşma tamamlanmış ancak kalıbın önemli kısmı hala oda sıcaklığı mertebesinde bulunmaktadır (Şekil 5.7).



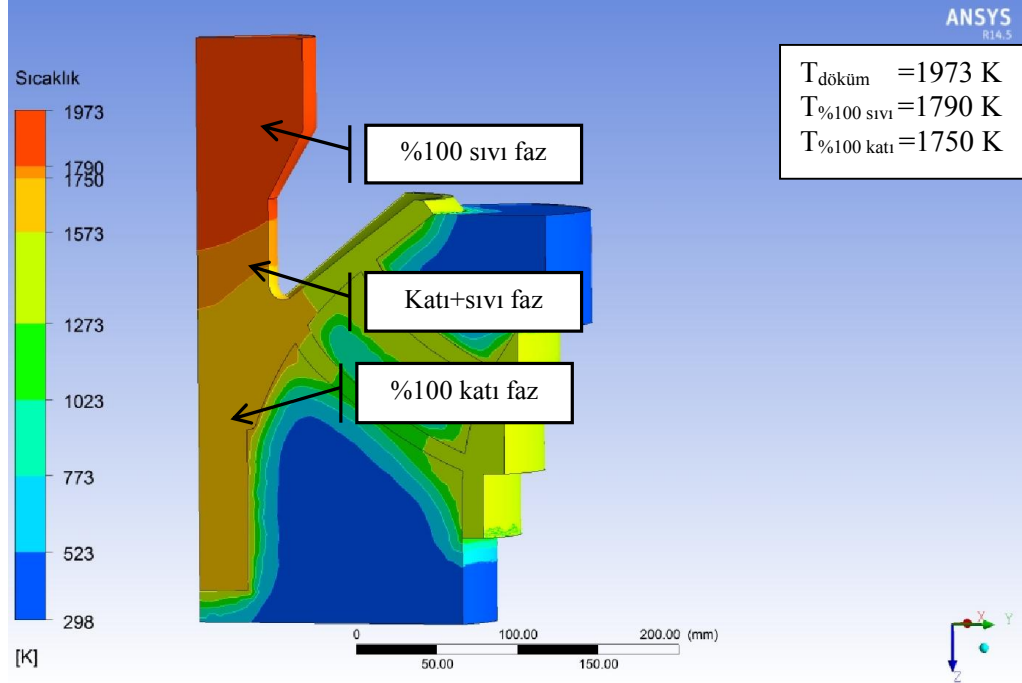
Şekil 5.8 : $t=120$ sn. Fan-maça çalışma alanlarındaki sıcaklık dağılımı (Model 1).

$t=120$ saniyede, dış kanatlar %100 katı ve besleyici %100 sıvıdır. Fan göbeğinin en alt bölgesinde katılaşma başlamıştır (Şekil 5.8).



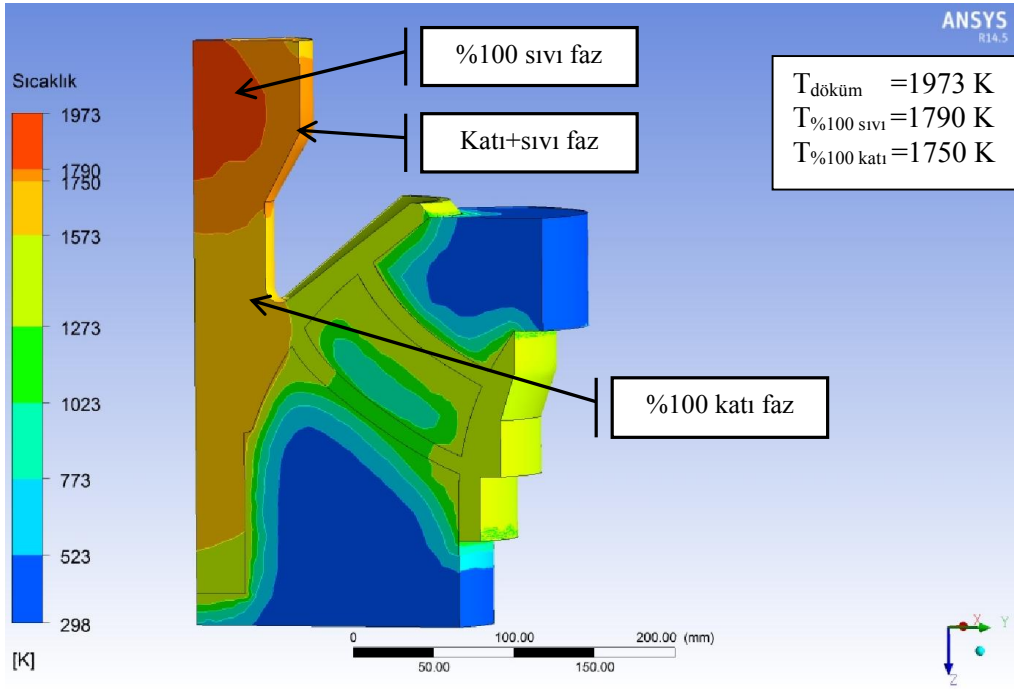
Şekil 5.9 : $t=240$ sn. Fan-maça çalışma alanlarındaki sıcaklık dağılımı (Model 1).

$t=240$ saniyede, beklenildiği gibi, fan göbeğindeki katılaşma besleyicinin bağlanmadığı uçtan başlayarak, besleyiciye doğru ilerlemektedir. Artık fan kanatları %100 katı, besleyici %100 sıvı ve göbeğin alt kısımlarında %100 katı ve besleyiciye yakın kısımlarında ise sıvı+katı fazlar görülmektedir (Şekil 5.9).

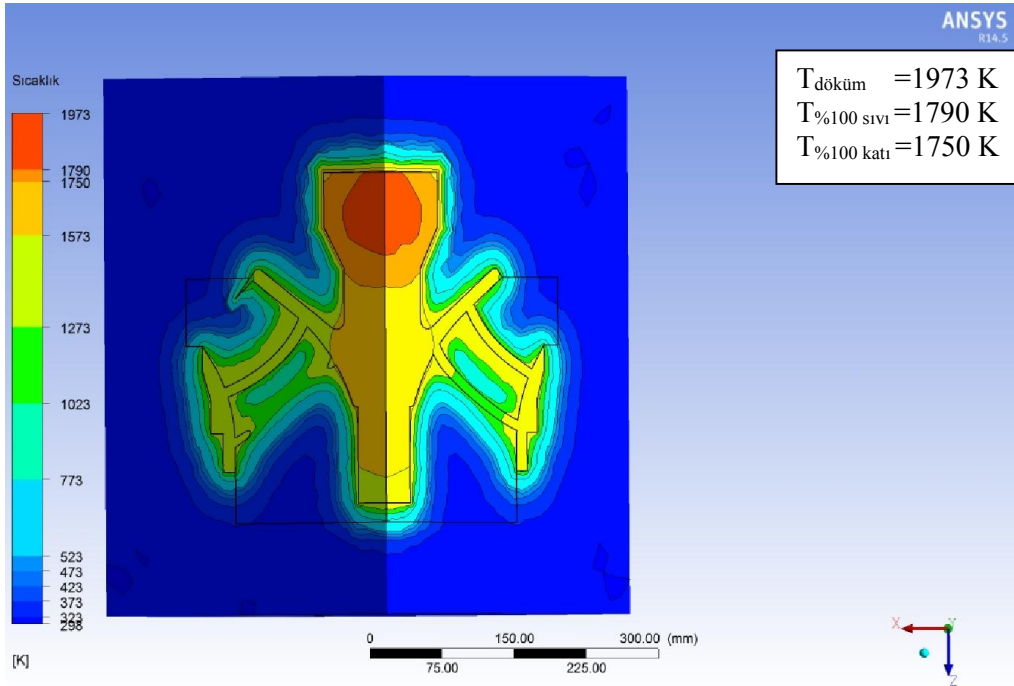


Şekil 5.10 : $t=360$ sn. Fan-maça çalışma alanlarındaki sıcaklık dağılımı (Model 1).

Katılaşmanın başlangıcından itibaren 360 saniyenin geçtiği durumun simülasyonu olan Şekil 5.10'da, son katılaşan kısmın besleyici olduğu görülmektedir. Sıvı kısım besleyicinin içinde bulunmakta ve sıvı+katı faz besleyici boynunda katılaşmaya devam etmektedir. Fan göbeğinde yönlendirilmiş katılaşmanın yakalandığı görülmektedir, ancak dış kanatlarla besleyicinin bağı koptuğu için dış kanatlarda muhtemelen çekintiler oluşacaktır. Dış kanatlarında çekinti boşluğunu giderecek soğutucu kullanımı Bölüm 5.2'de açıklanmıştır.

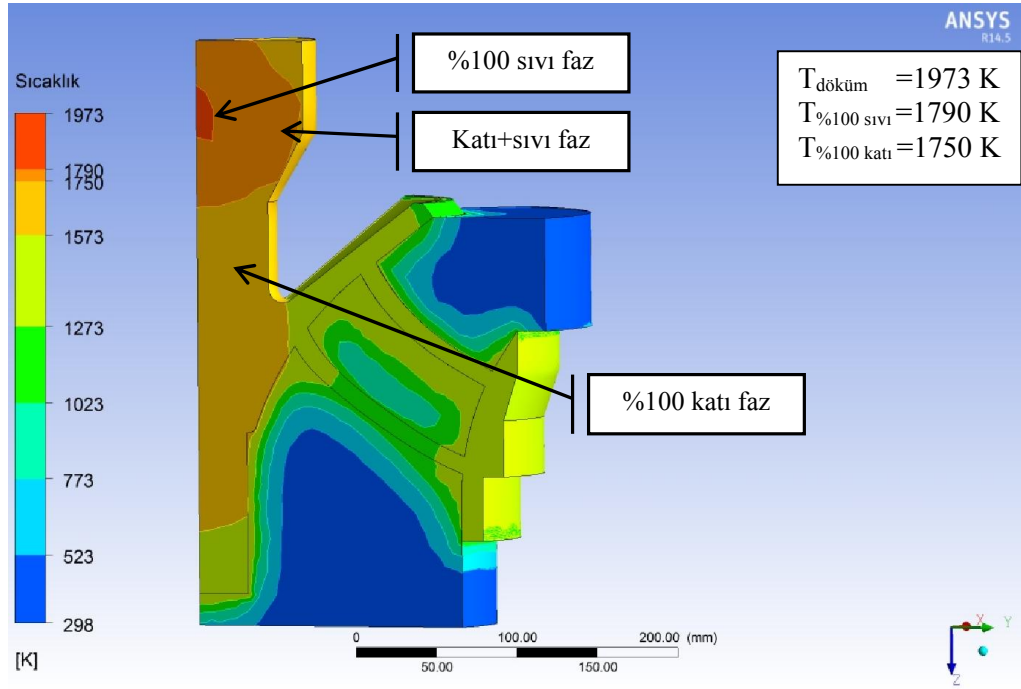


Şekil 5.11 : $t=480$ sn. Fan-maça çalışma alanlarındaki sıcaklık dağılımı (Model 1).

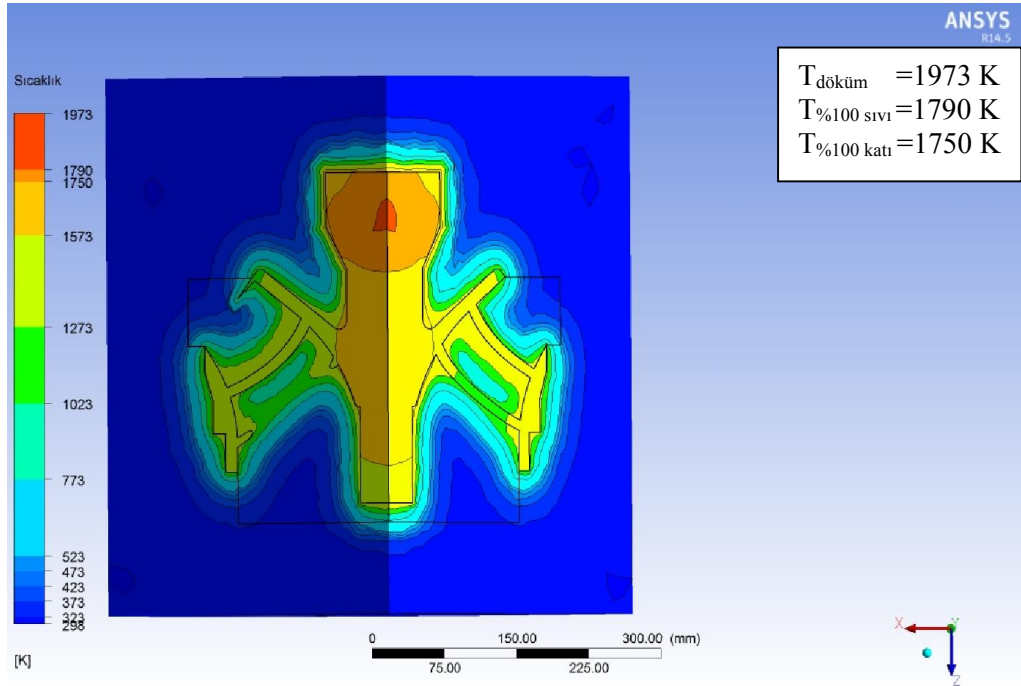


Şekil 5.12 : $t=480$ sn. Fan-maça-kalıp çalışma alanlarındaki sıcaklık dağılımı (Model 1).

$t=480$ saniyede, sıvı faz tamamen besleyicinin içindedir. Karmaşık geometri ve maça, kalıp etkisine rağmen, en azından fan göbeğinde yönlendirilmiş katılaşma elde edilmiştir. Bu analiz, besleyici boyutlarının doğru hesaplandığını göstermektedir. Sıvı+katı faz ise önemli ölçüde besleyici boynuna yaklaşmıştır (Şekil 5.11 ve Şekil 5.12).

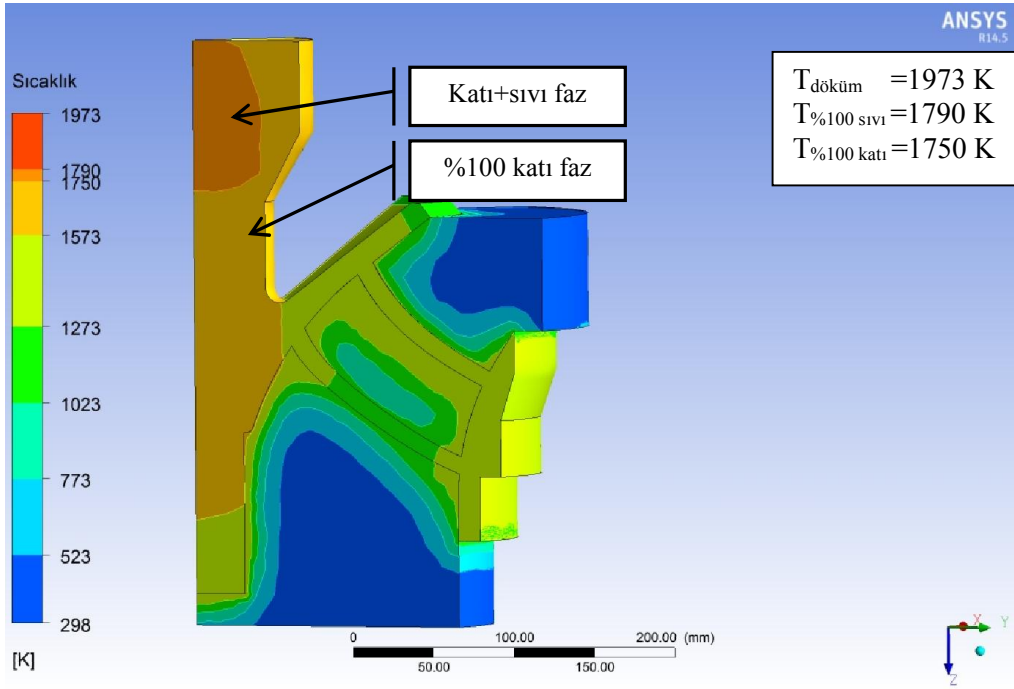


Şekil 5.13 : $t=515$ sn. Fan-maça çalışma alanlarındaki sıcaklık dağılımı (Model 1).

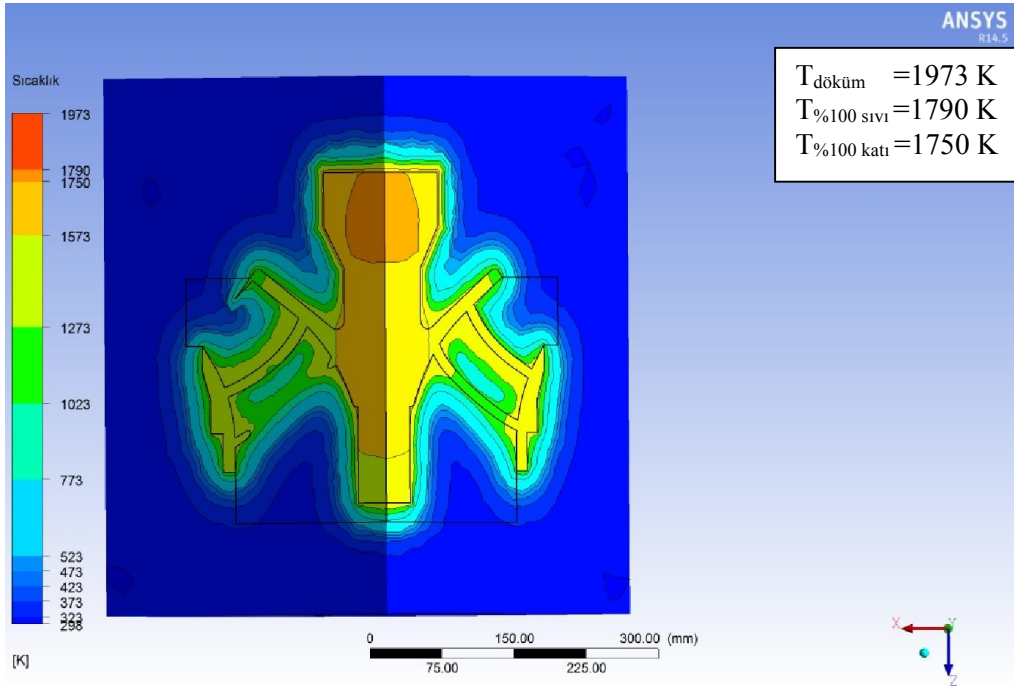


Şekil 5.14 : $t=515$ sn. Fan-maça-kalıp çalışma alanlarındaki sıcaklık dağılımı (Model 1).

$t=515$ saniyede, besleyici içindeki sıvı fazın kaybolmak üzere olduğu ve sıvı+katı fazın besleyicinin içine çekildiği görülmektedir (Şekil 5.13 ve Şekil 5.14).

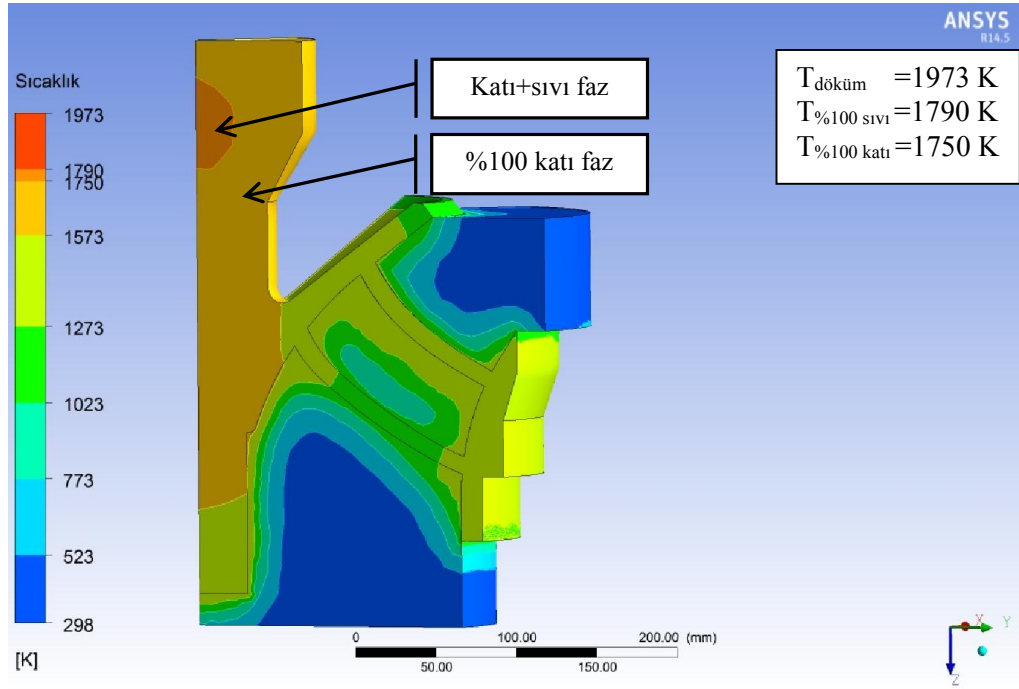


Şekil 5.15 : t=540 sn. Fan-maça çalışma alanlarındaki sıcaklık dağılımı (Model 1).

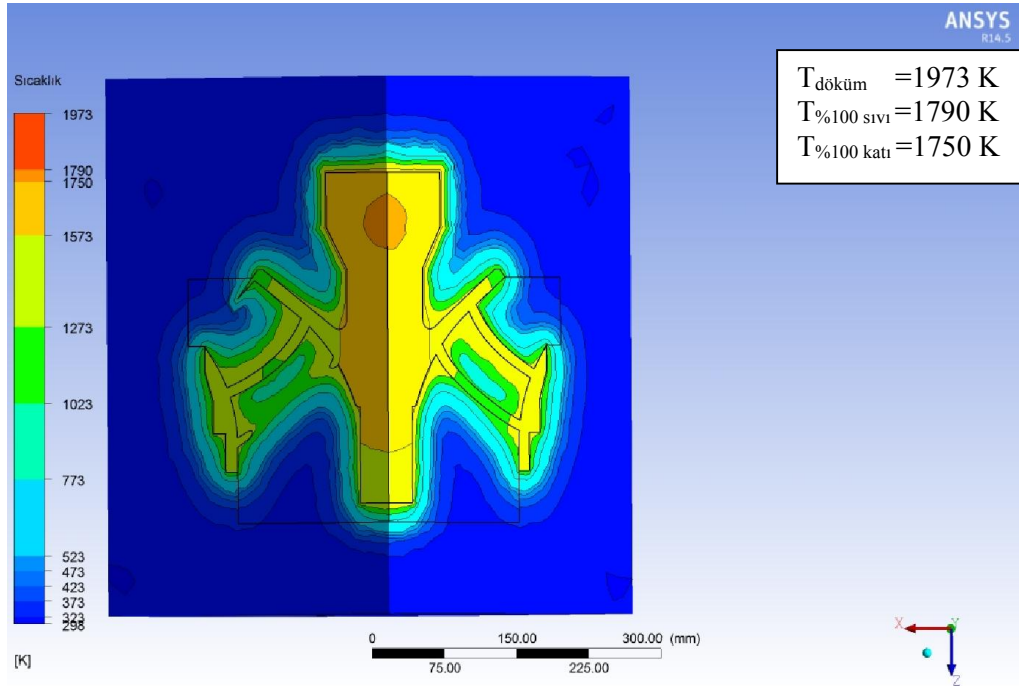


Şekil 5.16 : t=540 sn. Fan-maça-kalıp çalışma alanlarındaki sıcaklık dağılımı (Model 1).

Şekil 5.15 ve Şekil 5.16’da t=540 saniyedeki analiz görülmektedir. %100 sıvı faz → sıvı+katı faza dönüşmüştür. Sıvı+katı faz tamamen besleyicinin içindedir.

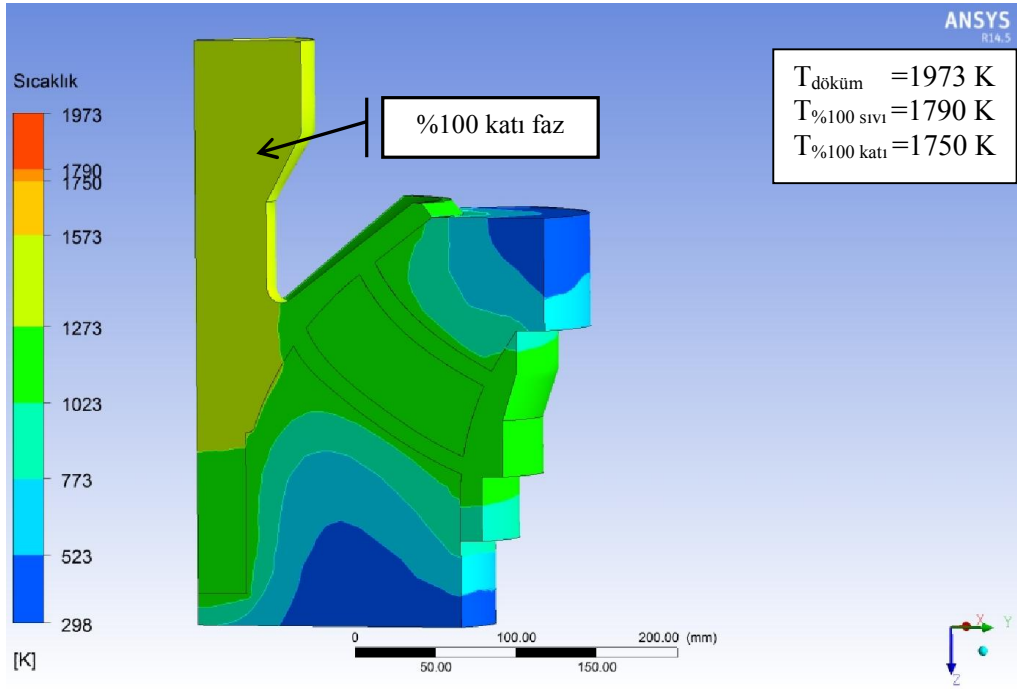


Şekil 5.17 : $t=565$ sn. Fan-maça çalışma alanlarındaki sıcaklık dağılımı (Model 1).

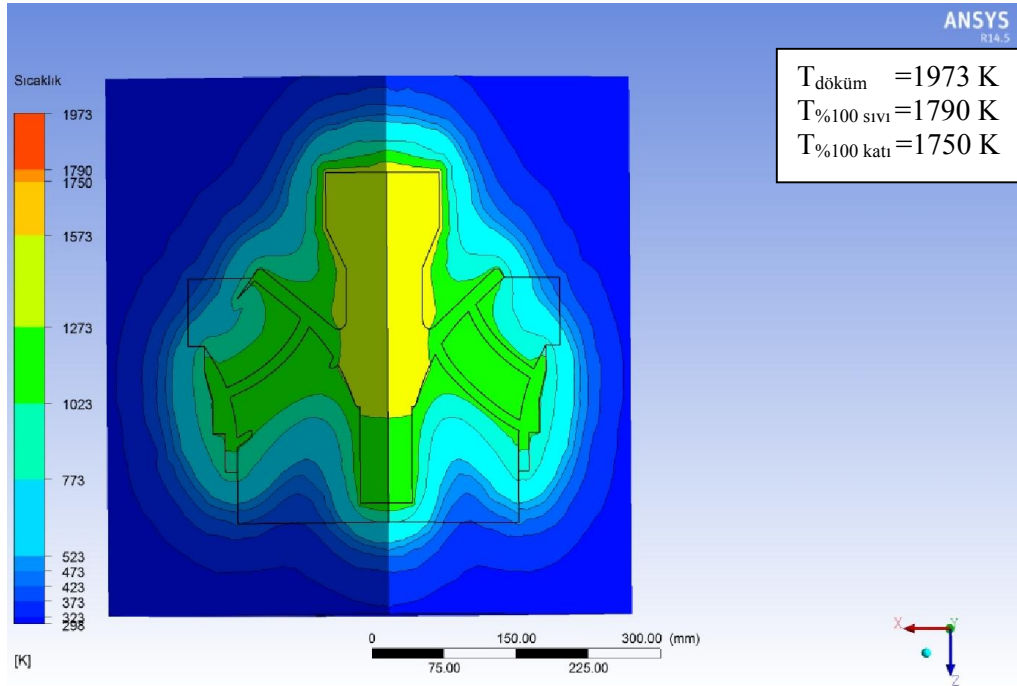


Şekil 5.18 : $t=565$ sn. Fan-maça-kalıp çalışma alanlarındaki sıcaklık dağılımı (Model 1).

$t=565$ saniyede, sıvı+katı faz da tamamen katıya dönüşmek üzeredir. Son katılan kısım besleyici içindedir ve fanın diğer bütün bölgeleri katı haldedir (Şekil 5.17 ve Şekil 5.18).

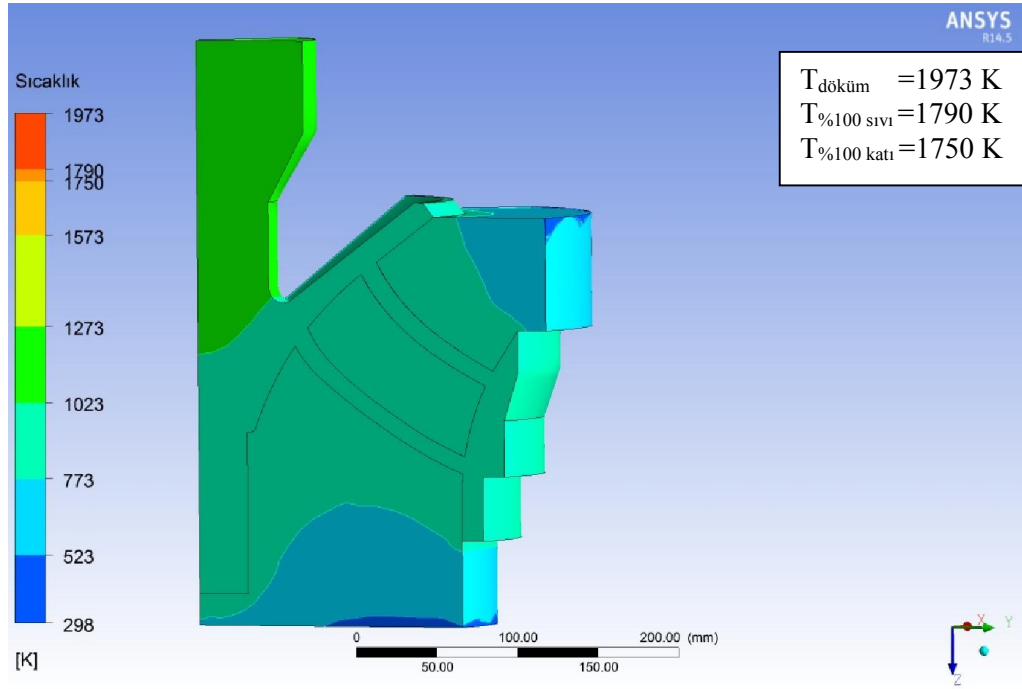


Şekil 5.19 : $t=2400$ sn. Fan-maça çalışma alanlarındaki sıcaklık dağılımı (Model 1).

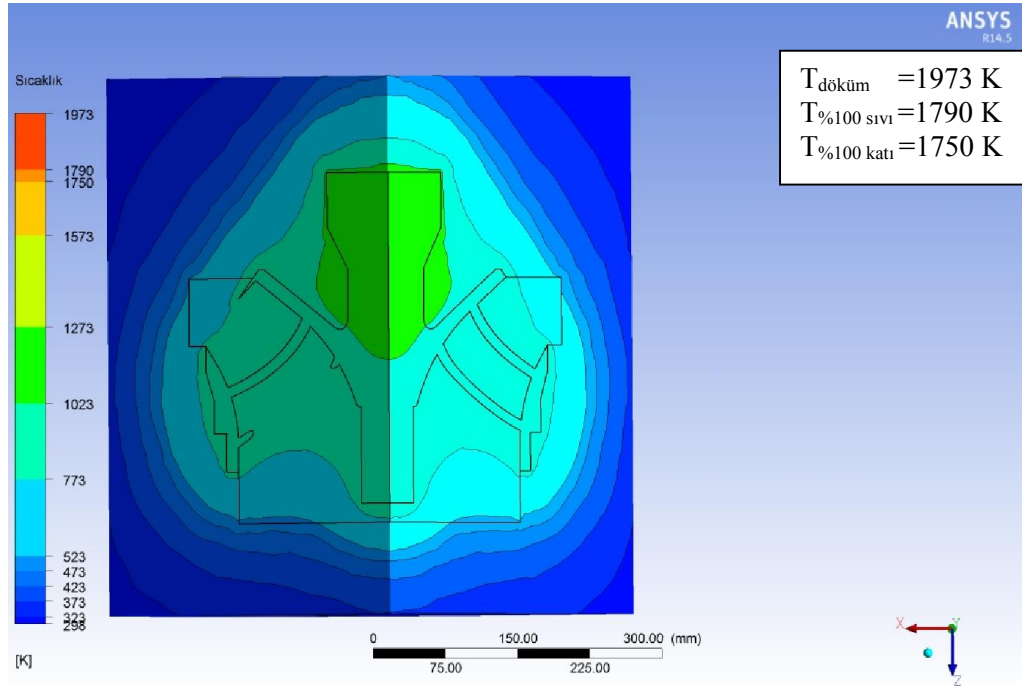


Şekil 5.20 : $t=2400$ sn. Fan-maça-kalıp çalışma alanlarındaki sıcaklık dağılımı (Model 1).

$t=2.400$ saniye, fan göbeği $1.573 \text{ K} - 1.273 \text{ K}$ aralığında bir sıcaklıkta iken, fanın kanat kısımları $1.273 \text{ K} - 1.023 \text{ K}$ aralığında bulunmaktadırlar. Metalden sonra en sıcak olması beklenen maçada, kanat aralarında kalan kısımlar metal ile aynı sıcaklık aralığında iken, uçlara doğru sıcaklığın azaldığı görülmektedir (Şekil 5.19 ve Şekil 5.20).



Şekil 5.21 : $t=7200$ sn. Fan-maça çalışma alanlarındaki sıcaklık dağılımı (Model 1).



Şekil 5.22 : $t=7200$ sn. Fan-maça-kalıp çalışma alanlarındaki sıcaklık dağılımı (Model 1).

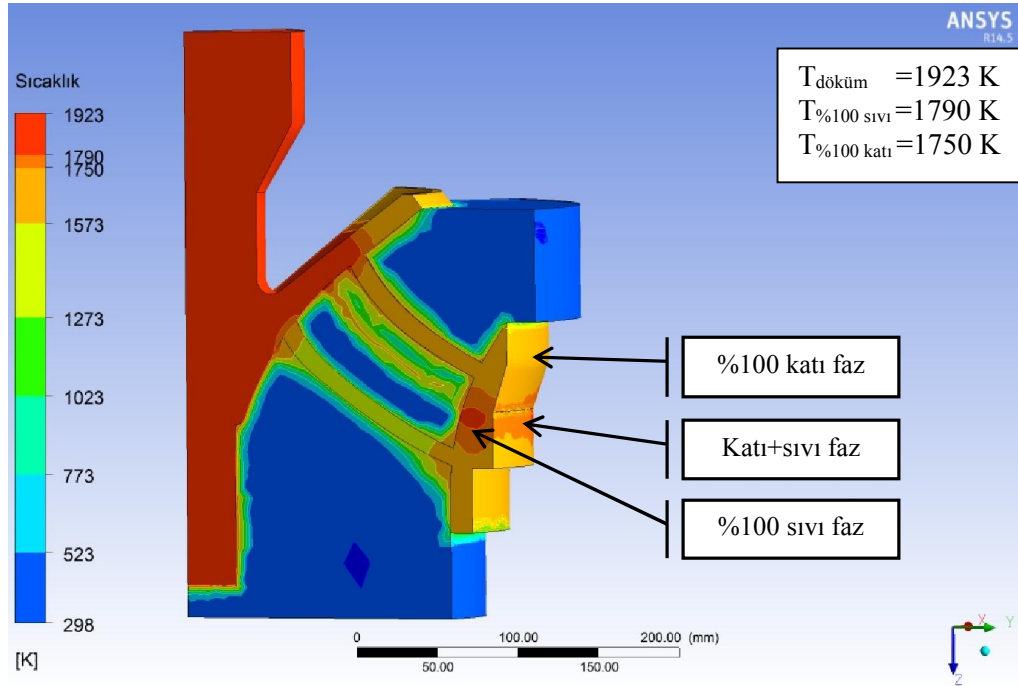
Şekil 5.21 ve Şekil 5.22, $t=7.200$ saniye sonrasındaki analizin son adımındaki sıcaklık dağılımını göstermektedir. Önemli konu ise, fanın göbek sıcaklığının 1.273 K – 1.023 K arasında ve fan kanatları temas halinde olduğu maça ile birlikte 1.023 K – 773 K aralığında iken, maçanın uç kısımlarındaki bazı noktalar 523 K – 298 K aralığında bulunmaktalar. Katılaşma tamamlandığında fan kanatları yaklaşık 900 K

soğurken, transfer edilen ısı enerji kalıp-maça tarafından emildiği halde, maça uçlarında bazı bölgeler oda sıcaklığına yakın kalmaktadırlar. $t=7.200$ saniyede, kalıp içindeki sıcaklık izotermi birbirinden tamamen ayrılmış vaziyettedir. Kalıbın dış yüzey sıcaklığı 298 K mertebesinde. Bu durum, pratikte ölçülen ve hissedilen duruma çok uygundur. Kum dökümde, kalıbın dış yüzey sıcaklığının oda sıcaklığında kaldığı bir çok referansta açıkça ortaya konulmuştur [11-12-13-14].

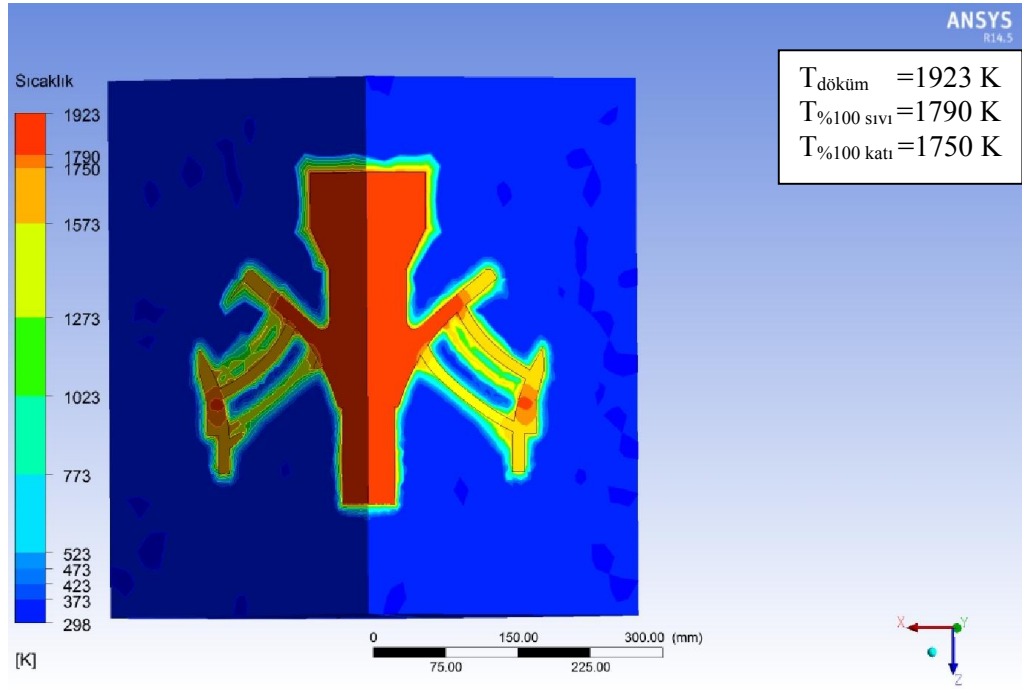
5.1.2 Model 2. $T_{\text{döküm}} = 1923 \text{ K}$

Model 2’de diğer bütün malzeme özellikleri ve sınır koşulları sabit tutularak, $t=0$ anında fan için başlangıç koşulu (initial condition) olarak 1923 K sıcaklık atanmıştır. Model 1’deki döküm sıcaklığına göre 50 K daha düşük olup, daha az aşırı ısıtma demektir ve bu farkın katılaşma süresi üzerindeki etkisini incelenmesi hedeflenmiştir.

Aşırı ısıtmanın katılaşma süresine etkisi inceleneceği için Model 1’deki bütün sıcaklık analizleri yerine katılaşmanın belli adımlarındaki analizler kullanılmıştır.

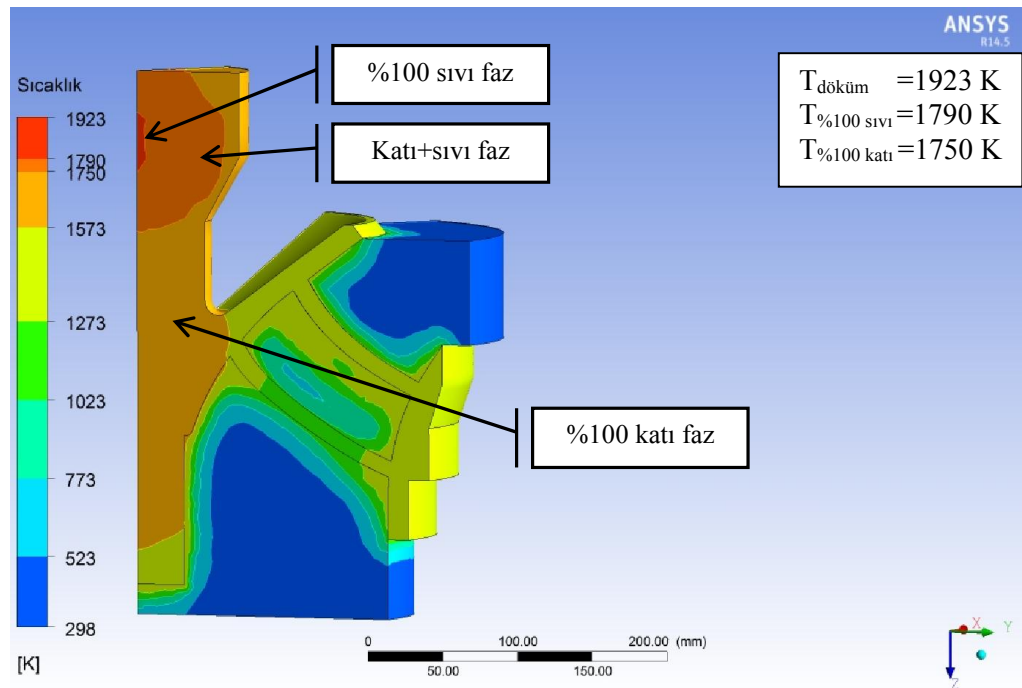


Şekil 5.23 : $t=50$ sn. Fan-maça çalışma alanlarındaki sıcaklık dağılımı (Model 2).

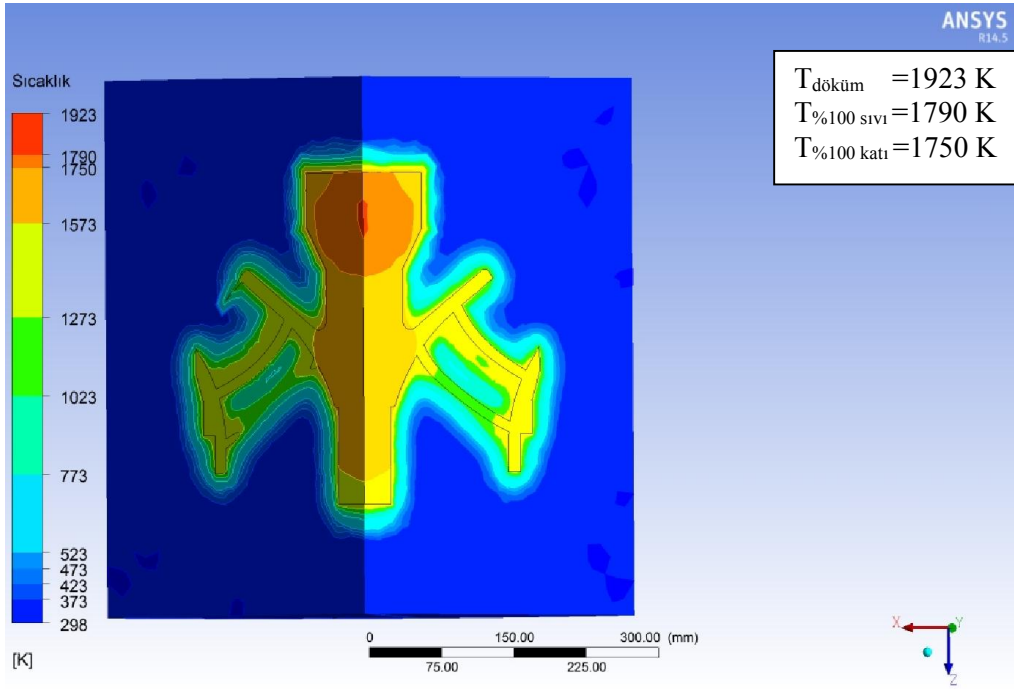


Şekil 5.24 : $t=50$ sn. Fan-maça-kalıp çalışma alanlarındaki sıcaklık dağılımı (Model 2).

Şekil 5.23 ve Şekil 5.24, fan-maça ve fan-maça-kalıp çalışma alanlarında $t=50$ saniyedeki sıcaklık dağılımını göstermektedir. Döküm sıcaklığı olan 1973 K olan Model 1'e göre fanın dış kanadındaki katılaşma süresi 25 saniye daha azalmıştır. Yani 50 K daha düşük döküm sıcaklığı fan dış kanat kesitinde katılaşmanın 25 saniye daha kısa süre aldığını göstermektedir.

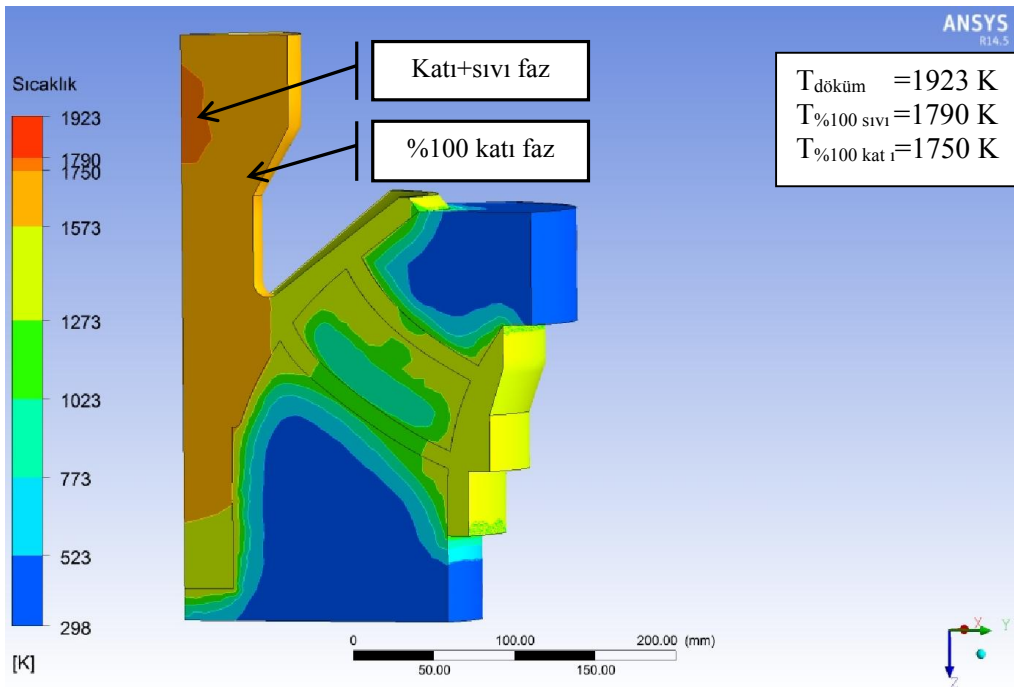


Şekil 5.25 : $t=352,5$ sn. Fan-maça çalışma alanlarındaki sıcaklık dağılımı (Model 2).

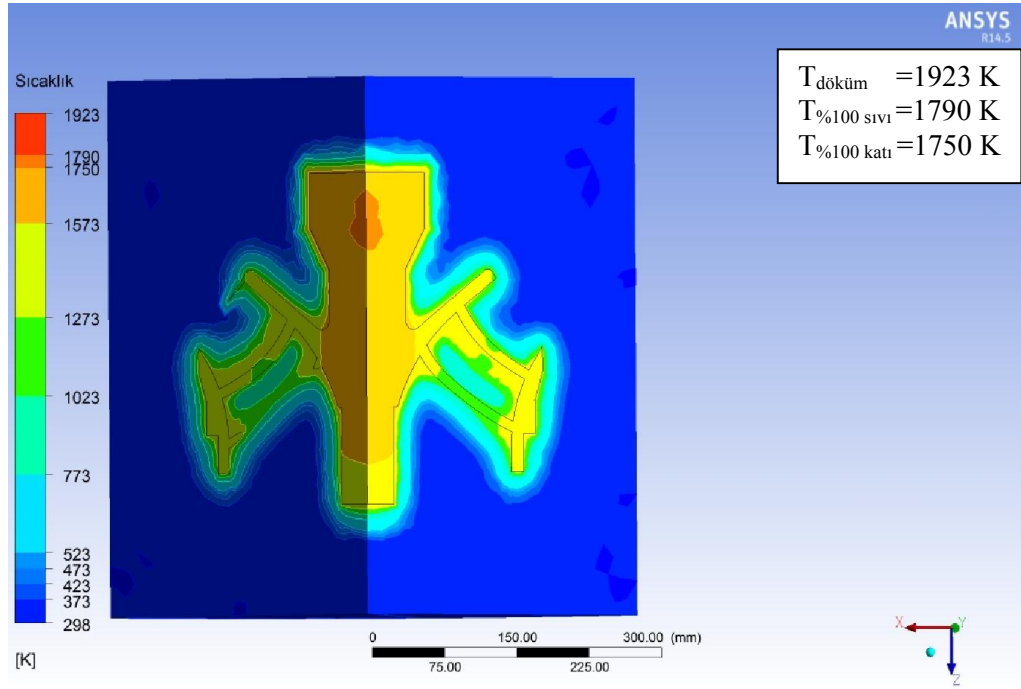


Şekil 5.26 : $t=352,5$ sn. Fan-maça-kalıp çalışma alanlarındaki sıcaklık dağılımı (Model 2).

Fan göbeğinde %100 sıvı metalin kaybolma anı olan 352,5 saniyedeki sıcaklık dağılımları Şekil 5.25 ve 5.26’da gösterilmiştir. Model 1’deki döküm sıcaklığında aynı katılaşma oranı 515 saniye de elde edilmişti.

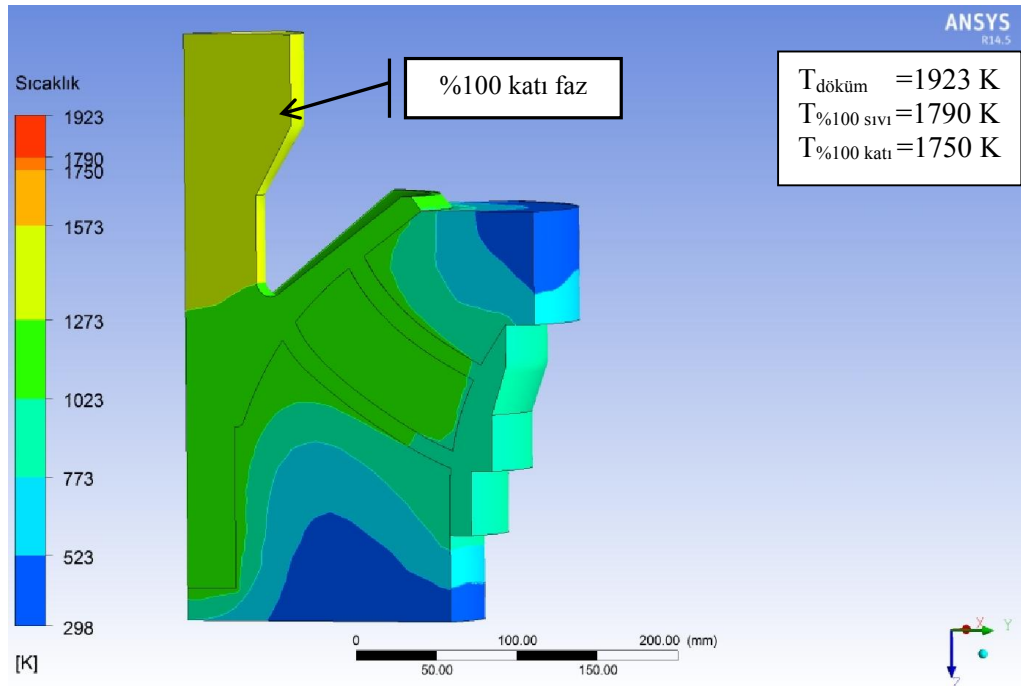


Şekil 5.27 : $t=395$ sn. Fan-maça çalışma alanlarındaki sıcaklık dağılımı (Model 2).

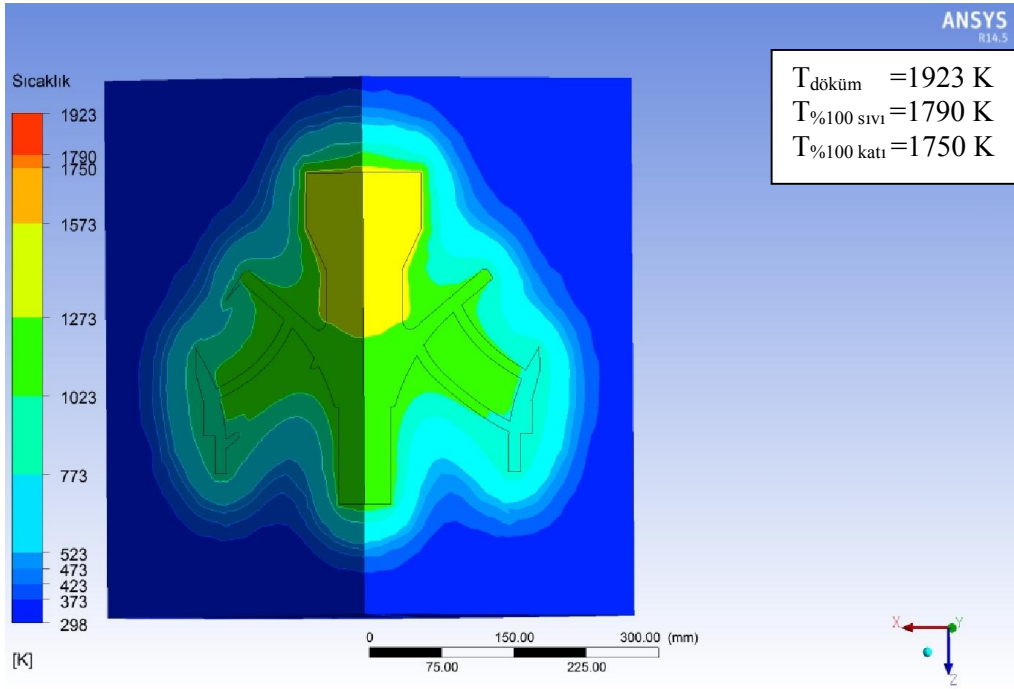


Şekil 5.28 : $t=395$ sn. Fan-maça-kalıp çalışma alanlarındaki sıcaklık dağılımı (Model 2).

Fan göbeğine bağlı besleyici içinde kalan son sıvı+katı fazın $\rightarrow$ katı faza dönüşme süresi Şekil 5.27 ve Şekil 5.28’de gösterilmiştir. $T=395$ saniyedeki sıvı+katı faz oldukça büyük bir geometride olmasına rağmen, bir sonraki monitor süresinde ($t=397,5$ saniyede) sıvı+katı faz tamamen kaybolmaktadır.

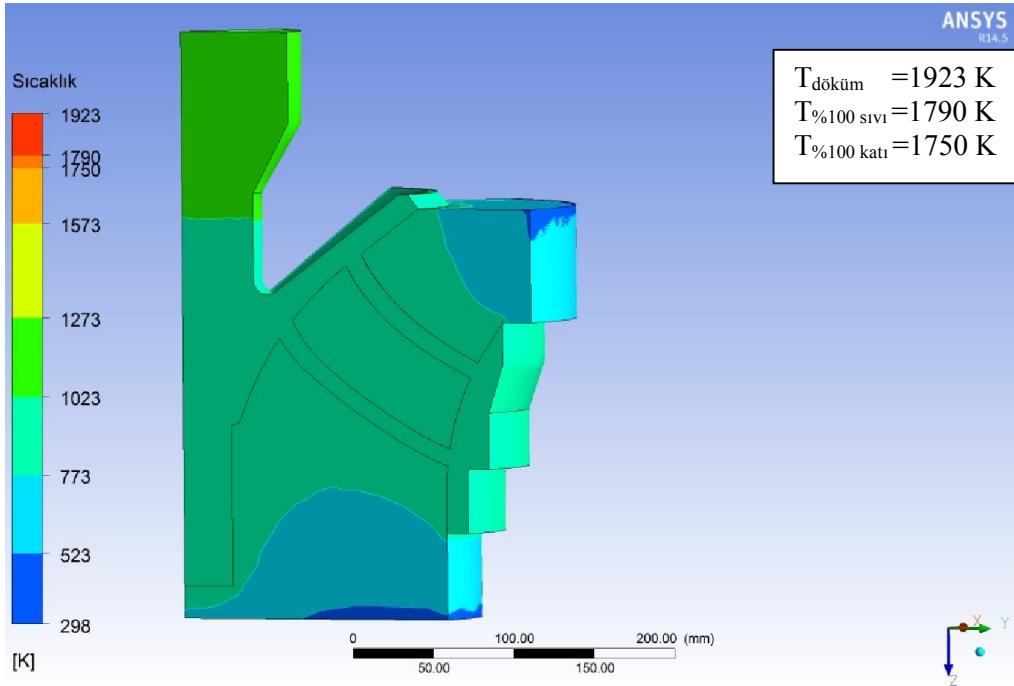


Şekil 5.29 : $t=2400$ sn. Fan-maça çalışma alanlarındaki sıcaklık dağılımı (Model 2).

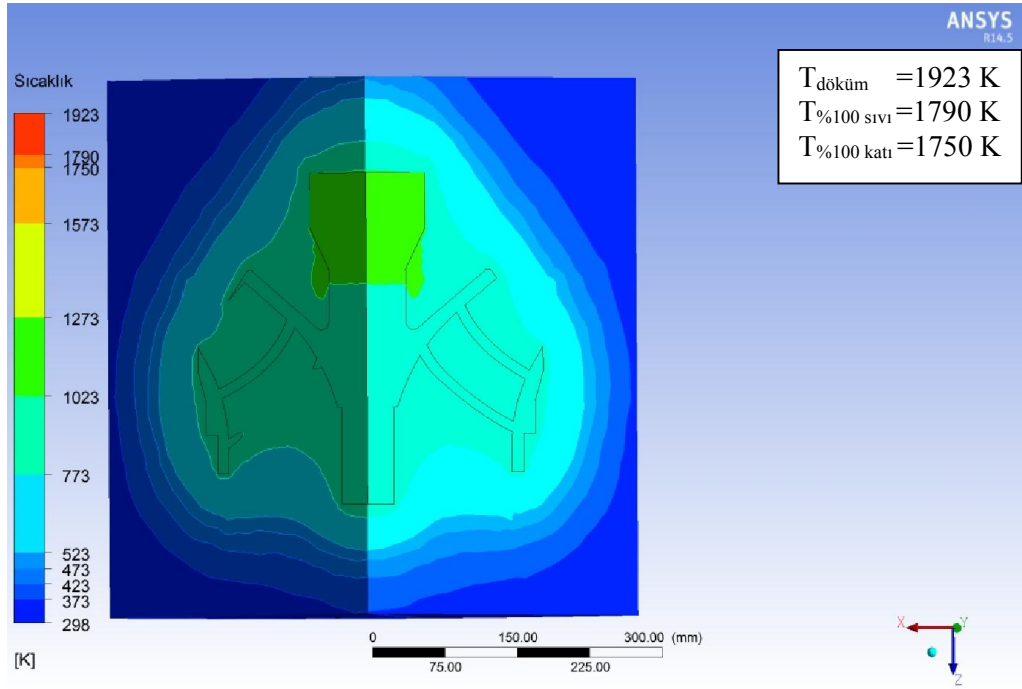


Şekil 5.30 : $t=2400$ sn. Fan-maça-kalıp çalışma alanlarındaki sıcaklık dağılımı (Model 2).

$T=2400$ saniyede, model ve maçadaki sıcaklık dağılımları, bu çalışma alanlarının Model 1'deki sıcaklık dağılımına çok benzemektedir. Ancak, 1573 K – 1273 K sıcaklık mertebesi fan göbeğinde beklendiği gibi Model 2'de daha küçük alan kaplamaktadır (Şekil 5.29 – Şekil 5.30).



Şekil 5.31 : $t=7200$ sn. Fan-maça çalışma alanlarındaki sıcaklık dağılımı (Model 2).



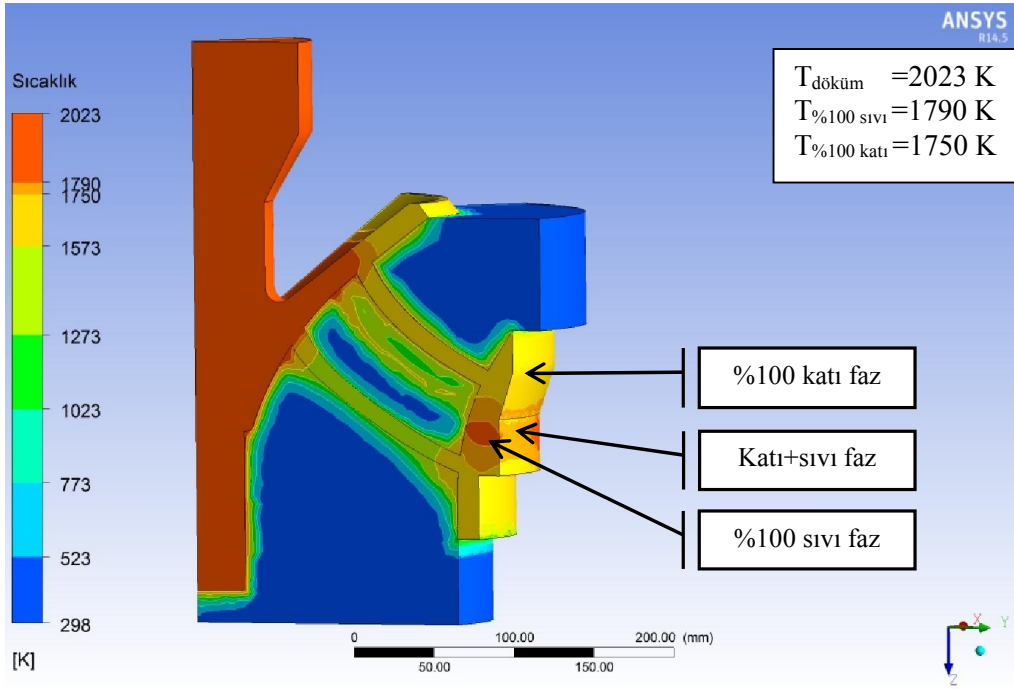
Şekil 5.32 : $t=7200$ sn. Fan-maça-kalıp çalışma alanlarındaki sıcaklık dağılımı (Model 2).

$T=7200$ saniyede, kalıp ve maça sıcaklık dağılımları Model 1 ve Model 2’de çok benzemektedirler. Sıcaklık aralığı sadece, fan besleyicisinde değişmektedir (Şekil 5.31 ve Şekil 5.32).

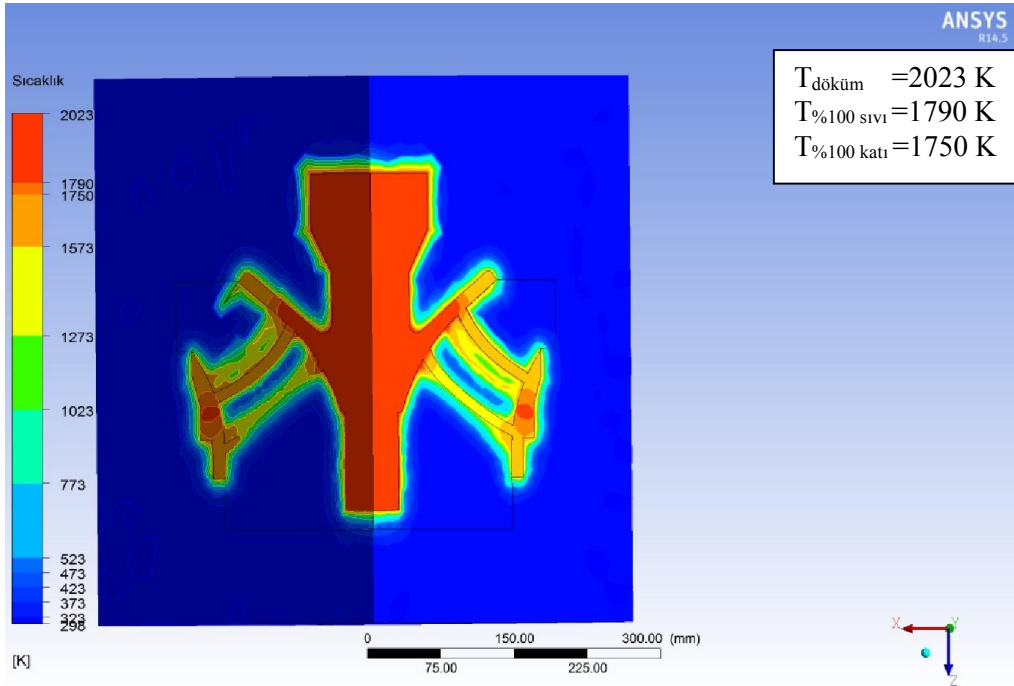
5.1.3 Model 3. $T_{\text{döküm}} = 2023$ K

Model 3’de, Model 1 ve 2’ye göre, bütün malzeme özellikleri ve sınır koşulları sabit tutularak, $t=0$ anında fan için başlangıç koşulu (initial condition) olarak 2023 K sıcaklık atanmıştır. Model 1’deki döküm sıcaklığına göre 50 K daha yüksek olup, daha fazla aşırı ısıtma demektir ve bu farkın katılma süresi üzerindeki etkisini incelenmesi hedeflenmiştir.

Aşırı ısıtmanın katılma süresine etkisi inceleneceği için Model 1’deki bütün sıcaklık analizleri yerine, katılmanın belli adımlarındaki analizler kullanılmıştır.

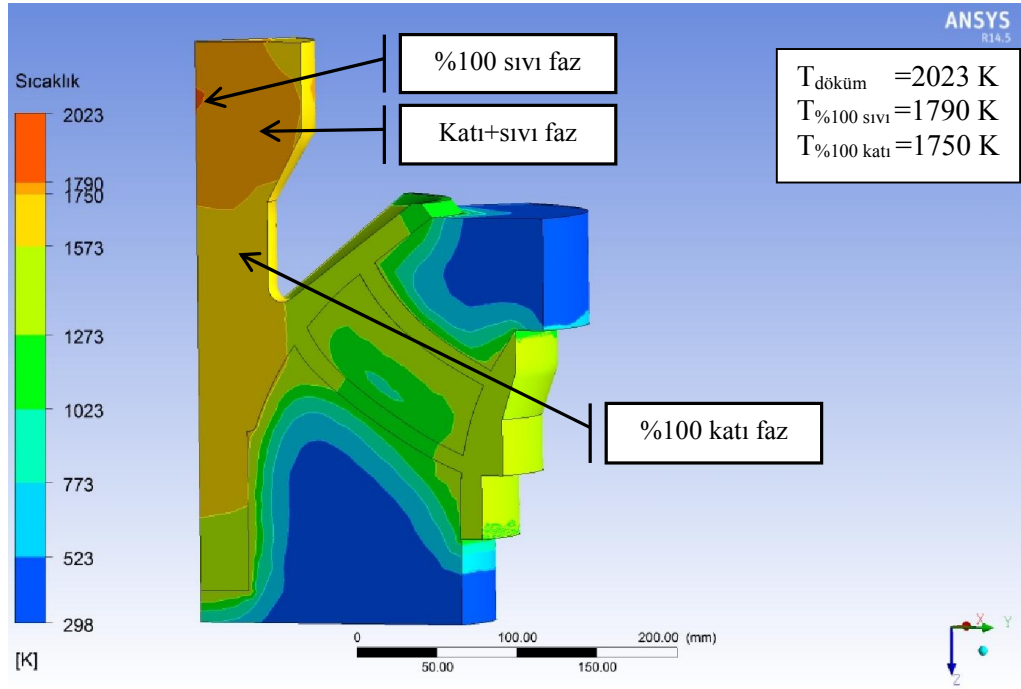


Şekil 5.33 : $t=102,5$ sn. Fan-maça çalışma alanlarındaki sıcaklık dağılımı (Model 3).

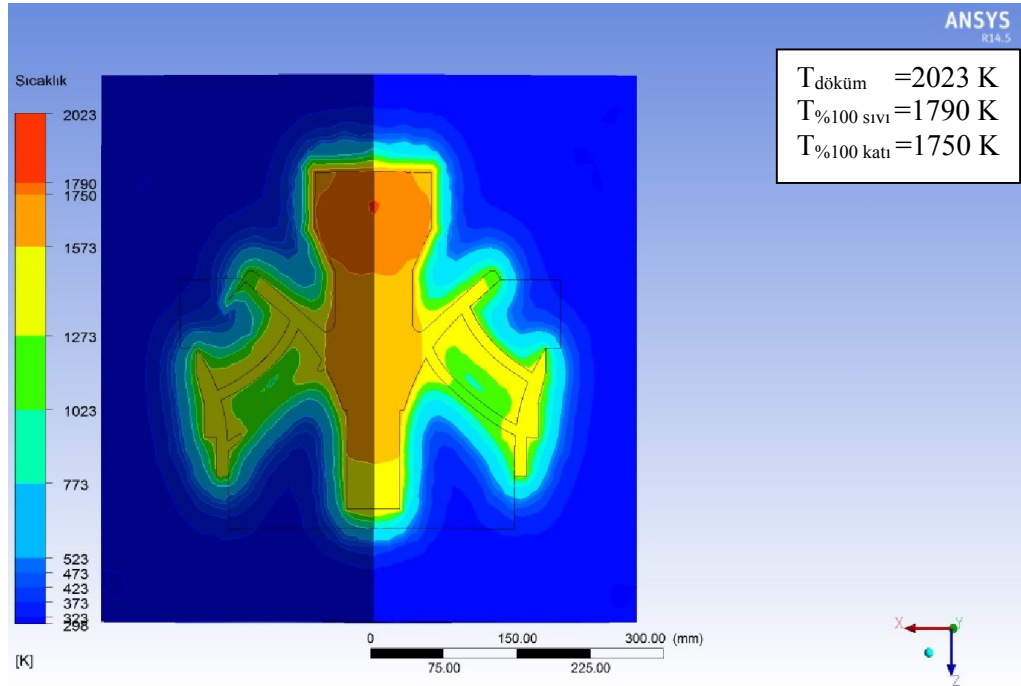


Şekil 5.34 : $t=102,5$ sn. Fan-maça-kalıp çalışma alanlarındaki sıcaklık dağılımı (Model 3).

Fan dış kanatlarındaki katılaşma $T_{döküm} = 2023$ K olduğu Model 3’de 102,5 saniyede gerçekleşmektedir. Bu $T_{döküm} = 1973$ K olan Model 1’e göre 27,5 saniye ve $T_{döküm} = 1923$ K olan Model 2’ye göre 52.5 saniye daha uzun bir katılaşma süresi demektir (Şekil 5.33 ve Şekil 5.34)

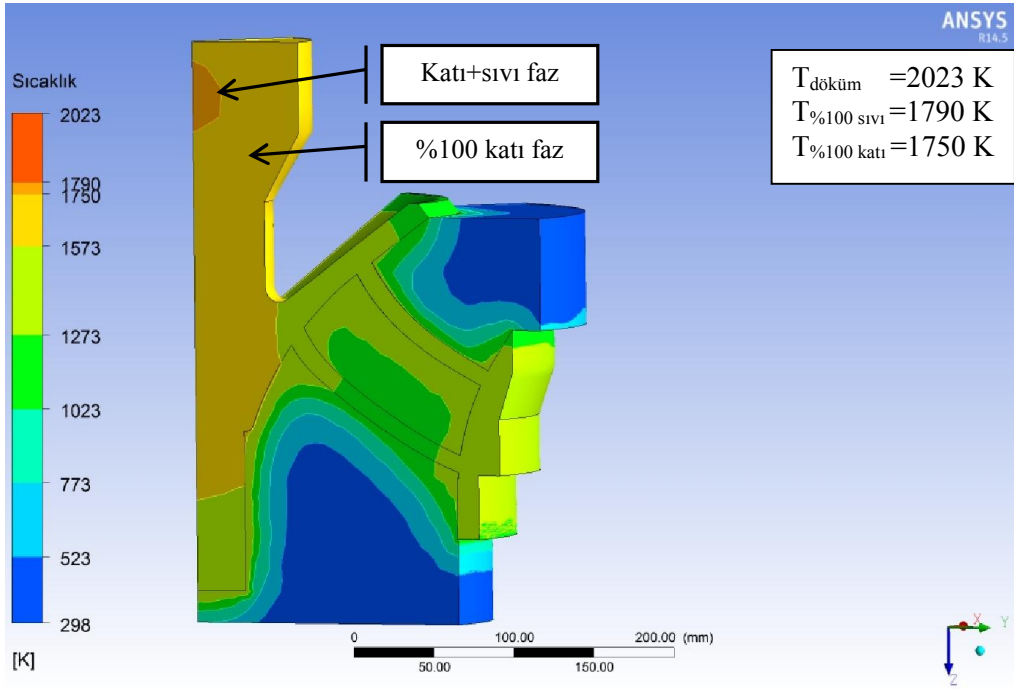


Şekil 5.35 : $t=695$ sn. Fan-maça çalışma alanlarındaki sıcaklık dağılımı (Model 3).

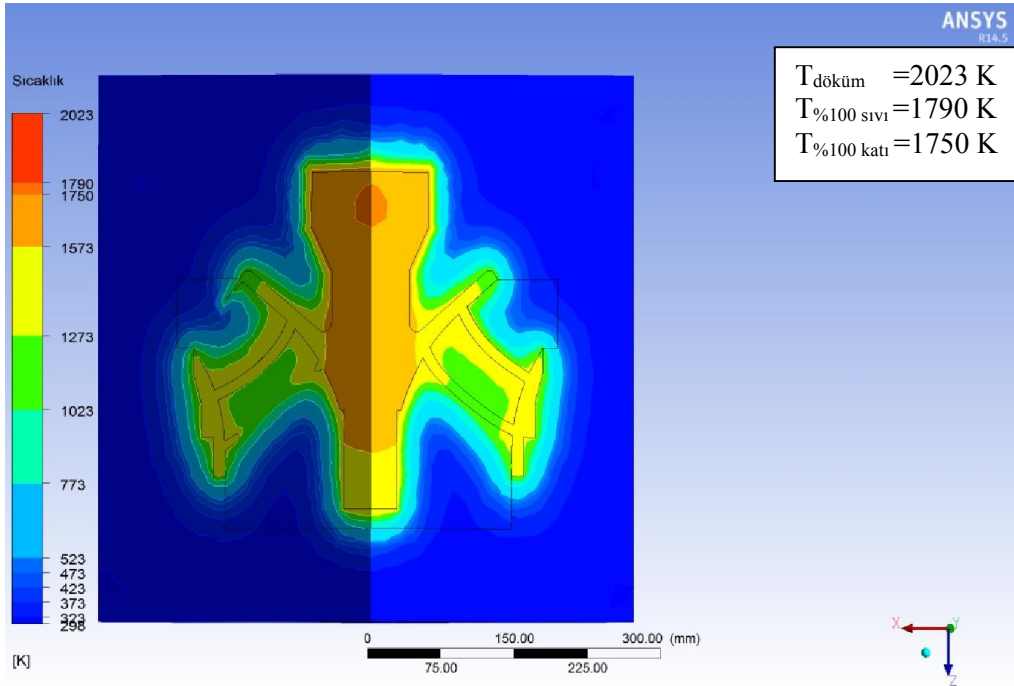


Şekil 5.36 : $t=695$ sn. Fan-maça-kalıp çalışma alanlarındaki sıcaklık dağılımı (Model 3).

Fan göbeğine bağlı olan besleyici de son sıvı metal 695 saniye de kaybolmaktadır. Sadece $t=0$ anındaki fan başlangıç koşulu değiştirildiği için, aşırı ısıtmanın katılaşma süresine etkisinin doğrusal olarak değiştiği gözlemlenmektedir (Şekil 5.35 ve Şekil 5.36).

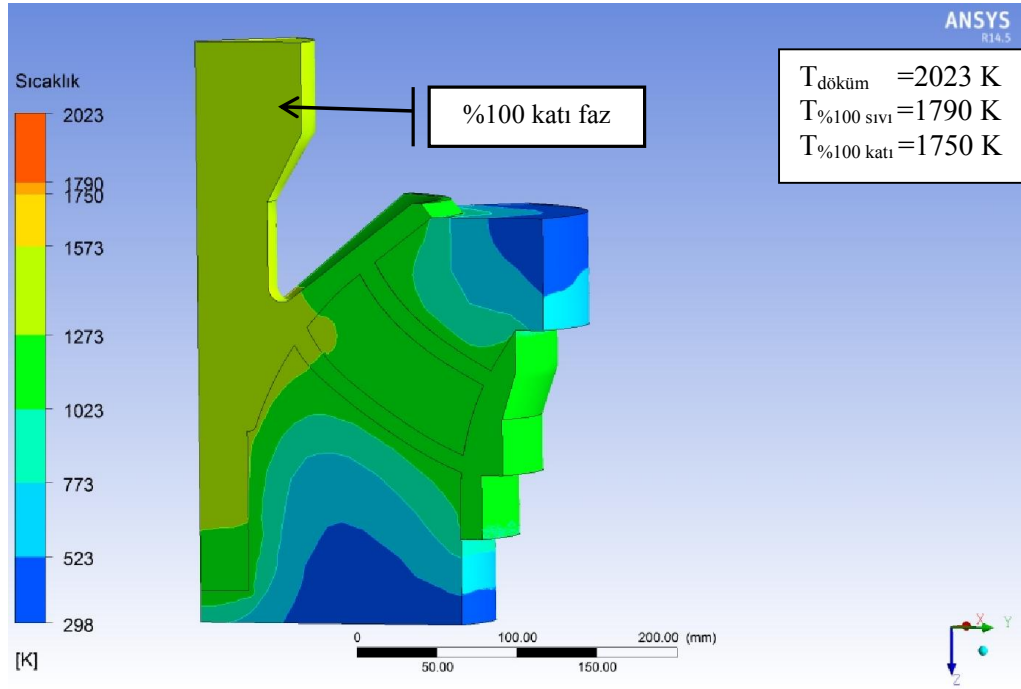


Şekil 5.37 : $t=745$ sn. Fan-maça çalışma alanlarındaki sıcaklık dağılımı (Model 3).

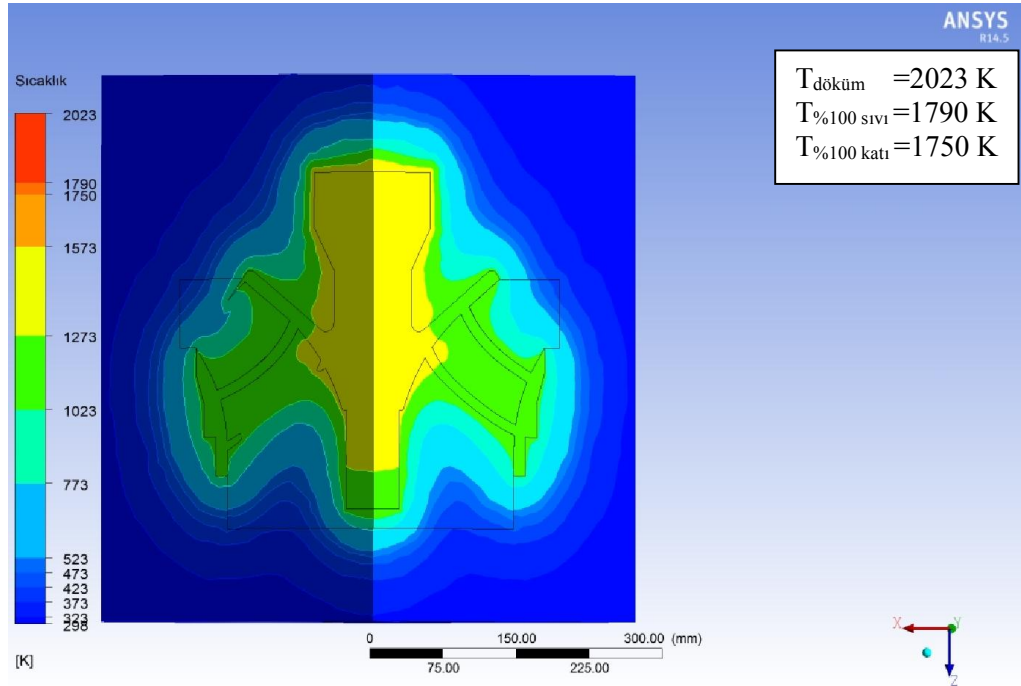


Şekil 5.38 : $t=745$ sn. Fan-maça-kalıp çalışma alanlarındaki sıcaklık dağılımı (Model 3).

Fan göbeğine bağlı besleyicideki son parça sıvı+katı fazın $\rightarrow$ katı faza dönüşme süresi $T_{\text{döküm}} = 2023$ K olduğu Model 3’de 745 saniyede gerçekleşmektedir. Bu $T_{\text{döküm}} = 1973$ K olan Model 1’e göre 230 saniye ve $T_{\text{döküm}} = 1923$ K olan Model 2’ye göre 350 saniye daha uzun bir katılaşma süresi demektir (Şekil 5.37 ve Şekil 5.38).

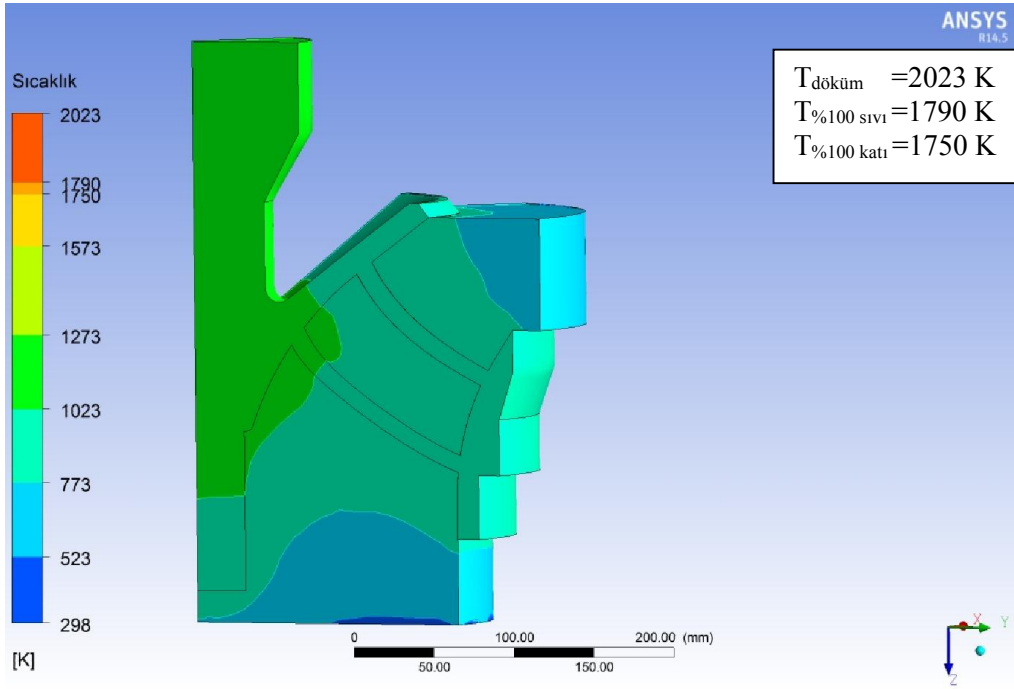


Şekil 5.39 : $t=2400$ sn. Fan-maça çalışma alanlarındaki sıcaklık dağılımı (Model 3).

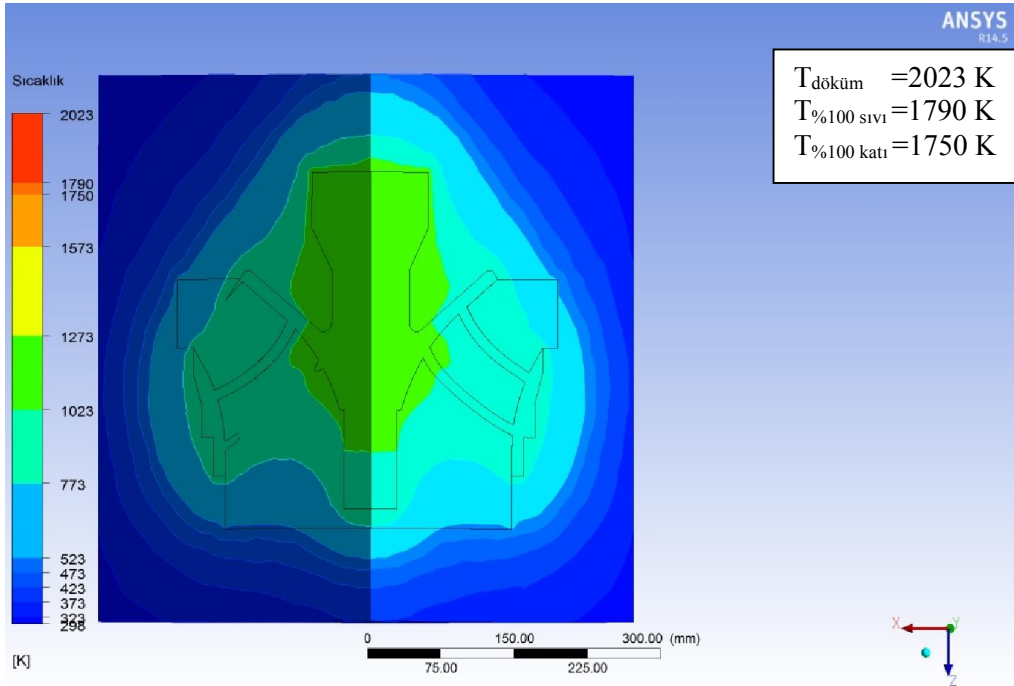


Şekil 5.40 : $t=2400$ sn. Fan-maça-kalıp çalışma alanlarındaki sıcaklık dağılımı (Model 3).

$t=2400$ saniyede, fan+maça+kalıp içindeki sıcaklık dağılımı Model 1, Model 2 ve Model 3’de birbirine benzerdir (Şekil 5.39 ve Şekil 5.40).



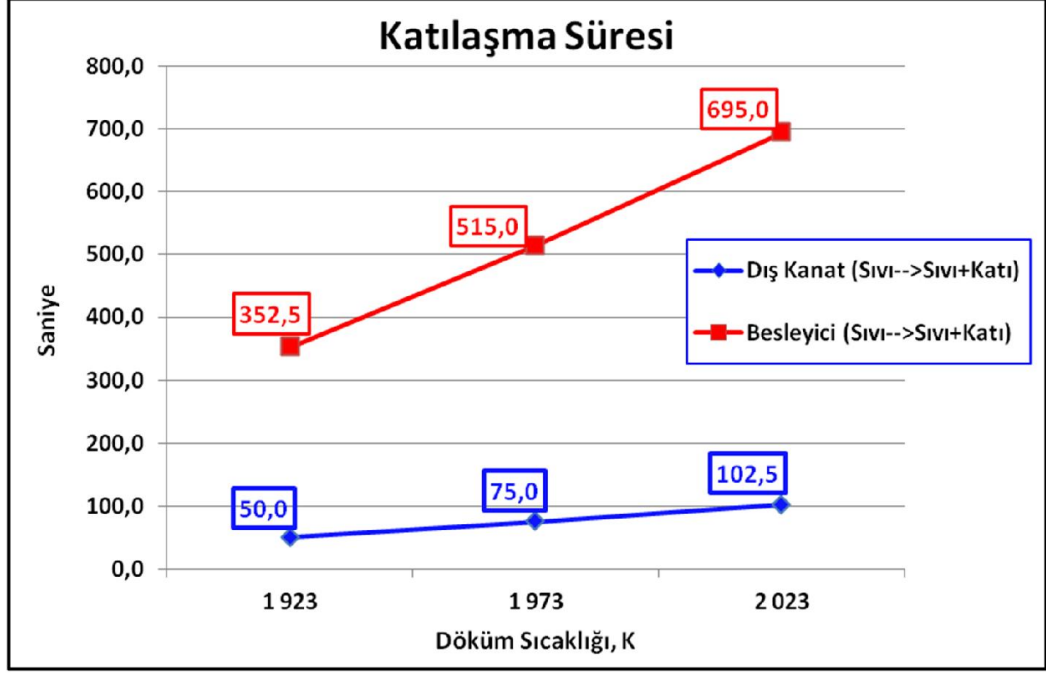
Şekil 5.41 : $t=7200$ sn. Fan-maça çalışma alanlarındaki sıcaklık dağılımı (Model 3).



Şekil 5.42 : $t=7200$ sn. Fan-maça-kalıp çalışma alanlarındaki sıcaklık dağılımı (Model 3).

$t=7200$ saniyede, tüm modellerde çok benzer ısı dağılımı görülmektedir. Bunun da anlamı, aşırı ısıtmanın, katılaşma sürecinin erken sürelerinde önemli farklar ortaya çıkardığı ve döküm sonrasında geçen zamanla birlikte döküm sıcaklığının öneminin kaybolduğudur.

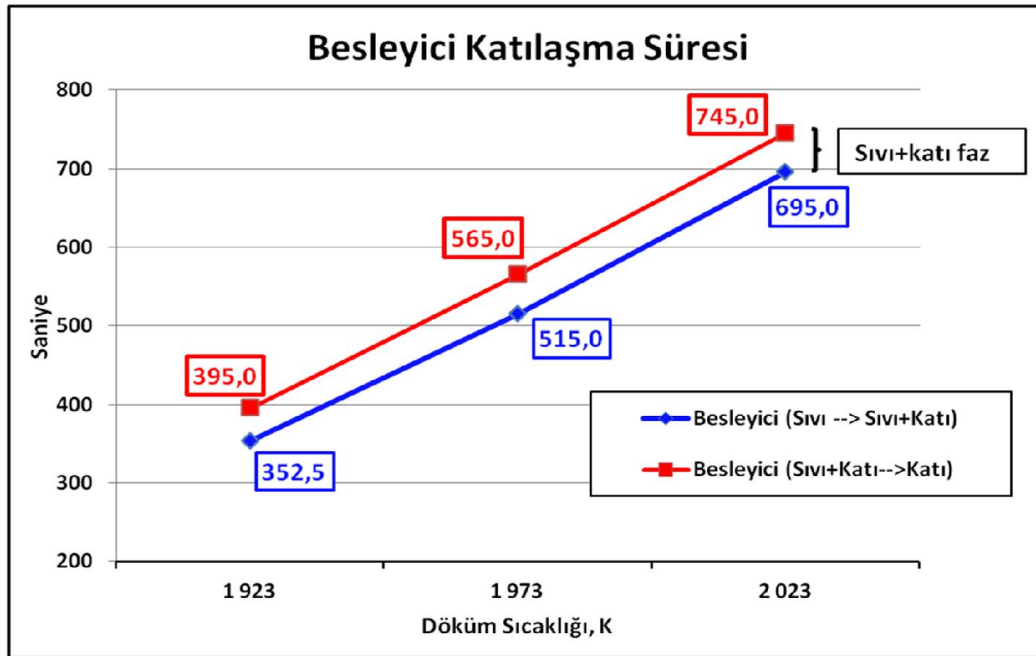
İlk üç modelde yaş kumdan imal edilmiş kalıp ve maça içine $T_{\text{döküm}} = 1973 \text{ K}$ (Model 1), $T_{\text{döküm}} = 1923 \text{ K}$ (Model 2) ve $T_{\text{döküm}} = 2023 \text{ K}$ olan değişik döküm sıcaklıkları kullanılarak simülasyon yapılmış ve fan geometrisinin kanat ve göbek/besleyici kısımlarındaki katılma süreleri hesaplanmıştır. Bu katılma süreleri Şekil 6.43’de grafik halinde gösterilmiştir.



Şekil 5.43 : Fan kanat ve göbeğinin değişik döküm sıcaklıklarındaki katılma süreleri.

Bu çalışmadaki terminolojide, katılma süresinin anlamı ilgili fan geometrisinde %100 sıvı fazın kaybolma anıdır, ancak sıvı fazın kaybolma anında, ilgili geometride sıvı+katı faz (Mushy Phase) hala mevcuttur. Fanın kanat kısmında kesit ince olduğu için sıvı+katı faz, düşük sıcaklıkla birlikte sıvı fazın kaybolmasından birkaç saniye (1-3 saniye) sonra kaybolmaktadır. Ancak, fan göbeğinin, hem geometri olarak hacimli olması hem de besleyicinin bağlanması sebebiyle sıvı fazın kaybolma anı sonrasında da sıvı+katı faz küçülerek varlığını belli süre daha devam ettirmektedir. Katılma süresi önemli olmakla birlikte sıvı+katı fazın katılma anında büyüklüğü fan geometrisi içindeki dağılımı da sıcak yırtılma gibi döküm problemlerini çözmek için önem taşımaktadır. Sıvı+katı fazın keskin köşelerde katılma süresince bulunması, metalin soğurken maruz kaldığı ısı büzölmeleri sebebiyle sıcak yırtılma riskinin olduğu bölgeleri işaret etmektedir. Ancak, sıvı+katı fazın döküm geometrisi içinde kenar ve keskin köşelerden uzakta olması, bu riski azaltmaktadır.

Göbek geometrisinde, sıvı fazın ve sıvı+katı fazın kaybolma süreleri Şekil 5.44’de gösterilmiştir. Döküm sıcaklığı arttıkça, beklendiği gibi, %100 sıvı fazın yok olması sonrasındaki sıvı+katı fazın, %100 katı faza dönüşme süresi artmaktadır. Döküm sıcaklığının 1923 K olduğu Model 1’de, göbekteki sıvı+katı faz, 100% sıvı fazın kaybolmasından 43 saniye sonra %100 katı hale geçerken, döküm sıcaklığının 2023 K (Model 3) olduğu durumda, bu süre 50 saniye olmaktadır. 100 K farkla yapılan iki dökümde (1923 K ve 2023 K) sıvı+katı fazın geometri içinde mevcut olma süresi sadece 7 saniye uzamaktadır. Halbuki aynı derecelerde yapılan dökümlerde, 100% sıvı metalin sıvı+katı faza dönüşme süresine baktığımızda, bu zaman farkı 342,5 saniye olmaktadır. Aşırı sıcak döküm, %100 sıvı fazın fan göbeğinde bulunma süresini sıvı+katı faza göre çok daha fazla artırmaktadır.



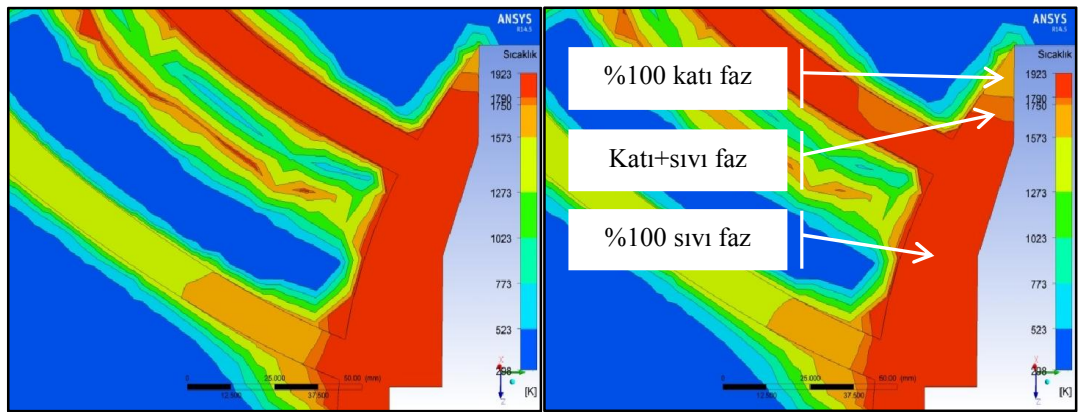
Şekil 5.44 : Besleyici bölgesinde %100 sıvı ve sıvı+katı fazların katılma süreleri.

Diğer taraftan döküm sonrası değişik zamanlarda fan geometrisi içindeki sıcaklık değişimine baktığımız zaman, besleyicinin görevini yapıp-yapmadığı da anlaşılabilmektedir. Son katılan bölge olması gereken besleyici bölgesi, uygun besleyici seçimi ve uygun bağlantı noktasının kullanıldığı, bu çalışmaya esas, geometride beklenildiği gibi en son katılan bölgedir. Kullanım gayesine uygun olarak döküm sonrasında katılan göbekte yaşanan metal çekintisini önlemek için sıvı metal beslemesi yapmaktadır. Besleyici, yönlendirilmiş katılmanın olmadığı durumlarda, en son katılan kısım olmasına rağmen, katılma düzeni olarak besleyiciyle irtibatı kaybeden diğer kısımlardaki katılmaya yeterli beslemeyi

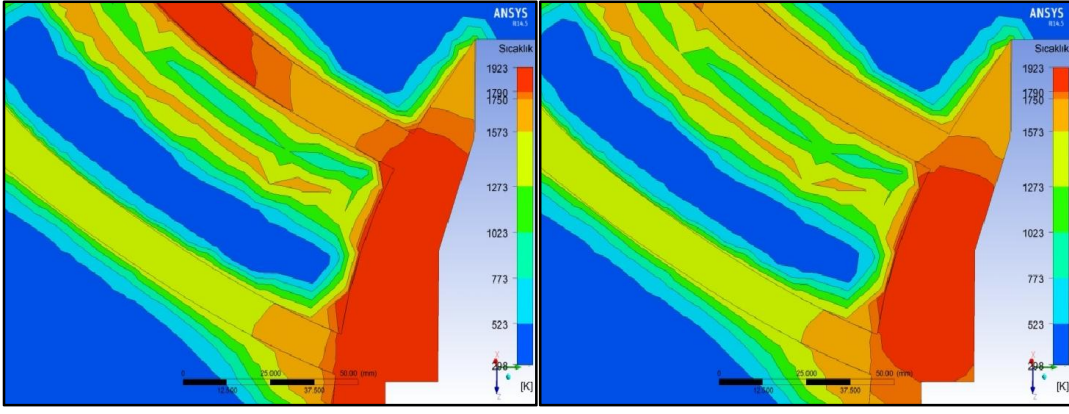
yapamaz. Fanın göbek kısmında, yönlendirilmiş katılaşma düzeni mevcuttur. Yani katılaşma besleyicinin bağlanmadığı kısımdan başlamakta ve besleyiciye doğru ilerlemektedir. Ancak, fan kanat geometrisinin besleyiciye ince kesitlerle bağlı olduğu ve ince kesitler kanatlarda bulunan büyük hacimlerden daha önce katılaştığı için besleyici/fan göbeği geometrisinden soğuma düzeni olarak kopmakta ve besleyicinin sağlayacağı sıvı metalden faydalanamadan katılaşmaktadır. Yüksek olasılıkla kanadın en kalın ve en son soğuyan kısımlarında, katılaşma çekintisi görülecektir.

Fan geometrisinin kanat uçlarının, bağımsız olarak katılaşan bölge (different feeding path) olması sebebiyle oluşan katılaşma çekintilerinin geometrik yerleri önem arz etmektedir. Kanatın içinde bir yerde oluşan katılaşma çekintisi, proses kalitesi bakımından arzu edilmese dahi fanın çalışmasında ve fan geometrisinin tasarımında esas hedef olan debi-basınç tasarım kriterlerinin elde edilmesinde, etkisi göreceli olarak azdır ve bu hata göz ardı edilebilir. Ancak, fan kanat yüzeyinde meydana gelecek çekintiler su akışında elde edilmesi istenen düzgün akışı (laminer flow) bozacağı ve suyun istenen debi-basınç tasarım kriterinde basınçlandırmasını engelleyeceği için istenmeyen ve hatta oluşması halinde fanın hurdaya atılmasına sebep olacak hata tipidir. Bu sebepten, son katılaşan metalin bulunduğu bölgenin yeri (çekinti bölgesi) çok önem arz etmektedir ve detaylı inceleme gerekmektedir.

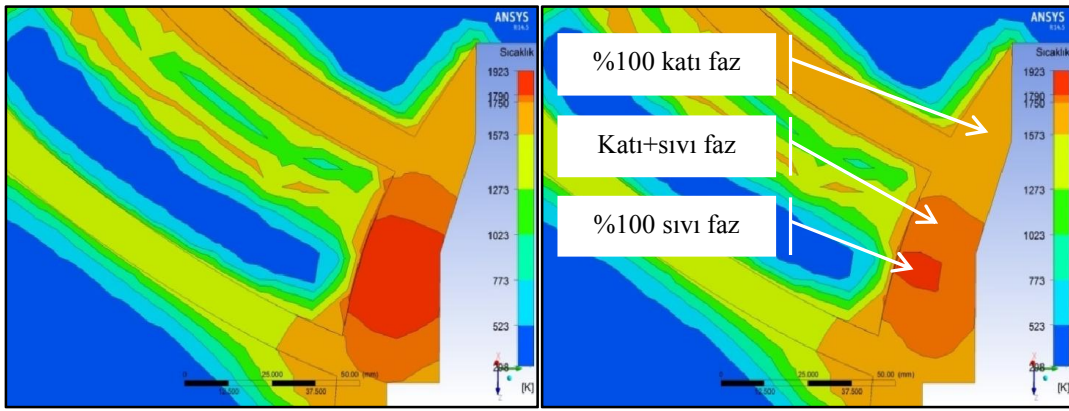
Ansys CFX'in son işlemci kısmındaki özellikler kullanılarak, son katılaşan metalin tam yeri ve büyüklüğü gözlemlenmiştir. Fan-maça çalışma alanlarındaki incelemeyi daha küçük ölçekte yaptığımız zaman, son katılaşan metalin geometri içindeki yerini ve boyutunu daha detaylı olarak görebilmekteyiz (Şekil 5.45 - Şekil 5.47).



Şekil 5.45 : $t= 30$ sn. ve 40 sn. Maça-fan çalışma alanları sıcaklık dağılımı ($T_{Döküm}= 1973$ K).

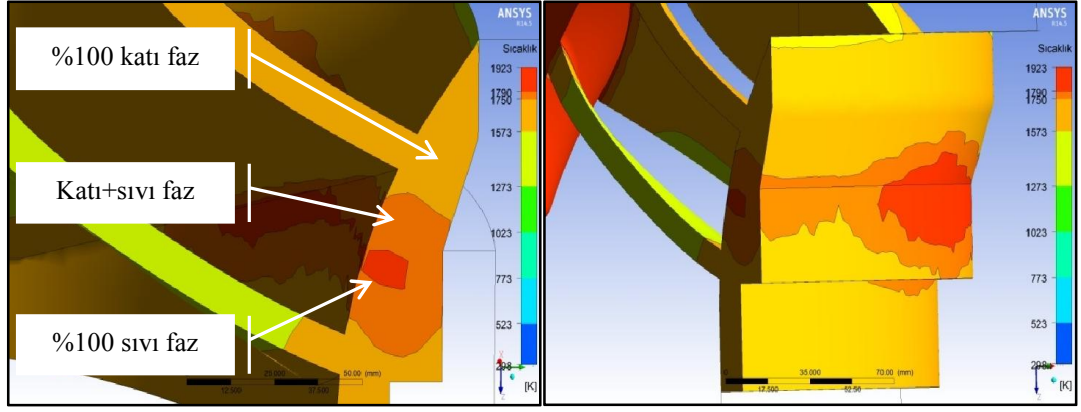


Şekil 5.46 : $t= 50$ sn. ve 60 sn Maça-fan çalışma alanları sıcaklık dağılımı ($T_{Döküm}= 1973$ K).

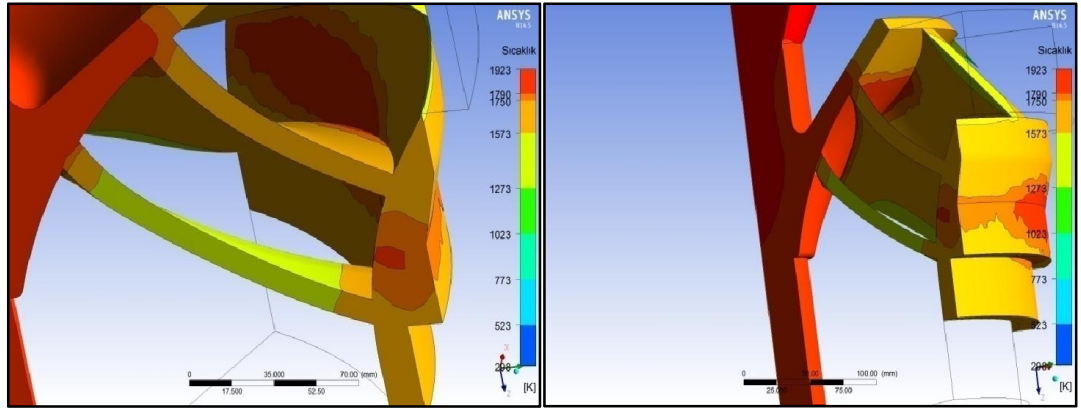


Şekil 5.47 : $t= 70$ sn. ve 75 sn. Maça-fan çalışma alanları sıcaklık dağılımı ($T_{Döküm}= 1973$ K).

Bu detaydaki incelemede kanat geometrisinde son katılaşma bölgesi 75 . saniyede fan kanadının iç yüzeyine yakın yerde olduğu görülmektedir. Ancak, gerçek durum sadece fanın daha detaylı incelenmesiyle ortaya çıkmaktadır. Son işlemcide incelenecek çalışma alanı seçimini, sadece fan olarak yapıldıktan sonra fan geometrisi üç boyutta incelenebilmektedir. Şekil 5.48 - Şekil 5.49, fan çalışma alanının $t=75$ saniyedeki sıcaklık dağılımını değişik geometrik perspektiflerden vermektedir.

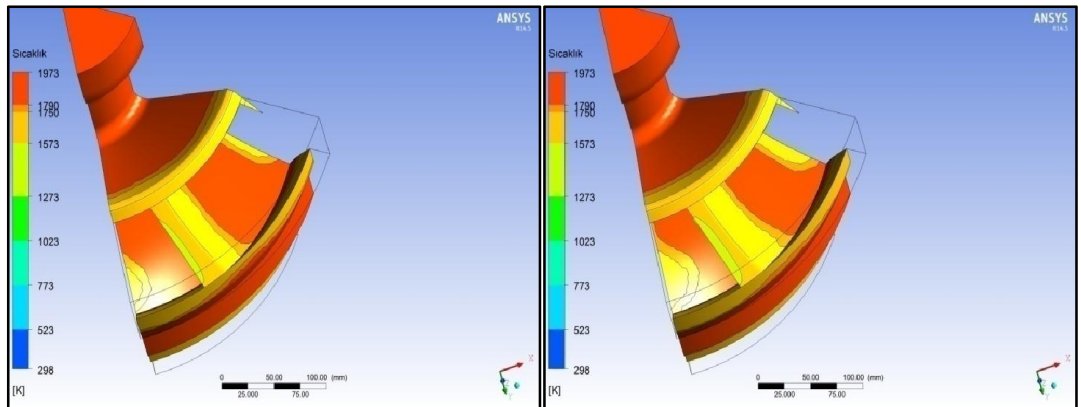


Şekil 5.48 : $t = 75$ sn. Fan çalışma alanı sıcaklık dağılımı ($T_{Döküm} = 1973$ K).

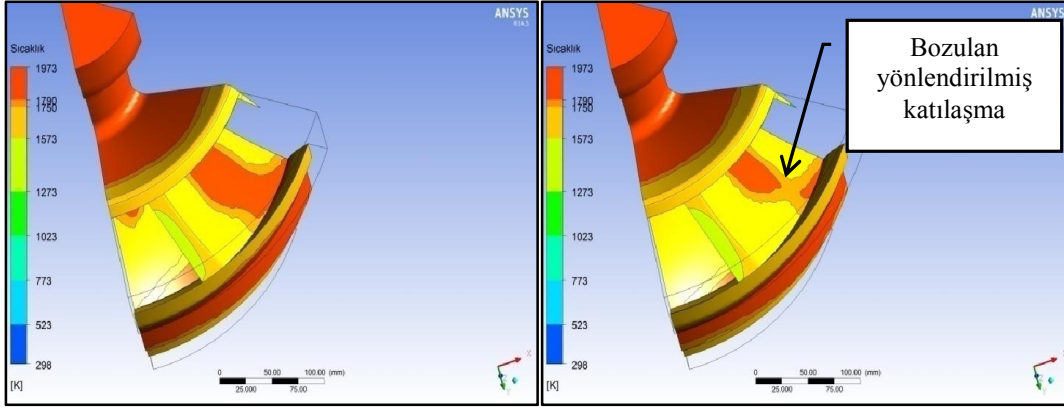


Şekil 5.49 : $t = 75$ sn. Fan çalışma alanı sıcaklık dağılımı ($T_{Döküm} = 1973$ K).

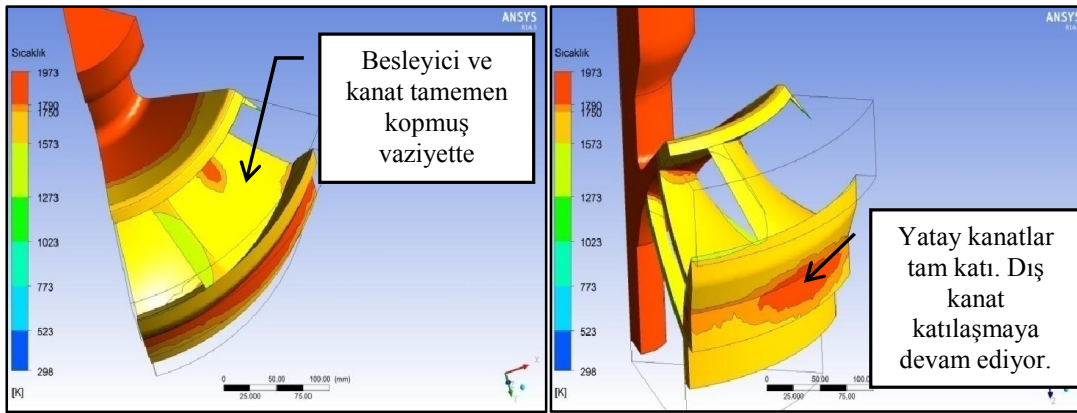
$t=75$ saniyede fan çalışma alanı incelendiği zaman kanatın iç ve dış yüzeylerinde birbirinden bağımsız katılaşılan bölgeler görülmektedir (Şekil 5.48 – Şekil 5.49). Kanat geometrisinin farklı açıdan yeniden incelenerek bu konunun açıklığa kavuşturulması gerekmektedir. Bu sebepten fan geometrisinin kanat kısmı, farklı açılardan bakılarak, yeniden incelenmiştir (Şekil 5.50 - Şekil 5.52).



Şekil 5.50 : $t = 50$ sn. ve 55 sn. Fan çalışma alanı sıcaklık dağılımı ($T_{Döküm} = 1973$ K).



Şekil 5.51 : $t = 60$ sn. ve 65 sn. Fan çalışma alanı sıcaklık dağılımı ($T_{Döküm} = 1973$ K).



Şekil 5.52 : $t = 70$ sn. ve 75 sn. Fan çalışma alanı sıcaklık dağılımı ($T_{Döküm} = 1973$ K).

Şekil 5.50 - Şekil 5.52 incelendiği zaman katılaşmanın göbek kısmında ve kanat kısmında birbirinden bağımsız olarak ilerlediği ortaya çıkmaktadır. Yatay kanatlarda 60 saniyede başlayan katılaşma 65. saniyede kopmaya başlamakta ve 70. saniyede besleyici ile irtibatta tam kopma olmaktadır. Artık 70. saniyeden sonra göbek kısmı ve kanat kısmı ayrı ayrı iki katılaşma bölgesi oluşturmaktadır. 75. saniyede ise yatay kanatlar tamamen katıdır ve dış kanat katılaşması besleyicinin sağlayacağı sıvı metalden kopmuş vaziyette devam ettirmektedir. Bu katılaşma düzeni içinde dış kanatlarda çekinti boşluklarının oluşması kuvvetle muhtemeldir. Bu kalite problemleri ise farklı uygulamalar yapılarak aşılabilmektedir. Modellemenin en önemli faydalarından birisi de muhtemel çözümlerin sorunun ne kadarını ortadan kaldıracığının, dökümhane içinde deneme-yanılma yöntemi gibi pahalı bir yöntemi kullanmadan gösterebilecek bir araç olmasıdır. Bu konuyla ilgili en önemli uygulamalardan bir tanesi de yönlendirilmiş katılaşmayı elde edebilmek için soğutucu kullanmaktır.

5.2 Soğutucunun katılaşma süresine etkisi

Çizelge 5.2 : Değişken soğutucu hacmi (Diğer parametreler Model 1 ile aynıdır).

Model	Kalıp	Maça	Döküm Sıcaklığı (K)	Soğutucu	Döküm Alaşımı
4	Yaş kum 40 AFS	Yaş kum 40 AFS	1.973	Küçük	AISI 1016
5	Yaş kum 40 AFS	Yaş kum 40 AFS	1.973	Büyük	AISI 1016

İlk 3 modelde, döküm sıcaklığının katılaşma süresine etkisi incelenmiştir. Döküm sıcaklığının katılaşma süresi üzerinde etkisi olmakla birlikte katılaşma düzeni üzerinde etkisi yoktur. Özellikle, parça geometrisi sebebiyle aynı parça içinde birden fazla bağımsız soğuma alanı varsa; ki bizim geometrimizde göbek ve kanat iki ayrı soğuma alanıdır; çekinti sorununu önlemek için yönlendirilmiş katılaşmayı sağlayabilecek bazı yöntemler uygulanabilir. Bu uygulamaların en çok görülenleri, parça geometrisini değiştirerek yönlendirilmiş katılaşmanın elde edilmesi veya soğutucu kullanmaktır. Bu çalışmaya konu olan fan geometrisinde, parça et kalınlıklarını artırarak (Özellikle yatay kanat kalınlığını) yönlendirilmiş katılaşma elde edilir. Ancak, bu durumda, fan içindeki su geçiş pasajları daralacağı için, uygun katılaşma düzeni elde etmek için değiştirilmiş fan geometrisi, tasarım için hedeflenen debi-basınç karakteristiğinden tamamen farklı bir özellik gösterir. Bu sebepten geometrinin çok küçük modifikasyonlara bile kapalı olduğu parçalarda, yönlendirilmiş katılaşmayı elde etmek için en uygun yöntem soğutucu kullanımıdır.

Kullanılacak soğutucunun hacmi ve şekli önemlidir. Soğutucunun mümkün olduğu kadar küçük ancak işlevsel olarak iş görece kadar büyük olmalıdır. Bu çalışma kapsamında, Model 4’de küçük, Model 5’de ise daha büyük soğutucunun hem katılaşma süresine hem de katılaşma düzenine etkisi incelenmiştir.

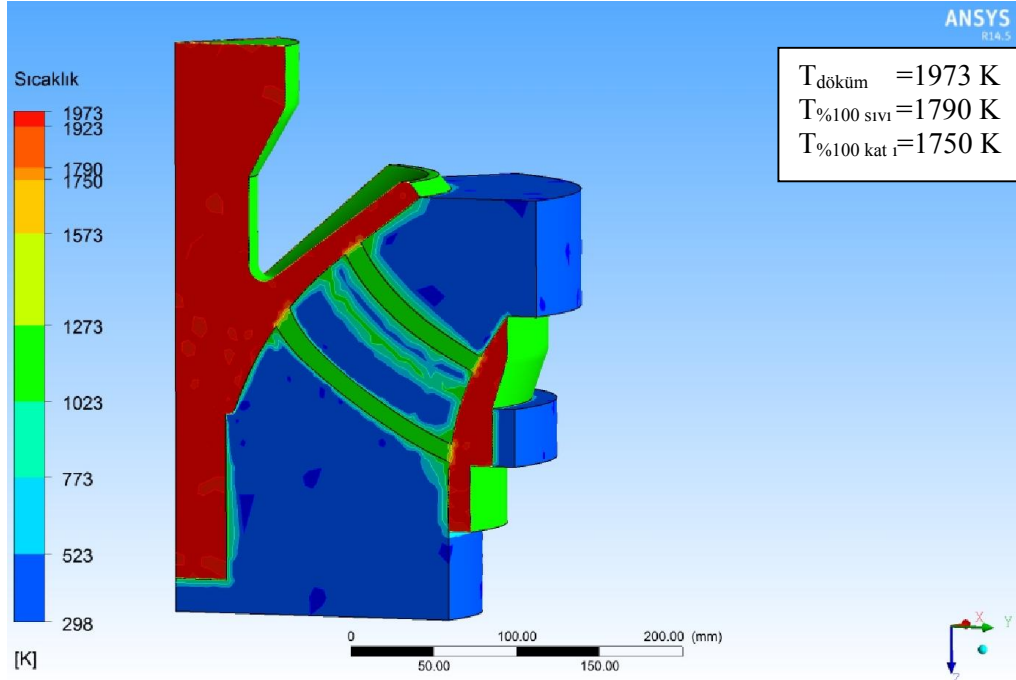
5.2.1 Model 4. Küçük hacimli soğutucu

$$\text{Küçük soğutucu hacim} = V_{k.soğ} = 122,33 \text{ (cm}^3/60^0 \text{ kesit)} \times 6 = 733,98 \text{ cm}^3$$

$$\text{Küçük soğutucu ağırlık} = W_{k.soğ} = 733,98 \text{ cm}^3 \times 7,846 \text{ g/ cm}^3 = 5.758,80 \text{ g}$$

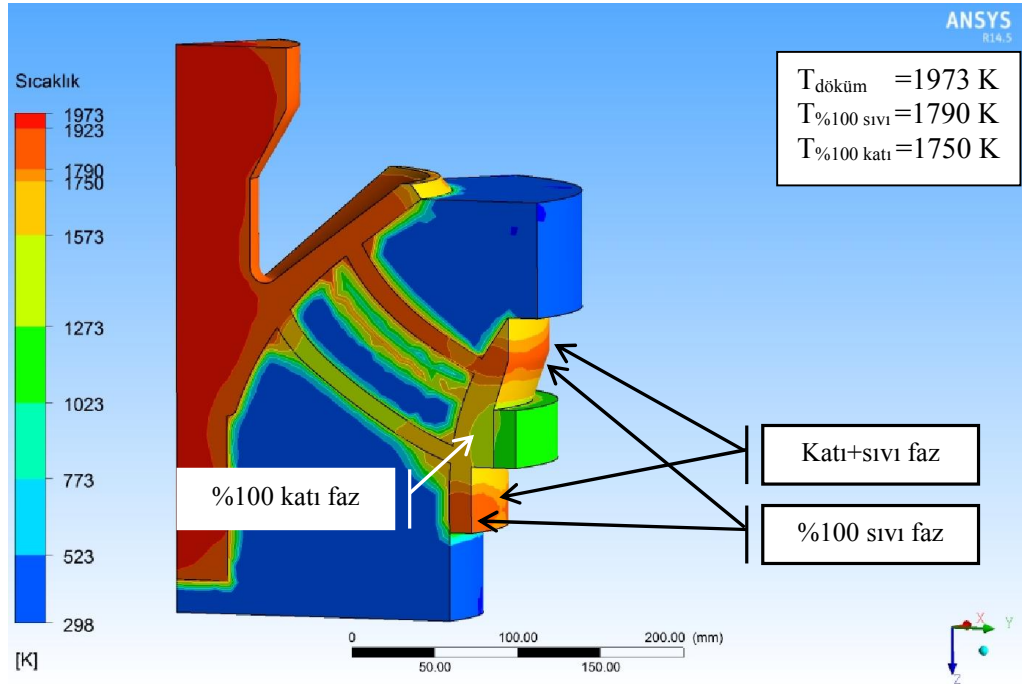
Bu çalışmanın 4. Modelinde, fanın dış kanat kısmında, yönlendirilmiş katılaşmayı bozarak bağımsız katılaşan kısım, 733,98 cm³ hacimli AISI 1016 çelik malzemeden imal edilmiş soğutucu kullanımıyla besleyiciden devamlı sıvı metal takviyesi

alabilecek katılaşma düzenine geçip geçmeyeceği incelenmiştir. Ancak, kesin sonuca varmak için öncelikle soğutucu kullanımıyla kanat kesitindeki katılaşma sürelerindeki farklılıkların incelenmesi gerekmektedir (Şekil 5.53 – Şekil 5.57).



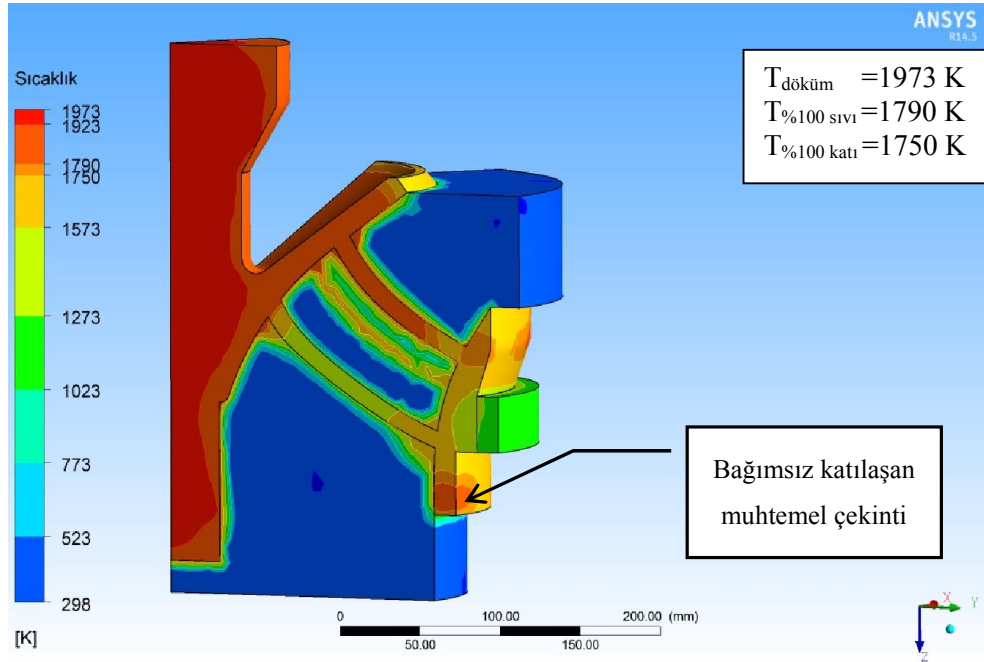
Şekil 5.53 : $t=0$ sn. Fan-maça-küçük soğutucu çalışma alanlarındaki sıcaklık dağılımı.

Şekil 5.53’de, başlangıç koşulunda ($t=0$, $T_{\text{döküm}} = 1973 \text{ K}$ ve $T_{\text{soğutucu}} = 298 \text{ K}$) ısı dağılımı görülmektedir.



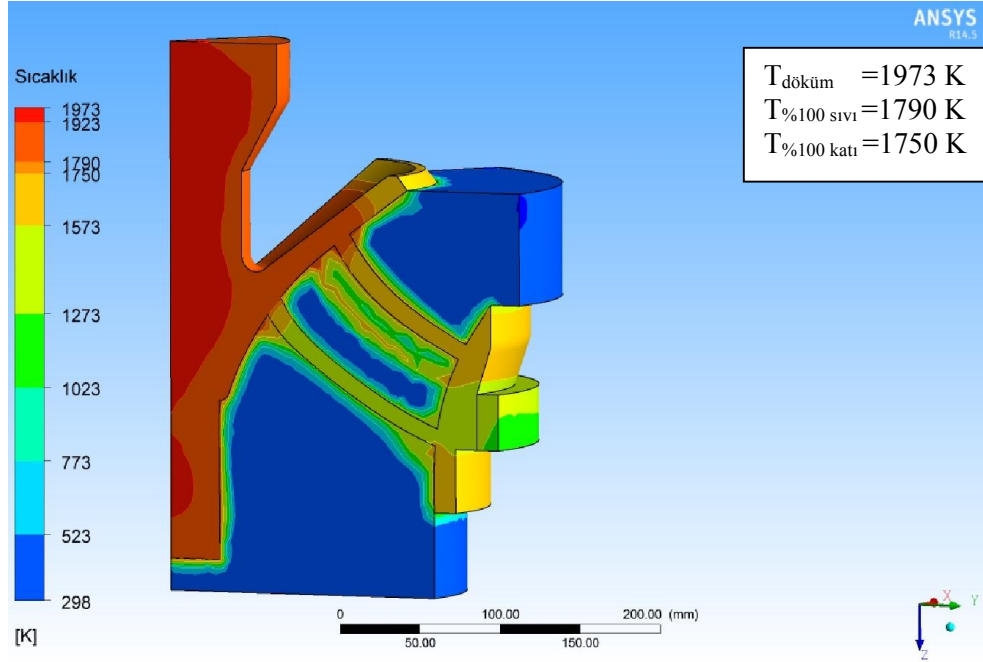
Şekil 5.54 : $t=35$ sn. Fan-maça-küçük soğutucu çalışma alanlarındaki sıcaklık dağılımı.

35 saniye sonra, soğutucunun temas halinde olduğu fan dış kanadı hızla soğurken, soğutucunun da ısındığı görülmektedir (Şekil 5.54). Soğutucunun temas halindeki fan kanat kısmı, en yüksek hacim/alan oranına rağmen katılaşmış olmakla birlikte, kanatın alt ve üst kısımlarında katılaşma $t=35$ saniyede devam etmektedir.



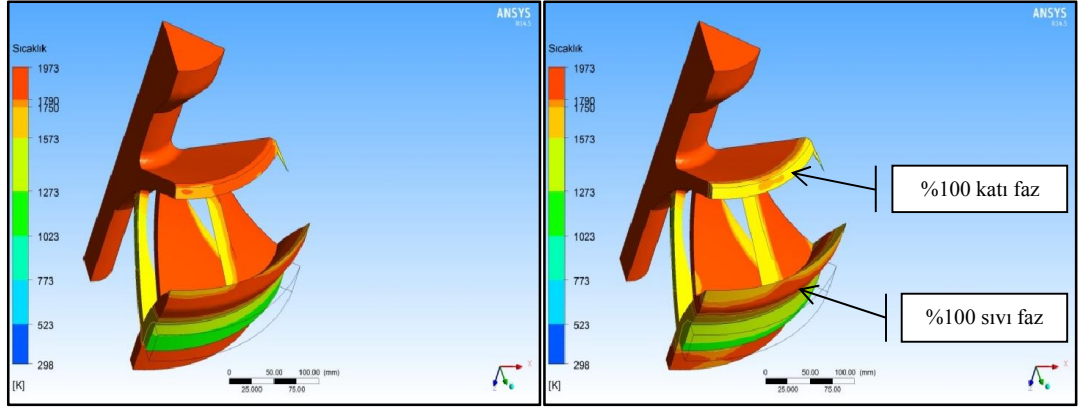
Şekil 5.55 : $t=37,5$ sn. Fan-maça-küçük soğutucu çalışma alanlarındaki sıcaklık dağılımı.

T=37,5 saniyede, fan dış kanadının alt kısmı, fan göbeğinde bulunan besleyiciden tamamen ayrı katılaşmaya devam etmektedir. Bu kısımlar muhtemel katılaşma çekinti bölgeleri olacaktır (Şekil 5.55).

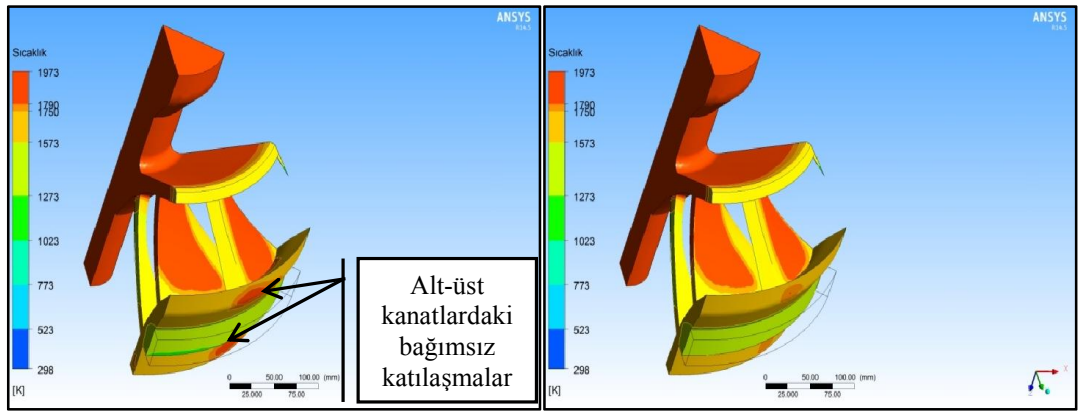


Şekil 5.56 : t=60 sn. Fan-maça-küçük soğutucu çalışma alanlarındaki sıcaklık dağılımı.

Yapılan analizde kanatın üst kısmı dış çaptan besleyiciye doğru yönlendirilmiş katılaşma yapmasına rağmen, t=37,5 saniyede kanat alt-uç kısımlarında besleyiciyle bağlantısı olmayan bağımsız katılaşma, muhtemelen de çekinti bölgelerinin olacağı anlaşılmaktadır. Soğutucunun, fana temas bölgelerinde sorun olmamasına rağmen, diğer bölgelerdeki sorunun küçük hacimli soğutucu ile aşılamayacağı anlaşılmaktadır. Küçük soğutucunun katılaşma düzenine etkisinin, çekinti sorununun şekli ve boyutunun anlaşılması için sadece fan detaylı olarak incelenmiştir (Şekil 5.57 – Şekil 5.60).

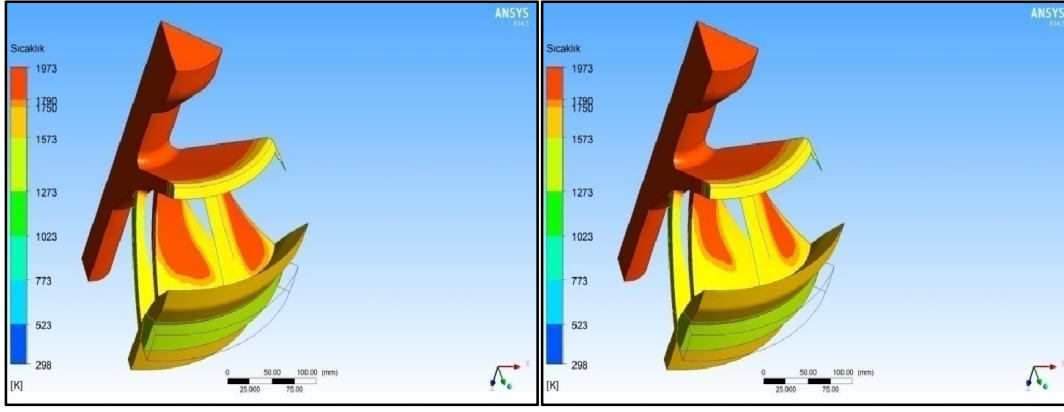


Şekil 5.57 : $t= 25$ sn. ve 35 sn. Fan-küçük soğutucu çalışma alanları sıcaklık dağılımı ($T_{Döküm}= 1973$ K).

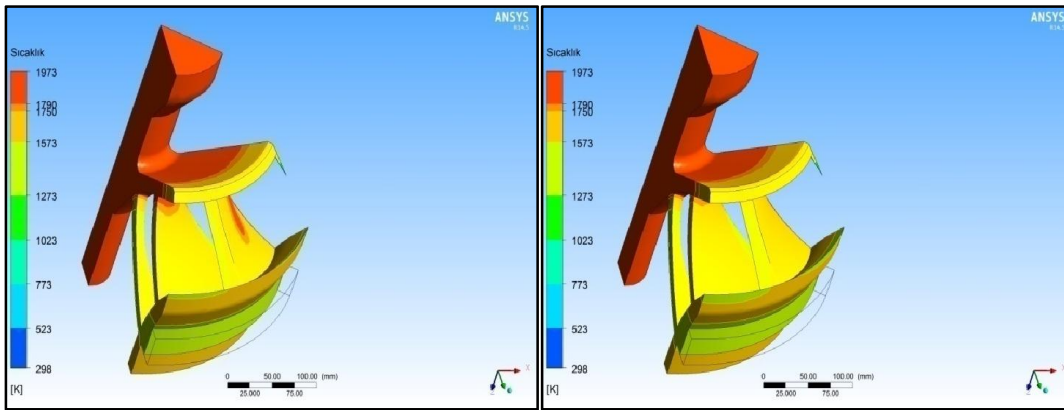


Şekil 5.58 : $t= 40$ sn. ve 42,5 sn. Fan-küçük soğutucu çalışma alanları sıcaklık dağılımı ($T_{Döküm}= 1973$ K).

Analizin başlangıcından sonra 25, 35, 40 ve 52.5 saniyelerde fandaki sıcaklık dağılımı Şekil 5.57 ve Şekil 5.58’de görülmektedir. Küçük soğutucu, hiç soğutucu kullanmamaya göre yönlendirilmiş katılaşmaya katkıda bulunsa dahi dış kanatlardaki (özellikle alt kısımda) bağımsız katılaşmayı önleyememektedir. Fan yatay kanatları fan göbeğine doğru katılaşırken, dış kanatlarda hala sıvı ve sıvı+katı fazlar mevcuttur.

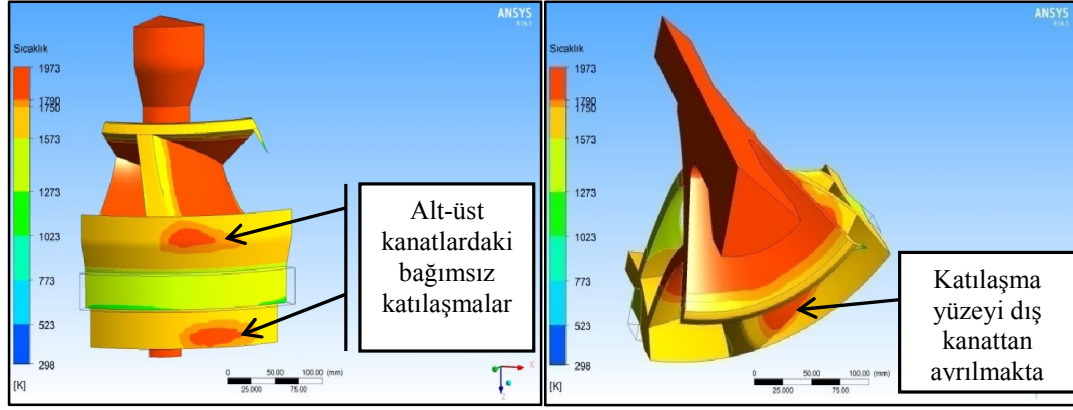


Şekil 5.59 : $t= 45$ sn. ve 50 sn. Fan-küçük soğutucu çalışma alanları sıcaklık dağılımı ($T_{Döküm}= 1973$ K).



Şekil 5.60 : $t= 60$ sn. ve 70 sn. Fan-küçük soğutucu çalışma alanları sıcaklık dağılımı ($T_{Döküm}= 1973$ K).

Küçük soğutucu kullanımı ile sorunun ne kadar çözüldüğünü anlamak için farklı kesitler alınarak incelenmiştir. Daha önceki analizlerde katılaşmada sorun görülen yer ve zaman dilimi belirlenmiştir. Buna göre, katılaşmanın başlangıcından sonraki 40 ve 42,5 saniyeler, dış kanatlardaki katılaşma açısından önemli olan analiz zamanlarıdır. Fan çalışma alanının $t=40$ ve $t=42,5$ saniyelerdeki sıcaklık dağılımı Şekil 5.57 - Şekil 5.60'dan daha farklı kesitten Şekil 5.61'de görülmektedir.



Şekil 5.61 : t=40 sn. ve 42,5 sn. Fan-küçük soğutucu çalışma alanları sıcaklık dağılımı ($T_{Döküm} = 1973 \text{ K}$).

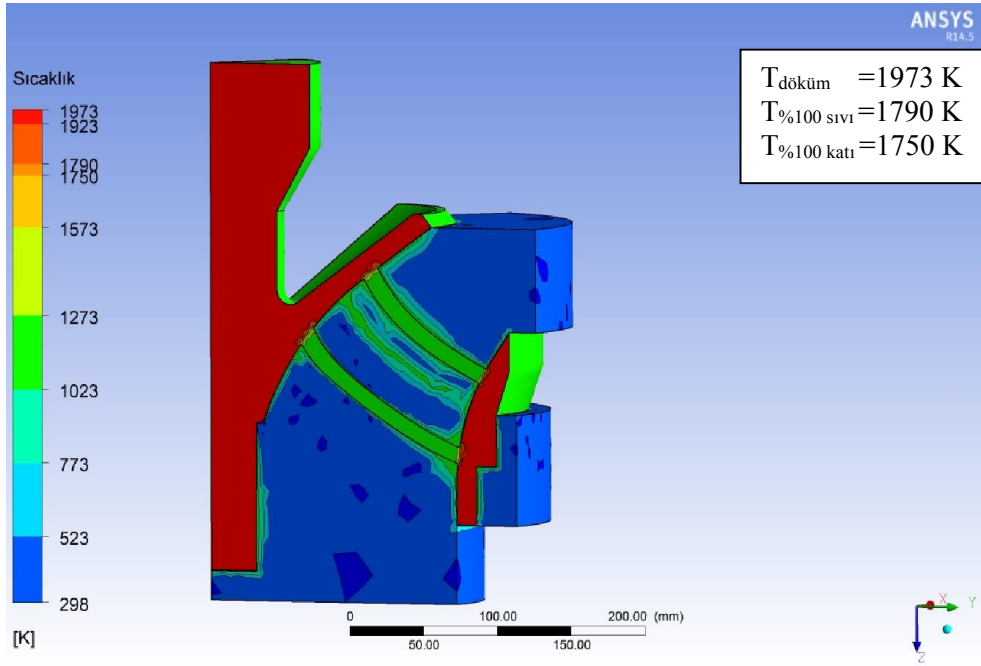
Şekil 6.58 ve Şekil 6.61'deki analizlerde, t=40 ve t=42,5 saniyelerdeki katılaşma farklı kesitlerden resimlenmiştir. Koyu kırmızı alanlar ($T > 1790 \text{ K}$) %100 sıvı fazı temsil etmektedir. %100 Sıvı fazı temsil eden koyu kırmızı bölgelerin etrafındaki koyu turuncu alanlar ($1790 \text{ K} < T < 1750 \text{ K}$) ise sıvı+katı fazı göstermektedir. Açık turuncudan başlayıp koyu maviye kadar değişik renkli alanlar ($T < 1750 \text{ K}$) %100 katı fazı göstermektedir. Farklı kesitlerden katılaşma incelendiği zaman, t = 40 s ve 42,5 sn. zaman aralığında, %100 sıvı fazı gösteren koyu kırmızı alanların fan besleyicisinde (göbek) ve fan dış kanatlarında bulunduğu görülmektedir. Aynı zaman aralığında, yatay fan kanatları ise özellikle dış kanatlara bağlanma bölgelerinde tamamen katılaşmış vaziyettedir. Fan besleyicisindeki sıvı faz, katılaşmanın hala devam ettiği dış kanatlarla olan irtibatı kopmuştur ve besleyici hala katılaşmanın devam ettiği dış kanatlara sıvı metal beslemesi yapamayacaktır. Dış kanatlarda çekinti görülmesi muhtemeldir. Sonuç olarak, küçük soğutucuyla dış kanatlarda yönlendirilmiş katılaşmanın elde edilemeyeceği anlaşılmaktadır.

5.2.2 Model 5. Büyük hacimli soğutucu

$$\text{Büyük soğutucu hacim} = V_{b.soğ} = 392,50 \text{ (cm}^3/60^0 \text{ kesit)} \times 6 = 2.355,00 \text{ cm}^3$$

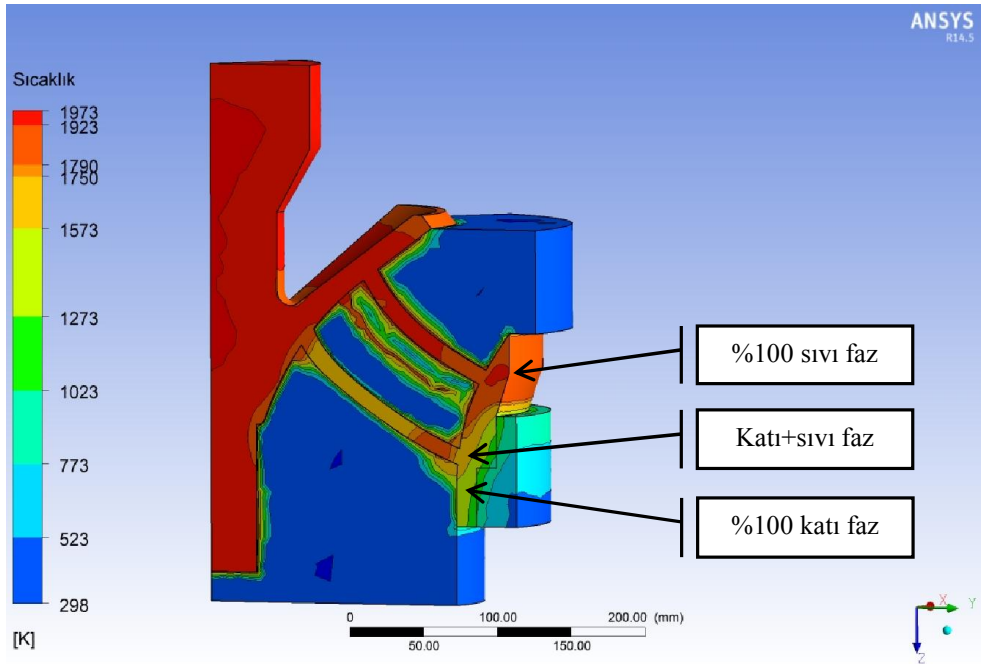
$$\text{Büyük soğutucu ağırlık} = W_{b.soğ} = 2.355,00 \text{ cm}^3 \times 7,846 \text{ g/cm}^3 = 18.477,33 \text{ g}$$

Tezin 5. Modelinde, $2.355,00 \text{ cm}^3$ hacimli AISI 1016 çelik malzemeden imal edilmiş soğutucu kullanımıyla fan dış kanadının besleyiciden sıvı metal takviyesi alabilecek katılaşma düzenine geçip geçmeyeceği incelenmiştir (Şekil 5.62 – Şekil 5.69).



Şekil 5.62 : $t=0$ sn. Fan-maça-büyük soğutucu çalışma alanlarındaki sıcaklık dağılımı.

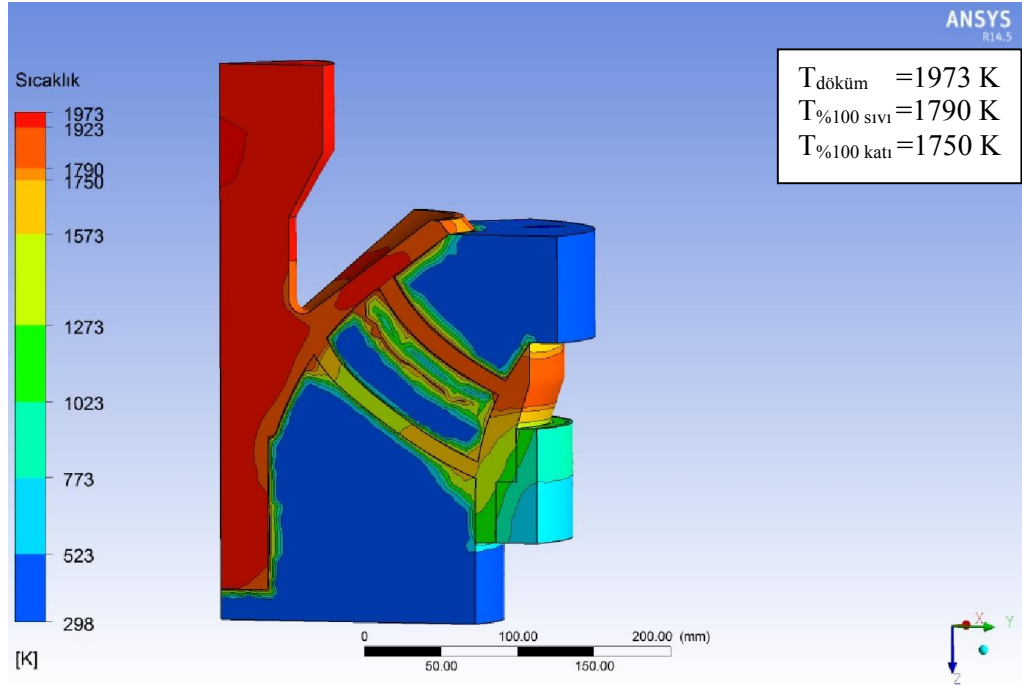
$t=0$ anında, $t=0$, $T_{\text{döküm}}=1973$ K ve $T_{\text{soğutucu}}=298$ K başlangıç koşullarındaki sıcaklık dağılımı görülmektedir (Şekil 5.62).



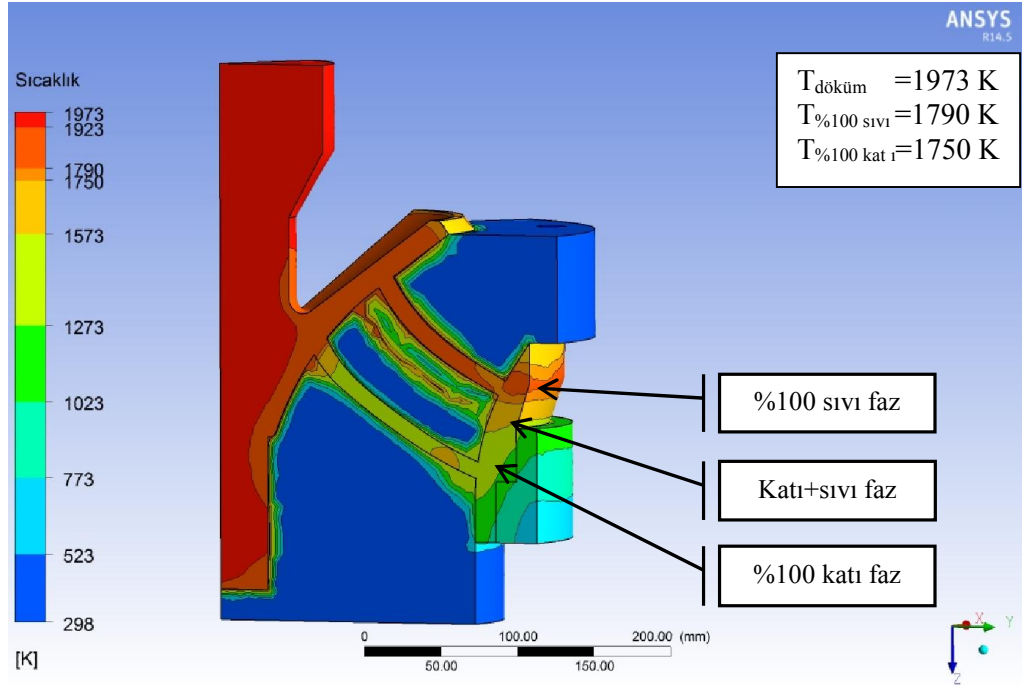
Şekil 5.63 : $t=15$ sn. Fan-maça-büyük soğutucu çalışma alanlarındaki sıcaklık dağılımı.

Büyük soğutucu kullanımı ile katılaşma fan dış kanatlarında çok hızla gelişmektedir. Fan dış kanatlarının büyük soğutucu ile temas halinde olan alt kısımları 15 saniye içinde katılaşmıştır. Soğutucunun kullanılmadığı durumda (Model 1), fanın dış

kanatlarının üst kısımdan başlayan katılaşma, soğutucunun etkisiyle alttan başlayarak fan dış kanadının üst bölgelerine doğru ilerlemiştir. (Şekil 5.63).



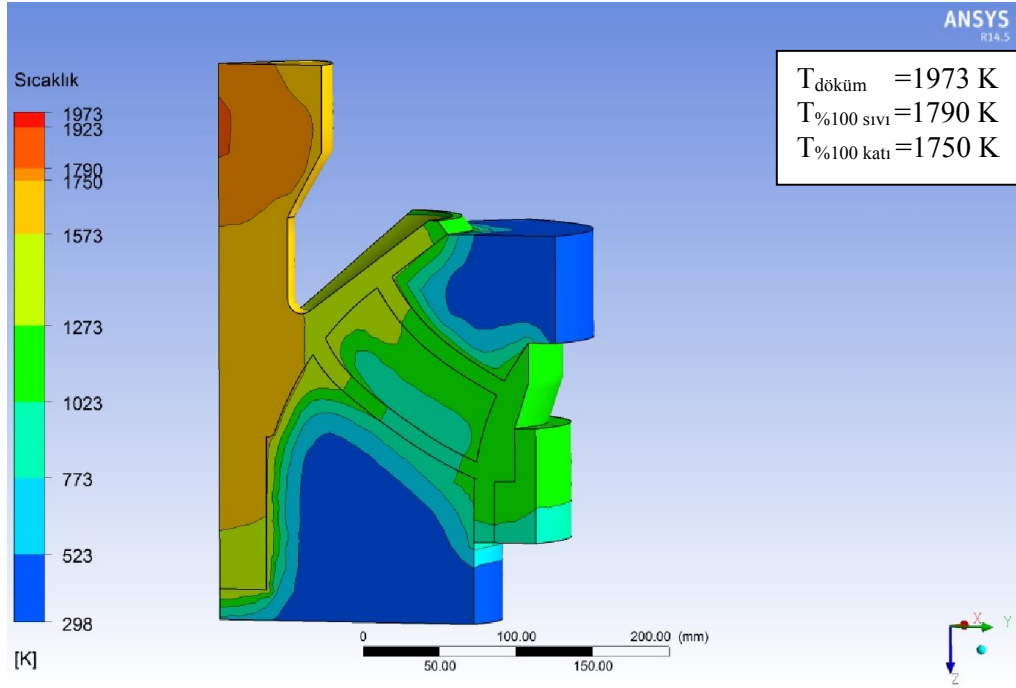
Şekil 5.64 : $t=25$ sn. Fan-maça-büyük soğutucu çalışma alanlarındaki sıcaklık dağılımı.



Şekil 5.65 : $t=35$ sn. Fan-maça-büyük soğutucu çalışma alanlarındaki sıcaklık dağılımı.

Fan dış kanatlarında hızla gelişen katılaşmada fan göbeğinden sıvı metal beslemesi için gereken sıcaklık dağılımı sağlanmış görünmektedir, ancak daha detay çalışmaya

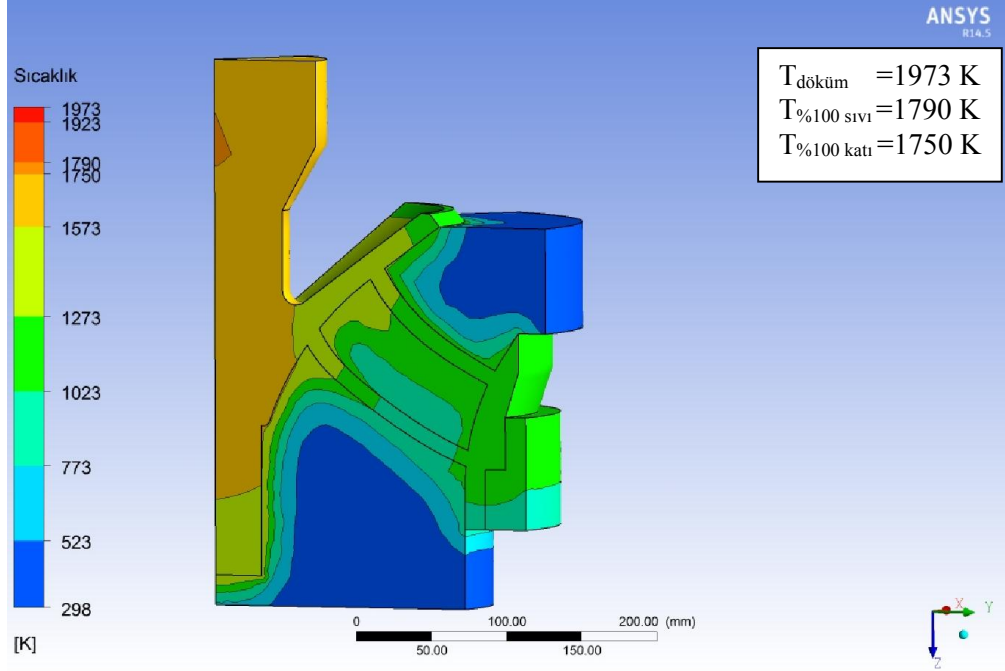
ihtiyaç duyulmaktadır (Şekil 5.64 – Şekil 5.65). Model 1’de 75 saniyede katılaştıran dış kanatlar (Şekil 5.6), büyük soğutucu kullanıldığı zaman 35 saniye de katılaştırmaktadır (Şekil 5.65). Küçük soğutucu ise katılaşmayı 37,5 saniyede sağlamakla birlikte (Şekil 5.55), dış kanatların hem üst hem de alt kısımlarında 2 ayrı bağımsız katılaşma bölgesi yaratmaktadır. Sonuç itibariyle, küçük soğutucu kullanım amacını sağlayamamaktadır.



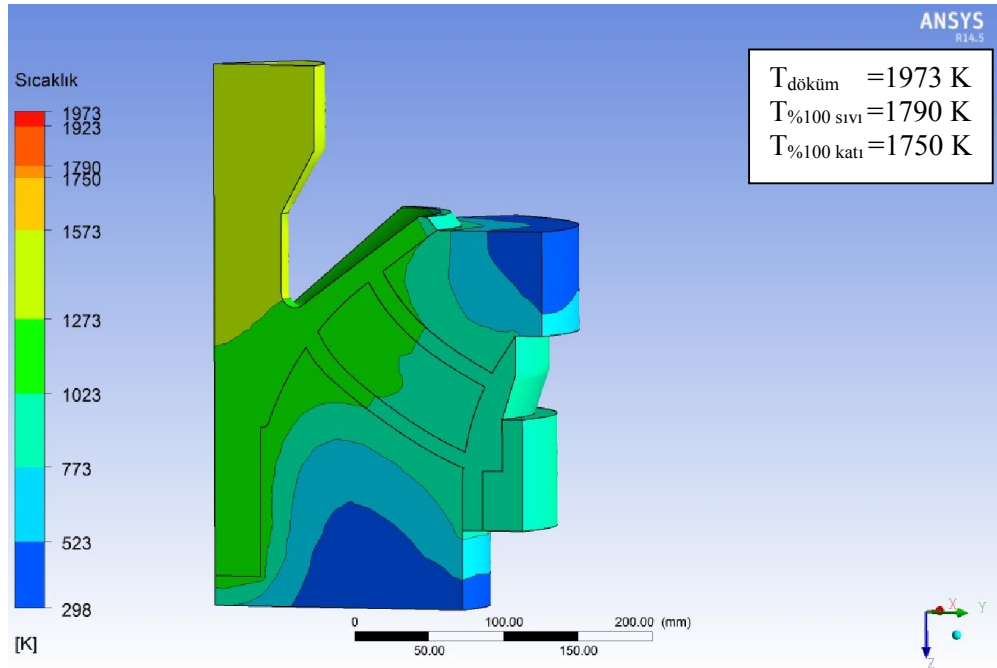
Şekil 5.66 : $t=515$ sn. Fan-maça-büyük soğutucu çalışma alanlarındaki sıcaklık dağılımı.

Büyük soğutucunun katılaşma düzenine etkisi temas ettiği noktalarda büyük olmakla birlikte fan göbeği ve besleyici gibi soğutucu temasından uzak olan bölgelerde etkisinin ihmal edilebilir düzeyde olduğu görülmektedir. Besleyici içindeki sıvı metalin kaybolma anı büyük soğutucu ile birlikte 515 saniyede olmaktadır. Soğutucunun kullanılmadığı ve diğer sınır koşulların tamamen aynı olduğu Model 1’de de besleyicideki katılaşma süresi 515 saniyedir. Bu iki model karşılaştırılarak, büyük soğutucunun fan göbeği ve besleyici üzerindeki, etkisi de analiz edilebilmektedir. Şekil 5.13’de görüldüğü gibi, Model 1’deki besleyicide %100 sıvı faz $\rightarrow$ sıvı+katı faza 515. saniyede dönüşmektedir. Soğutucunun kullanıldığı Model 5’te de, %100 sıvı faz $\rightarrow$ sıvı+katı faza 515. saniyede dönüşmektedir (Şekil 5.66). Bu sonuçlardan da görülmektedir ki, soğutucunun büyük veya küçük olmasının etkisi sınırlı olup, besleyici üzerindeki etkisi ihmal edilebilir düzeydedir.

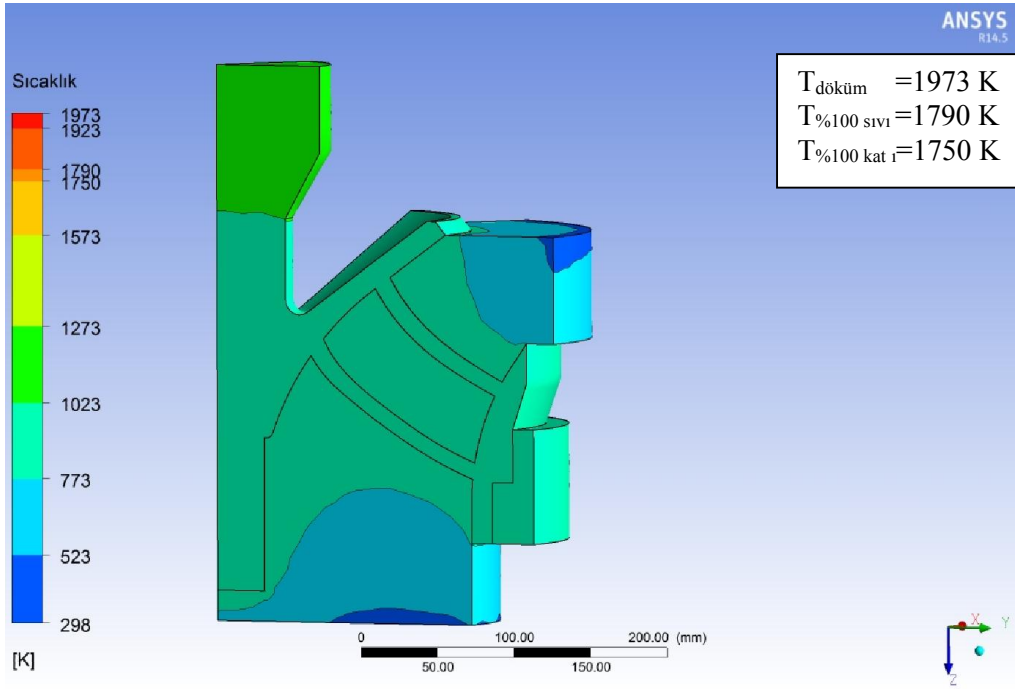
Besleyici içindeki sıvı+katı fazın Model 1'deki analizde %100 katı faza dönüşme süresi 565 saniye iken (Şekil 5.17 - Şekil 5.18), soğutucunun kullanıldığı Model 5'de sıvı+katı fazın $\rightarrow$ %100 katı faza dönüşme süresi 557,5 saniyedir (Şekil 5.67). Yani soğutucu, besleyicide %100 katı fazın oluşumunu 7,5 saniye daha kısaltmıştır. Oransal olarak etkisi -%1,3'tür ve ihmal edilebilecek seviyeyedir.



Şekil 5.67 : $t=557,5$ sn. Fan-maça-büyük soğutucu çalışma alanlarındaki sıcaklık dağılımı.



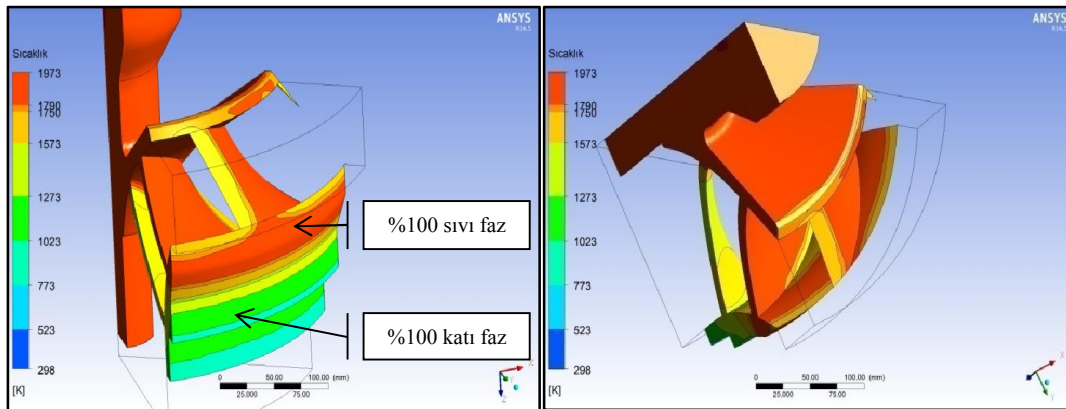
Şekil 5.68 : $t=2400$ sn. Fan-maça-büyük soğutucu çalışma alanlarındaki sıcaklık dağılımı.



Şekil 5.69 : $t=7200$ sn. Fan-maça-büyük soğutucu çalışma alanlarındaki sıcaklık dağılımı.

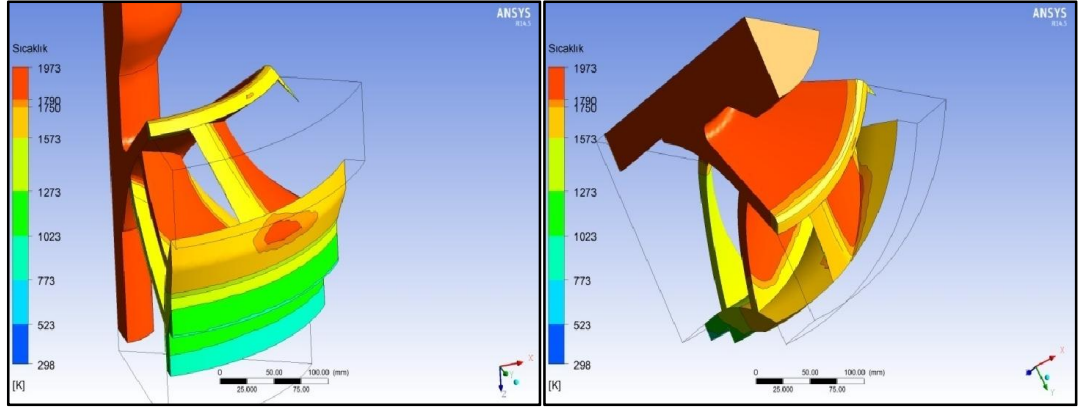
Tüm modellerde olduğu gibi, ilerleyen periyotlarda, döküm sıcaklığı ve büyük veya küçük soğutucu kullanımı, çalışma alanlarındaki sıcaklık dağılımlarında fark yaratmamaktadır. $t=2400$ ve $t=7200$ sürelerinde, sıcaklık dağılımları tüm modellerde çok benzerdir (Şekil 5.68 – Şekil 5.69).

Büyük soğutucunun fanda meydana gelen katılaşma üzerindeki etkisi ayrıca detaylı olarak incelenmiştir (Şekil 5.70 – Şekil 5.77).



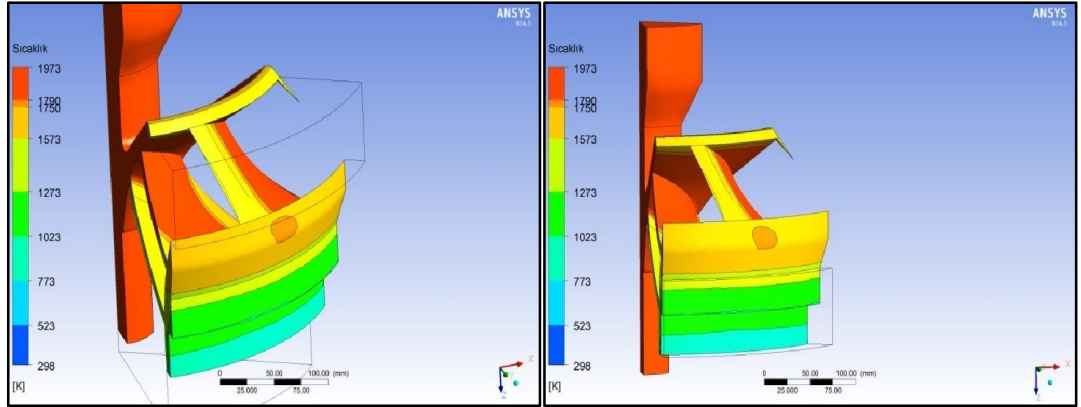
Şekil 5.70 : $t=30$ sn. Fan-büyük soğutucu çalışma alanları sıcaklık dağılımları ($T_{Döküm} = 1973$ K).

Şekil 5.70, $t=30$ s’de, fandaki sıcaklık dağılımını göstermektedir. Fan dış kanatlarının alt kısımları tamamen katılaşmış, soğutucunun temas etmediği üst kısımlarda ise sıvı metal bulunmaktadır.



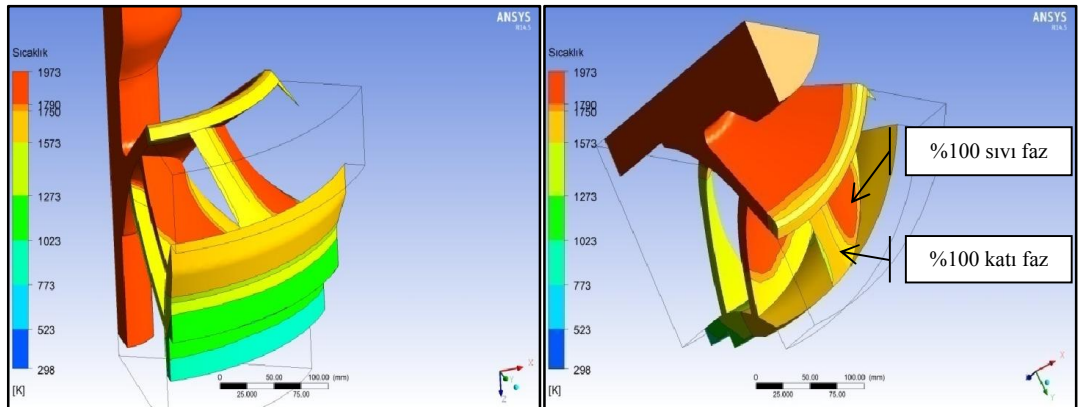
Şekil 5.71 : $t=40$ sn. Fan çalışma alanı sıcaklık dağılımları ($T_{\text{Döküm}}=1973$ K).

$t=40$ saniyede, fan dış kanatları hemen hemen katılaşmış durumdadır. Sadece üst fan yatay kanadının dış kanata temas ettiği birleşme yerinde; kesişim yerlerinin yüksek hacim/alan modülü nedeniyle döküm pratiğinde de çok sık görüldüğü üzere sıvı metal bulunmaktadır. Yönlendirilmiş katılaşmanın sağlanması için önemli olan, bu kesişimin yatay kanatlardan önce katılaşmasıdır (Şekil 5.71).



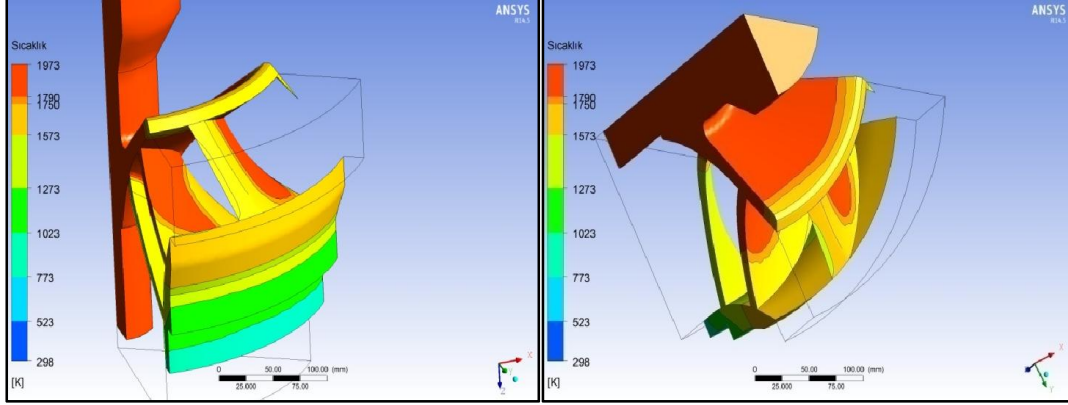
Şekil 5.72 : $t=42,5$ sn. Fan çalışma alanı sıcaklık dağılımları ($T_{\text{Döküm}}=1973$ K).

$t=42,5$ saniyede, yatay ve dış kanat kesişimindeki sıvı metal kaybolmuş, sıvı+katı metal bulunmaktadır (Şekil 5.72). Yatay kanatlarda hala sıvı metal bulunmaktadır.



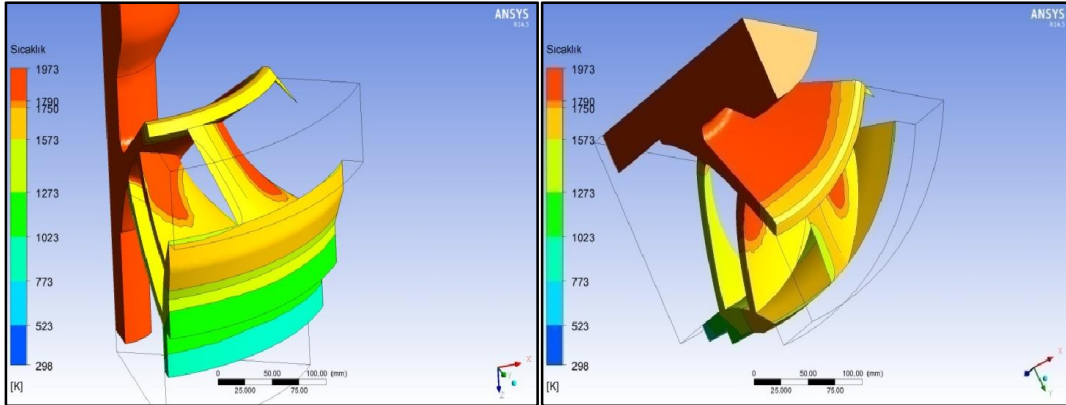
Şekil 5.73 : $t=45$ sn. Fan çalışma alanı sıcaklık dağılımları ($T_{\text{Döküm}}=1973$ K).

$T=45$ saniyede, artık dış kanatlar tamamen katılaşmıştır ve yatay kanatlar hala sıvı metal içermektedir. Büyük soğutucu kullanımıyla dış kanatlarda yönlendirilmiş katılaşma elde edilmiştir (Şekil 5.73).



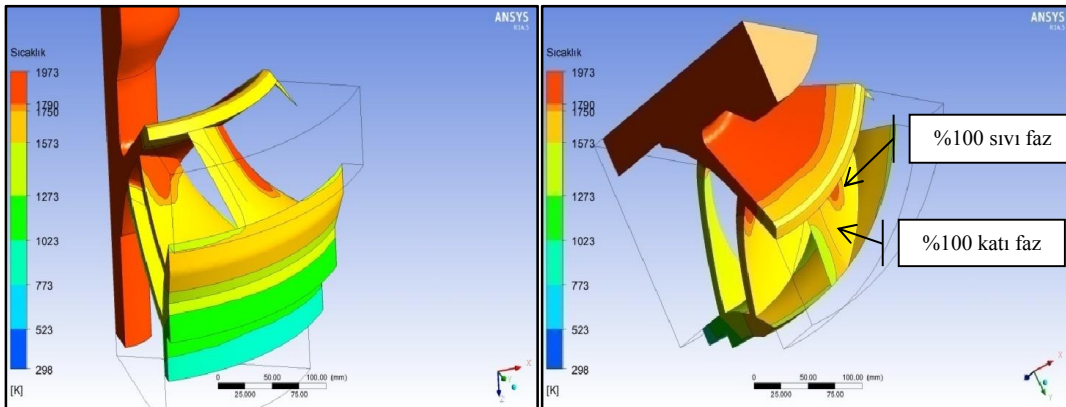
Şekil 5.74 : $t=50$ sn. Fan çalışma alanı sıcaklık dağılımları ($T_{Döküm}= 1973$ K).

Yatay kanatlardaki katılaşmanın, yatay kanatların dış kanatlara temas noktalarından başlayıp besleyici yönünde olması sağlanmıştır (Şekil 5.74).

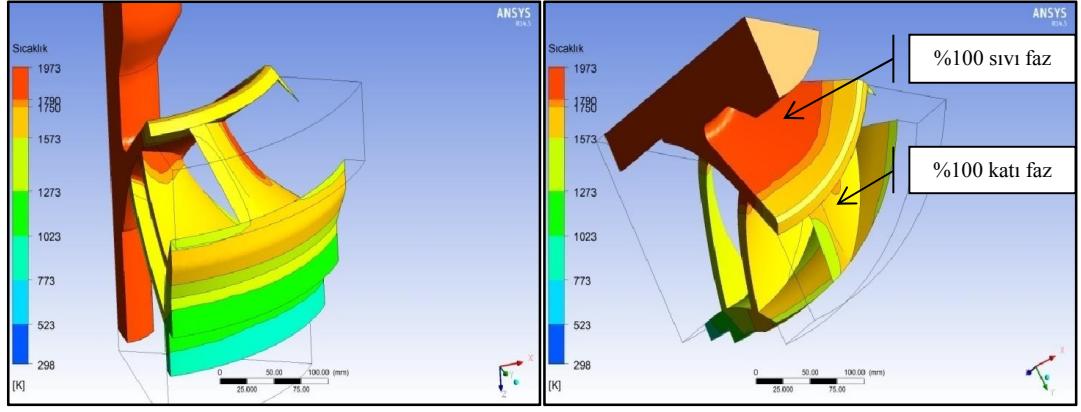


Şekil 5.75 : $t=55$ sn. Fan çalışma alanı sıcaklık dağılımları ($T_{Döküm}= 1973$ K).

$t=55$ saniyede, yatay kanatlarda başlayan katılaşmanın dış taraftan, fan göbeğine doğru devam etmesi sağlanmıştır (Şekil 5.75).



Şekil 5.76 : $t=60$ sn. Fan çalışma alanı sıcaklık dağılımları ($T_{Döküm}= 1973$ K).



Şekil 5.77 : $t=65$ sn. Fan çalışma alanı sıcaklık dağılımları ($T_{Döküm}=1973$ K).

$t=60$ ve $t=65$ saniyelerde, yatay kanatlarda da tam yönlendirilmiş katılaşmanın olduğu görülmektedir. Fan geometrisinin besleyiciye en uzak dış kanatlarından başlayan katılaşmanın, kademeli olarak fan göbeğine (besleyiciye) doğru devam etmesi sağlanmış ve katılaşma süresince katılaşan her bölgeye besleyiciden gerekli sıvı metal takviyesi olduğu görülmüştür (Şekil 5.76 – Şekil 5.77).

Sonuç olarak, küçük soğutucunun dış kanatlar üzerindeki katılaşmayı iki bağımsız bölgeye bölmesi ve besleyiciye doğru yönlendirilmiş katılaşmayı sağlayamaması sebebiyle kullanımının uygun olmadığı anlaşılmıştır. Ancak büyük soğutucunun kullanıldığı Model 5’de katılaşma düzeni $t=42,5$ saniyede incelenecek olursa (Şekil 5.72), katılaşmanın dış kanatlarda tamamen bittiği ve katılaşmanın besleyiciye doğru; besleyici ile irtibat kopması olmadan; tamamlandığı görülmektedir (Şekil 5.73 – Şekil 5.77). Dış kanatlarda olması muhtemel katılaşma çekintisinin büyük besleyici kullanımıyla aşıldığı Model 5’deki analizden anlaşılmaktadır.

Bu çalışmada kurulan model esnektir ve soğutucu olarak değişik metaller veya değişik geometriler kullanılabilir. Kullanılan değişik metal soğutucular için ısı özelliklerinin modele ilave edilmesi gereklidir. Değişik geometriler için ise sadece soğutucu çalışma alanının diğer çalışma alanlarıyla olan arayüzler yeniden belirlenmelidir.

5.3 Kalıp yoğunluğunu katılaşma süresine etkisi

Kalıp yoğunluğu, paketlenme basıncı, tane boyutu ve tane boyutu dağılımı, kullanılan bağlayıcı gibi değişik faktörler tarafından etkilenmektedir. Şekil 3.15’deki deneysel grafikte, aynı paketlenme basıncı ve 4 elek sayısı için, yığın yoğunluğunun tane boyutuna göre %7 değiştiği görülmektedir. Model 1’de kalıp ve maçada yaş kum 40

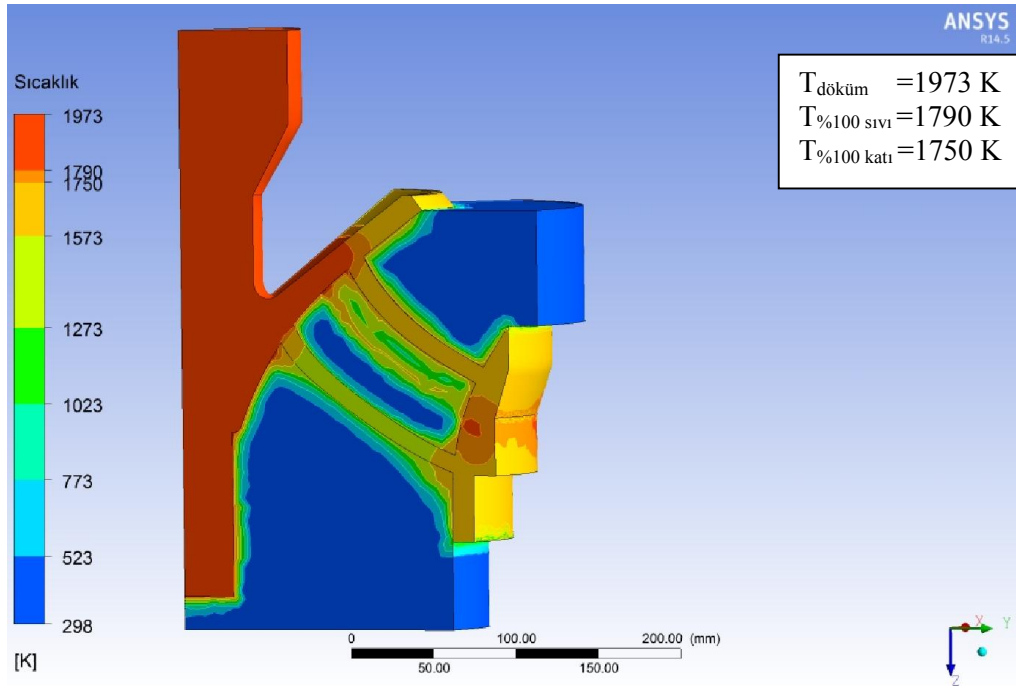
AFS için ısııl özellikler kullanılmıştır. Yaş kum 20 AFS ve 140 AFS için yoğunluk grafikleri, yaş kum 40 AFS yoğunluk grafiği ve Şekil 3.20'deki düzeltme faktörleri kullanılarak yeniden hesaplanmıştır. 40 AFS ve 20 AFS arasında 1,02 ve 40 AFS ve 140 AFS arasında 0,95 düzeltme faktörleri kullanılmıştır (Şekil 3.19). Kalıp yoğunluğunun katılma süresine etkisi Model 6 ve Model 7'de incelenmiştir.

Model 6 ve Model 7, Model 1'den sadece kalıp yoğunluğu ile farklılık göstermektedir. Diğer bütün sınır ve başlangıç koşullar aynıdır. Farklı kalıp yoğunluğunun katılmaya etkisini açıklamak için Model 6 - Model 1 ve Model 7 - Model 1 mukayeseleri yapılmıştır.

Çizelge 5.3 : Değişken kalıp yoğunluğu (Diğer parametreler Model 1 ile aynıdır).

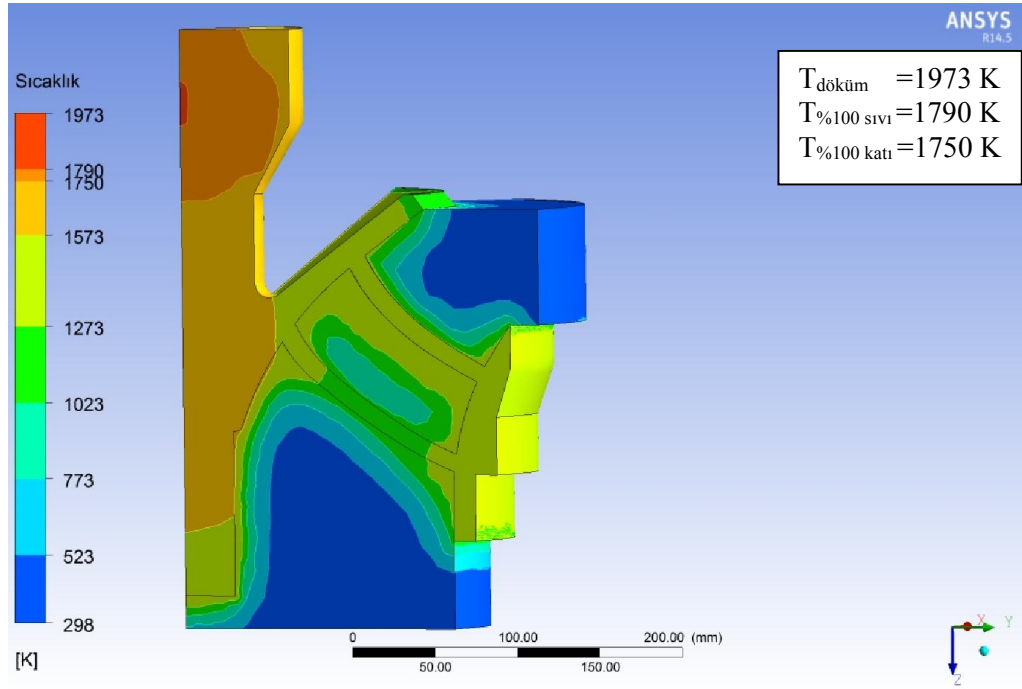
Model	Kalıp	Maça	Döküm Sıcaklığı (K)	Soğutucu	Döküm Alaşımı
6	Yaş kum 20 AFS	Yaş kum 40 AFS	1.973	Yok	AISI 1016
7	Yaş kum 140 AFS	Yaş kum 40 AFS	1.973	Yok	AISI 1016

5.3.1 Model 6. Kalıp: 20 AFS yaş kum



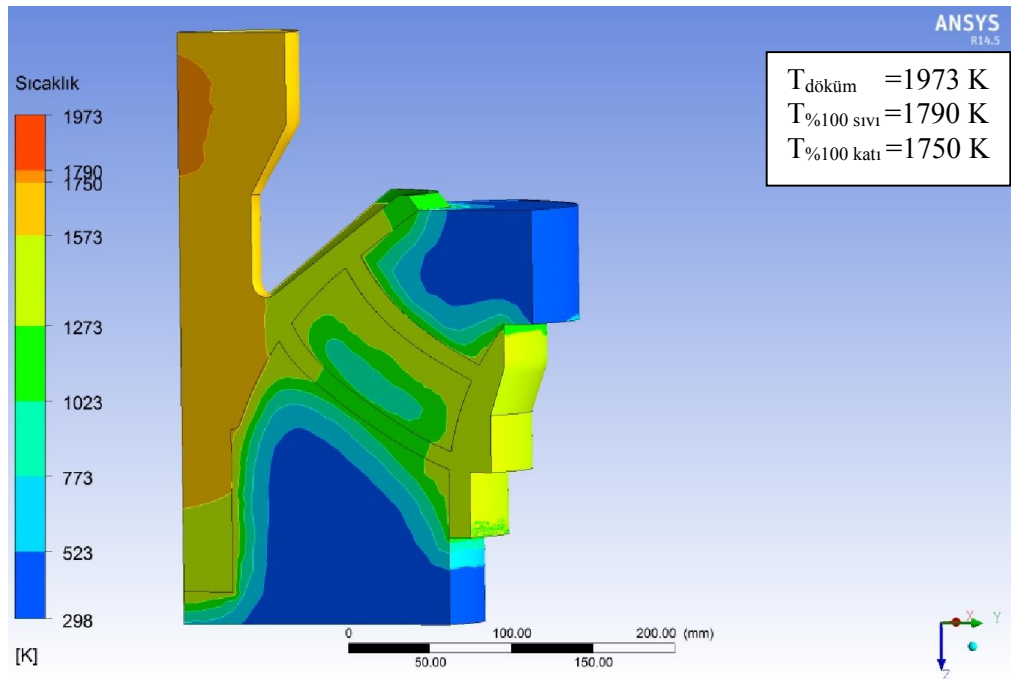
Şekil 5.78 : $t=75$ sn. Fan-maça çalışma alanlarındaki sıcaklık dağılımı (Kalıp 20 AFS yaş kum).

$t=75$ saniyede, Model 6'da (Kalıp 20 AFS) fan dış kanat kesitinde katılma bitmeye yakındır ve dış kanatın tamamı katılmak üzeredir (Şekil 5.78). Model 1'de de (Kalıp 40 AFS) aynı katılma $t=75$ saniyede oluşmaktadır (Şekil 5.6).



Şekil 5.79 : $t=515$ sn. Fan-maça çalışma alanlarındaki sıcaklık dağılımı (Kalıp 20 AFS yaş kum).

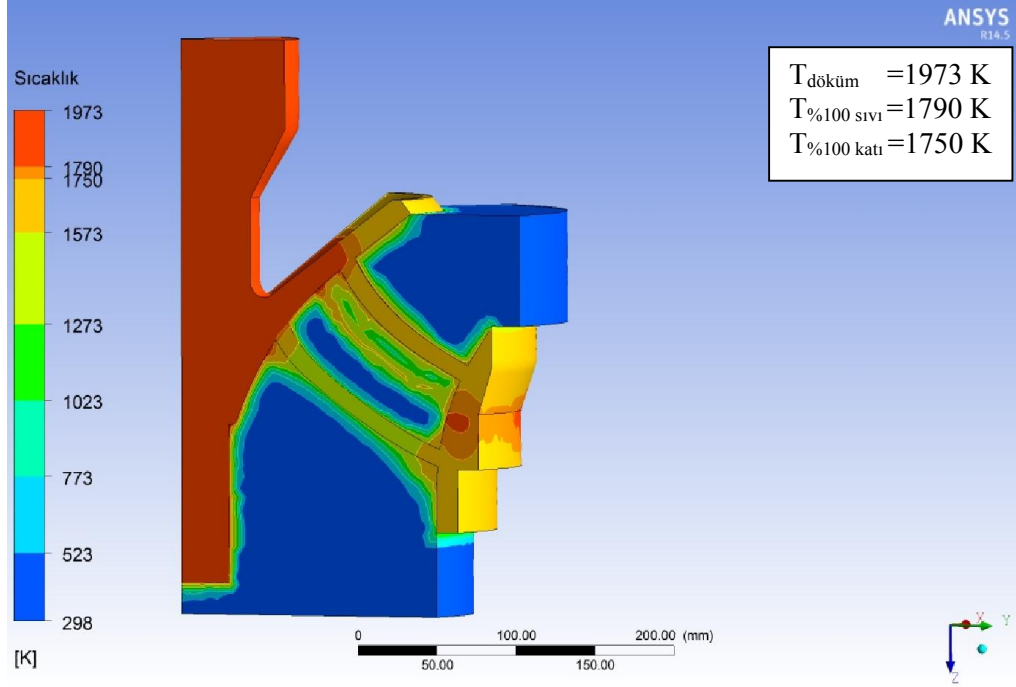
Model 6'da, besleyici içindeki %100 sıvı fazın $\rightarrow$ sıvı+katı faza dönüşme süresi 515 saniyedir (Şekil 5.79). Aynı katılaşma Model 1'de de aynı sürede olmaktadır (Şekil 5.13).



Şekil 5.80 : $t=560$ sn. Fan-maça çalışma alanlarındaki sıcaklık dağılımı (Kalıp 20 AFS yaş kum).

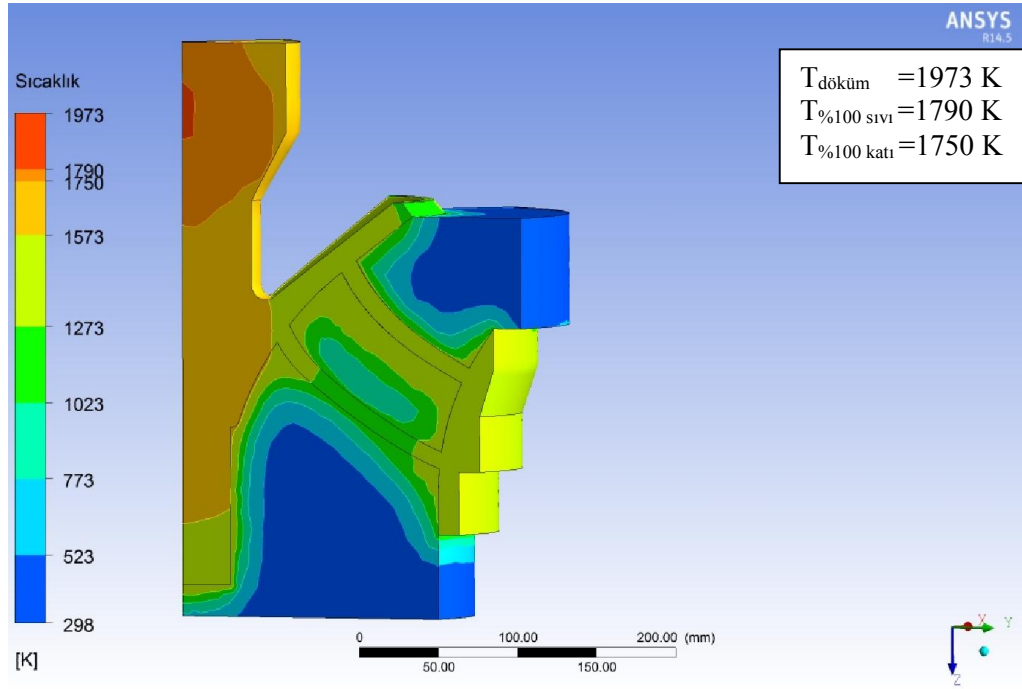
Model 6'da, besleyici içindeki sıvı+katı fazın→%100 katı faza dönüşme süresi 560 saniyedir (Şekil 5.80). Aynı katılaşma Model 1'de 565 saniyede olmaktadır (Şekil 5.17).

5.3.2 Model 7. Kalıp: 140 AFS yaş kum



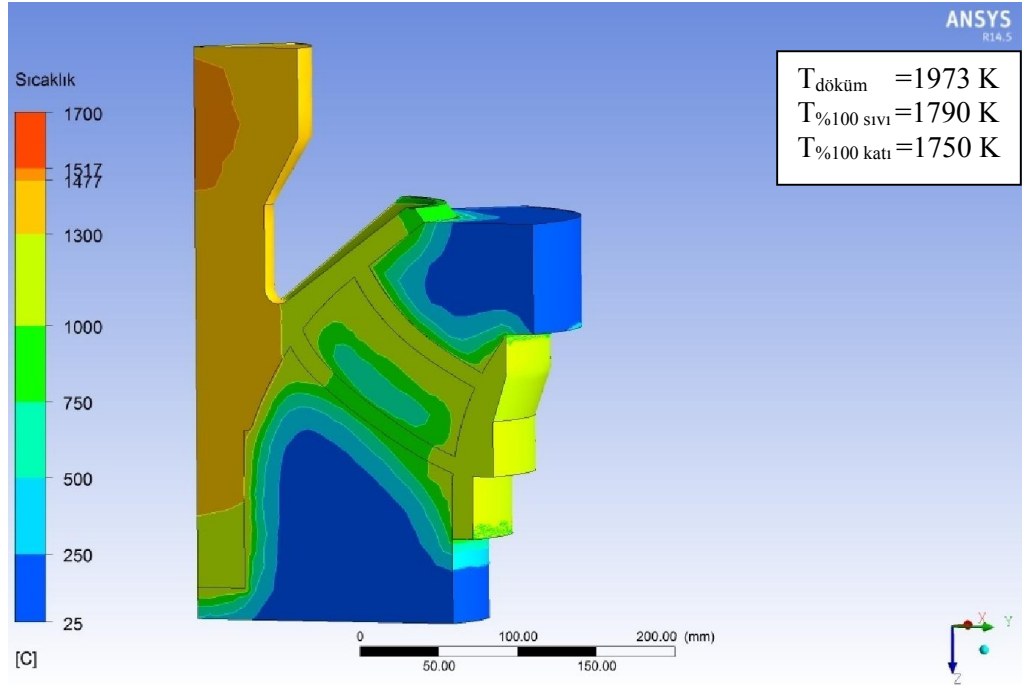
Şekil 5.81 : $t=75$ sn. Fan-maça çalışma alanlarındaki sıcaklık dağılımı (Kalıp 140 AFS yaş kum).

Model 7 ve Model 1'de fan dış kanatlarındaki katılaşma 75 saniye içinde oluşmaktadır (Şekil 5.81 ve Şekil 5.6).



Şekil 5.82 : $t=515$ sn. Fan-maça çalışma alanlarındaki sıcaklık dağılımı (Kalıp 140 AFS yaş kum).

Model 7 ve Model 1’de besleyici içindeki %100 sıvı fazın $\rightarrow$ sıvı+katı faza dönüşme süreleri 515 saniyedir (Şekil 5.82 ve Şekil 5.13).

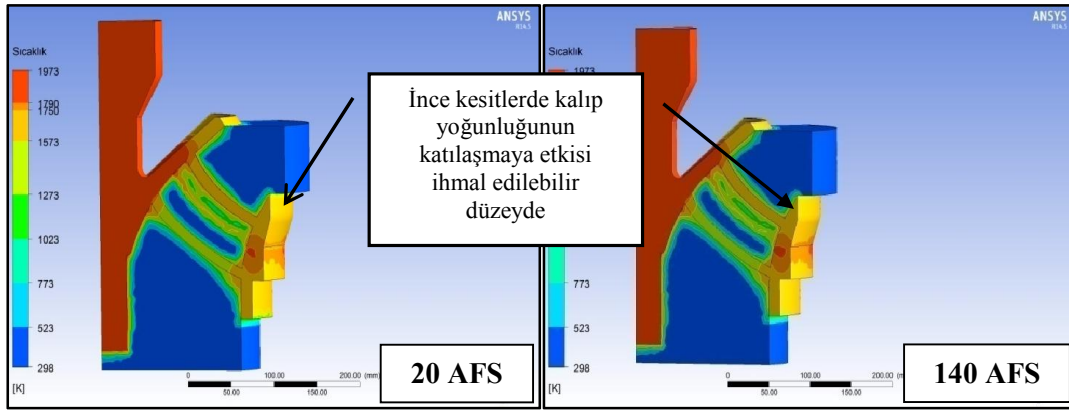


Şekil 5.83 : $t=560$ sn. Fan-maça çalışma alanlarındaki sıcaklık dağılımı (Kalıp 140 AFS0 yaş kum).

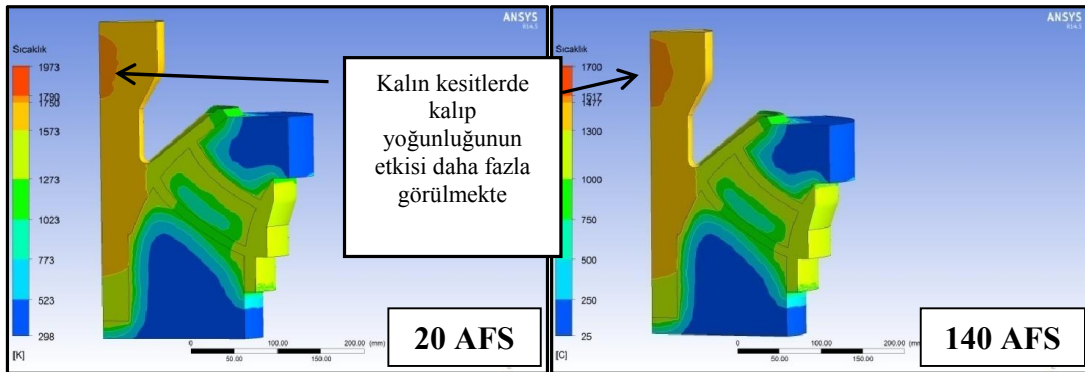
Model 7 ’de besleyici içindeki sıvı+katı fazın $\rightarrow$ %100 katı faza dönüşme süresi 560 sn. ve Model 1’in dönüşme süresi 565 sn.’dir (Şekil 5.83 ve Şekil 5.17). Genel bir

söyleyişle, kalıp yoğunluğunun katılaşma üzerine etkisinin çok kısıtlı olduğu hatta daha yoğun ve daha az yoğun iki kalıp malzemesi içinde katılaşan metalin aynı sürelerde katılaştığı söylenebilir. Ancak, katılaşma süreleri çok benzer olsa bile katılaşan fazın geometrik şekli farklıdır ve bazı geometrilerde bu farklılık döküm kalitesini etkileyecek bir farklılıktır.

Daha yakın bir incelemeyle aynı zaman dilimlerinde kalıp malzemesinin Model 6'daki 20 AFS (büyük tane) ve Model 7'deki 140 AFS (küçük tane) olduğu durumları mukayese edersek, özellikle ince kesitlerde kalıp yoğunluğunun etkisi hemen hemen hiç olmamaktadır. Fan göbeği gibi hacimli bölgelerde ise 20 AFS ve 140 AFS için katılaşma sürelerindeki farklılıkları daha belirgindir ancak yine de etki çok kısıtlıdır (Şekil 5.84 – Şekil 5.85).



Şekil 5.84 : t=75 s. Fan-maça çalışma alanlarındaki sıcaklık dağılımı.



Şekil 5.85 : t=560 s. Fan-maça çalışma alanlarındaki sıcaklık dağılımı.

Analitik çözüm denklemi olan (3.4) numaralı denklem katılaşma süresinin kalıp yoğunluğu ile olan ilişkisini göstermektedir. Bu ilişkide, katılaşma süresi, kalıp yoğunluğu ile ters orantılıdır. Denklem 3.3 ise katılaşan metal kalınlığının, kalıp yoğunluğunun karekökü ile doğru orantılı olduğunu göstermektedir.

Tezde kullanılan modellerde, Şekil 5.85’de de görüldüğü gibi, besleyici içindeki sıvı+katı faz, $t=560$ saniyede, daha yoğun olan kalıp malzemesinde hacimsel olarak daha küçüktür, yani katılaşma daha hızlı ilerlememiştir. Ancak, katılaşma süresi üzerinde yoğunluğun etkisinin karekök ile doğru orantılı olması, yoğunluğun katılaşma üzerindeki etkisinin kısıtlı olduğunu zaten teorik olarak göstermektedir ki bu çalışmada 20 AFS yaş kum ve 140 AFS yaş kum arasındaki yoğunluk farkı $\sim 7\%$ olmasına rağmen, katılaşma üzerindeki yoğunluk etkisi çok sınırlıdır.

5.4 Kalıp ve maça malzemesinin katılaşma süresine etkisi

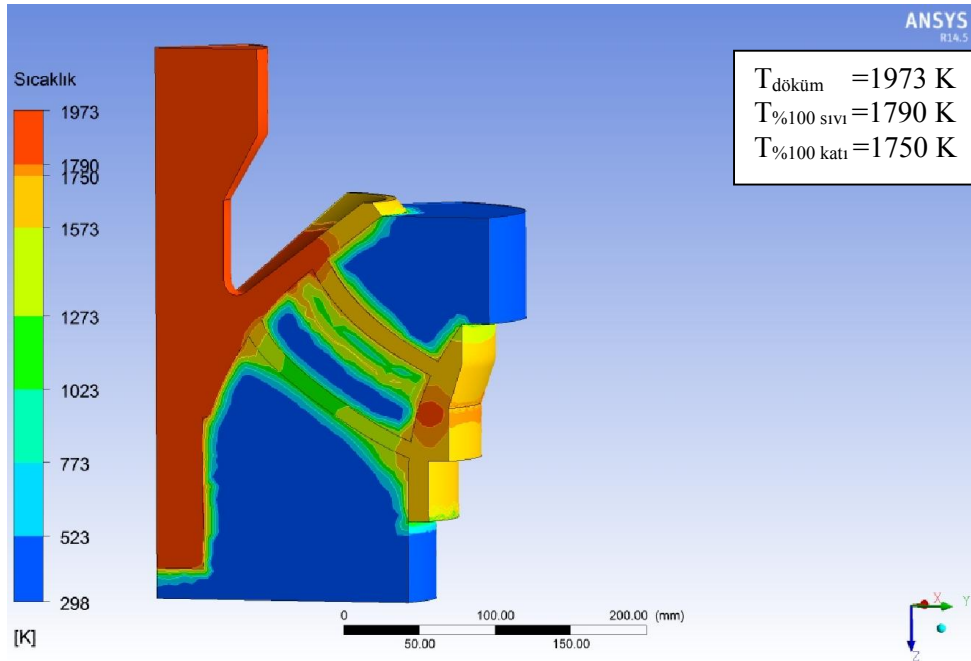
Çizelge 5.4 : Değişken kalıp-maça malzemesi (Diğer parametreler Model 1 ile aynıdır).

Model	Kalıp	Maça	Döküm Sıcaklığı (K)	Soğutucu	Döküm Alaşımı
8	Üretan	Üretan	1.973	Yok	AISI 1016
9	Kabuk	Kabuk	1.973	Yok	AISI 1016

Model 1’de yaş kum kalıp ve maça malzemesi içine 1973 K de dökülen AISI 1016 malzemenin katılaşma süresi ve katılaşma düzeni analiz edilmişti. Model 8 ve Model 9’da ise üretan ve kabuk kalıp-maça malzemeleri içine 1973 K’de dökülen AISI 1016 çelik malzemesi modellendi. Model 1. Model 8 ve Model 9 arasındaki tek fark kalıp+maça malzemesi farkı olup, diğer bütün başlangıç ve sınır koşullar aynıdır.

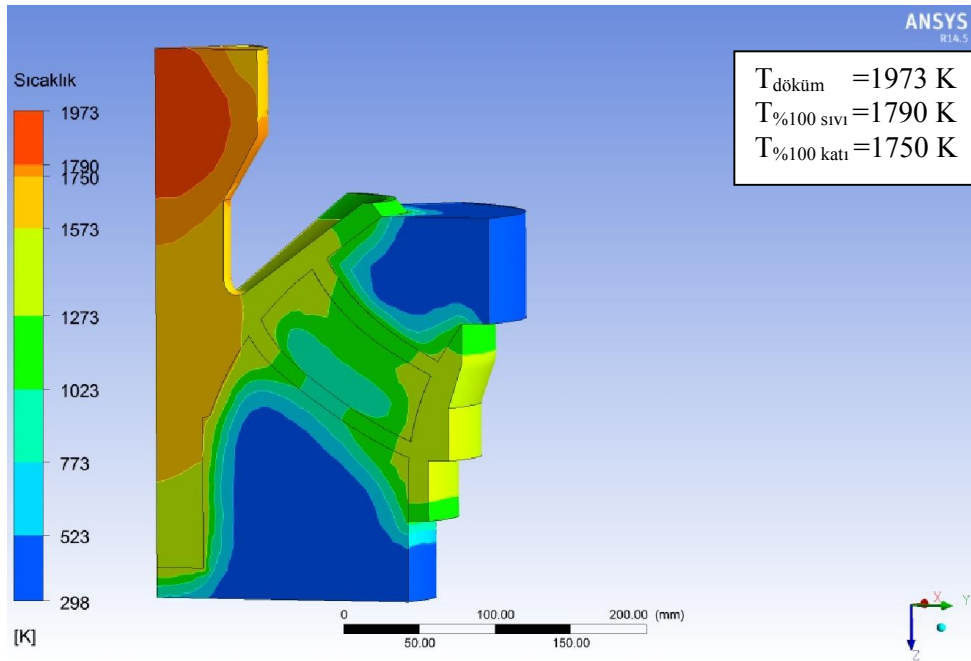
Kalıp ve maça malzemelerinin değişik yoğunluk, özgül ısı ve ısı iletkenlik özelliklerine sahip olmaları sebebiyle, katılaşma süresi ve düzeni üzerinde değişik etkileri vardır. Üretan (üretan reçine bağlı kum) ve kabuk kalıp maça malzemelerinin bu özellikleri Bölüm 3.11’de verilmişti. Bu bölümde, bu özellikler kullanılarak yapılan modellemelerdeki önemli adımların katılaşma süreleri verilecektir.

5.4.1 Model 8. Kalıp ve maça : Kabuk



Şekil 5.86 : $t=47,5$ sn. Fan-maça çalışma alanlarındaki sıcaklık dağılımı (Kabuk kalıp ve maça).

Kabuk kalıp ve maçanın kullanıldığı Model 8’de dış kanatların katılma süresi 47,5 saniyedir (Şekil 5.86). 40 AFS yaş kum’un kullanıldığı Model 1’de ise aynı bölge 75 saniyede katılmaktadır (Şekil 5.6). Kabuk kalıp+maça ile yapılan döküm, yaş kum döküme göre dış kanatlarda %36 daha hızlı soğumaya sahiptir.



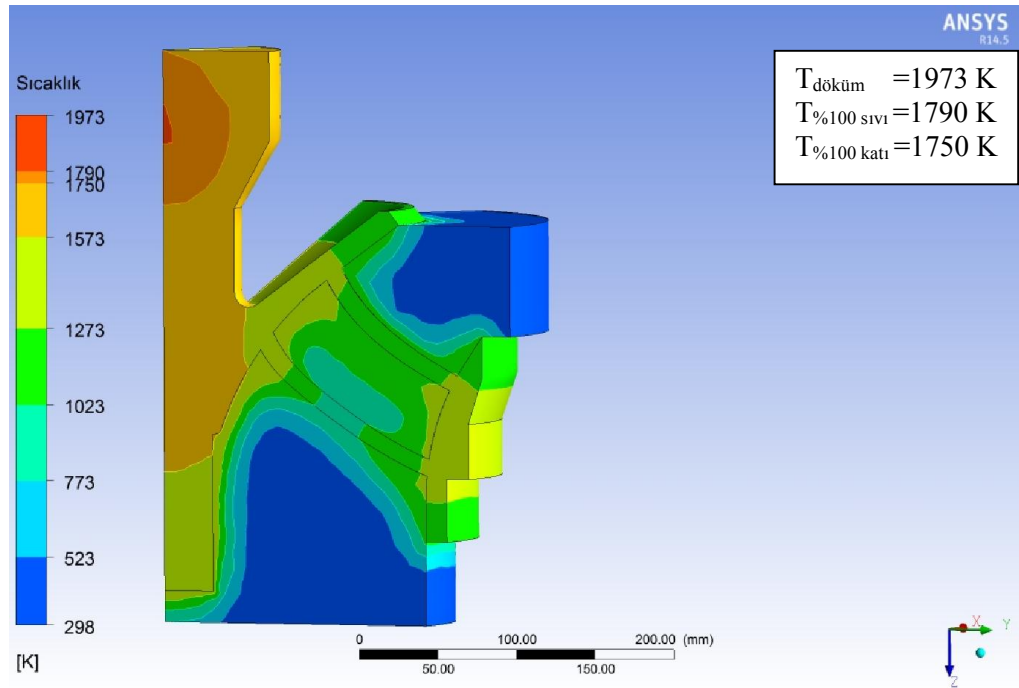
Şekil 5.87 : $t=300$ sn. Fan-maça çalışma alanlarındaki sıcaklık dağılımı (Kabuk kalıp ve maça).

$t=300$ saniyede besleyici içindeki sıvı metal geometrisinin, Model 1'deki benzer sürelerdeki sıvı metal geometrisinden oldukça farklı olduğu görülmektedir (Şekil 5.87, Şekil 5.9 ve Şekil 5.10). Model 1'de besleyici üst noktalarında bu sürelerde katı metal oluşmamış durumda iken, kabuk kalıp+maçanın kullanıldığı Model 8'de besleyici üst kısımlarında katılaşma mevcuttur.

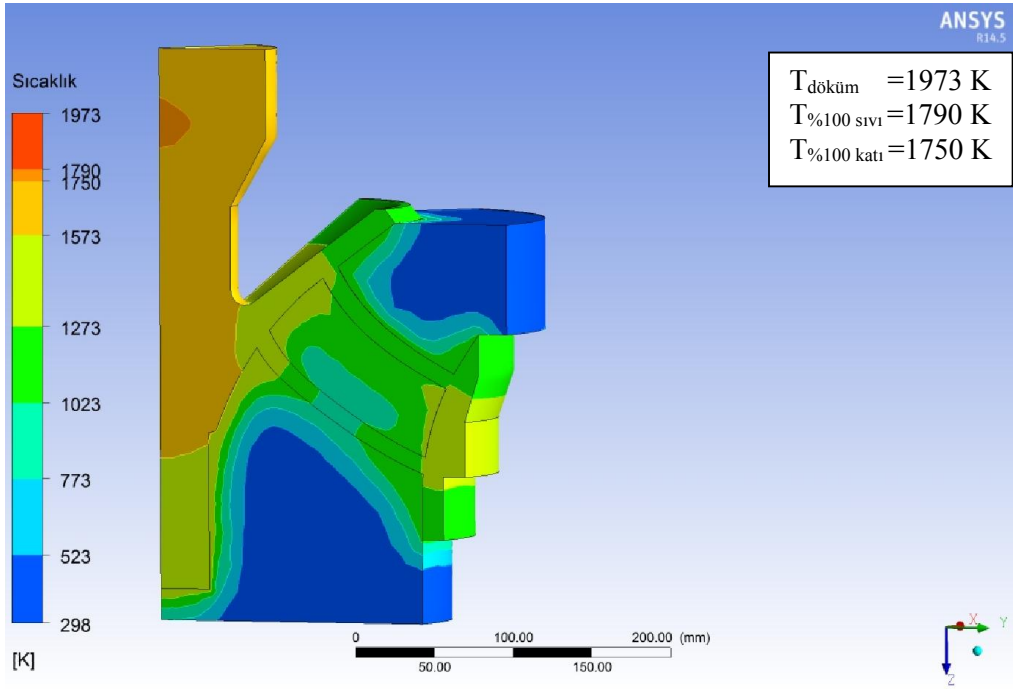
Besleyici içinde son %100 sıvı metal Model 8'de $t=350$ saniyede tamamen katılaşırken (Şekil 5.88), aynı katılaşma Model 1'de 515. saniyede olmaktadır (Şekil 5.13). Kabuk kalıp +maça'da, fanın besleyici kısmındaki katılaşma süresi %32 mertebesinde daha kısadır.

Sıvı+katı faz $\rightarrow$ katı faz dönüşümü Model 8'de 372,5 saniyede olmaktadır (Şekil 5.89), aynı dönüşüm Model 1'de 565 saniyededir (Şekil 5.17).

Model 8 ve Model 1'in mukayesesinden çıkan özet sonuca göre, modellemede kullanılan fan geometrisi esas alınırsa, kabuk kalıp+maça ikilisindeki soğuma, aynı sıcaklıkta 40 AFS yaş kum kalıp+maça ikilisine göre %32-%36 daha hızlıdır.

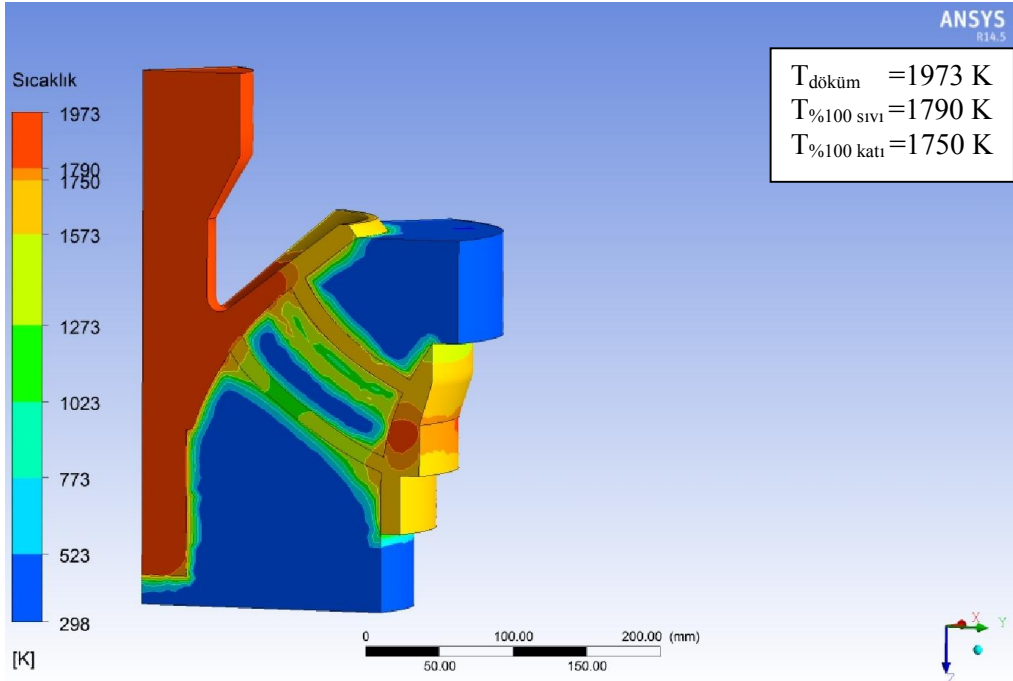


Şekil 5.88 : $t=350$ sn. Fan-maça çalışma alanlarındaki sıcaklık dağılımı (Kabuk kalıp ve maça).



Şekil 5.89 : $t=372,5$ sn. Fan-maça çalışma alanlarındaki sıcaklık dağılımı (Kabuk kalıp ve maça).

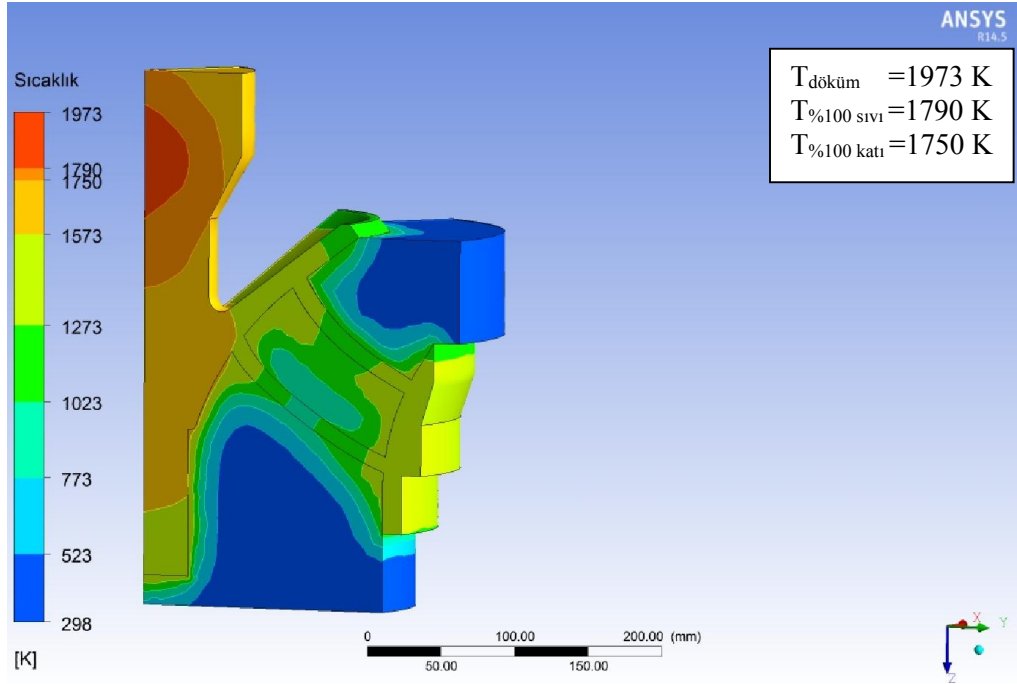
5.4.2 Model 9. Kalıp ve maça : Üretan (üretan reçine bağlı kum)



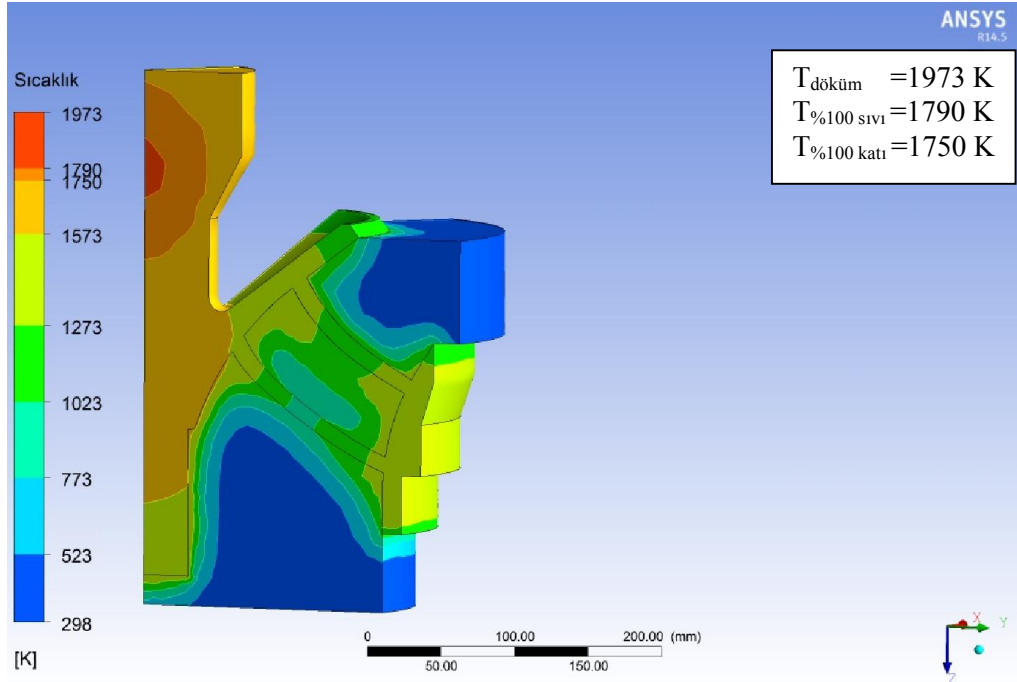
Şekil 5.90 : $t=45$ sn. Fan-maça çalışma alanlarındaki sıcaklık dağılımı (Üretan kalıp ve maça).

Üretan kalıp+maça ikilisi (Şekil 5.90), kabuk kalıp+maçaya (Model 8) göre dış kanatlarda 2,5 saniye, 40 AFS yaş kum kalıp+maçaya (Model 1) göre fan dış

kanatlarında 30 saniye daha kısa sürede katılaşma sağlamaktadır. Kabuk ve üretilen arasındaki fark, ihmal edilebilecek seviyededir.



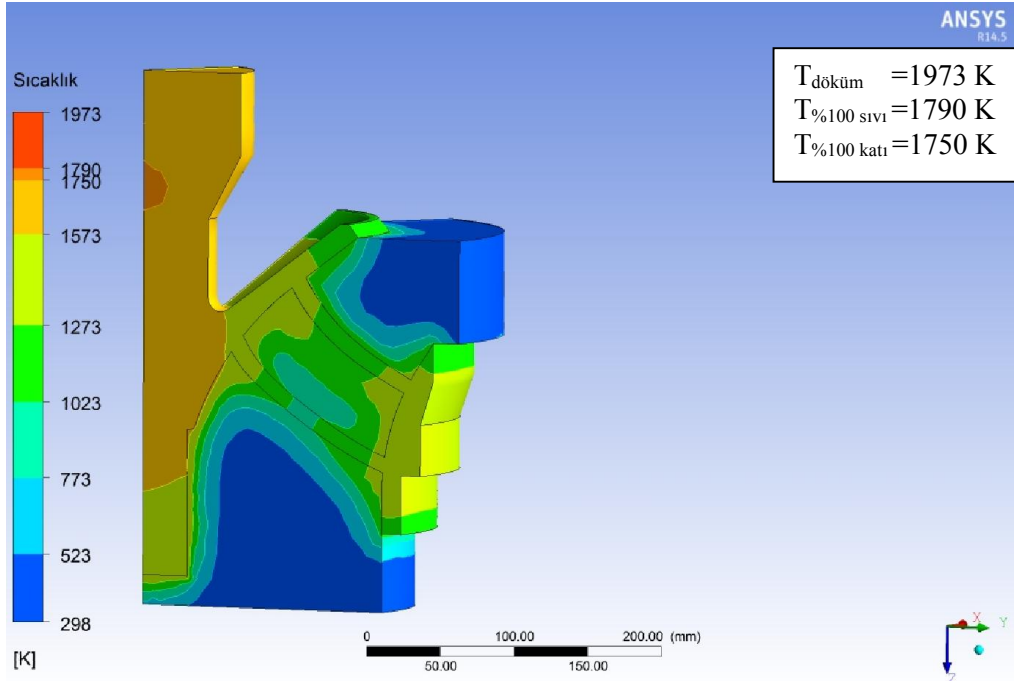
Şekil 5.91 : $t=300$ sn. Fan-maça çalışma alanlarındaki sıcaklık dağılımı (Üretilen kalıp ve maça).



Şekil 5.92 : $t=317,5$ sn. Fan-maça çalışma alanlarındaki sıcaklık dağılımı (Üretilen kalıp ve maça).

Üretilen kalıp+maça ikilisindeki besleyicide, %100 sıvı fazın $\rightarrow$ sıvı+katı faza dönüşüm süresi $t=317,5$ saniyedir (Şekil 5.92). Sıvı+katı fazın besleyici içindeki

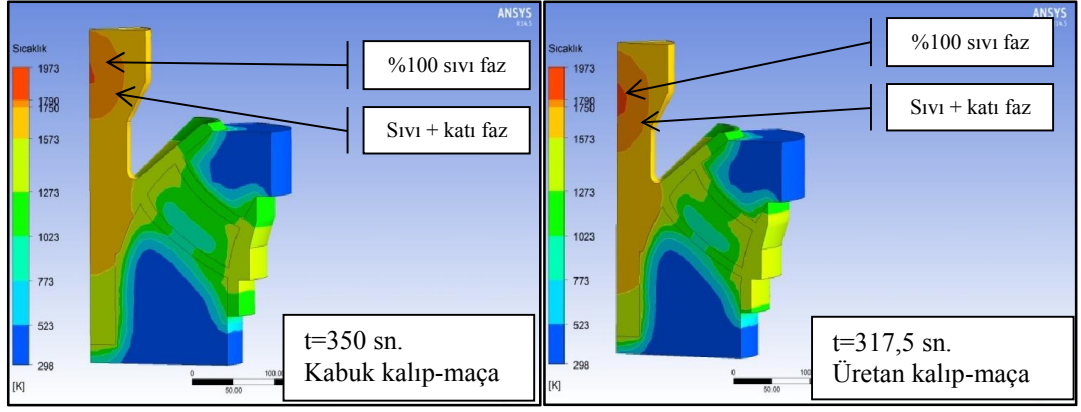
geometrisi Model 1 ve Model 8'e göre oldukça değişiktir. Besleyicinin üst kenarı tamamen katıdır ve sıvı+katı faz fan merkezine (fan göbeğine) doğru inmiştir. Bu durum istenmeyen bir durum olup, fan merkezinde çekintilere sebep olması muhtemeldir.



Şekil 5.93 : t=345 sn. Fan-maça çalışma alanlarındaki sıcaklık dağılımı (Üretan kalıp ve maça).

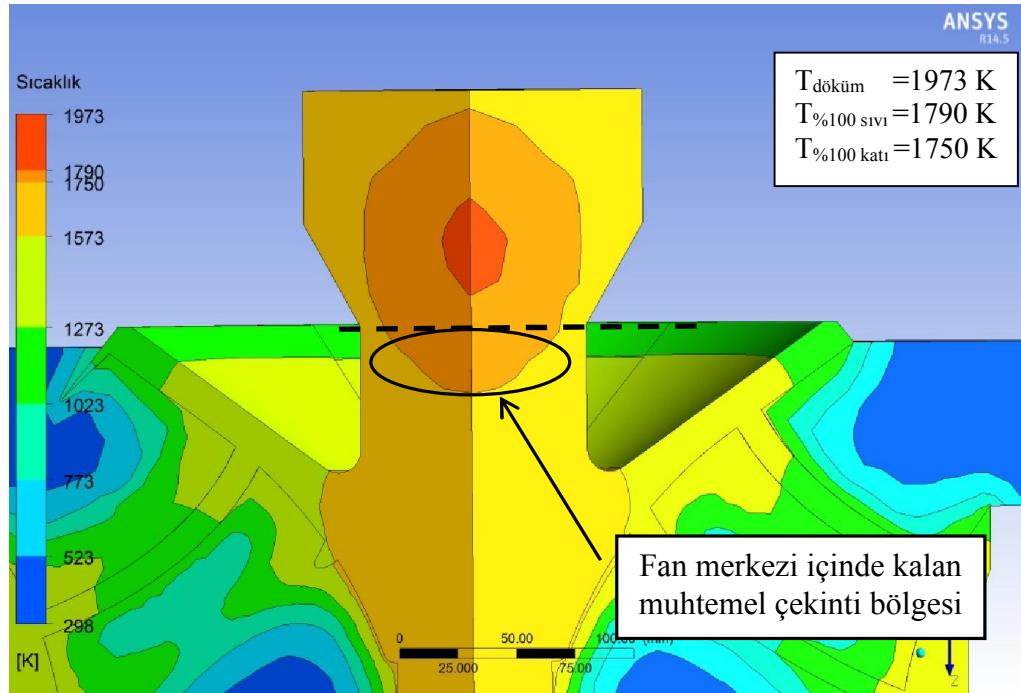
Besleyicideki sıvı+katı fazın → %100 katı faza dönüşme süresi olan 245 saniye, Model 1'deki aynı katılaşma derecesine göre 220 saniye daha kısadır (Şekil 5.17). Bu da %39 daha hızlı soğuma demektir.

Model 8 ve model 9'da değişik kalıp-maça malzemelerinin katılaşma süresine etkileri görsel olarak mukayeseli incelenirse, üretan kalıp-maça ikilisinin, kabuk kalıp-maça ikilisine göre daha hızlı katılaşma (soğuma) sağladığı anlaşılır. İnce kesit olan dış kanatlarda, kabuk kalıp-maça malzemeleri daha hızlı katılaşma sağlamalarına rağmen etki sadece 2,5 saniye gibi bir kısıtlı süredir (Şekil 5.86 ve Şekil 5.90). Ancak, daha kalın kesitlerde etki artmaktadır. Fan göbeği ve besleyici bölgesindeki katılaşma sürelerindeki fark sıvı metalin kaybolma ve sıvı+katı faza geçme anında 32,5 saniyeye çıkmaktadır (Şekil 5.88 ve Şekil 5.92).



Şekil 5.94 : Kabuk ve üretan kalıp-maça malzemelerinde son %100 sıvı fazın→ sıvı+katı faza dönüşme anındaki sıcaklık dağılımı.

Şekil 5.94’de kabuk (t=350 sn.) ve üretan (t=317,5 sn.) kalıp-maça malzemelerinin sıvı fazın kaybolma anındaki sıcaklık dağılımları görülmektedir. Aradaki katılaşma süre farkı 32,5 saniyedir ancak bundan daha önemlisi sıvı fazın kaybolma anındaki sıvı+katı fazın şekli ve fan göbeği-besleyici bölgesindeki konumudur.



Şekil 5.95 : t=317,5 sn. 120° fan-maça çalışma alanlarındaki sıcaklık dağılımı (Üretan kalıp ve maça).

Üretan kalıp-maça ikilisinde sıvı faz hızla katılaşırken, peltemsi faz daha yaygın ve besleyici boynundan fan göbeğine doğru girmiş halde bulunmaktadır (Şekil 5.95). Bunun anlamı besleyici içinde kalması gereken çekme boşluklarının besleyici boynundan fan göbeğine doğru girmesidir ki çekme boşluklarının fan göbeğinde oluşmasına sebep olacak bir durumdur. Model 8 ve Model 9 incelendiği zaman, bu

çalışmada incelenen fan geometrisi için, kabuk kalıp-maça malzemesinin üreten kalıp-maça malzemelerine göre daha uygun malzeme ikilisi olduğu anlaşılmaktadır.

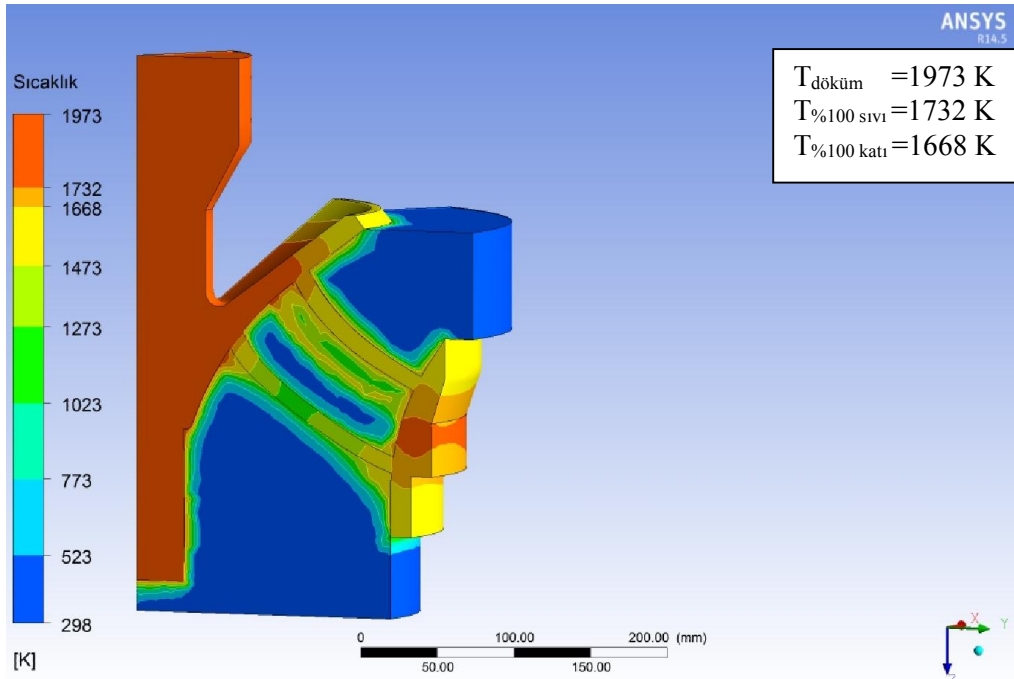
5.5 Döküm alaşımının katılaşma süresine etkisi

Çizelge 5.5 : Değişken döküm alaşımı. (Diğer parametreler Model 1 ile aynıdır).

Model	Kalıp	Maça	Döküm Sıcaklığı (K)	Soğutucu	Döküm Alaşımı
10	Yaş kum 40 AFS	Yaş kum 40 AFS	1.973	Yok	AISI 304
11	Yaş kum 40 AFS	Yaş kum 40 AFS	1.973	Yok	AISI 316

Değişik döküm alaşımlarının katılaşma süresine etkileri sahip oldukları özgül ısı, termal iletkenlik ve yoğunluklarına bağlı olarak farklılık gösterir. Aynı geometride ve aynı sınır ve başlangıç koşullarında, AISI 304 ve AISI 316 malzemenin katılaşma süreleri, Model 10 ve Model 11’de incelenmiş ve Model 1’de analizi yapılan AISI 1016 malzemesi ile mukayesesi yapılmıştır.

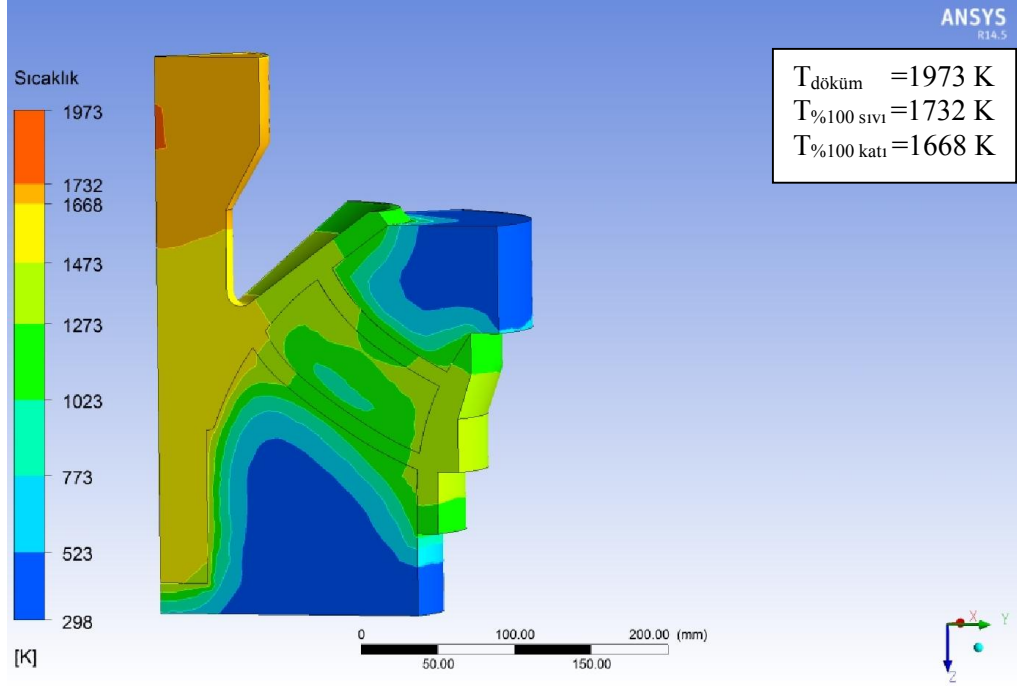
5.5.1 Model 10, Fan alaşımı : AISI 304



Şekil 5.96 : $t=102,5$ sn. Fan-maça çalışma alanlarındaki sıcaklık dağılımı (Fan AISI 304).

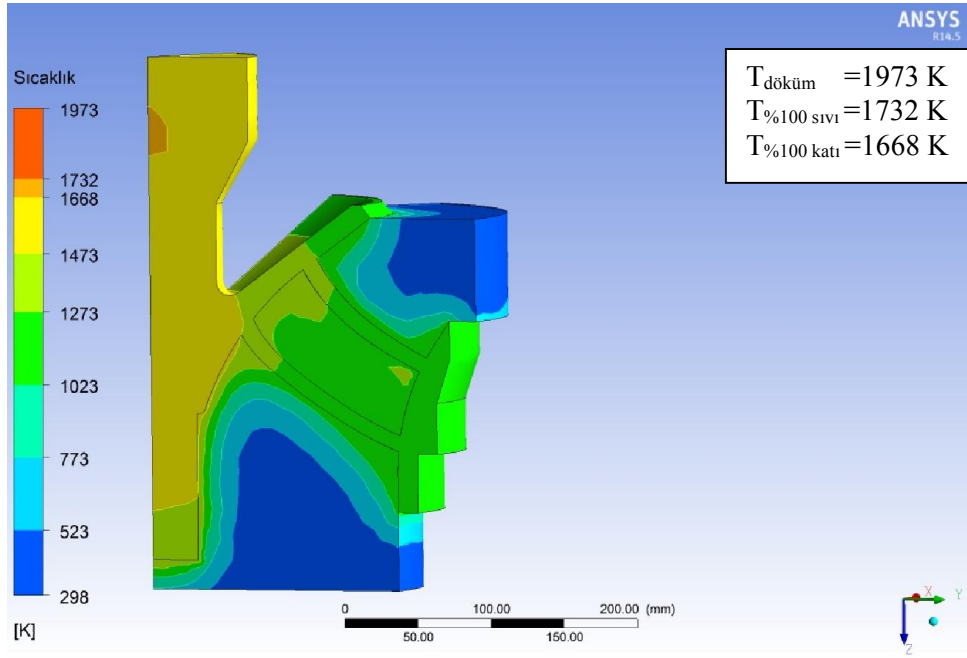
Dış kanatlarda AISI 304 çelik malzemenin katılaşmayı tamamladığı sürenin $t=102,5$ saniye olduğu görülmektedir (Şekil 5.96). Benzer katılaşma, Model 1’de (AISI 1016)

75 saniye de oluşmaktadır (Şekil 5.6). Buradaki asıl fark, AISI 304 çeliğin tam sıvı ve tam katı faz başlangıç sıcaklıklarının (“liquidus” ve “solidus”) AISI 1016 çeliğe göre daha düşük sıcaklıklar olmasından kaynaklanmaktadır. Pratikte, AISI 304 çelik daha düşük sıcaklıklarda dökülmektedir. Ancak, malzeme değişikliğinin katılaşma süresine etkisini mukayese edebilmek için, tezde AISI 304 için $T_{döküm} = 1973$ K alınmıştır.



Şekil 5.97 : $t=710$ sn. Fan-maça çalışma alanlarındaki sıcaklık dağılımı (Fan AISI 304).

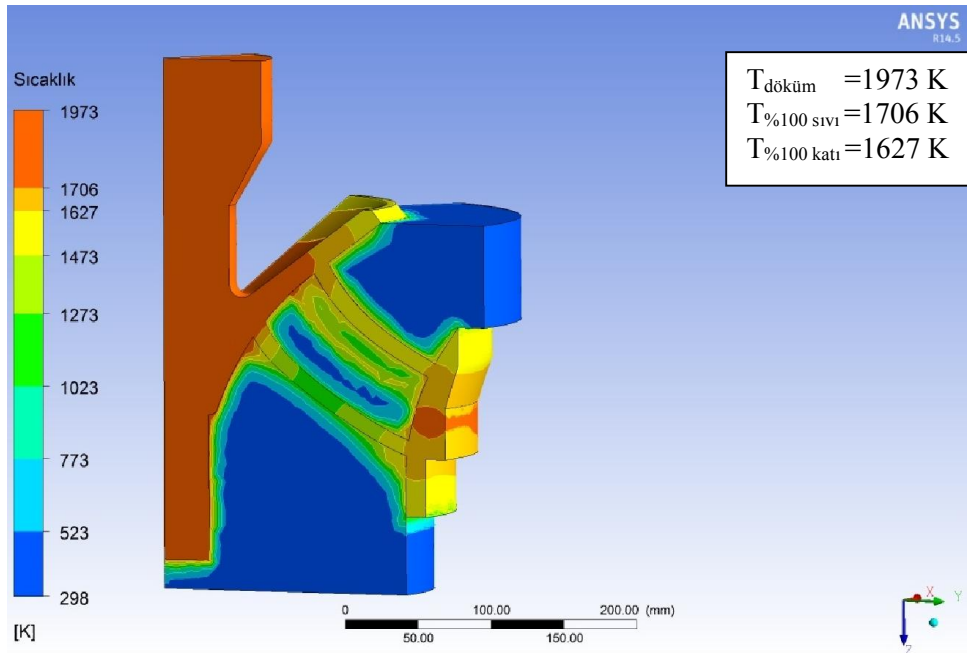
Şekil 5.97’de Model 10’da besleyicideki %100 sıvı $\rightarrow$ sıvı+katı faza $t=710$ saniyede dönüşmektedir. Aynı faz dönüşümü Model 1’de 515 saniyede olmaktadır (Şekil 5.13).



Şekil 5.98 : $t=840$ sn. Fan-maça çalışma alanlarındaki sıcaklık dağılımı (Fan AISI 304).

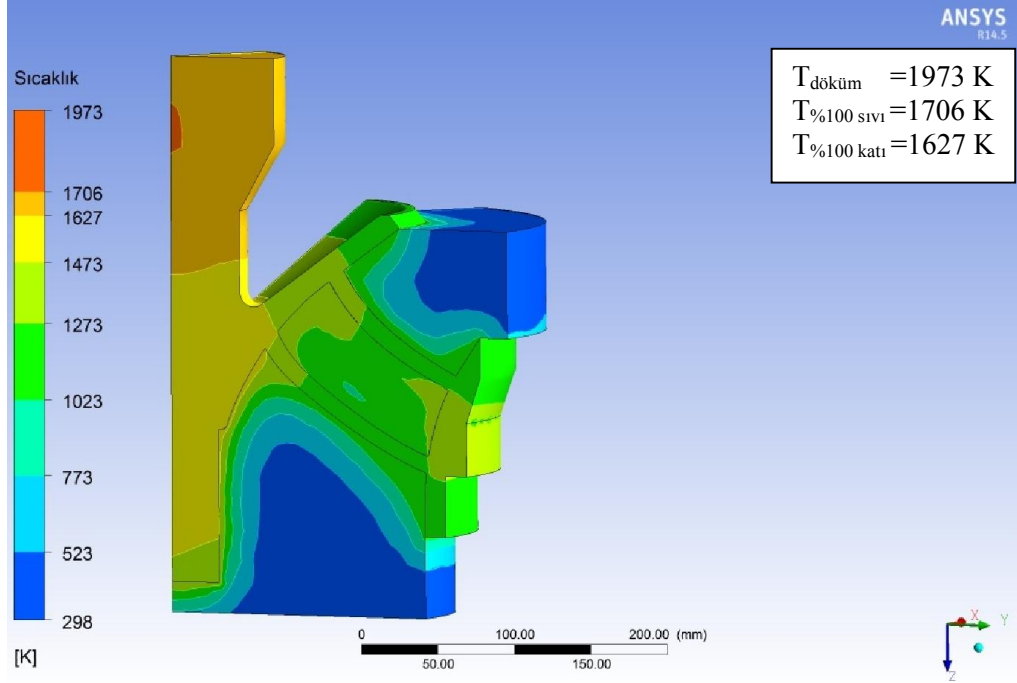
Besleyicideki sıvı+katı faz $\rightarrow$ %100 katı faza 840 saniyede dönüşmektedir (Şekil 5.98). Aynı faz dönüşümü Model 1’de 565 saniyedir (Şekil 5.17). Özet olarak, aynı döküm sıcaklığı ve geometride, AISI 304, AISI 106 çeliğe göre %49 daha uzun katılaşma süresine sahiptir.

5.5.2 Model 11, Fan alaşımı : AISI 316



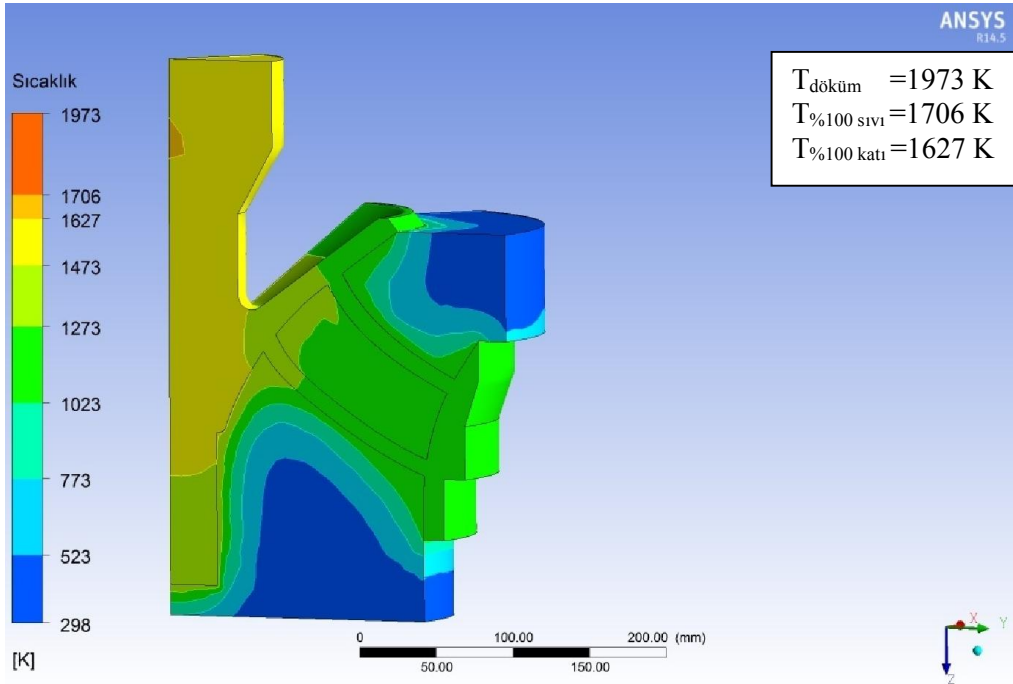
Şekil 5.99 : $t=117,5$ sn. Fan-maça çalışma alanlarındaki sıcaklık dağılımı (Fan AISI 316).

Model 10 ve Model 11’de, döküm sıcaklığının AISI 304 ve AISI 316 paslanmaz çelikleri için 1973 K alınmıştır. AISI 316 çeliğin T%100 sıvı ve T%100 katı faz başlangıç sıcaklıklarının AISI 304 çeliğe göre daha düşük olması sebebiyle, AISI 316 çelik 15 saniye daha uzun katılaşma süresine sahiptir (Şekil 5.99).



Şekil 5.100 : $t=785$ sn. Fan-maça çalışma alanlarındaki sıcaklık dağılımı (Fan AISI 316).

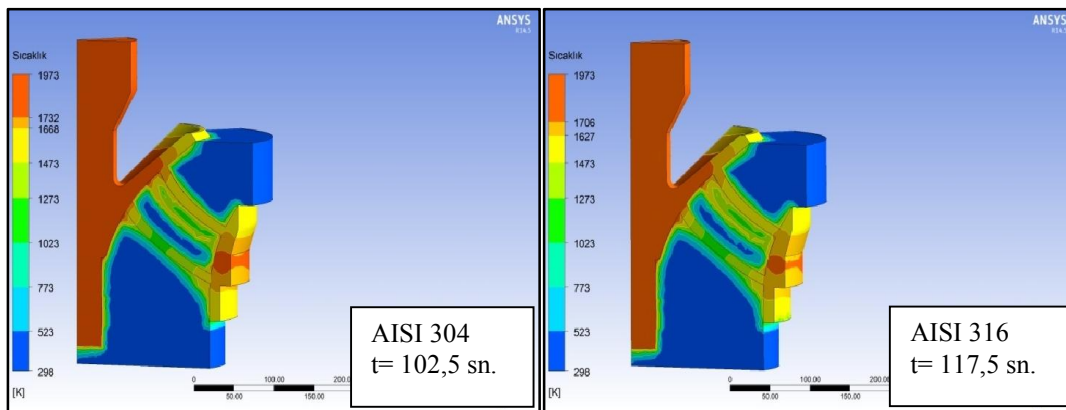
Model 11’de %100 sıvı metalin besleyicide katılaşma süresi 785 saniyedir (Şekil 5.100), bu süre AISI 304 çeliğe göre 75 saniye (Şekil 5.97) ve AISI 1016 çeliğe göre 270 saniye daha uzundur (Şekil 5.17).



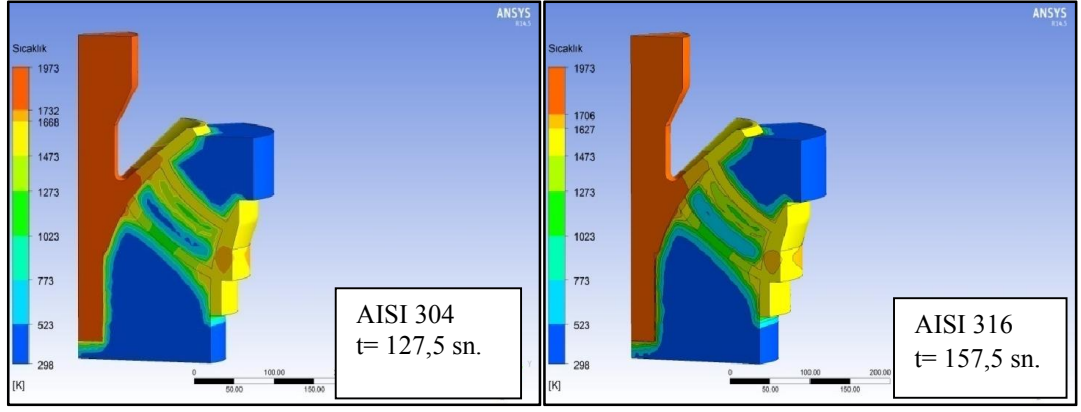
Şekil 5.101 : $t=1020$ sn. Fan-maça çalışma alanlarındaki sıcaklık dağılımı (Fan AISI 316).

AISI 316 çelik besleyicide %100 katı faza 1020 saniyede geçmektedir (Şekil 5.101). Besleyicideki tam katılaşma süresini incelediğimiz zaman, AISI 316 çeliğin AISI304 çeliğe göre %21, AISI 1016 çeliğe göre ise %81 daha uzun katılaşma süresine sahip olduğu görülmektedir.

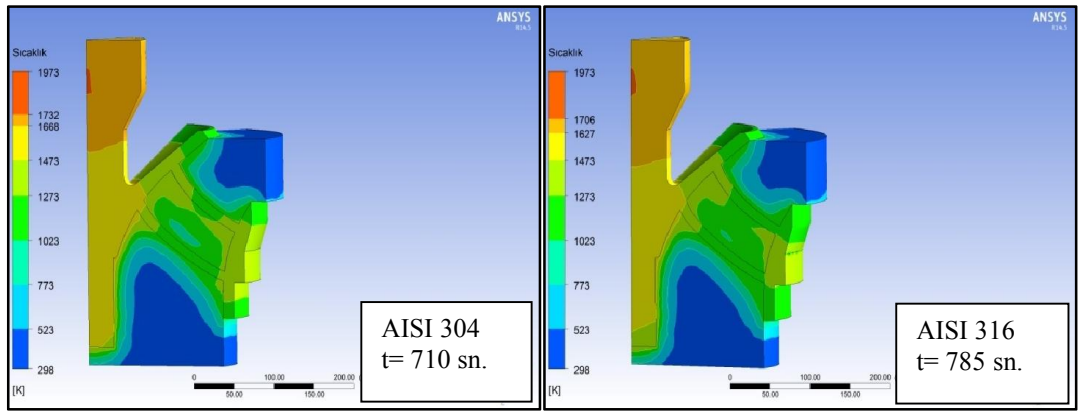
Bu kısımda, AISI 304 ve AISI 316 çeliklerin katılaşma adımları daha yakından mukayese edilmiştir.



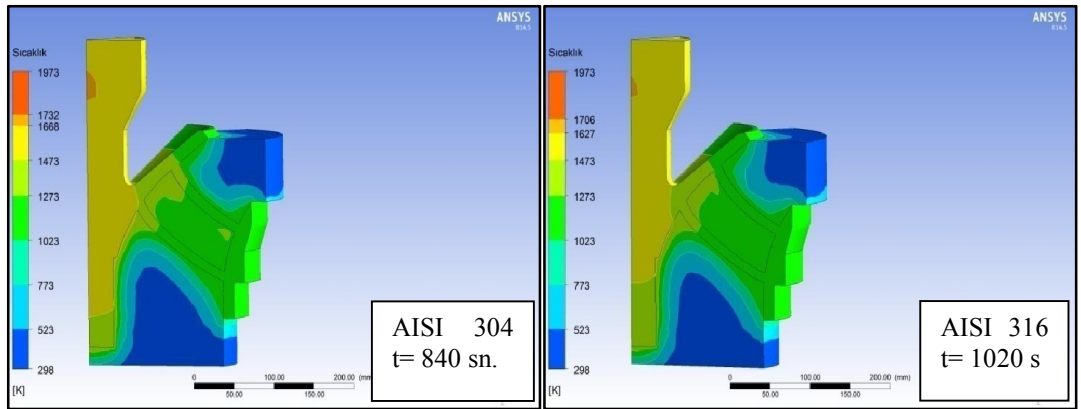
Şekil 5.102 : Fan-maça çalışma alanları dış kanatta %100 sıvı fazın $\rightarrow$ sıvı+katı faza dönüşme anındaki sıcaklık dağılımı (AISI 304 ve 316).



Şekil 5.103 : Fan-maça çalışma alanları dış kanatta sıvı+katı fazın→%100 katı faza dönüşme anındaki sıcaklık dağılımı (AISI 304 ve 316).

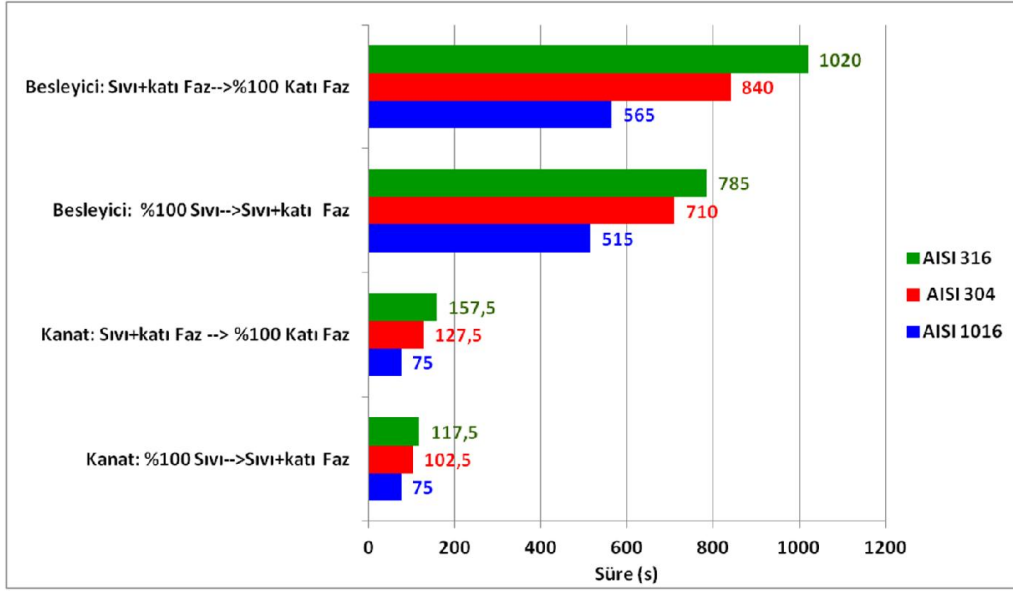


Şekil 5.104 : Fan-maça çalışma alanları besleyici bölgesinde %100 sıvı fazın→sıvı+ katı faza dönüşme anındaki sıcaklık dağılımı (AISI 304 ve 316).



Şekil 5.105 : Fan-maça çalışma alanları besleyici bölgesinde sıvı+katı fazın→%100 katı faza dönüşme anındaki sıcaklık dağılımı (AISI 304 ve 316).

Bu bölümde, AISI 1016, AISI 304 ve AISI 316 çelikler için aynı geometri, aynı döküm sıcaklığı ve aynı kalıp+maça kullanıldığı zaman, dış kanat ve göbek/besleyici kesitlerinde, %100 sıvı ve sıvı+katı fazın kaybolma sıcaklıklarını gösteren grafik elde edilmiştir (Şekil 5.106).



Şekil 5.106 : AISI 1016, AISI 304 ve AISI 316 fan-maça çalışma alanları dış kanat ve göbek/besleyici bölgelerinde katılaşma süreleri.

Model 10 ve 11'in incelemeleri sonunda, AISI 304 ve AISI 316 çelik dökümler için besleyicinin doğru hacimde olmadığı sonucuna varılabilmektedir. Özellikle AISI 316 dökümünde besleyici boyutu daha sorunludur. Şekil 5.104 incelendiği zaman, %100 sıvı fazın kaybolma anında, döküm sonrası değişik sürelerde de olsa, sıvı+katı faz AISI 316'da fan göbeği içine daha fazla girmektedir. AISI 316 dökümde, çekinti boşluklarının fan göbeğinde oluşma ihtimali, AISI 304 çeliğe göre daha fazladır. AISI 316 çelik dökümde besleyici boyutlarının daha büyütülerek, göbekteki çekintinin besleyici içinde kalması sağlanabilir. Aynı durumu AISI 1016 çelikte incelediğimiz zaman, Şekil 5.17'de görüldüğü gibi, sıvı+katı faz tamamen besleyici içinde kalmakta ve son katılaşma anında oluşması muhtemel çekintiler besleyici içinde oluşmaktadır.

6. GENEL SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRMELER

1- Dökümhanelerde, hata içermeyen parçaların üretimi için geçmişten beri kullanılan deneme-yanılma metotları, çözümü uzun denemelerle sağlaması ve pahalı metotlar olması sebebiyle, gelişen teknolojinin sağladığı olanaklarla terk edilmiştir. Çözüm, deneme-yanılma metotlarından veya döküm tasarımı için genel sonuçlar veren analitik yöntemlerden, hızlı, güvenilir, detaylı ve lokal analizler sağlayan sayısal metotlara kaymıştır. Bu metotların endüstri uygulamaları için geliştirilmiş değişik ticari yazılımlar mevcuttur. Ancak, donanım ve yazılım yatırımının üstüne gelen ve kullanıcının her sene ödemek zorunda kaldığı güncelleme ücretleri bu tür özel yazılımların küçük hatta orta büyüklükteki dökümhanelerde kullanımını imkansız kılmaktadır.

Bu tezde genel kullanım alanı akışkan problemlerinin analizleri olan Ansys CFX yazılımı, katılma problemlerinin analizinde kullanılmıştır. Literatürde çok basit geometriler için örnekler bulunmakla birlikte, fan, maça, kalıp ve soğutucu gibi dört çalışma alanının kullanıldığı ve çok karmaşık geometriye sahip fan geometrisi ilk defa modellenmiş ve bu konuda genel bir prosedür oluşturulmuştur.

Pompa tasarımcıları ve üreticilerinin, Ansys CFX kullanarak geliştirdikleri ilk fan geometrileri, yüksek döküm hata oranlarına ve sonuç olarak yüksek üretim maliyetine açık, üretilebilirliği düşük tasarımlardır. Bu ilk tasarımlar, mühendislik disiplinleri arasında bir dizi fikir alış-verişi ile hem hedeflenen tasarım kriterlerine yakın hem de üretilebilirlik açısından sorunsuz hale getirilmeden kullanılamamaktadır. Fan tasarımının, dökümhanede çıkacak muhtemel hataları, küçük tasarım değişiklikleriyle minimuma indirecek şekilde değiştirilmesi, yüksek rekabet ve artan maliyetler sebebiyle bir gerekliliktir.

Karmaşık geometrilerde görülen çok sayıdaki besleme yolu (feeding path) üretilebilirliği azaltan en önemli etkidir. Daha küçük besleyici ve daha az besleyici sayısı, daha düşük maliyetli döküm demektir. Bu sebepten, döküm geometrisi içindeki besleme yollarının belirlenmesi önem taşımaktadır. Besleme yolları geometrisi ise döküm içindeki katılma düzeninin bilinmesiyle elde edilmektedir.

Bu çalışmada, fan döküm geometrisindeki katılaşma düzeninin belirlenmesine çalışılmıştır. Katılaşma düzeni üzerinde döküm sıcaklığının, soğutucu kullanımının, kalıp yoğunluğunun, değişik kalıp malzemelerinin (kalıplama malzemesinin) ve değişik döküm alaşımlarının etkisi ve pratik uygulaması yapılmış olan fan tasarımının besleyici boyutunun değişik koşullar altında uygunluğu incelenmiştir.

2- Model 1, Model 2 ve Model 3’de yapılan analizde, döküm sıcaklığı ve katılaşma süresi arasında doğrusal bir bağıntı olduğu görülmektedir. Bu doğrusal bağıntı, hem fan dış kanatları gibi ince kesitlerde hem de fan göbeği ve besleyici gibi hacimli kesitler için geçerlidir. AISI 1016 çelik döküm için yapılan analizde 1 K döküm sıcaklık artışı, fan dış kanadında %100 sıvı→sıvı+kıta faz dönüşümünü 0,525 saniye, besleyicideki %100 sıvı→sıvı+kıta faz dönüşümünü ise 3,425 saniye geciktirmektedir. 1 K döküm sıcaklığı artışı, besleyicide sıvı+kıta→%100 kıta faz dönüşümünü ise 3,5 saniye geciktirmektedir. Döküm sıcaklığı ve katılaşma süreleri arasındaki bu doğrusal ilişki benzer geometri, sınır ve başlangıç koşulları altındaki başka fan geometrilerine de uygulanabilir yapıdadır.

3- Pratik uygulamalarda çok görülen soğutucu kullanımı küçük ve büyük soğutucu olarak Model 4 ve Model 5’de incelenmiştir. Küçük soğutucunun katılaşmayı hızlandırmakla birlikte yönlendirilmiş katılaşma için gereken etkiyi yapamadığı aksine katılaşmayı iki ayrı bölgeye ayırarak katılaşmayı hatalara daha açık hale getirdiği görülmektedir. Büyük soğutucu ise yönlendirilmiş katılaşmayı ancak sağlayabilmiştir. Benzer geometri ve benzer başlangıç sınır koşullarındaki değişik dökümlerde de kullanılabilir. Yaklaşık 18,5 kg olan büyük soğutucu, kg ağırlık başına 1.9 sn. daha hızlı katılaşma sağlamıştır.

3- Pratik uygulamalarda çok sık karşılaşılan, soğutucunun etki alanı da incelenmiştir. Soğutucu, pratiğe uygun olarak, fan göbeği ve besleyicisi üzerinde hiçbir etki yapmamıştır. Bu bölgelerde %100 sıvı→sıvı+kıta faz dönüşümü soğutucu kullanılmayan Model 1 ile aynı sürelerde meydana gelmiştir. Ancak, sıvı+kıta faz→%100 kıta faz dönüşümünde, büyük soğutucu %1,3 daha hızlı katılaşmaya sebep olmuştur ki bu fark, modelleme hatasından kaynaklanabilir. Özet olarak, fan göbeği ve besleyicide, dış kanatlara temas halinde olan soğutucunun pratik etkisi ihmal edilebilir seviyededir.

4- Kalıp yoğunluğunun katılaşma süresi ve düzenine etkisinin incelendiği Model 6 ve Model 7’de, yoğunluğun katılaşma süresine etkisinin çok sınırlı olduğu görülmüştür. Analitik hesap sonuçları da bu sonuçla uyum içindedir. Model 7 ve Model 1 arasında sıvı+katı faz→katı faz dönüşümün süreleri arasındaki fark %1’dir. Analitik çözümde, bu iki model için beklenen farkın $\sqrt{1,05} = 1,0246$ yani %2,46 kadar olması beklenirken, sayısal analizde bu farkın % 1 olmasının sebebi; Analitik çözümün, ısı özelliklerinin sıcaklıkla değişim etkisini ve parça geometrisinin şekil etkisini hesaba almamasından kaynaklanabilmektedir. Aynı kalıp ve maça malzemesindeki farklı yoğunlukların katılaşma üzerinde etkisi çok sınırlı olmaktadır.

5- Farklı kalıp ve maça malzemelerinin (kabuk ve üretilen) katılaşma süresine etkisi Model 8 ve Model 9 da incelenmiştir. Yapılan modelleme ve analizlerde, üretilen malzemesinin kullanımında, fan göbeğinde muhtemel katılaşma çekintisi sorununun oluşacağı anlaşılmıştır. Farklı kalıp ve maça malzemelerinin katılaşma süresi üzerindeki etkileri, sonuçları doğrulama adına başvurulmuş analitik çözümden de anlaşılacağı üzere daha büyüktür. Farklı özgül ısı, ısı iletkenlik ve yoğunluk sahibi farklı kalıp ve maça malzemelerinin katılaşma süresi üzerindeki etkilerinin, karekök ile orantılı olsa dahi, sadece farklı yoğunluğun çalışıldığı Model 6 ve Model 7’ye göre fazla olacağı açıktır. Özellikle, kalıp malzemelerinin ısı emme gücünü oluşturan özgül ısı önemli etkiler yapmaktadır.

6- Pratikte AISI 1016 çelik için yapılan uygulama, AISI 304 ve AISI 316 paslanmaz çeliklere de uygulanmıştır. Model 10 ve Model 11, bu iki analizi göstermektedir. Mukayese yapabilmek adına paslanmaz çelikler için uygulamalardan daha yüksek döküm sıcaklığı kullanılsa dahi, aşırı sıcak dökümün sadece katılaşma süresini uzattığı ancak son katılaşma bölgesinin yerini değiştirmeyeceği düşüncesiyle, özellikle AISI 316 döküm için yüksek döküm sıcaklığında çıkan besleyici sorununun, daha düşük sıcaklıklarda döküm yapılsa dahi çıkacağı anlaşılmaktadır.

7- Tezde, endüstride karşılaşılan en karmaşık döküm geometrilerden birisi olan fan geometrisi, katılaşma süresi ve düzenini Ansys CFX yazılımı kullanılarak elde etmek üzere yapılmıştır. Sonuçlar pratikte gözlenen fiziksel olaylarla uyum içindedir. Geometri içindeki son katılaşma noktaları, daha önce yapılmış literatür çalışmalarında belirlenen yerlerde oluşmuştur. Katılaşma süreleri hesaplanmış ve geometri içinde hangi kısmın hangi kısımdan daha önce katılaştığı gözlemlenmiştir. Katılaşma süreleri içindeki saniyelik sapmaların (hataların) öneminden çok

geometrinin hangi kısmının daha önce katılaştığı ve kaç besleme yolu gerektiğini anlamak önemlidir. Bu çalışmada ile geliştirilen modelleme prosedürü, herhangi başka bir geometriye, herhangi başka bir alaya, başlangıç ve sınır koşullarına çok hızlı bir şekilde uygulanabilir. Çalışma, esas olarak bu modelleme prosedürünün geliştirilmesi ve daha sonraki modellemelere öncülük etmesi açısından önemlidir.

7. ÖNERİLER

Bu çalışma teorik bir çalışmadır, ancak sonuçlar gerek analitik metot gerekse de pratikte gözlemlenen sonuçlarla uyum içindedir. Tezde modellenen geometrinin teorik sonuçlarının endüstride, modellenen geometri, sınır ve başlangıç koşulları içeren pratik uygulamalara uygunluğunun deneylerle ispatlanması uygun olacaktır.

Model kurulurken yapılan varsayımlardan birisi olan soğuma esnasında metal ile kalıp-maça arasında oluşması muhtemel hava filmi, ileriki çalışmalar kapsamında modele dahil edilebilir.

Tezde, fan, kalıp, maça ve soğutucu çalışma alanlarını içeren genel modele, besleyici çevresine yerleştirilen ekzotermik gömlek ve kalıp içi soğutucu çalışma alanları da ilave edilerek, bir modelde olması muhtemel tüm çalışma alanlarını kapsayan genel bir model oluşturulması, bu çalışmanın ikinci adımı olabilir.

Bu çalışmada, Ansys CFX yazılımı kullanılmıştır. Elde edilen soğuma eğrileri, Ansys Structural yazılımına aktararak, soğuma esnasında döküm parçalarında oluşan iç gerilmeler hesaplanabilir. Bu adım ile bazı durumlarda döküm sonrası gereken tavlama prosesinin gerekliliği veya derecesi tahmin edilerek, daha ekonomik döküm parçası üretimine ulaşılabilir.

Benzer bir yazılım olan Fluent paket programı kullanılarak, kalıp dolumu ve daha sonrasında katılaşma ve iç gerilmelerin hesabı yapılarak, tüm proses bir bütün halinde modellenebilir.

Bu tezde geliştirilen modelleme prosedürü kullanılarak sürekli döküm için genel bir prosedür oluşturulabilmesi mümkündür. Bu modelde, döküm sıcaklığı, döküm hızı, soğutma suyu derecesi ve basıncı gibi parametrelerin etkisi de incelenebilir.

KAYNAKLAR

- [1] **Versteeg, H. K. & Malalasekera, W.** (2007). *Introduction to Computational Fluid Dynamics – Finite Volume Method*, 2nd. Edition, Edinburg, UK: Pearson – Prentice Hall.
- [2] **Ekinci, S.** (2013). *Kavitasyon ve Superkavitasyon Ders Notları*, Gemi İnşaatı ve Gemi Makineleri Mühendisliği Bölümü, YTÜ, İstanbul, Türkiye.
- [3] **Tannehill, J. C., Anderson, D. A. & Pletcher, R. H.** (1997). *Computational Fluid Mechanics and Heat Transfer*, 2nd. Edition, Pennsylvania, USA: Taylor & Francis.
- [4] **Briggs, C. W., Gazelius, R. A. & Donaldson, A. R.** (1938). Steel Casting Design for the Engineer and Foundryman, *AFS Trans.*, 46, 685-696.
- [5] **Caine, J. B.** (1963). A checklist for Riserling, *Foundry*, 97 (5), 120-125.
- [6] **Myskowaski, E. T. & Bishop, H. D.** (1955). Applications of Chills for Neutralization of Ribs and Bosses Hot Spot on Plates, *AFS Trans.*, 63, 295-300.
- [7] **Johns, R.** (1980). Design Casting to Avoid Foundry Defects, *AFS Trans.*, 88, 199-200.
- [8] **Wlodawer, R.** (1966). *Directional Solidification of Steel Casting*, Oxford, NY, USA: Pergamon Press.
- [9] **Flinn, R. E., Guichelaar, P. J. & Weins, M. J.** (1965). Riser Size and Placement for Copper Alloy Casting, *AFS Trans.*, 73, 355-368.
- [10] **Creese, R. C.** (1950). An Evaluation of Cylindrical Riser Design with Insulating Materials, *AFS Trans.*, 87, 665-667.
- [11] **Flinn, R. A., Reese, D. C. & Spindler, W. A.** (1955). Riserling of Ductile Iron, *AFS Trans.*, 63, 720-725.
- [12] **Basutkar, P. K., Miller, R. E. & Loper, C. R. Jr.** (1971). Calculation of Solidification Time of Various Alloys in Sand Molds, *AFS Trans.*, 79, 170-176.
- [13] **Sciema, G. & Jeancolas, M.** (1973). Solidification Time of Simple Shaped Castings, *Cast Metal Research Journal*, March, 1-7.
- [14] **Geiger, G. H. & Poirier D. R.** (1973). *Transport Phenomena in Metallurgy*, Massachusetts, USA: Addison Wesley.
- [15] **Heine, R. W., Loper, C. R. Jr. & Rosental, P. C.** (1955). *Principles of Metal Casting*, 2nd. Edition, New York, USA: McGraw-Hill.
- [16] **Flemings, M. J.** (1974). *Solidification Processing*, New York, USA: McGraw-Hill.

- [17] **Chvorinov, N.** (1940). Theory of Solidification of Castings, *Giesserei*, 27, 177-186.
- [18] **Adams, C. M. Jr. & Taylor, H. F.** (1957). Flow of Heat from Sand Casting by Conduction, Radiation and Convection, *AFS Trans.*, 65, 170-176.
- [19] **Berry, J., Kondik, V. & Martin, G.** (1959). Solidification Times of Simple Shaped Castings in Sand Molds, *AFS Trans.*, 67, 449-476.
- [20] **Adams, C. M. Jr. & Taylor, H. F.** (1953). Fundamental of Riser Behavior, *AFS Trans.*, 61, 686-693.
- [21] **Loper, C. R. Jr. & LeMahieu, D. L.** (1972). White Cast Iron Solidification Time as Influenced by Casting Geometry, *AFS Trans.*, 80, 483-492.
- [22] **Heine, R. W.** (1968). Feeding Paths for Riser Castings, *AFS Trans.*, 76, 463-469.
- [23] **Roberts, R., Loper, C. R. Jr. & Heine, R. W.** (1969). Riser Design, *AFS Trans.*, 77, 373-377.
- [24] **Kotschi, R. M. & Loper, C. R. Jr.** (1974). Design of T and X sections for Castings, *AFS Trans.*, 82, 535-542.
- [25] **Loper, C. R. Jr.** (1975). Designs of Bosses and L sections for Castings, *AFS Trans.*, 83, 173-184.
- [26] **Kotschi, R. M. & Loper, C. R. Jr.** (1976). Effects of Chills and Cores on the Design of Junctions in Castings, *AFS Trans.*, 84, 631-640.
- [27] **Kotschi, R. M., Loper, C. R. Jr. & Frankenberg, R. E.** (1977). Elimination of Shrinkage Defects Through Casting Redesign, *AFS Trans.*, 85, 571-575.
- [28] **Çopur, M., Kotschi, R. M. & Loper, C. R. Jr.** (1986). Analysis of The Solidification Order in Selected Casting Sections, *AFS Conference*, USA.
- [29] **Meyers, G. E.** (1971). *Analytical Methods in Conduction Heat Transfer*, New York, USA: McGraw-Hill.
- [30] **Morrone, R. E., Wilkes, J. O. & Pehlke, R. D.** (1970) Numerical Simulation of Solidification, Part I: Low Carbon Steel casting - "T" Shape. *Cast Metal Research Journal*, 6 (4). 184-188.
- [31] **Morrone, R. E., Wilkes, J. O. & Pehlke, R. D.** (1970). Numerical Simulation of Solidification, Part I: Low Carbon Steel casting - "L" Shape. *Cast Metal Research Journal*, 6 (4). 188-192.
- [32] **Jeyarajan, A. & Pehlke, R. D.** (1975). Casting Design by Computer, *AFS Trans.*, 83, 405-412.
- [33] **Jeyarajan, A. & Pehlke, R. D.** (1976). Computer Simulation of a Casting with a Chill, *AFS Monograph*.
- [34] **Jeyarajan, A. & Pehlke, R. D.** (1978). Application of Computer Aided Design to a Steel Wheel Casting, *AFS Trans.*, 86, 457-463.

- [35] **Rao, B. & Williams, D. C.** (1966). Effects of Variation in Rammed Sand Density and Various Additives on Thermal Conductivity of Green Sand Mixture, *AFS Trans.*, 74, 43-52.
- [36] **Sanders, C. A. & Doelman, R. L.** (1971). Heat Abstraction from Metal Casting into Molding Media and its Influence on Bond and Binder Thermal Alteration in Recycled System Molding Sand, *AFS Trans.*, 79, 1-14.
- [37] **Stoehr, R. A.** (1981). Simulation of Design of Sand Casting, *Conference proceedings- The Metallurgical Society of AIME*, New York, 3-18.
- [38] **Hardley, J. G. & Bobcock, D.** (1981). Thermal Properties of Mold Materials, *Conference proceedings-The Metallurgical Society of AIME*, New York, 83-92.
- [39] **Wray, P. J.** (1981). Mechanical, Physical and Thermal Data for Modeling the Solidification Proceeding of Steel, *Conference proceedings-The Metallurgical Society of AIME*, New York, 245-257.
- [40] **Stoehr, R. A., Wang, C., Whang, W. S. & Ingerslev, P.** (1986). Modeling the Filling of Complex Foundry Molds. *Modeling and Control of Casting and Welding Processes*, Metallurgical Society, Pennsylvania, 303-313.
- [41] **Domanus, H. M., Liu, Y. Y. & Sha, W. T.** (1986). Fluid Flow and Heat Transfer for Castings. *Modeling and Control of Casting and Welding Processes*, Metallurgical Society, Pennsylvania, 363-375.
- [42] **Aleksandrov, Y. D., Golodenko, N. N., Dremov, V. & Nedopekin, F. V.** (2009). Mathematical Simulation of Metal Solidification in a Wedge-like Casting Mold with Allowance for Natural Convection, *Inzhenerno-Fizicheskii Zhurnal*, 83 (3), 478-484.
- [43] **Pariona, M. M. & Mossi, A. C.** (2005). Numerical Simulation of Heat Transfer During Solidification of Pure Iron in Sand and Mullite Molds, *Journal of Brazilian Society of Mechanical Science and Engineering*, 27 (4), 399-406.
- [44] **Showman, R. E. & Aufderheide, R. C.** (2003). A process for Thin-Wall Sand Casting. *AFS Trans.*, American Foundry Society, Des Plaines, IL, USA.
- [45] **Midea, A. C., Burns, M. & Wagner, I.** (2007). Advanced Thermo-Physical Data for Casting Process Simulation – The Importance of Accurate Sleeve Properties, *International Foundry Reseach, Giessereiforschung*, 59, Düsseldorf, Germany, 34-43.
- [46] **Solenicki, G., Budic, I. & Ciglar, D.** (2010). Determination of Thermal Conductivity in Foundry Mould Mixtures, *Metallurgia*, 49, 3-7.
- [47] **Abed, J.** (2011). The Influence of Different Casting Method on Solidification Time and Mechanical Properties of Al-Sn Castings, *International Journal of Engineering & Technology*, 11, 34-44.
- [48] **Adedayo, V. & Aremo, B.** (2011). Influence of Mould Heat Storage Capacity on Properties of Grey Iron, *Journals of Minerals & Materials Characteristics & Engineering*, 19 (4), 387-396.

- [49] **Bienko, G. & Drptlew, A.** (2005). Effect of Moulding sand Thermal Capacity on Morphology of Carbide Phase in High Chromium Cast Iron, *Materials Science*, 11 (4), 41-48.
- [50] **Technical Data Sheet.** (2013), Retrieved May 16, 2013 from:
www.slideshare.net/SAIFfoundry/hevi-sand-process-technical-paper
- [51] **Danzing, J. A.** (1989). Modeling Liquid-Solid Phase Change with Melt Convection. *Journal of Numerical Methods in Engineering*, 28, 1775.
- [52] **Bailey.** (2013). Retrieved March 21, 2013 from
www.mace.manchester.ac.uk/project/research/structures/strucfire/materialInFire/Steel/StainlessSteel/thermalProperties.htm
- [53] **Bailey.** (2013). Retrieved March 21, 2013 from
www.mace.manchester.ac.uk/project/research/structures/strucfire/materialInFire/Steel/HotRolledCarbonSteel/thermalProperties.htm
- [54] **Peet, M. J., Hassan, H. S. & Bhadeshia, H. K. D. H.** (2011). Prediction of Thermal Properties of Steel, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 54, 2602-2608.
- [55] **Santos, J. M., Quaresma, V. & Garcia, A.** (2001). Determination of Transient Interfacial Heat Transfer Coefficients in Chill Mold Castings, *Journal of Alloys and Compounds*, 319, 174-186.
- [56] **Ahmadian, M. T., Shirinparvar, M. & Davami, P.** (1999). A New Approach in Modeling of Metal-Mold Interface in Casting Using Finite Element Method, *Scientific Iranica*, 6 (2), 143-148.
- [57] **Liu, H Shen & Li, W.** (1995). Progress in Numerical Simulation of Solidification Process of Shaped Casting, *Journal of Materials Science and Technology*. 11(5), 313-322.
- [58] **AFS Cast Metal Institute,** (1973). Basic Principles of Gating and Riser. Chapter 5.
- [59] **Chakraborty, S. & Sahai, Y.** (1991). Effect of Varying Ladle Stream Temperature on the Melt Flow and Heat Transfer in Continuous Casting Tundishes, *ISIJ Int*, 31, 960-967.
- [60] **Miettinen, J.** (1997). Calculation of Solidification-Related Thermo-physical Properties of Steels, *Metallurgical and Materials Transactions B*, 28 (B), 909-916.
- [61] **Jablonka, K. H. & Schwerdtfeger, K.** (1991). *Steel Res.* 62, 24-33.
- [62] **Keil, M. J., Rodriguez, J. & Ramrattan, S. N.** (1999). Thermal Distortion of Shell and Nobake Binder System. *AFS Trans.*, 107, 71-74.
- [63] **Maijer, M.** (1994). Mathematical Modeling of Microstructure and Residual Stress Evolution in Cast Iron Calendar Rolls (Doctoral Dissertation). The University of British Columbia, BC, Canada.
- [64] **Cook, R. D.** (1995). *Finite Element Modeling for Stress Analysis*, New York, USA: John Wiley & Sons.
- [65] **Moaveni, S.** (2002). *Finite Element Analysis – Theory and Application with Ansys*, 2nd Edition, New Jersey, USA: Prentice-Hall.

- [66] **ANSYS Handbook.** (2011). Chapter 6, Ansys Inc., Canonsbyrg, USA.
- [67] **ANSYS Handbook.** (2011). *Fundamental FEA Concepts and Applications*, Ansys Inc., Canonsbyrg, USA.
- [68] **ANSYS Workbench Tutorial.** (2010). Ansys Inc., Canonsbyrg, USA.
- [69] **ANSYS Thermal Analysis Guide.** (2013). Ansys Inc., Canonsbyrg, USA.
- [70] **Weck, O. & Kim, I. Y.** (2004). *Finite Element Method*. MIT, Lecture Notes.
- [71] **Liu, Y.** (2003). *Introduction to Finite Element Method*. Lecture Notes, University of Cincinnati.
- [72] **Blazec, J.** (2001). *Computational Fluid Dynamics: Principles and Applications*, , 1st. Eddition, Oxford, UK: Elsevier.

EKLER

EK A: Çözüm modelin CFX çalışma alanı, malzeme, arayüz ve sınır koşul özeti
(Solution model: CFX domains, materials, interfaces and boundary conditions)

EK A: Çözüm modelin CFX çalışma alanı, malzeme, arayüz ve sınır koşul özeti
(Solution model: CFX domains, materials, interfaces and boundary conditions)

```
# State file created: 2012/04/13 17:01:40
# CFX-14.0 build 2011.10.10-23.01
```

LIBRARY:

CEL:

EXPRESSIONS:

StCpExp = StCp(T)

StKExp = StK(T)

END

FUNCTION: StCp

Argument Units = [C]

Option = Interpolation

Result Units = [J kg⁻¹ K⁻¹]

INTERPOLATION DATA:

Data Pairs = \

180,1118,360,752,600,654,760,680,761,1515,910,1538,911,20
44,1400,215\

5,1401,2749,1537,2976,1538,3733,1640,3757

Extend Max = On

Extend Min = On

Option = One Dimensional

END

END

FUNCTION: StK

Argument Units = [C]

Option = Interpolation

Result Units = [W m⁻¹ K⁻¹]

INTERPOLATION DATA:

Data Pairs = \

0,59.5,100,57.8,200,53.2,300,49.4,400,45.6,500,41,600,36.
8,700,33.1,\

800,28.1,1000,27.6,1200,29.7

Extend Max = On

Extend Min = On

Option = One Dimensional

END

END

END

MATERIAL GROUP: Air Data

Group Description = Ideal gas and constant property
air. Constant \
properties are for dry air at STP (0 C, 1 atm) and
25 C, 1 atm.

END

MATERIAL GROUP: CHT Solids

```

    Group Description = Pure solid substances that can be
used for conjugate \
    heat transfer.
END
MATERIAL GROUP: Calorically Perfect Ideal Gases
    Group Description = Ideal gases with constant
specific heat capacity. \
    Specific heat is evaluated at STP.
END
MATERIAL GROUP: Constant Property Gases
    Group Description = Gaseous substances with constant
properties. \
    Properties are calculated at STP (0C and 1 atm).
Can be combined with \
    NASA SP-273 materials for combustion modelling.
END
MATERIAL GROUP: Constant Property Liquids
    Group Description = Liquid substances with constant
properties.
END
MATERIAL GROUP: Dry Peng Robinson
    Group Description = Materials with properties
specified using the built \
    in Peng Robinson equation of state. Suitable for
dry real gas modelling.
END
MATERIAL GROUP: Dry Redlich Kwong
    Group Description = Materials with properties
specified using the built \
    in Redlich Kwong equation of state. Suitable for
dry real gas modelling.
END
MATERIAL GROUP: Dry Soave Redlich Kwong
    Group Description = Materials with properties
specified using the built \
    in Soave Redlich Kwong equation of state. Suitable
for dry real gas \
    modelling.
END
MATERIAL GROUP: Dry Steam
    Group Description = Materials with properties
specified using the IAPWS \
    equation of state. Suitable for dry steam
modelling.
END
MATERIAL GROUP: Gas Phase Combustion
    Group Description = Ideal gas materials which can be
use for gas phase \
    combustion. Ideal gas specific heat coefficients
are specified using \
    the NASA SP-273 format.

```

```

END
MATERIAL GROUP: IAPWS IF97
    Group Description = Liquid, vapour and binary mixture
materials which use \
    the IAPWS IF-97 equation of state. Materials are
suitable for \
    compressible liquids, phase change calculations and
dry steam flows.
END
MATERIAL GROUP: Interphase Mass Transfer
    Group Description = Materials with reference
properties suitable for \
    performing either Eulerian or Lagrangian multiphase
mass transfer \
    problems. Examples include cavitation, evaporation
or condensation.
END
MATERIAL GROUP: Liquid Phase Combustion
    Group Description = Liquid and homogenous binary
mixture materials which \
    can be included with Gas Phase Combustion materials
if combustion \
    modelling also requires phase change (eg:
evaporation) for certain \
    components.
END
MATERIAL GROUP: Particle Solids
    Group Description = Pure solid substances that can be
used for particle \
    tracking
END
MATERIAL GROUP: Peng Robinson Dry Hydrocarbons
    Group Description = Common hydrocarbons which use the
Peng Robinson \
    equation of state. Suitable for dry real gas
models.
END
MATERIAL GROUP: Peng Robinson Dry Refrigerants
    Group Description = Common refrigerants which use the
Peng Robinson \
    equation of state. Suitable for dry real gas
models.
END
MATERIAL GROUP: Peng Robinson Dry Steam
    Group Description = Water materials which use the
Peng Robinson equation \
    of state. Suitable for dry steam modelling.
END
MATERIAL GROUP: Peng Robinson Wet Hydrocarbons
    Group Description = Common hydrocarbons which use the
Peng Robinson \

```



```

        equation of state. Suitable for condensing real gas
models.
    END
    MATERIAL GROUP: Peng Robinson Wet Refrigerants
        Group Description = Common refrigerants which use the
Peng Robinson \
        equation of state. Suitable for condensing real gas
models.
    END
    MATERIAL GROUP: Peng Robinson Wet Steam
        Group Description = Water materials which use the
Peng Robinson equation \
        of state. Suitable for condensing steam modelling.
    END
    MATERIAL GROUP: Real Gas Combustion
        Group Description = Real gas materials which can be
use for gas phase \
        combustion. Ideal gas specific heat coefficients
are specified using \
        the NASA SP-273 format.
    END
    MATERIAL GROUP: Redlich Kwong Dry Hydrocarbons
        Group Description = Common hydrocarbons which use the
Redlich Kwong \
        equation of state. Suitable for dry real gas
models.
    END
    MATERIAL GROUP: Redlich Kwong Dry Refrigerants
        Group Description = Common refrigerants which use the
Redlich Kwong \
        equation of state. Suitable for dry real gas
models.
    END
    MATERIAL GROUP: Redlich Kwong Dry Steam
        Group Description = Water materials which use the
Redlich Kwong equation \
        of state. Suitable for dry steam modelling.
    END
    MATERIAL GROUP: Redlich Kwong Wet Hydrocarbons
        Group Description = Common hydrocarbons which use the
Redlich Kwong \
        equation of state. Suitable for condensing real gas
models.
    END
    MATERIAL GROUP: Redlich Kwong Wet Refrigerants
        Group Description = Common refrigerants which use the
Redlich Kwong \
        equation of state. Suitable for condensing real gas
models.
    END
    MATERIAL GROUP: Redlich Kwong Wet Steam

```

```

    Group Description = Water materials which use the
Redlich Kwong equation \
    of state. Suitable for condensing steam modelling.
END
MATERIAL GROUP: Soave Redlich Kwong Dry Hydrocarbons
    Group Description = Common hydrocarbons which use the
Soave Redlich Kwong \
    equation of state. Suitable for dry real gas
models.
END
MATERIAL GROUP: Soave Redlich Kwong Dry Refrigerants
    Group Description = Common refrigerants which use the
Soave Redlich Kwong \
    equation of state. Suitable for dry real gas
models.
END
MATERIAL GROUP: Soave Redlich Kwong Dry Steam
    Group Description = Water materials which use the
Soave Redlich Kwong \
    equation of state. Suitable for dry steam
modelling.
END
MATERIAL GROUP: Soave Redlich Kwong Wet Hydrocarbons
    Group Description = Common hydrocarbons which use the
Soave Redlich Kwong \
    equation of state. Suitable for condensing real gas
models.
END
MATERIAL GROUP: Soave Redlich Kwong Wet Refrigerants
    Group Description = Common refrigerants which use the
Soave Redlich Kwong \
    equation of state. Suitable for condensing real gas
models.
END
MATERIAL GROUP: Soave Redlich Kwong Wet Steam
    Group Description = Water materials which use the
Soave Redlich Kwong \
    equation of state. Suitable for condensing steam
modelling.
END
MATERIAL GROUP: Soot
    Group Description = Solid substances that can be used
when performing \
    soot modelling
END
MATERIAL GROUP: User
    Group Description = Materials that are defined by the
user
END
MATERIAL GROUP: Water Data

```

Group Description = Liquid and vapour water materials
with constant \

properties. Can be combined with NASA SP-273
materials for combustion \

modelling.

END

MATERIAL GROUP: Wet Peng Robinson

Group Description = Materials with properties
specified using the built \

in Peng Robinson equation of state. Suitable for
wet real gas modelling.

END

MATERIAL GROUP: Wet Redlich Kwong

Group Description = Materials with properties
specified using the built \

in Redlich Kwong equation of state. Suitable for
wet real gas modelling.

END

MATERIAL GROUP: Wet Soave Redlich Kwong

Group Description = Materials with properties
specified using the built \

in Soave Redlich Kwong equation of state. Suitable
for wet real gas \

modelling.

END

MATERIAL GROUP: Wet Steam

Group Description = Materials with properties
specified using the IAPWS \

equation of state. Suitable for wet steam
modelling.

END

MATERIAL: Air Ideal Gas

Material Description = Air Ideal Gas (constant Cp)

Material Group = Air Data, Calorically Perfect Ideal
Gases

Option = Pure Substance

Thermodynamic State = Gas

PROPERTIES:

Option = General Material

EQUATION OF STATE:

Molar Mass = 28.96 [kg kmol⁻¹]

Option = Ideal Gas

END

SPECIFIC HEAT CAPACITY:

Option = Value

Specific Heat Capacity = 1.0044E+03 [J kg⁻¹ K⁻

1]

Specific Heat Type = Constant Pressure

END

REFERENCE STATE:

Option = Specified Point

```

Reference Pressure = 1 [atm]
Reference Specific Enthalpy = 0. [J/kg]
Reference Specific Entropy = 0. [J/kg/K]
Reference Temperature = 25 [C]
END
DYNAMIC VISCOSITY:
Dynamic Viscosity = 1.831E-05 [kg m^-1 s^-1]
Option = Value
END
THERMAL CONDUCTIVITY:
Option = Value
Thermal Conductivity = 2.61E-2 [W m^-1 K^-1]
END
ABSORPTION COEFFICIENT:
Absorption Coefficient = 0.01 [m^-1]
Option = Value
END
SCATTERING COEFFICIENT:
Option = Value
Scattering Coefficient = 0.0 [m^-1]
END
REFRACTIVE INDEX:
Option = Value
Refractive Index = 1.0 [m m^-1]
END
END
END
MATERIAL: Air at 25 C
Material Description = Air at 25 C and 1 atm (dry)
Material Group = Air Data, Constant Property Gases
Option = Pure Substance
Thermodynamic State = Gas
PROPERTIES:
Option = General Material
EQUATION OF STATE:
Density = 1.185 [kg m^-3]
Molar Mass = 28.96 [kg kmol^-1]
Option = Value
END
SPECIFIC HEAT CAPACITY:
Option = Value
Specific Heat Capacity = 1.0044E+03 [J kg^-1 K^-
1]
Specific Heat Type = Constant Pressure
END
REFERENCE STATE:
Option = Specified Point
Reference Pressure = 1 [atm]
Reference Specific Enthalpy = 0. [J/kg]
Reference Specific Entropy = 0. [J/kg/K]
Reference Temperature = 25 [C]

```

```

END
DYNAMIC VISCOSITY:
    Dynamic Viscosity = 1.831E-05 [kg m-1 s-1]
    Option = Value
END
THERMAL CONDUCTIVITY:
    Option = Value
    Thermal Conductivity = 2.61E-02 [W m-1 K-1]
END
ABSORPTION COEFFICIENT:
    Absorption Coefficient = 0.01 [m-1]
    Option = Value
END
SCATTERING COEFFICIENT:
    Option = Value
    Scattering Coefficient = 0.0 [m-1]
END
REFRACTIVE INDEX:
    Option = Value
    Refractive Index = 1.0 [m m-1]
END
THERMAL EXPANSIVITY:
    Option = Value
    Thermal Expansivity = 0.003356 [K-1]
END
END
MATERIAL: Aluminium
Material Group = CHT Solids, Particle Solids
Option = Pure Substance
Thermodynamic State = Solid
PROPERTIES:
    Option = General Material
EQUATION OF STATE:
    Density = 2702 [kg m-3]
    Molar Mass = 26.98 [kg kmol-1]
    Option = Value
END
SPECIFIC HEAT CAPACITY:
    Option = Value
    Specific Heat Capacity = 9.03E+02 [J kg-1 K-1]
END
REFERENCE STATE:
    Option = Specified Point
    Reference Specific Enthalpy = 0 [J/kg]
    Reference Specific Entropy = 0 [J/kg/K]
    Reference Temperature = 25 [C]
END
THERMAL CONDUCTIVITY:
    Option = Value
    Thermal Conductivity = 237 [W m-1 K-1]

```

```

END
END
END
MATERIAL: Copper
  Material Group = CHT Solids, Particle Solids
  Option = Pure Substance
  Thermodynamic State = Solid
  PROPERTIES:
    Option = General Material
    EQUATION OF STATE:
      Density = 8933 [kg m-3]
      Molar Mass = 63.55 [kg kmol-1]
      Option = Value
    END
    SPECIFIC HEAT CAPACITY:
      Option = Value
      Specific Heat Capacity = 3.85E+02 [J kg-1 K-1]
    END
    REFERENCE STATE:
      Option = Specified Point
      Reference Specific Enthalpy = 0 [J/kg]
      Reference Specific Entropy = 0 [J/kg/K]
      Reference Temperature = 25 [C]
    END
    THERMAL CONDUCTIVITY:
      Option = Value
      Thermal Conductivity = 401.0 [W m-1 K-1]
    END
  END
END
MATERIAL: SandCore
  Material Group = User
  Option = Pure Substance
  Thermodynamic State = Solid
  PROPERTIES:
    Option = General Material
    EQUATION OF STATE:
      Density = 1195.8 [kg m-3]
      Molar Mass = 1.0 [kg kmol-1]
      Option = Value
    END
    SPECIFIC HEAT CAPACITY:
      Option = Value
      Specific Heat Capacity = 1172.3 [J kg-1 K-1]
    END
    THERMAL CONDUCTIVITY:
      Option = Value
      Thermal Conductivity = 0.52 [W m-1 K-1]
    END
  END
END
END

```

```

MATERIAL: SandMold
  Material Group = User
  Option = Pure Substance
  Thermodynamic State = Solid
  PROPERTIES:
    Option = General Material
    EQUATION OF STATE:
      Density = 1494.7 [kg m-3]
      Molar Mass = 1.0 [kg kmol-1]
      Option = Value
    END
    SPECIFIC HEAT CAPACITY:
      Option = Value
      Specific Heat Capacity = 1172.3 [J kg-1 K-1]
    END
    THERMAL CONDUCTIVITY:
      Option = Value
      Thermal Conductivity = 0.52 [W m-1 K-1]
    END
  END
END
MATERIAL: Soot
  Material Group = Soot
  Option = Pure Substance
  Thermodynamic State = Solid
  PROPERTIES:
    Option = General Material
    EQUATION OF STATE:
      Density = 2000 [kg m-3]
      Molar Mass = 12 [kg kmol-1]
      Option = Value
    END
    REFERENCE STATE:
      Option = Automatic
    END
    ABSORPTION COEFFICIENT:
      Absorption Coefficient = 0 [m-1]
      Option = Value
    END
  END
END
MATERIAL: Steel
  Material Group = CHT Solids,Particle Solids
  Option = Pure Substance
  Thermodynamic State = Solid
  PROPERTIES:
    Option = General Material
    EQUATION OF STATE:
      Density = 7854 [kg m-3]
      Molar Mass = 55.85 [kg kmol-1]
      Option = Value

```

```

END
SPECIFIC HEAT CAPACITY:
    Option = Value
    Specific Heat Capacity = StCpExp
END
REFERENCE STATE:
    Option = Specified Point
    Reference Specific Enthalpy = 0 [J/kg]
    Reference Specific Entropy = 0 [J/kg/K]
    Reference Temperature = 25 [C]
END
THERMAL CONDUCTIVITY:
    Option = Value
    Thermal Conductivity = StKExp
END
END
MATERIAL: Water
    Material Description = Water (liquid)
    Material Group = Water Data, Constant Property
Liquids
    Option = Pure Substance
    Thermodynamic State = Liquid
PROPERTIES:
    Option = General Material
EQUATION OF STATE:
    Density = 997.0 [kg m-3]
    Molar Mass = 18.02 [kg kmol-1]
    Option = Value
END
SPECIFIC HEAT CAPACITY:
    Option = Value
    Specific Heat Capacity = 4181.7 [J kg-1 K-1]
    Specific Heat Type = Constant Pressure
END
REFERENCE STATE:
    Option = Specified Point
    Reference Pressure = 1 [atm]
    Reference Specific Enthalpy = 0.0 [J/kg]
    Reference Specific Entropy = 0.0 [J/kg/K]
    Reference Temperature = 25 [C]
END
DYNAMIC VISCOSITY:
    Dynamic Viscosity = 8.899E-4 [kg m-1 s-1]
    Option = Value
END
THERMAL CONDUCTIVITY:
    Option = Value
    Thermal Conductivity = 0.6069 [W m-1 K-1]
END
ABSORPTION COEFFICIENT:

```



```

        Absorption Coefficient = 1.0 [m^-1]
        Option = Value
    END
    SCATTERING COEFFICIENT:
        Option = Value
        Scattering Coefficient = 0.0 [m^-1]
    END
    REFRACTIVE INDEX:
        Option = Value
        Refractive Index = 1.0 [m m^-1]
    END
    THERMAL EXPANSIVITY:
        Option = Value
        Thermal Expansivity = 2.57E-04 [K^-1]
    END
END
END
MATERIAL: Water Ideal Gas
    Material Description = Water Vapour Ideal Gas (100 C
and 1 atm)
    Material Group = Calorically Perfect Ideal Gases,
Water Data
    Option = Pure Substance
    Thermodynamic State = Gas
    PROPERTIES:
        Option = General Material
    EQUATION OF STATE:
        Molar Mass = 18.02 [kg kmol^-1]
        Option = Ideal Gas
    END
    SPECIFIC HEAT CAPACITY:
        Option = Value
        Specific Heat Capacity = 2080.1 [J kg^-1 K^-1]
        Specific Heat Type = Constant Pressure
    END
    REFERENCE STATE:
        Option = Specified Point
        Reference Pressure = 1.014 [bar]
        Reference Specific Enthalpy = 0. [J/kg]
        Reference Specific Entropy = 0. [J/kg/K]
        Reference Temperature = 100 [C]
    END
    DYNAMIC VISCOSITY:
        Dynamic Viscosity = 9.4E-06 [kg m^-1 s^-1]
        Option = Value
    END
    THERMAL CONDUCTIVITY:
        Option = Value
        Thermal Conductivity = 193E-04 [W m^-1 K^-1]
    END
    ABSORPTION COEFFICIENT:

```

```

        Absorption Coefficient = 1.0 [m^-1]
        Option = Value
    END
    SCATTERING COEFFICIENT:
        Option = Value
        Scattering Coefficient = 0.0 [m^-1]
    END
    REFRACTIVE INDEX:
        Option = Value
        Refractive Index = 1.0 [m m^-1]
    END
END
END
FLOW: Flow Analysis 1
    SOLUTION UNITS:
        Angle Units = [rad]
        Length Units = [m]
        Mass Units = [kg]
        Solid Angle Units = [sr]
        Temperature Units = [K]
        Time Units = [s]
    END
    ANALYSIS TYPE:
        Option = Transient
    EXTERNAL SOLVER COUPLING:
        Option = None
    END
    INITIAL TIME:
        Option = Automatic with Value
        Time = 0 [s]
    END
    TIME DURATION:
        Option = Total Time
        Total Time = 1800 [s]
    END
    TIME STEPS:
        Option = Timesteps
        Timesteps = 0.5 [s]
    END
END
DOMAIN: Fan
    Coord Frame = Coord 0
    Domain Type = Solid
    Location = B590
    BOUNDARY: Fan Kalip Side 1
        Boundary Type = INTERFACE
        Location = Fan_Kalip_Int
    BOUNDARY CONDITIONS:
        HEAT TRANSFER:
            Option = Conservative Interface Flux

```

```

        END
    END
END
BOUNDARY: Fan Maca Side 1
    Boundary Type = INTERFACE
    Location = Fan_Maca_Int
    BOUNDARY CONDITIONS:
        HEAT TRANSFER:
            Option = Conservative Interface Flux
        END
    END
END
BOUNDARY: Periodic Faces in Fan Side 1
    Boundary Type = INTERFACE
    Location = Fan_Yan1
    BOUNDARY CONDITIONS:
        HEAT TRANSFER:
            Option = Conservative Interface Flux
        END
    END
END
BOUNDARY: Periodic Faces in Fan Side 2
    Boundary Type = INTERFACE
    Location = Fan_Yan2
    BOUNDARY CONDITIONS:
        HEAT TRANSFER:
            Option = Conservative Interface Flux
        END
    END
END
DOMAIN MODELS:
    DOMAIN MOTION:
        Option = Stationary
    END
    MESH DEFORMATION:
        Option = None
    END
END
INITIALISATION:
    Option = Automatic
    INITIAL CONDITIONS:
        TEMPERATURE:
            Option = Automatic with Value
            Temperature = 1640 [C]
        END
    END
END
SOLID DEFINITION: Solid 1
    Material = Steel
    Option = Material Library
    MORPHOLOGY:

```

```

        Option = Continuous Solid
    END
END
SOLID MODELS:
    HEAT TRANSFER MODEL:
        Option = Thermal Energy
    END
    THERMAL RADIATION MODEL:
        Option = None
    END
END
END
DOMAIN: Kalip
    Coord Frame = Coord 0
    Domain Type = Solid
    Location = B385
    BOUNDARY: Boundary 1
        Boundary Type = WALL
        Location = Kalip_Alt,Kalip_Ust
        BOUNDARY CONDITIONS:
            HEAT TRANSFER:
                Heat Flux in = 5.75 [W m^-2]
                Option = Heat Flux
            END
        END
    END
    BOUNDARY: Boundary 2
        Boundary Type = WALL
        Location = Kalip_Arka
        BOUNDARY CONDITIONS:
            HEAT TRANSFER:
                Heat Flux in = 7.5 [W m^-2]
                Option = Heat Flux
            END
        END
    END
    BOUNDARY: Fan Kalip Side 2
        Boundary Type = INTERFACE
        Location = Kalip_Fan_Int
        BOUNDARY CONDITIONS:
            HEAT TRANSFER:
                Option = Conservative Interface Flux
            END
        END
    END
    BOUNDARY: Kalip Maca Side 1
        Boundary Type = INTERFACE
        Location = Kalip_Maca_Int
        BOUNDARY CONDITIONS:
            HEAT TRANSFER:
                Option = Conservative Interface Flux

```

```

        END
    END
END
BOUNDARY: Periodic Faces in Kalip Side 1
    Boundary Type = INTERFACE
    Location = Kalip_Yan1
    BOUNDARY CONDITIONS:
        HEAT TRANSFER:
            Option = Conservative Interface Flux
        END
    END
END
BOUNDARY: Periodic Faces in Kalip Side 2
    Boundary Type = INTERFACE
    Location = Kalip_Yan2
    BOUNDARY CONDITIONS:
        HEAT TRANSFER:
            Option = Conservative Interface Flux
        END
    END
END
DOMAIN MODELS:
    DOMAIN MOTION:
        Option = Stationary
    END
    MESH DEFORMATION:
        Option = None
    END
END
INITIALISATION:
    Option = Automatic
    INITIAL CONDITIONS:
        TEMPERATURE:
            Option = Automatic with Value
            Temperature = 25 [C]
        END
    END
END
SOLID DEFINITION: Solid 1
    Material = SandMold
    Option = Material Library
    MORPHOLOGY:
        Option = Continuous Solid
    END
END
SOLID MODELS:
    HEAT TRANSFER MODEL:
        Option = Thermal Energy
    END
    THERMAL RADIATION MODEL:
        Option = None

```

```

END
END
END
DOMAIN: Maca
  Coord Frame = Coord 0
  Domain Type = Solid
  Location = B250
  BOUNDARY: Fan Maca Side 2
    Boundary Type = INTERFACE
    Location = Maca_Fan_Int
    BOUNDARY CONDITIONS:
      HEAT TRANSFER:
        Option = Conservative Interface Flux
      END
    END
  END
END
BOUNDARY: Kalip Maca Side 2
  Boundary Type = INTERFACE
  Location = Maca_Kalip_Int
  BOUNDARY CONDITIONS:
    HEAT TRANSFER:
      Option = Conservative Interface Flux
    END
  END
END
BOUNDARY: Periodic Faces in Maca Side 1
  Boundary Type = INTERFACE
  Location = Maca_Yan1
  BOUNDARY CONDITIONS:
    HEAT TRANSFER:
      Option = Conservative Interface Flux
    END
  END
END
BOUNDARY: Periodic Faces in Maca Side 2
  Boundary Type = INTERFACE
  Location = Maca_Yan2
  BOUNDARY CONDITIONS:
    HEAT TRANSFER:
      Option = Conservative Interface Flux
    END
  END
END
DOMAIN MODELS:
  DOMAIN MOTION:
    Option = Stationary
  END
  MESH DEFORMATION:
    Option = None
  END
END

```

```

INITIALISATION:
  Option = Automatic
  INITIAL CONDITIONS:
    TEMPERATURE:
      Option = Automatic with Value
      Temperature = 25 [C]
    END
  END
END
SOLID DEFINITION: Solid 1
  Material = SandCore
  Option = Material Library
  MORPHOLOGY:
    Option = Continuous Solid
  END
END
SOLID MODELS:
  HEAT TRANSFER MODEL:
    Option = Thermal Energy
  END
  THERMAL RADIATION MODEL:
    Option = None
  END
END
END
DOMAIN INTERFACE: Fan Kalip
  Boundary List1 = Fan Kalip Side 1
  Boundary List2 = Fan Kalip Side 2
  Interface Type = Solid Solid
  INTERFACE MODELS:
    Option = General Connection
  FRAME CHANGE:
    Option = None
  END
  HEAT TRANSFER:
    Option = Conservative Interface Flux
  HEAT TRANSFER INTERFACE MODEL:
    Option = None
  END
  END
  PITCH CHANGE:
    Option = None
  END
END
MESH CONNECTION:
  Option = Automatic
END
END
DOMAIN INTERFACE: Fan Maca
  Boundary List1 = Fan Maca Side 1
  Boundary List2 = Fan Maca Side 2

```

```

Interface Type = Solid Solid
INTERFACE MODELS:
  Option = General Connection
  FRAME CHANGE:
    Option = None
  END
  HEAT TRANSFER:
    Option = Conservative Interface Flux
    HEAT TRANSFER INTERFACE MODEL:
      Option = None
    END
  END
  PITCH CHANGE:
    Option = None
  END
END
MESH CONNECTION:
  Option = Automatic
END
DOMAIN INTERFACE: Kalip Maca
  Boundary List1 = Kalip Maca Side 1
  Boundary List2 = Kalip Maca Side 2
  Interface Type = Solid Solid
  INTERFACE MODELS:
    Option = General Connection
    FRAME CHANGE:
      Option = None
    END
    HEAT TRANSFER:
      Option = Conservative Interface Flux
      HEAT TRANSFER INTERFACE MODEL:
        Option = None
      END
    END
    PITCH CHANGE:
      Option = None
    END
  END
  MESH CONNECTION:
    Option = Automatic
  END
DOMAIN INTERFACE: Periodic Faces
  Boundary List1 = Periodic Faces in Fan Side
1,Periodic Faces in Kalip \
  Side 1,Periodic Faces in Maca Side 1
  Boundary List2 = Periodic Faces in Fan Side
2,Periodic Faces in Kalip \
  Side 2,Periodic Faces in Maca Side 2
  Interface Type = Solid Solid

```



```

INTERFACE MODELS:
  Option = Rotational Periodicity
  AXIS DEFINITION:
    Option = Coordinate Axis
    Rotation Axis = Coord 0.3
  END
END
MESH CONNECTION:
  Option = GGI
END
END
OUTPUT CONTROL:
  RESULTS:
    File Compression Level = Default
    Option = Standard
  END
  TRANSIENT RESULTS: Transient Results 1
    File Compression Level = Default
    Include Mesh = No
    Option = Selected Variables
    Output Variables List = Temperature
    OUTPUT FREQUENCY:
      Option = Timestep Interval
      Timestep Interval = 2
    END
  END
END
SOLVER CONTROL:
  ADVECTION SCHEME:
    Option = High Resolution
  END
  CONVERGENCE CONTROL:
    Maximum Number of Coefficient Loops = 15
    Minimum Number of Coefficient Loops = 1
    Timescale Control = Coefficient Loops
  END
  CONVERGENCE CRITERIA:
    Residual Target = 1.E-4
    Residual Type = RMS
  END
  TRANSIENT SCHEME:
    Option = Second Order Backward Euler
  TIMESTEP INITIALISATION:
    Option = Automatic
  END
END
END
COMMAND FILE:
  Version = 14.0
END

```


ÖZGEÇMİŞ



Ad Soyad : Murat Çopur

Doğum Yeri ve Tarihi : Ankara, 22.03.1960

E-posta: murat.copur@alarko-carrier.com.tr

Adres: Alarko Carrier Sanayi ve Ticaret A.Ş., Gebze Organize Sanayi Bölgesi, Şahabettin Bilgisu Cad., 41480 Gebze Kocaeli

Eğitim :

1983-1985: Yüksek Lisans, The University of Wisconsin-Madison, Engineering Faculty, Metallurgical and Materials Engineering.

Tez Konusu : Microcomputer Analysis of The Solidification Order in Selected Geometries.

1978-1982: Lisans, ODTÜ, Mühendislik Fakültesi, Metalurji Mühendisliği

TEZDEN TÜRETİLEN YAYINLAR/SUNUMLAR

Uluslararası Makaleler:

1. M. Copur, M. N. Eruslu, Finite volume modeling of the solidification of an axial steel cast impeller, Metalurgija, 53 (2) (2014) 149-154.

