



**KARMAŞIK DÖKÜM KESİTLERİNİN KATILAŞMA İZOTERMLERİNİN
BİRİM ALAN YÖNTEMİNE GÖRE MATEMATİK MODELLEMESİ VE
MAKRO DÖKÜM HATASI ANALİZİ**

Dilara YILMAZ

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
METALURJİ VE MALZEME MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

KASIM 2021

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
 - Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
 - Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
 - Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
 - Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,
- bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Dilara YILMAZ

08/11/2021

KARMAŞIK DÖKÜM KESİTLERİNİN KATIĞAŞMA İZOTERMLERİNİN BİRİM
ALAN YÖNTEMİNE GÖRE MATEMATİK MODELLEMESİ VE MAKRO DÖKÜM
HATASI ANALİZİ
(Yüksek Lisans Tezi)

Dilara YILMAZ

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Kasım 2021

ÖZET

Birim Alan yaklaşımı, katılaşma izotermelerini çizmek için kullanılabilen geometri tabanlı şekil tanıma özelliğine sahip bir matematik modellemesidir. Bu çalışmada, bu modellemenin karmaşık döküm parçalarına uygulanabilirliği araştırılmaktadır. Bu amaçla üç farklı döküm parçası seçilmiş, seçilen parçaların analiz için uygun kesitleri alınmış, bu kesitler AutoCAD çizim programına aktarılmış ve Birim Alan yaklaşımına dayalı basit bir izoterm hesaplayıcısı yardımıyla her kesit üzerinde katılaşma izotermlerinin nasıl çizilebileceği ayrıntılı bir biçimde anlatılmıştır. Buna göre, Birim Alan yaklaşımına dayalı dış köşe, iç köşe, silindirik dairesel yüzey ve silindirik düzlemsel yüzey formülleri kullanılarak kesitlerin hangi bölümü hangi formüle uyuyorsa, o formül kullanılarak ilgili köşe izotermi çizilmiş, daha sonra bu köşe izotermi en yakın teğet ve paralel taşıma metodları kullanılarak birbirine bağlanmıştır. Birim Alan yaklaşımına dayalı katılaşma izotermi tamamlandıktan sonra kalan büyük boşluklar tanımlanarak katılaşma sırasında oluşabilecek olası makro döküm hatalarının yerleri belirlenmeye çalışılmıştır. Her parça için elde edilen katılaşma izotermi ve bulunan hata noktaları Magmasoft® döküm simülasyon programının aynı döküm şekilleri için verdiği Porosity ve Hot Spot FSTime simülasyon sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Buna göre, Birim Alan yaklaşımının verdiği makro hata noktaları ile Magmasoft porosity sonuçları kısmen uyumludur. Birim Alan yaklaşımına göre bulunan hata noktaları gözeneklerin yerini belirleyebilmekte ancak gözenekliliğin parçanın diğer kısımlarına yayılma etkisini tam olarak belirleyememektedir. Buna karşılık, Birim Alan yaklaşımının verdiği makro hata noktaları ile Magmasoft® döküm simülasyon programının verdiği Hot Spot noktaları arasında çok yüksek korelasyon söz konusudur. Bu korelasyonu daha çok artırmak için, döküm parçaların karmaşıklığı ile orantılı olarak, Birim Alan yaklaşımına göre analiz edilecek kesit sayısının yeterli sayıda artırılması daha sağlıklı sonuçlar vermektedir.

Bilim Kodu : 91504

Anahtar Kelimeler : Döküm, Katılaşma, Geometri tabanlı matematik modelleme, Katılaşma izotermi, Birim Alan.

Sayfa Adedi : 95

Danışman : Dr. Öğr. Üyesi Kamil Kunt TÜZÜNALP

MATHEMATICAL MODELLING AND MACRO CASTING ANALYSIS OF
COMPLEX CASTING SECTIONS ACCORDING TO THE UNIT AREA METHOD
(M.Sc. Thesis)

Dilara YILMAZ

GAZİ UNIVERSITY
GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES
November 2021

ABSTRACT

The Unit Area approach is a geometry-based mathematical modeling with shape recognition feature that can be used to plot two-dimensional solidification isotherms. In this study, the applicability of this modeling to complex casting parts was investigated. For this purpose, three different casting parts were selected, sections suitable for analysis were taken, these sections were transferred to the AutoCAD drawing program and drawing the solidification isotherms on each section with the help of a simple isotherm calculator based on the Unit Area approach was explained in detail. Accordingly, using the formulas of square outer corners, square internal corners, cylindrical round surfaces and cylindrical planar surfaces based on the Unit Area approach, the relevant corner isotherms are drawn using the formulas, whichever part of the sections fits which formula, and then these corner isotherms are joined by using the closest tangent and parallel joining methods together. After the drawing of the solidification isotherms based on the Unit Area approach have been completed, the remaining large gaps have been defined, and the locations of possible macro casting defects that may occur during solidification have been investigated. The solidification isotherms obtained for each part and the defect points found were compared with the Porosity and Hot-Spot FSTime simulation results provided by the Magmasoft® casting simulation software for the same casting shapes. Accordingly, macro defect locations given by the Unit Area approach and Magmasoft porosity results are partially compatible. The defect locations found according to the Unit Area approach can determine the location of the pores, but cannot fully determine the effect of porosity to spread to other parts of the part. On the other hand, there is a very high correlation between the macro defect points provided by the Unit Area approach and the hot-spot locations provided by the Magmasoft® casting simulation program. In order to further increase this correlation, increasing the number of sections to be analyzed according to the Unit Area approach, in proportion to the complexity of the cast parts, gives more accurate results. The Unit Area approach provides approximate results on the shape of the defect locations, but it can show their exact location with greater precision.

Science Code : 91504

Key Words : Casting, Solidification, Geometry based mathematical modeling, Unit Area.

Page Number : 95

Supervisor : Assist. Prof. Dr. Kamil Kunt TÜZÜNALP

TEŞEKKÜR

Bu çalışmanın tamamlanması için her zaman desteğini hissettiğim, öğrencisi olmaktan mutlu olduğum Gazi Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü'ne şükranlarımı iletirim. Başta kıymetli fikirleriyle çalışmalarımı yönlendiren, lisansüstü eğitimim süresince benden desteğini esirgemeyen değerli danışmanım Dr. Öğr. Üyesi Kamil Kunt TÜZÜNALP'e teşekkür ederim. Tezimin sonuçlarının açıklığa kavuşmasında Magmasoft görüntülerine ulaşabilmem konusunda destek olan Magma Türkiye personelleri Baran SULAR ve Murat AKÇIN'a desteklerinden dolayı sonsuz teşekkürlerimi iletiyorum. Bu süreç boyunca desteğini esirgemeyen anneme, babama ve ablama teşekkür ederim. Tezim için gerekli olan AutoCAD programını kuran çok sevdiğim arkadaşım Kübra Ezgi DEMİRTAŞ'a, AutoCAD 'i öğrenmemde yardımcı olan Fatih BOZKURT arkadaşşıma teşekkürü borç bilirim.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ŞEKİLLERİN LİSTESİ	x
RESİMLERİN LİSTESİ	xiv
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xv
1. GİRİŞ.....	1
2. MAKRO KATILAŞMA HATALARININ BELİRLENMESİ İÇİN GEOMETRİ TABANLI YÖNTEMLER	7
2.1. Heuvers Çemberi Yöntemi	7
2.2. Döküm Modülü Yöntemi	7
2.3. Geliştirilmiş Modül Yöntemi	8
2.4. Kesit Üzerinde Modül Hesaplama Yöntemi.....	8
2.5. Vektörel Modül Yöntemi (Modulus Vector Method)	9
2.6. Termal Gradyan ve Modül Yöntemi	9
2.7. Şekil Faktörü Yöntemi	9
2.8. Orta Eksen Tabanlı Enterpolasyon Yöntemi	10
2.9. Birim Alan Yöntemi	11
2.10. Katılaşmanın Geometri Tabanlı Modellerinde Güncel Yöntemler	11
2.11. Chvorinov Yönteminin Yetersizlikleri	13
2.12. Katılaşma İzotermelerini Belirlemek İçin BA Yaklaşımının Uygulanması...	15
2.13. Kübik Döküm Kesitlerinin Katılaşma İzotermlerinin Belirlenmesi.....	16
2.14. Silindirlerin 2 Boyutlu Bölümlerinin Katılaşma İzotermlerinin Belirlenmesi	18

	Sayfa
2.15. İç Köşelerin Katılma İzotermlerinin Belirlenmesi	20
2.16. Döküm Simulasyonu	21
3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	25
3.1. Basit Seviyedeki Karmaşık Geometrik Şeklin İzotermlerinin Belirlenmesi ..	26
3.2. Orta Seviyedeki Karmaşık Geometrik Şeklin İzotermlerinin Belirlenmesi ...	35
3.3. Yüksek Seviyedeki Karmaşık Geometrik Şeklin İzotermlerinin Belirlenmesi	46
4. SONUÇLARIN MAGMASOFT® İLE DOĞRULANMASI.....	55
4.1. Basit Seviyedeki Karmaşık Geometrik Şekle Sahip Parça.....	56
4.1.1. Porosity simulasyonları	56
4.1.2. Hot Spot FSTime simulasyonları	59
4.2. Orta Seviyedeki Karmaşık Geometrik Şekle Sahip Parça.....	62
4.2.1. Porosity simulasyonları	62
4.2.2. Hot Spot FSTime simulasyonları	65
4.3. Yüksek Seviyedeki Karmaşık Geometrik Şekle Sahip Parça.....	68
4.3.1. Porosity simulasyonları	68
4.3.2. Hot Spot FSTime simulasyonları	71
5. DENEY SONUÇLARI.....	75
5.1. Basit Seviyede Karmaşık Geometrik Şekle Sahip Döküm Parçası (1. Parça)	75
5.1.1. Bir numaralı parça, yolluksuz, gözeneklilik kriteri	75
5.1.2. Bir numaralı parça, yolluklu, gözeneklilik kriteri	75
5.1.3. Bir numaralı parça, yolluksuz, Hot Spot belirleme kriteri	76
5.1.4. Bir numaralı parça, yolluklu, Hot Spot belirleme kriteri	76
5.2. Orta Seviyede Karmaşık Geometrik Şekle Sahip Döküm Parçası (2. Parça).	77
5.2.1. İki numaralı parça, yolluksuz, gözeneklilik kriteri.....	77
5.2.2. İki numaralı parça, yolluklu, gözeneklilik kriteri	77

	Sayfa
5.2.3. İki numaralı parça, yolluksuz, Hot Spot belirleme kriteri	78
5.2.4. İki numaralı parça, yolluklu, Hot Spot belirleme kriteri.....	78
5.3. Yüksek Seviyede Karmaşık Geometrik Şekle Sahip Döküm Parçası (3. Parça).....	79
5.3.1. Üç numaralı parça, yolluksuz, gözeneklilik kriteri	79
5.3.2. Üç numaralı parça, yolluklu, gözeneklilik kriteri	79
5.3.3. Üç numaralı parça, yolluksuz, Hot Spot belirleme kriteri	79
5.3.4. Üç numaralı parça, yolluklu, Hot Spot belirleme kriteri.....	80
5.4. Birim Alan Yaklaşımı ile Chvorinov'un Çalışmalarının Karşılaştırılması	81
6. SONUÇ VE ÖNERİLER	83
6.1. Birim Alan Yöntemine Göre Yapılan Çalışmalar ve Sonuçları	83
6.2. Birim Alan Yaklaşımı ile Magmasoft Simulasyon Sonuçlarının Karşılaştırılması.....	84
6.3. Tezin Bütünü Hakkında Genel Değerlendirmeler	87
KAYNAKLAR	91
ÖZGEÇMİŞ	95

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Birim Alan yaklaşımını tanımlamak için oluşturulan yapısal bileşke	16
Şekil 2.2. Toplam hayali yüzey alanından Birim Alan'ının belirlenmesi	17
Şekil 2.3. Bir kare dış köşede BA değerinin hesaplanması için önerilen model	17
Şekil 2.4. Silindirik döküm parçalarının BA yaklaşımına göre modelleme yöntemi	19
Şekil 2.5.Kare iç köşelerin BA yaklaşımına göre modellenmesi için önerilen yöntem .	20
Şekil 3.1. Bir numaralı parçanın teknik resmi	26
Şekil 3.2 .Bir numaralı parçanın Solidworks katı modeli.....	27
Şekil 3.3 Bir numaralı parçanın Solidworks katı modeli üzerinden kesitinin alınması..	27
Şekil 3.4. Bir nunaralı parçanın görünüşleri, perspektifi ve uzunlamasına kesiti.....	28
Şekil 3.5. Bir numaralı parçanın kesit görünüşünün, tarama çizgileri silinerek, Birim Alan yaklaşımına göre izotermilerin çizimi için hazırlanması.	29
Şekil 3.6. Birinci parçada Birim Alana dayalı izotermilerin kare dış köşe üzerine çizilmesi.....	30
Şekil 3.7. Birinci parçada tamamlanmış kare dış köşe izotermi.....	31
Şekil 3.8. Birinci parçada dış köşelerin karelerle tanımlanması	32
Şekil 3.9. Birinci parçada açılı kare dış köşe köşenin görüntüsü.....	32
Şekil 3.10. Bir numaralı parçanın tamamlanmış ve tamamlanmamış görüntüsü	33
Şekil 3.11. Bir numaralı parçanın kesiti alınmış katılama izoterm görüntüsü	34
Şekil 3.12. Bir numaralı parçanın AutoCAD'de tüm izotermi tamamlanmış görüntüsü.....	34
Şekil 3.13. Bir numaralı parçanın yolluk tasarımı	35
Şekil 3.14. İki numaralı parçanın Solidworks katı modeli.....	35
Şekil 3.15 .İki numaralı parçanın Solidworks katı modelinden kesit alınması.....	36
Şekil 3.16. İki numaralı parçanın Solidworks teknik resmi.....	36
Şekil 3.17 .İkinci parçanın ilk köşesinin koordinatlarının belirlenmiş görüntüsü	37

Şekil	Sayfa
Şekil 3.18. İkinci parçanın ilk köşesinin Polyline komutu ile izotermilerin son halinin oluşturulduğu görüntüsü	38
Şekil 3.19. İki numaralı parçanın kare dış köşelerinin birbirine bağlandığı görüntüsü..	38
Şekil 3.20. İkinci Parçanın sol tarafındaki kare dış köşenin, sağ köşedeki izoterm ile bağlanması	39
Şekil 3.21. İki numaralı parçanın sağ alt köşesinin AutoCAD görüntüsü	39
Şekil 3.22. İki numaralı parçada iç ve dış köşelerin birbirine bağlanması	40
Şekil 3.23. İki numaralı parçanın iç köşe izotermi	40
Şekil 3.24. İki numaralı parçanın iç köşe izotermi parçanın içine taşınması	41
Şekil 3.25. İki numaralı parçanın sağ kısmının tamamlanmış izotermi	41
Şekil 3.26. İkinci parçada kare dış köşenin açılı ile döndürülmüş halinin görüntüsü.....	42
Şekil 3.27. İki numaralı şeklin sol tarafının detaylı izoterm görüntüsü.....	43
Şekil 3.28. İkinci parçada AutoCAD “Offset” komutu ile oluşturulan izoterm	44
Şekil 3.29. İkinci parçada izoterm birleştirilerek parçanın ortasının tamamlanması .	44
Şekil 3.30. İki numaralı parçada AutoCAD üzerinde tamamlanmaya yakın görüntüsü.....	45
Şekil 3.31. İki numaralı parçada AutoCAD üzerinde tamamlanan bütün izoterm	45
Şekil 3.32. İki numaralı şeklin yolluk tasarımı	46
Şekil 3.33. Üç numaralı parçanın teknik resmi.....	47
Şekil 3.34. Üçüncü parçada silindir dairesel ve silindir düzlemsel yüzey izotermi ...	47
Şekil 3.35. Üçüncü parçada silindir dairesel yüzeyin izotermi birleştirilmesi	48
Şekil 3.36. Üçüncü parçada A-A kesitinin tamamlanmış sağ kısmı (solda) ve iç köşe izotermi (sağda)	48
Şekil 3.37. Üçüncü parçada A-A kesitinin tamamlanmış sol kısmı	49
Şekil 3.38. Üçüncü parçada A-A kesitinin orta kısmının tamamlanması	49
Şekil 3.39. Üçüncü parçada A-A kesitinin izotermi tamamlanmış görüntüsü	50
Şekil 3.40. Üç numaralı parçanın B-B kesitinin görüntüsü	50

Şekil	Sayfa
Şekil 3.41. Üçüncü parçada B-B kesitinin izoterm çizimlerine başlandığı kenarın görüntüsü.....	51
Şekil 3.42. Üç numaralı parçanın B-B kesitinin iç köşelerinin görüntüsü.....	51
Şekil 3.43. Üç numaralı parçada B-B kesit izotermlerinin ilerme şekli ve birleşmesi ...	52
Şekil 3.44. Üç numaralı parçada B-B kesitinin izotermlerinin birleştirilmesi.....	52
Şekil 3.45. Üç numaralı parçada B-B kesitinin AutoCAD çizimin tamamlanmış görüntüsü	53
Şekil 3.46. Üç numaralı parçaya ait yolluk tasarımı.....	53
Şekil 4.1. Porosity kriterinin şematik anlatımı.....	55
Şekil 4.2. Bir numaralı parçanın yolluksuz porosity görüntüsü.....	57
Şekil 4.3. Bir numaralı parçanın farklı açıdan yolluksuz porosity görüntüsü	57
Şekil 4.4. Bir numaralı parçanın yolluklu porosity görüntüsü.....	58
Şekil 4.5. Bir numaralı parçanın farklı açıdan yolluklu porosity görüntüsü.....	58
Şekil 4.6. Bir numaralı parçanın yolluksuz Hot Spot FSTime görüntüsü	59
Şekil 4.7. Bir numaralı parçanın farklı açıdan yolluksuz Hot Spot FSTime görüntüsü .	60
Şekil 4.8. Bir numaralı parçanın yolluklu Hot Spot FSTime görüntüsü.....	61
Şekil 4.9. Bir numaralı parçanın farklı açıdan yolluklu Hot Spot FSTime görüntüsü....	61
Şekil 4.10. İki numaralı parçanın yolluksuz porosity görüntüsü	62
Şekil 4.11. İki numaralı parçanın yolluklu porosity görüntüsü	63
Şekil 4.12. İki numaralı parçanın farklı açıdan yolluklu porosity görüntüsü	63
Şekil 4.13. İki numaralı parçanın farklı açıdan yolluklu porosity görüntüsü	64
Şekil 4.14. İki numaralı parçanın farklı açıdan yolluklu porosity görüntüsü	64
Şekil 4.15. İki numaralı parçanın yolluksuz Hot Spot FSTime görüntüsü	65
Şekil 4.16. İki numaralı parçanın farklı açıdan yolluksuz Hot Spot FSTime görüntüsü.....	65
Şekil 4.17. İki numaralı parçanın yolluklu Hot Spot FSTime görüntüsü	66
Şekil 4.18. İki numaralı parçanın yolluklu Hot Spot FSTime görüntüsü	67

Şekil	Sayfa
Şekil 4.19. İki numaralı parçanın yolluklu Hot Spot FSTime görüntüsü	67
Şekil 4.20. Üç numaralı parçanın yolluksuz porosity görüntüsü	68
Şekil 4.21. Üç numaralı parçanın yolluksuz porosity görüntüsü	69
Şekil 4.22. Üç numaralı parçanın yolluklu porosity görüntüsü	70
Şekil 4.23. Üç numaralı parçanın farklı açıdan yolluklu porosity görüntüsü	70
Şekil 4.24. Üç numaralı parçanın farklı açıdan yolluklu porosity görüntüsü	71
Şekil 4.25. Üç numaralı parçanın yolluksuz Hot Spot FSTime görüntüsü	72
Şekil 4.26. Üç numaralı parçanın yolluksuz Hot Spot FSTime görüntüsü	72
Şekil 4.27. Üç numaralı parçanın yolluksuz Hot Spot FSTime görüntüsü	73
Şekil 4.28. Üç numaralı parçanın yolluklu Hot Spot FSTime görüntüsü	74
Şekil 4.29. Üç numaralı parçanın yolluklu Hot Spot FSTime görüntüsü	74
Şekil 5.1. Şekil 3.11’de verilen Birim Alan yaklaşımına dayalı modelin merkez boşluğunun boyanmış hali	76
Şekil 5.2. Şekil 3.30’da verilen Birim Alan yaklaşımına dayalı modelin merkez boşluklarının boyanmış hali	78
Şekil 5.3. Şekil 3.37 ve 3.45’te üç numaralı parça için iki farklı kesit üzerinde verilen Birim Alan yaklaşımına dayalı modellerin merkez boşluklarının boyanmış hali	80

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 3.1. Visual Basic hesap makinası kullanıcı ara yüzü.....	29

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler

Açıklamalar

°

Derece (Açı sembolü)

Kısaltmalar

Açıklamalar

BA

Birim Alan

DM

Döküm Modülü

DDY

Dikdörtgen Düz Yüzey

EYT

En Yakın Teğet

KİK

Kare İç Köşe

KDK

Kare Dış Köşe

OY

Ofset Yöntemi

SR

Yapısal Bileşke

SDY

Silindir Dairesel Yüzey

SDÜY

Silindir Düzlemsel Yüzey

1. GİRİŞ

Yapılan döküm işlemlerinde ve çalışmalarında sonuçların tam ve doğru olması için besleyicilerin ve yollukların doğru büyüklükte ve doğru yerlere yerleştirilmeleri gerekmektedir. Bu yerleştirilmeler ve denemelerin yapımı küçük ölçekli fabrikalarda yapılmaktadır. Tam anlamıyla bir döküm elde etmek için besleyicilerin önemi oldukça büyüktür ve bu döküm ile ilgilenen mühendisler tarafından kabul görmektedir. Verimli bir besleyicinin, döküm sırasında olması muhtemel çekmeyi bire bir doldurması için minimum hacme sahip olması gerektiği tüm mühendisler tarafından bilinmektedir. Küçük ölçekli fabrikaların yaptığı deneme yanılma yolu ile öğrenilen bu durum çok maliyetli olmaktadır. Bu maliyeti azaltmak için geliştirilen geometri ve matematik tabanlı modellemelerde basit şekillerle ilerlenmektedir. Basit şekillerin döküm çalışmaları empirik matematiksel eşitliklere dayalıdır. Basit şekillerin besleyici ve yolluklarının doğru kullanılması yine matematiksel eşitliklerle olduğundan dolayı daha kısa zamanda hesaplanır. Günümüzde bu çözümlerin fiziksel, mekanik ve termal özelliklerini de göz önünde bulundurarak bu çözümlemelerin yapılması her zaman gerekli değildir. Aynı şekilde küçük ölçekli fabrikaların bu özellikleri göz önünde bulundurarak satın alıp kullanacakları bilgisayar simülasyon programlarının da maliyetleri oldukça yüksektir. Maliyetlerini karşılaması için de çok fazla sayıda seri üretim yapılması gerekmektedir, böylelikle yüksek olan maliyet göz ardı edilebilir. Buna karşılık olarak daha düşük maliyetli çalışmalar araştırılmış ve döküm işleminin ilk tasarım aşamasında eklenecek besleyicilerin döküm parçası üzerindeki yerlerinin belirlenmesi amacıyla katılaşma izotermelerinin geometrik parametreleri kullanılarak tespit edilmesinde Chvorinov'un temel eşitliği kullanılmaya başlanmıştır. Geometrik parametreler kullanılarak dökümlerin katılaşma izotermelerinin belirlenmesi, çoğunlukla Chvorinov'un temel "Döküm Modülü" (DM) kuralına dayanmaktadır. Bu kural, aşağıda verildiği üzere, başlangıçta dökümlerin katılaşma sürelerini tahmin etmek için kullanılmıştır [1].

$$t = k \cdot \left(\frac{V}{A}\right)^2$$

(1.1)

Yukarıdaki eşitlikte, "t" toplam katılaşma zamanını (dak.), "V" döküm hacmini (cm^3), "A" döküm soğuma yüzey alanını (cm^2), ve "V/A" ise Döküm Modülünü (cm) temsil etmektedir. "k" sabiti ise döküm işlem koşullarına bağlı bir sabittir [1].

Chvorinov'un yaklaşımının geliştirilmesindeki asıl sebep döküm simülasyonunu geometrik tabanlı olacak şekilde uygun maliyetle elde edebilmektir. Bu konudaki başlıca çalışmalardan biri, Kotschi ve Plutshack tarafından bir döküm parçanın döküm modülü prensibi esas alınarak yapılan hesaplamalardır. Ancak, bu hesaplamalarda iç köşeler doğru biçimde hesaplanamamıştır. İç köşeler için çizilen katılma izotermi köşe noktalarında eksik sonuç vermiştir. Bu eksik noktalar 45° çizgilerle tamamlanmıştır [2]. Bu sebepten dolayı farklı bir çalışma Neises ve çalışma arkadaşları tarafından yapılmıştır ve bu çalışma "T" kesitlere uygulanmıştır, ancak silindir ve küre gibi geometrik şekillerde bu çalışmalar yapılmamıştır [3].

Dökümlerdeki olabilecek makro hataları belirlemek döküm endüstrisi açısından önemli bir konudur [4]. Dökümde olası kusurların anlaşılması için geometri tabanlı analiz yöntemi kullanılabilir, bu efektif bir yöntemdir [2, 4-6]. Geometri tabanlı analiz yöntemleri basit geometrik modellerden elde edilen basit deneysel eşitliklere dayandığından dolayı bu yöntemler kısa sürede sonuca ulaşmada kullanılır. Ek olarak, geometri tabanlı analiz yöntemlerinde döküm ve kalıp malzemelerinin tüm fiziksel, mekanik ve nihai özelliklerinin belirlenmesi her zaman gerekli değildir.

Geometrik parametreler kullanılarak dökümlerin katılma izotermi belirlenmesi çoğunlukla kullanılan Chvorinov'un temel "Döküm Modülü" (DM) kuralı Eş. 1.1 aynı V/A değerine sahip iki dökümün, döküm şekli ne olursa olsun aynı anda katılacağını belirtir [1,7]. Benzer döküm koşulları altında, Eş. 1.1 'deki k parametresi belirlenmeden dökümlerin katılma süreleri karşılaştırılabilir [8]. Ek olarak, karmaşık döküm şekilleri basit şekillere ayrılabilir ve her bir şekil için ayrı ayrı DM hesaplamaları yapılabilir [2,8].

İki boyutlu döküm kesitlerinin katılma izotermi belirlemek için DM prensibini geliştirme yönünde çeşitli girişimlerde bulunulmuştur. Burada DM kuralı, $DM = V/A = A/P$ olarak geliştirilmiştir. Burada A kesit alanı ve P ise döküm bölümünün çevresini ifade etmektedir. Çeşitli döküm bölümlerinin katılma izotermi belirlemek için geliştirilmiş DM kuralı uygulanmıştır [9,10].

Katılmanın geometri tabanlı modellenmesi amacıyla Chvorinov'un DM yaklaşımı dışında başka yöntemler de kullanılmaktadır. Bunlardan biri "Medial Eksen Tabanlı İnterpolasyon Yöntemi", (MAT) olarak adlandırılmıştır. MAT yöntemi daha önce biyolojik şekilleri

tanımlamak için kullanıldı. İki boyutlu analizin medial eksenlerini oluşturmak için bir diskin iki boyutlu bir şeklin içine yuvarlanmasıyla medial bir nesne elde edildi. Medial nesne, orijinal nesnenin geometrik bilgilerini korurken indirgenmesidir. Medial nesne yöntemi, dökümlerin katılma izotermelerini simüle etmek için uygulandı ve ısıнын bu medial eksenlerden yaklaşık olarak dikey yönlerde çıkarılması gerekiyordu. Bu yöntem, sınır koşulları ve malzeme özellikleri için daha iyi hassasiyet elde etmek amacıyla tek boyutlu doğrusal olmayan bir ısı iletim denklemi ile desteklenmiştir [6,11,12].

Katılmanın geometri tabanlı matematik modellemesi için başka bir yöntem Birim Alan (BA) yaklaşımıdır. Birim Alan yaklaşımı ilk olarak Özdemir tarafından dökümlerde katılma zamanının belirlenmesi ve besleyicilerin boyutlarının hesaplanması için öne sürülmüştür [13]. Aynı zamanda küp, silindir ve küre biçimli parçalarda iki boyutlu döküm kesitleri ve üç boyutlu parçalar için BA yaklaşımına göre katılma izotermelerinin çizimi için eşitlikler öne sürülmüştür ve iki boyutlu katılma izotermelerinin bilgisayarda nasıl çizilebileceğinin temelleri gösterilmiştir [13]. BA yaklaşımına dayalı katılma zamanı ve besleyici boyutlandırılması hesaplamaları gerçek döküm şartları ile karşılaştırılmış ve olumlu sonuçlar elde edilmiştir. Burada önemli bulgulardan biri, BA değerleri deneysel olarak belirlenen katılma sürelerine göre grafiğe döküldüğünde, farklı döküm geometrilerinin katılma sürelerinin ölçümleri, Chvorinov denkleminde $(V/A)^2$ parametresine karşı bir miktar dağılım gösterirken, BA yaklaşımı ile elde edilen aynı düz çizgiye düşmektedir [13]. Özdemir ve Atasoy tarafından BA yaklaşımı katılma zamanlarının, besleyicilerin boyutlarının hesaplanmasına uygulanmış ve deneysel sonuçlarla karşılaştırması yapılarak DM yaklaşımına göre daha iyi sonuçlar verdiği gösterilmiştir [14]. BA yaklaşımının iki boyutta kare, dikdörtgen, silindirik, küresel, L,T ve artı biçimli döküm kesitleri üzerlerinde yer alan dış köşelere, iç köşelere, silindirlerde yer alan dairesel ve düzlemsel kenarlara ve kürelere uygulanması ise Tüzünalp-Özdemir tarafından yapılmıştır [15]. Bu son çalışma, bu tezin gerçekleştirilmesi için de başlangıcı oluşturmaktadır.

BA yaklaşımının temelinde farklı yönlerde büyüyen döküm tanelerinin karşılaştıkları yerlerde oluşan yapısal bileşke boyutlar bulunmaktadır, Şekil 2.1. Konunun basite indirgenmesi için şekil üzerinde kesikli çizgilerle işaretlenen kare şeklindeki bir dış köşenin iki dik kenarından büyüyen tanelerin oluşturduğu yapısal bileşke dikkate alınmıştır. Bu yapısal bileşke hayali ısı akış yönünün tam ters yönünde bulunmaktadır. Bu dış köşenin soğuması için gereken toplam ısı akışının ise, ısıнын aktığı varsayılan ve şekli olmayan hayali

bir alandan meydana geldiği varsayılmaktadır. Bu hayali alan Birim Alan (BA) olarak tanımlanmaktadır [13-15]. Katılaşan dökümler için tasarlanan bu matematik modelleme aşağıda verilen basitleştirilmiş koşullara bağlı olarak geliştirilmiştir:

1. Isının dökümden homojen bir biçimde dağıtıldığı varsayılmıştır.
2. Döküm işlem parametreleri model içine eklenmemiştir.
3. Sıvı-katı ara yüzeylerinin düzlemsel olduğu varsayılmıştır.
4. Döküm işleminin yolluk ve besleyici sistemlerinden bağımsız halde gerçekleştiği varsayılmıştır.
5. Döküm boşluğunun anında dolduğu ve katılaşmanın kalıp duvarından $t=0$ anında başladığı varsayılmıştır.
6. Kalıbın ısıyı sürekli çekebildiği varsayılmıştır.

BA parametresi, Şekil 2.2’de gösterildiği gibi, söz konusu dış köşenin hacim ve SR değerleri ile aşağıdaki gibi ilişkilendirilmektedir:

$$BA = V/SR$$

(1.2)

Burada, V dökümün hacmi (cm^3), SR yapısal bileşke (cm) ve BA ise Birim Alan değerini (cm^2) temsil etmektedir.

Eş. 1.1’de verilen Chvorinov kuralının aksine, burada katılaşma zamanı dökümün BA değerine aşağıdaki gibi bağlanmaktadır:

$$t = k \cdot BA$$

(1.3)

Burada k metal/kalıp malzemesi ve katılaşma işlem değerlerine bağlıdır. Eğer, malzeme ve döküm işlem parametreleri ihmal edilirse, Eş. 1.4 aşağıdaki şekli almaktadır:

$$t = BA$$

(1.4)

Böylelikle, katılaşma zamanı doğrudan döküm kesitinin birim alanı ile ilişkilendirilmektedir [13]. Bu son eşitlik, malzeme ve döküm işlem değerleri hesaba katılmadan katılaşmanın başından sonuna kadar zamandan bağımsız ve ardışık sırada katılaşma izotermelerinin karmaşık bir döküm kesiti içine çizilebilmesine olanak sağlamaktadır. Bu tez çalışmasında BA yaklaşımına göre yapılan bütün çalışmalar bu temel prensip üzerine dayalı olarak gerçekleştirilecektir. BA yaklaşımının katılaşma zamanlarını ve besleyici boyutlarının hesaplanmasında gösterdiği hassasiyetin [14], katılaşma izotermelerinin çiziminde de temel şekillerde devam ettiği gösterilmiştir [15]. Bu noktadan yola çıkılarak, BA yaklaşımının karmaşık döküm kesitlerinde katılaşma izotermelerinin çiziminde ve olası makro hata noktalarının tahmin edilmesi amacıyla kullanılıp kullanılamayacağı araştırılacaktır.

2. MAKRO KATIŁAŐMA HATALARININ BELİRLENMESİ İÇİN GEOMETRİ TABANLI YÖNTEMLER

Geometri tabanlı katılaşma modelleri, katılaşma aşamalarının ve geometri şekli tarafından yönlendirilen sıcak noktaların konumlarının belirlenmesine dayanmaktadır. Bu yaklaşım metal, kalıp ve ısı transfer sistemlerinin ideal termal özelliklerini kullanarak katılaşma sürecini simüle eder. Sıcaklığın ve katılaşma süresinin ardışık değeri, içindeki herhangi bir nokta ile ilişkili gerçek değerlerden daha büyük önem taşır. Aşağıda günümüzde kullanılan geometri tabanlı modelleme ile geometri tabanlı matematik modelleme yöntemleri sıralanmaktadır:

2.1. Heuvers Çemberi Yöntemi

Bu yöntem, daha önce açıklanan modül ilkesine dayanmaktadır. Şu anlama gelir; eğer katılaşma sırasında sıvı metalin belirli bir alanda hapsolması önlenecekse veya katılaşma belirli bir yöne doğru yönlendirilecekse, yönlü katılaşma prensiplerine göre bir kesitin modülünün sürekli besleyici yönünde artırılması gerekmektedir. Heuvers pratik bir yöntem öneren ilk kişidir. Döküm kesitleri üzerinde besleyici yönünde çapı artan bir dizi daire çizmenin altında yatan varsayım, yarıçapın daha büyük olmasıdır. Dairenin yarıçapı ne kadar büyükse, bu durumda tam katılaşma için gereken sürenin daha uzun olduğudur. Bu yöntemin kendi içindeki sınırlamalarına rağmen, yöntem dökümhane mühendisleri arasında çok popüler kalmıştır [16].

2.2. Döküm Modülü Yöntemi

Bazı araştırmacılar döküm parçalarının ayrı bölümlerinin büyüklükleri ile katılaşma sırası arasında bir ilişki geliştirdiler. Bu bilgi oldukça faydalıdır ancak karmaşık dökümlerin zihinsel olarak "T", "X" , "L" bölümleri gibi bir dizi basit döküm bileşenine ayrılmasını gerektirmiştir. Bu çalışma Döküm Modülüne (V/A) dayandığından sonuçlar şöyledir; yalnızca kalıp bileşenlerinin geometrisine ve metalin önceden bilinmesine bağlıdır. Döküm Modül Yöntemi'nde ısı transferi ve fiziksel özellikler ihmal edildiğinden, belirli bir miktar hassasiyet kaybı beklenmiştir. Döküm Modülü yaklaşımı biraz ilkel olsa da, eskiden yalnızca klasik ısı transferi veya FEM veya FDM teknikleriyle ilişkilendirilen faydaların çoğu, bazı araştırmacılar tarafından tartışılan yaklaşım kullanılarak gerçekleştirilebilmektedir. Bazı

araştırmacılar tarafından tartışıldığı gibi, Döküm Modülü iki terimden oluşmaktadır: hacim ve yüzey alanı. Bu iki terimi en geniş anlamıyla ele alarak hacim terimi ısı içeriğine eşitlenebilir ve yüzey alanı ise ısı çıkarma hızı ile ilişkilendirilebilmektedir. Bu şekilde bakıldığında, bir çil ve kalıplama kumu arasındaki termal yayılımdaki farklılıklar, Döküm Modülü'nün yüzey alanı terimine bir çarpan faktörü ile yerleştirilebilmiştir. Döküm Modülü yaklaşımı, klasik ısı transferi yöntemlerinin titizliğinden yoksundur, ancak üç boyutlu ısı transferi probleminin çözümüne yönelik yeterli bir mühendislik yaklaşımı için bir temel sağlamıştır [2].

2.3. Geliştirilmiş Modül Yöntemi

Geometrik parametreler kullanılarak dökümlerin katılaşma izotermelerinin belirlenmesi çoğunlukla Chvorinov'un temel DM kuralına dayandığından önceki bölümde bahsedilmişti. Chvorinov'un kuralı, aynı V/A değerine sahip iki dökümün, döküm şekli ne olursa olsun aynı anda katılaşacağını belirtmektedir. Ek olarak, karmaşık döküm şekilleri basit şekillere ayrılabilirdiği gibi her bir şekil için ayrı ayrı DM hesaplamaları yapılabilmektedir. DM kuralı, $DM = V/A = A/P$ olduğu, burada A , kesit alanı ve P , döküm bölümünün çevresi olduğu için daha da geliştirilmiştir. A/P olarak ilerlenen bu çalışmanın adı ise Geliştirilmiş Modül Yöntemi olarak bilinmektedir [9,10].

2.4. Kesit Üzerinde Modül Hesaplama Yöntemi

Wlodawer [8], besleyiciyi tasarlamak için Chvorinov kuralını kullandı ve ona göre besleyicinin modülü, dökümün modülünden daha büyüktür. Daha karmaşık geometriler, daha basit şekle ve modüle bölünmüştür. Burada her bir kısım hesaplanır. Modülün en büyük değeri, son katılaşma noktası değerini gösterecektir. Katılaşan metal kalınlığı ve buna karşılık gelen Döküm Modülü, döküm boyunca artar ve katılaşmanın son noktasına ulaşılır. Bu katılaşma ilerlemesi dökümdeki son katılaşma noktası olarak bilinir.

Geliştirilmiş Modül yönteminin özü, gerçek üç boyutlu bir döküm parçasını kesitlere ayırmak, temel geometrik cisimlere dönüştürmek ve 'hacim/yüzey alanı' oranını hesaplamaktır. Sadece kalıba temas eden döküm yüzeyleri (örneğin kum) yüzey alanı olarak dâhil edilir. Temas yüzeylerine dökümün diğer bileşenlerini birleştirdiği gövde dâhil değildir, çünkü uzun süreler boyunca bu yüzeylerde çok az soğuma meydana gelir veya hiç

olmaz. Wlodawer tarafından özetlenen yaklaşıma göre, besleyici dökümün 1,2 katı alınır ve besleyiciler dökümden sonra katılaşır [16].

2.5. Vektörel Modül Yöntemi (Modulus Vector Method)

Sıcak noktaların belirlenmesi ve besleme yollarının simülasyonu için yararlı olan, dökümlerin katılma analizine yönelik yeni bir geometri tabanlı yaklaşım anlatılmaktadır. Bu teknik, yazılı daire yöntemini kullanarak bir döküm bölümünde kütle konsantrasyonu bölgelerini tespit etmek için bir program uygulanırken keşfedilmiştir. Bu amaçla, bir kesit içinde belirli bir noktadan tüm yönlere ışınlar yansıtılmış ve kesit sınırları ile kesişmeleri hesaplanmıştır. Bu ışınlar boyunca vektörlerin bileşkesinin sıcak noktaya işaret ettiği bulunmuştur. Daha sonra, vektör uzunluklarını modül cinsinden hesaplamak için daha iyi bir yöntem tanıtılmıştır [17].

2.6. Termal Gradyan ve Modül Yöntemi

Katılma bir dökümde, kalın kısımdaki metal sıvı kalır. Sıcaklık dökümün katılmış uçlarına doğru düşerken bir sıcaklık gradyanı katılmaı yönlendiren besleyiciye doğru gelişir. Pellini (1952), Wlodawer'in [8] düşüncesini alıntılararak, sağlam bir döküm elde etmek için, katılma alan ($0,5^{\circ}\text{C}$ daha sıcak olan döküm) bitişik bir bölümden beslenebilirken, bir plakadaki sıcaklık gradyanı plakanın en az $0,5^{\circ}\text{C}/\text{cm}$ uzunluğunda olmalı düşüncesi ile hareket etmiştir. Sonuçlarına göre de bu savunmanın kum kalıba dökülen çelik için de geçerli olduğu kanısına varılmıştır. Daha uzun katılma süresine sahip bir kesit ayrıca daha büyük modüle de sahiptir, şeklinde bir sonuç ortaya çıkmıştır [16].

2.7. Şekil Faktörü Yöntemi

Berry tarafından açıklandığı gibi Chvorinov'un yaklaşımı Wlodawer katılma süresini tatmin edici bir şekilde ifade edememektedir. Berry, Chvorinov ve Wlodawer ile katılma süresinin değiştiğini göstermek için deneyler yapmıştır. Katılma süresinin aynı modül değerlerine sahip farklı şekilli dökümler için bile değişmekte olduğunu gözlemlemiştir. Berry aynı zamanda Chvorinov ve Wlodawer hesaplama yaparken şekilden etkilendiğini rapor etmiştir. Berry'e göre geometrik modül kullanılmadan önce katılma süresi doğru hesaplamak için bir faktörle çarpılmalıdır. Eğer Dökümün şekli bölgeden bölgeye

değişiyorsa, katılaşımadaki sapmaların dikkate alınması gerektiğini Jamar önermiştir. Tiryakioğlu'nun da bu konuda, besleyici-döküm şekil faktörü oranı besleyici bir verimlilik oranına sahiptir, şeklinde bir savunması olmuştur [16].

2.8. Orta Eksen Tabanlı Enterpolasyon Yöntemi (MAT = Medial Axis Interpolation Technique)

Bir katının medial nesnesi (orta eksenleri), kapsamlı bilgi sağlayan iskelet temsili geometrik temelli çeşitli uygulamalar için daha fazla kullanılabilir, olarak tanımlanır. İki boyutlu bir bölgenin medial eksen dönüşümü 1960'larda biyolojik şekilleri tanımlamak için ilk olarak tanıtılmıştır. Bir kesitin içinde bir disk yuvarlamak veya cisim üç boyutlu ise, bir hacim içinde bir kürenin yuvarlanması ile medial nesne inşa edildi. Böylece en az iki noktada etki alanı sınırı ile teması sürdürürken, iki boyutlu bir bölgenin medial eksen dönüşümü merkezin bir odağı olduğu savunulmuştur. Tüm bu iç mekanların merkezleri, maksimal diskler, medial noktalar olarak bilinir. Medial eksen üç boyutlu bir nesne için medial yüzeye dönüşür. Medial nesne, parçanın yarıçap bilgisi taşıyarak, orjinal nesneyi birebir temsil eder. Bu nedenle, iki boyutlu döküm bölümleri olduğu takdirde, MAT'ın tek boyutlu bir büyüklük olduğu görülmektedir. Medial nesne terimi hem bir yüzeyin orta eksenini hem de bir katının orta yüzeyini temsil eder. Önerilen tek boyutlu enterpolasyon şemasının uygulanmasındaki ilk adım, tek boyutlu bir çubuk için geçici sıcaklık profillerini ve sonra değişen uzunluklarda daha fazla çubukları incelemektir. Ayrıca, test amaçlı özellikler için basitleştirilmiş birim değerleri varsayılmıştır, böylece kodun hata ayıklaması kolaylaşmıştır. Test aşamasından sonra koşullar simülasyon malzeme özellikleri ve sınırları için gerçekçi değerler kullanılarak gerçekleştirilir. Orta eksene dik olan bir döküm geometrisi tek boyutlu bir çubuktur. Bu çubuktan gelen bu veri bankası enterpolasyon algoritması tarafından daha sonra kullanılmak üzere saklanır. Döküm modeli daha sonra CADfix yazılımı ve medial eksenler kullanılarak oluşturulur ve belirli bir dökümün orta yarıçapları CADfix kullanılarak elde edilir. Dökümdeki orta eksenlere dik olan tüm koordinat noktaları, d , artık maksimum yarıçap R 'ye göre normalleştirilebilir. Son olarak, hesaplanmış olan tek boyutlu sıcaklık çözümü etki alanı ve bir veri bankasında saklanır [6,11,12,16].

2.9. Birim Alan Yöntemi

Yukarıdaki yöntemlerde görebileceğiniz üzere, döküm yapılacak olan geometrik şekilleri dikkate alarak hesaplanacak şekil tanıma özellikli bir çalışma olmamasından kaynaklı olarak geliştirilen Birim Alan Yöntemi daha hassas sonuçlar vererek doğru sonuca, hatasız döküme daha çok yaklaştırmaktadır. Karmaşık parçaların gerçek, fiziksel döküm yapıldığı zaman çıkabilecek sonuçları, Birim Alan Yöntemi ile ilerleyerek elde edebileceğimiz için bu çalışma ile ilenmiştir [13-15].

2.10. Katılaşmanın Geometri Tabanlı Modellerinde Güncel Yöntemler

İlk yöntem, katılaşmanın geometri tabanlı modellemelerinde birçok deneyler yapılmıştır. Bir fazın alternatif bir ergime ve katılaşma döngüsünü simüle etmek için yüksek doğrulukta bir sayısal model kullanılmıştır. Bu davranış ısı ile bağlantılıdır. Konvektif ısı transferi gerçekten de ergime sürecine hâkimdir, dolayısıyla ısı transferini artırır, katılaşma sırasında ana ısı transfer modu iletim iken, daha yavaş bir çalışma sürecine neden olur. PCM (phase-change material) tamamen katılaşmasa da, etkinliği önemli ölçüde azaltılabilir. Bu durumda daha kısa olması için soğutma süresi PCM'nin tamamen eritilmesi tavsiye edilmez. Ancak, güneş enerjisi depolama uygulamaları için tam ergime gizli ısı depolama kapasitesini kullanmak için PCM gereklidir. Bu nedenle, kısmi ergime optimal değildir. Diğer uygulamalar için (daha kısa olduğunda deşarj süresine ihtiyaç duyulduğunda) harici soğutma tekniklerinin kullanılması daha soğuk bir tahliye sıcaklığı sağlamak için gereklidir [21].

2 Numaralı bir yöntem de, iki boyutlu bir alanda kalıcı bir kalıpta ikili alaşım katılaşma işleminin sayısal modelleme yöntemi sunulmaktadır. Model, kalıp ile döküm arasında var olan değişken genişlikteki gaz boşluğunun katılaşma süreci üzerindeki etkisini hesaba katar. Sayısal model, döküm ve kalıbın bağımsız uzaysal ayrıklaştırılmasıyla sonlu elemanlar yöntemine (FEM) dayanmaktadır. Hacimlerinin ısıya bağlı değişimlerinden kaynaklanan bu bölgelerin yer değiştirmeleri de hesaba katılır. Kabul edilen yaklaşım, geçici sıcaklık alanlarının elde edildiği iki ayrı ağı kullanımlarını içerir. Döküm ve kalıp arasındaki termal etkileşim, uygun sınır koşulu ile tanımlanır. Çözüm, her bölge için bağımsız olarak her zaman adımında sırayla elde edilir. Sunulan matematiksel ve sayısal katılaşma modelleri ve hesaplamaların sonuçları, gaz boşluğunun dökümün soğutma koşulları üzerindeki etkisinin önemini göstermektedir. Kalıptaki ve dökümdeki bağımsız ağlara dayanmayı tarif eden

yaklaşım, global eşitlik setinin sıralı çözümü nedeniyle çok fazla operasyonel bellek tasarrufu yapmayı mümkün kılar. Daha fazla çalışma, termal olarak deforme olmuş bölgelerin mekanik etkileşiminin modele eklenmesinin yanı sıra boşluktaki radyasyonun etkisine odaklanmıştır. Döküm karmaşık dış sınırlara sahip olduğunda boşluğun yerini ve genişliğini doğru bir şekilde tahmin etmek önemlidir [22].

Bir diğer yöntem, aşırı soğutmanın etkileri birleştirilmiş faz değişim süreci, ısı transferi ve sıvı akışını kullanır ve son olarak, TEM sisteminde termal enerjinin oluşumu tarif edilir. Model kullanılarak tahmin edilen sıcaklık-zaman değişimi karşılaştırılmış, yayınlanan deneysel sonuçların çok iyi olduğu gözlemlenmiştir. Çeşitli aşamaları, yani; sıvı varlığında katılaşma süreci hal soğutması, aşırı soğuması, kinetik katılaşma ve yeniden değerlendirme, sabit sıcaklıkta katılaşma ve katı hal soğutması mevcut model tarafından tahmin edilmiştir [23].

Kısa sürede katılaşan malzemelerde çekme kusurları gözeneklilik olarak ortaya çıkma eğilimi gösterirken, uzun sürede katılaşan malzemelerde bu kusurlar yüzey çöküntüleri şeklinde olabilir. Bunu başarmak için 3-D tabanlı bir basınç düşüşü ile döküm alaşımları için çekme kusurlarını değerlendirmek için besleme akış modeli geliştirilmiştir. Bu süreklilik formülasyonu kütle, enerji ve momentumun taşınmasını tanımlamak için kullanılır. Katılaşma sırasında akış için itici gücün büzülme olduğu varsayılır. Model, basit bir dökümde çekmeyi hesaplamak için kullanılır. Sonuçlar metalin katılaşma aralığına bağlı olarak iç ve dış çekme kusurlarını gösterir. Kısa katılaşma aralığı, esas olarak iç çekmeye neden olurken, uzun katılaşma aralığı dış çekmeye neden olur [24].

Tanımlanan matematiksel ve sayısal katılaşma modeli, keskin katılaşma cephesindeki koşulları doğru bir şekilde saf metallerin işlem sürekliliğini hesaba katmasını sağlar. Seviye seti yöntemine dayalı sunulan ön izleme tekniği hareketli iç sınırlarla ilgili sorunları çözmek için kullanışlı bir araçtır. Sonlu elemanlar yöntemine dayalı olarak sunulan formülasyon ev içi bilgisayar programı oluşturmak için bir temel sağlar. Katılaşmanın çözünen dağılımını dikkate alan süreç daha ileri analizi için başlangıç yapar [25].

Piksel, aydınlatılmış 2-D'nin temel bileşeni olduğu için desenleme sonuçlarını tahmin etmek, desenleme sürecindeki görüntüleri açıklamak için bir matematiksel model tek bir pikselin yoğunluk dağılımı için oluşturuldu ve daha sonra bir katılaşma modelinin geliştirilmesine uygulandı. Son olarak, model tahminlerini deneysel verilerle karşılaştırarak doğrulandı 2

boyutlu görüntülerle bir desenleme işlemi kullanılarak elde edildi. Fizibilite modeli başarıyla sergilendi [26].

Son yöntemde, pek çok malzemenin nominal faz değişim sıcaklığında katılaşmadığı iyi bilinmektedir. Daha doğrusu, çekirdeklenme içlerinde daha düşük bir sıcaklıkta katılaşma meydana gelir. Bu fenomene genellikle “süper soğutma” veya literatürde “aşırı soğutma” adı verilir. Anlama, tahmin etme ve mümkünse önleme veya en azından azaltma, özellikle gizli ısı termal enerji depolama (LHTES) sistemleri için çok önemlidir. Çünkü daha yüksek verim elde etmek için içlerindeki sıcaklık farkları küçük olmalıdır. Kinetik katılaşma hızı, aktivasyon enerjisine bağlıdır, sıcaklığa ve dolayısıyla zamana bağlıdır. Model pürüzsüz bir görünüm sağlar, ayrıca fiziksel olarak sağlam katılaşma modelleri elde edilir. Bu çalışmada, çok boyutlu yeni bir matematiksel model süper soğutma ile katılaştırma geliştirilmiştir. Entalpi formülasyonuna dayalıdır ve kurum içi bir sistem kullanılarak çözülür. Model tek fazlı da dahil olmak üzere sürecin tüm temel aşamalarını nicel olarak başlangıç durumundan çekirdeklenme sıcaklığına sıvı soğutma, hızlı bir sıcaklığın eşlik ettiği kinetik çekirdeklenme nominal faz değişim sıcaklığına yükselme, düzenli katılaşma ve son olarak katı fazın soğutulmasını açıklamaktadır. Aktivasyon enerjisine dayalı katılaşma hızı kinetiği belirler. Bu çalışmada kullanılan fiziksel formülasyon olarak anlamlı bir kinetik katılaşmadan normal aşamaya geçiş sadece çevreye olan ısı kaybı ile tanımlanır. Özellikle zamana bağlı malzeme içindeki çeşitli noktalarda sıcaklık davranışı tahmin edilir ve sınırlarla ilgili konunun etkileri gösterilir. Böylece, korurken fiziksel olarak sağlam katılaşma kalıpları enerji dengeleri tamamen tanımlanan model, makale karmaşık modellemede önemli bir adım sunmaktadır [27].

2.11. Chvorinov Yönteminin Yetersizlikleri

Chvorinov yaklaşımı döküm parçalarının geometri tabanlı matematik modellemesinde temel bir kilometre taşıdır. Ancak, sahip olduğu bazı yetersizlikler daha sonra BA yaklaşımı gibi birçok yeni modelleme tekniğinin geliştirilmesine neden olmuştur.

Chvorinov'un ardından Caine, Adams ve Taylor, Wlodawer, 'Ruddle, Johns, McAdams ve Creese, besleyicilerin boyutlandırılmasına daha tatmin edici bir yaklaşım için Chvorinov eşitliğini esas alarak bazı öneriler ortaya koymuştur. Caine çelik dökümler için gözlemlerinden yola çıkarak bir hesaplama geliştirmiştir, bulduğu bu yaklaşım sağlam ve düzgün dökümlerin yapılmasını sağlamakla birlikte, aynı zamanda zahmetli hesaplamalar

gerektirmiştir. Bishop, Caine'in yaklaşımının üzerinde çalışıp bir takım değişiklikler yaptıktan sonra, dökümün boyutlarına göre hesaplanan sözde bir şekil faktörü kullanan NRL (Naval Research Laboratory) yöntemi olarak bilinen yeni bir yöntem önermiştir. Adams tarafından geliştirilen eşitlik, hem katılma sırasında oluşan shrinkage boşluğunu hem de Chvorinov'un katılma süresini dikkate alarak bazı eşitlikler bulmuş fakat pratik uygulamaya konulmamıştır. Bu belirtilen isimlerin haricinde, Chvorinov'un yaklaşımı, birkaç çalışan tarafından da eleştirildi ve değiştirildi. Flemings, Chvorinov'un önerisinin mükemmel olduğunu düşünmesiyle birlikte, aynı zamanda eksikliğinden bahsetmiştir. Dökümlerde yaygın bir olay olan katılma çekmesini içermediği savunmuştur. Wlodawer, bir döküm modülü yöntemi önermiştir ve farklı geometrilerin dökümlerinin döküm modülü hesaplamalarını açıklamıştır. Bu yaklaşımda besleyicinin döküm modülü dökümün 1,2 katı olarak alınmıştır ve besleyicinin dökümden daha sonra katıldığını varsayılmıştır. Öte yandan Kondic ve arkadaşları, Chvorinov'un yaklaşımının katılma süresini tatmin edici bir şekilde ifade etmediğini savundular. Deneysel sonuçlara dayanarak, eşit döküm modülü değerlerine sahip farklı şekilli (örn. küp ve silindir) dökümler için bile katılma süresinin dökümün geometrisi ile değiştiğini gösterdiler. Hesaplamaları basitleştirmek ve daha doğru sonuçlar elde etmek için girişimlerde de bulunulmuştur. Ruddle, döküm modülünün yanı sıra döküm hacmini de dikkate alırken, Johns döküm modülünün yanı sıra döküm ağırlığını da hesaba katmıştır. McAdams tarafından çelik dökümler için geliştirilen Q-numarası sistemi esas olarak modül yaklaşımını temel alarak ve bazı düzeltme faktörlerini içermiştir. Creese ise tüm dökümlerde uygulanabilir hale getirmek için Q-numarası yöntemini bazı değişikliklerde bulunmuştur. Sağlam dökümler elde etmek için çözülmesi gereken zorlukların, temelde Chvorinov'un yaklaşımının, dökümlerin katılma süresini hesaplayamamasından kaynaklandığını anlaşılmıştır. Flemings, Chvorinov'un yaklaşımının eksikliğini shrinkage sebebiyle olduğunu açıklamaya çalışsa da, problem, dökümlerin katılma süresinin hesaplanmasında mevcut yöntemlerin yetersizliğinden kaynaklanmaktadır [14].

Tiryakioğlu ise, çalışmalarında Chvorinov yaklaşımının en önemli eksikliğinin şekil faktörünü dikkate almaması olduğunu öne sürmüş ve Chvorinov'un döküm modülü prensibini geliştirmek için düzeltmeler ve geliştirmeler önermiştir [18-20]. Burada orijinal Chvorinov kuralını katılma zamanı bakımından geliştirmek amacıyla dökümlerin boyut ve şekil faktörlerini Eş. 1.1'de verilen Chvorinov eşitliğine ekleyerek daha iyi katılma zamanı sonuçları elde edebilmek için çalışmalar yapılmıştır. Bu eşitlik kullanılarak araştırma yapan

akademik çalışmalarda, farklı geometrik şekillerdeki malzemelerin katılma sürelerinde aynı hacme sahip farklı şekillerde (örneğin küp ve silindir) herhangi bir farklılığı gösteremediği belirtilmiştir [13-15,28].

Bu çalışmada, katılmayı modellemeye çalışan mevcut geometri tabanlı matematik modellerinin şekil faktörü bakımından matematik eşitlikleri eklenerek geliştirilmesinin yerine, en temel geometrik çıkarım aşamasında şekil faktörünü içinde barındırdığı bildirilen Birim Alan yaklaşımının, katılma zamanını da doğru ifade ettiğinin öne sürülmesi nedeniyle [13,14], bu avantajının, karmaşık döküm kesitlerinin katılma izotermelerinin çiziminde kullanılabileceği düşünülmüş ve olası makro hata noktalarının tespitinde hangi hassasiyette sonuçlar verebileceği araştırılmıştır.

2.12. Katılma İzotermelerini Belirlemek İçin BA Yaklaşımının Uygulanması

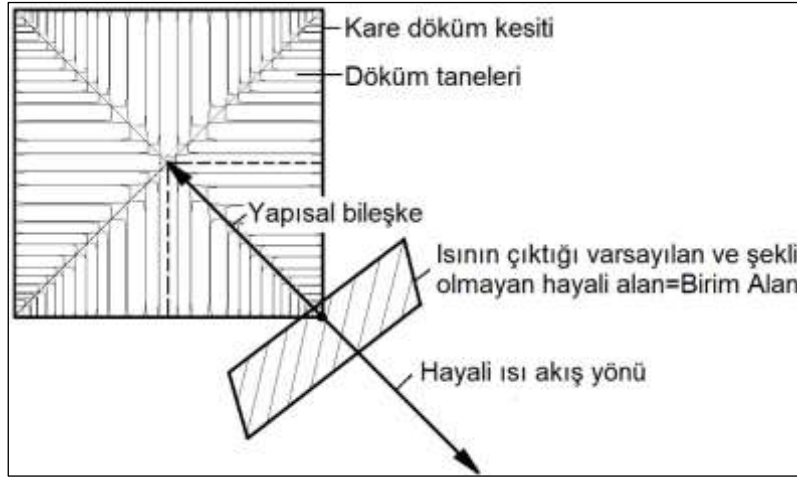
Birim Alan yaklaşımı ilerleyen katılmanın makro analizi için kullanılabilecek geometri tabanlı bir matematik modelledir. Katılma zamanlarının belirlenmesinde, besleyici boyutlarının tespitinde ve katılma izotermelerinin çiziminde kullanılabilecek basit matematik yapıları bir araçtır. Bu bakımdan bilinen profesyonel döküm simülasyon programlarına alternatif oluşturacak bir özellik taşımamaktadır. Bunun yerine, döküm simülasyon programlarına hazırlık amacıyla, ilk deneme amaçlı döküm tasarımı yapılırken yardımcı olabilecek bir nitelik taşımaktadır. Bunun yanı sıra, profesyonel döküm simülasyon programı satın almak için maddi gücü yeterli olmayan küçük ve orta ölçekli işletmelerde dökümün ilk tasarımı için yardımcı bir araç olarak kullanılabilir. Örneğin, Ankara ilinde yer alan Alfa Döküm ve Makina San. ve Tic. İth. İhr. Ltd. Şti.'de dökülen parçaların katılma zamanlarının hesaplanmasında, besleyicilerinin boyutlarının etkili ve verimli olarak hesaplanmasında yoğun olarak kullanılmakta ve %70 sağlam döküm elde edilebilecek ölçüde doğru sonuçlar verdiği bildirilmektedir. Bu tez çalışmasında ise, BA yaklaşımının eksik kalan son aşaması olan katılma izotermelerinin karmaşık döküm parçaları üzerinde çizilmesi konusu, bu karmaşık döküm parçalarının kesitleri üzerinde detaylı olarak incelenmektedir. Bu sayede, dökümlerin ilk tasarım aşamasında Alfa Döküm firmasında etkili ve verimli besleyici boyutlarının hesaplanabilmesi ile birlikte, besleyicilerin dökümün hangi konumuna yerleştirilebileceği hakkında da daha çok bilgi sahibi olunması amaçlanmaktadır.

BA yaklaşımının temel şekillere uygulaması çalışması daha önce yapılmıştı [15]. Aynı çalışmada, küp, dikdörtgen prizma, silindir, küre, “L”, “T” ve artı biçimli döküm kesitleri üzerinde katılma izotermelerinin iki boyutlu çizim metodları gösterilmişti. Bu çizimler yapılırken, ilgili kesitler üzerinde ortaya çıkan temel geometrik kavşak noktaları üzerinde izotermelerin çizilebilmesini BA yaklaşımına dayalı matematik eşitlikleri ortaya konulmuştur. Bu kavşak noktaları, kare dış köşeler (KDK), kare iç köşeler (KİK), silindir dairesel yüzeyler (SDY), silindir düzlem yüzeyler (SDÜY) ve kürelerin iki boyutlu kesitleri olarak gösterilmiştir [15].

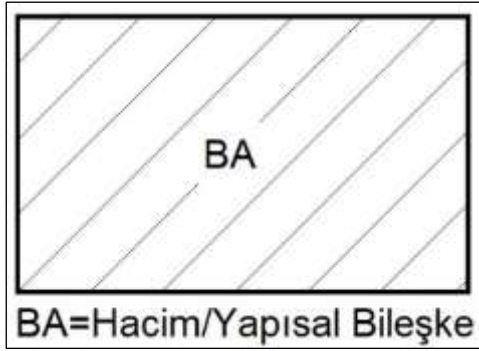
Bu tez kapsamında yukarıda verilen beş kavşak noktası tipi kullanılarak, dökümlerin karmaşık kesitleri üzerinde de BA yaklaşımının ilerleyen katılma izotermelerinin çizimine uygulanabileceği gösterilmeye çalışılacaktır.

2.13. Kübik Döküm Kesitlerinin Katılma İzotermelerinin Belirlenmesi

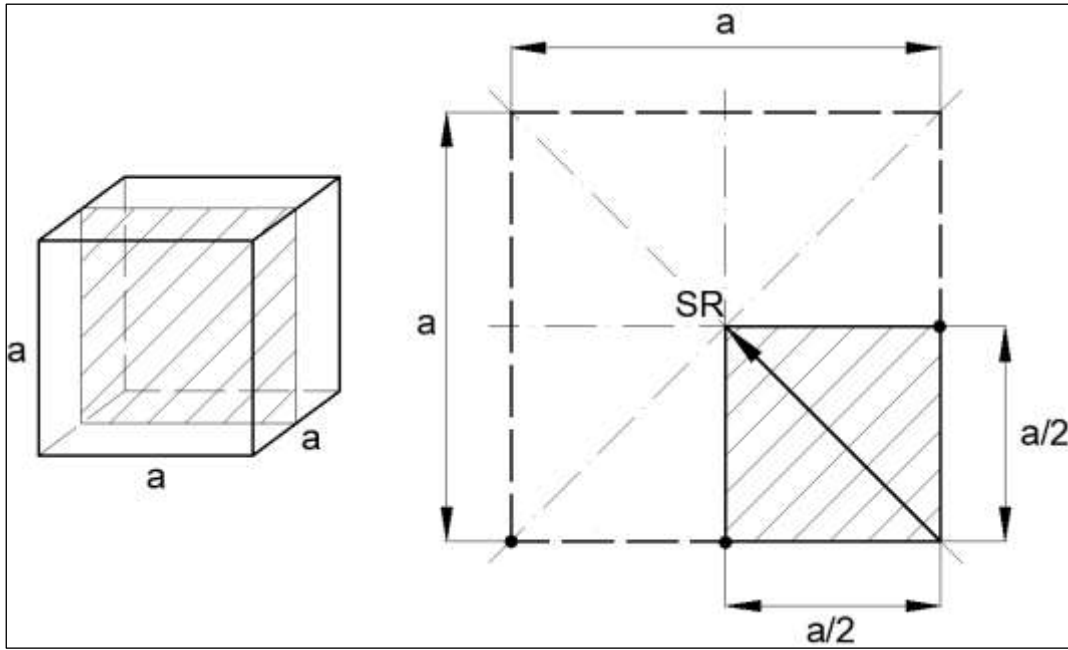
Eş. 1.4 kullanılarak kare bir kesit üzerinde katılma izotermelerinin çiziminin metodu daha önce detaylı bir biçimde gösterilmişti [15]. Buna göre, axaxa cm ölçülere sahip bir küpün kesiti alındığında axa mm boyutlarında kare bir döküm kesiti ortaya çıkmaktadır, Şekil 2.3.



Şekil 2.1. Birim Alan yaklaşımını tanımlamak için oluşturulan yapısal bileşke [13-15]



Şekil 2.2. Toplam hayali yüzey alanından Birim Alan'ının belirlenmesi [13-15]



Şekil 2.3. Bir kare dış köşede BA değerinin hesaplanması için önerilen model [13-15]

Bu kesit üzerinde yer alan dört dış köşeden bir tanesi inceleme altına alınmaktadır. İncelenecek dış köşenin ölçüleri $(a/2) \times (a/2)$ cm² dir. Eş. 1.2'ye göre $BA=V/SR$ olduğu için, bu iki boyutlu dış köşenin hacmi:

$$V = \frac{a}{2} \cdot \frac{a}{2}$$

Yapısal bileşkesinin değeri ise:

$$SR = \sqrt{\left(\frac{a}{2}\right)^2 + \left(\frac{a}{2}\right)^2}$$

(1.5)

$$x = \sqrt{\frac{y^2}{\left(\frac{y}{tp}\right)^2 - 1}} \quad (1.7)$$

$$y = \sqrt{\frac{x^2}{\left(\frac{x}{tp}\right)^2 - 1}} \quad (1.8)$$

Olacaktır. Buradan BA değeri:

$$BA = \frac{V}{SR} = \frac{\frac{a}{2} \cdot \frac{a}{2}}{\sqrt{\left(\frac{a}{2}\right)^2 + \left(\frac{a}{2}\right)^2}} \quad (1.6)$$

Olarak bulunabilir. Modeli kartazyen koordinat değerleri ile göstermek için $x=a/2$ ve $y=a/2$ alınabilir. Ayrıca Eş. 1.4'e göre katılma zamanı, $t=BA$ olduğundan ve bu çalışmada katılma izotermelerinin belirlenebilmesi için gerçek zaman yerine ardışık zaman aralıkları

Kullanılacağından dolayı $t_p=BA$ alınacaktır. Burada t_p ardışık zaman parametresini temsil etmektedir. Sonuç olarak:

$$BA = t_p = \frac{x \cdot y}{\sqrt{(x)^2 + (y)^2}} \quad (1.9)$$

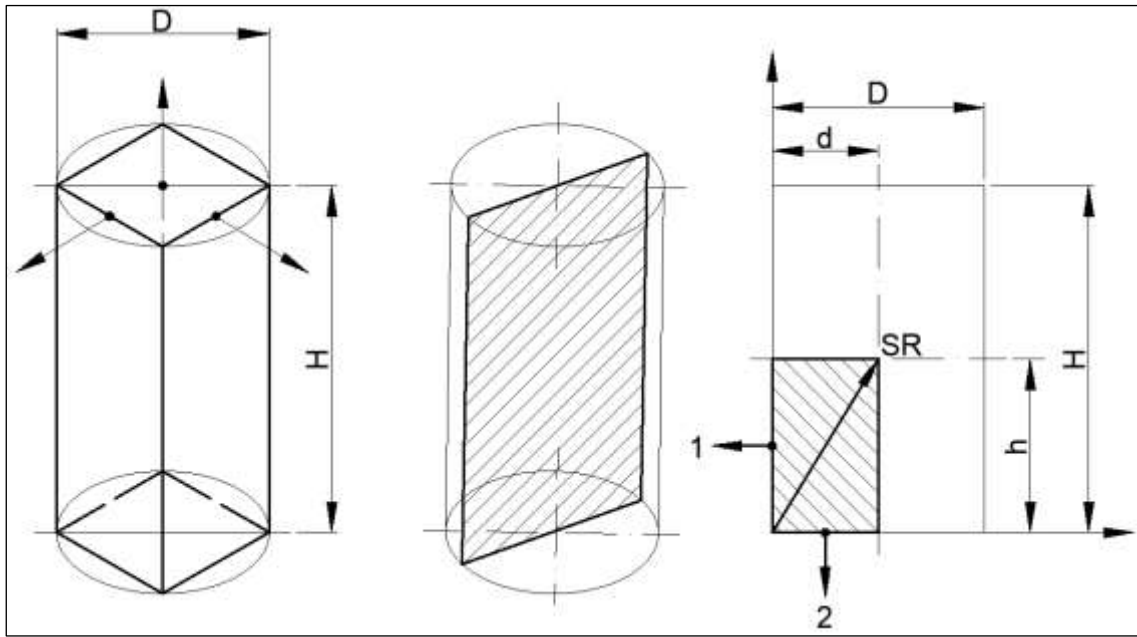
Eşitliği elde edilecektir. Bu eşitlik x ve y bileşenleri için çözüldüğünde Eş. 1.7 ve 1.8 elde edilecektir [13-15]:

Eş. 1.7 ve Eş. 1.8 kullanılarak, bütün döküm kesitlerinde kare dış köşe bulunan bütün noktalarda, bu kare dış köşe için katılma izotermelerinin kalıp dış kenarından başlayarak merkeze doğru ilerlemesi geometri tabanlı olarak simule edilebilmektedir.

2.14. Silindirlerin 2 Boyutlu Bölümlerinin Katılma İzotermelerinin Belirlenmesi

Silindirlerde bulunan dairesel ve düzlemsel yüzeylerin BA yaklaşımına göre modellenebilmesi için bir silindirin içine kare prizma yerleştirildi [13-15]. Bu prizmanın

boyutları kullanılarak kare dış köşelere benzer bir modelleme yapıldı ancak farklı olarak, silindir dairesel yüzeylerde yay ölçüleri dikkate alınmıştır. Bu nedenle BA yaklaşımı, silindirlerde şekil faktörünü de dikkate aldığından daha önce Chvorinov'a dayalı modellemelerden ayrılmaktadır. Silindir şekiller için uygulanan BA tabanlı modelleme önceki kaynaklardan detaylı biçimde incelenebilir [13-15].



Şekil 2.4. Silindirik döküm parçalarının BA yaklaşımına göre modelleme yöntemi

Sayısal bir durum olarak, katılma izotermelerini belirlemek için bir silindirin $H = D = 10$ cm'lik bir silindirik döküm kesiti incelenmiştir, Şekil 2.4. Katılma izotermelerini eşit zaman aralıklarında çizmek için bir VB programı hazırlanmıştır. Eş. 1.10 ve Eş. 1.11, yukarıda verilen ölçülerdeki bir silindir için katılma izotermelerinin grafiğini çizmek için sırasıyla bölge 1 ve bölge 2 için kullanılır, çünkü bölge 1, yarıçap, r (veya x) ve bölge 2, yükseklik, h (veya y) ile ilgili olan alt yüzeyden ısı transferinden etkilenir. Silindir kesitinin kalan üç çeyreği, katılma izotermeleri bölgeleri 1 ve 2'nin dikey ve yatay eksenlere uygun simetrisi alınarak elde edilebilmektedir.

Önceki kaynaklarda detaylı olarak verilen [13-15] hesaplamalar yapıldıktan sonra, dairesel yüzeyden modelleme için Eş. 1.10 ve düzlemsel (burada taban) yüzeyden soğuma için ise Eş. 1.11 kullanılmaktadır. Bu iki eşitlik, silindirler için dairesel yüzey ile düzlemsel yüzeyi

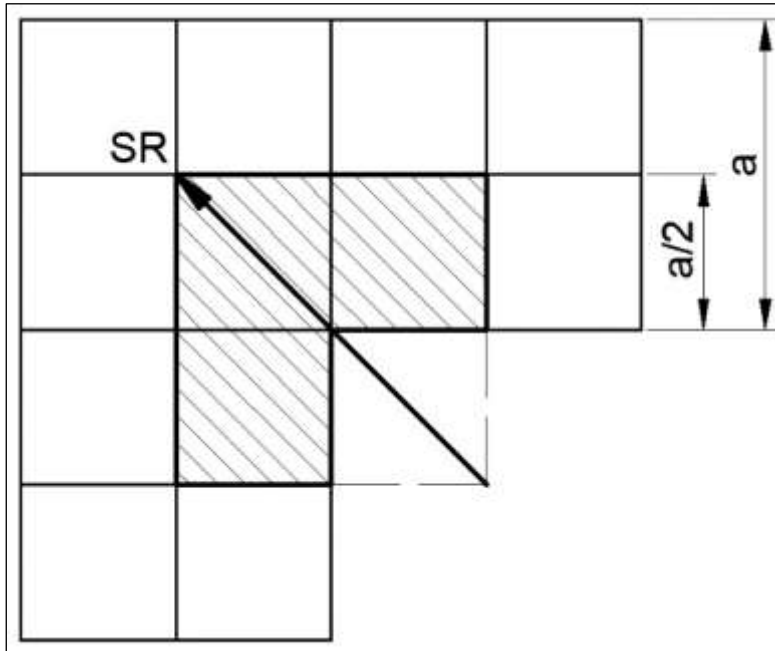
ayrı ayrı modelleyebildiği için, Chvorinov'un döküm modülü yaklaşımının şekil faktörünü dikkate almaması problemi, BA yaklaşımı ile çözülebilmektedir. Aynı zamanda bu eşitlikler kare dış köşeler için elde edilen eşitlikler ile de farklılık göstermektedir. Bu nedenle, BA yaklaşımı kare dış köşeler ile silindirlerde bulunan yüzeylerdeki farklı ısı akışlarını modelleyebilmektedir.

$$x = \sqrt{\frac{y^2}{\left(\frac{y}{t_p}\right)^2 - 1,232}} \quad (1.10)$$

$$x = \sqrt{\frac{1,232 \cdot x^2}{\left(\frac{x}{t_p}\right)^2 - 1}} \quad (1.11)$$

2.15. İç Köşelerin Katılma İzotermlerinin Belirlenmesi

İç köşelerin geometri tabanlı matematik modellemesi daha önce Chvorinov'a dayalı modellemelerde problem oluştuyordu [2]. Ancak, BA yaklaşımı iç köşeleri ilk defa geometri tabanlı olarak modelleyebilmiştir, Şekil 2.5 [15]. İç köşelerin BA yaklaşımına göre modellenmesi, aynı yaklaşıma göre kare dış köşelerin modellenmesine benzerdir, ancak burada iç köşenin geometrik yapısına uyum sağlamak için köşenin iç kısmundan bir kare eksiltilmiş ve modelleme buna göre yapılmıştır.



Şekil 2.5. Kare iç köşelerin BA yaklaşımına göre modellenmesi için önerilen yöntem [15]

Şekil 2.5’deki modele göre iç köşelerin katılma izotermelerini belirleme formülleri eşitlik 1.12 ve 1.13’de verilmiştir.

$$x = \sqrt{\frac{y^2}{2,25 \cdot (\frac{y}{t_p})^2 - 1}}$$

(1.12)

$$y = \sqrt{\frac{x^2}{2,25 \cdot (\frac{x}{t_p})^2 - 1}}$$

(1.13)

Eş. 1.12 ve Eş. 1.13, orantılı zaman, t_p , eşitliklerin sonuçları nedeniyle bir iç köşenin dış yüzeylerinden elde edilen katılma izotermelerinin konumunu sağlar. Burada BA modeli, bir iç köşeye ilişkin bir izotermi kare dış köşe gibi çizecektir ama bir döküm kesiti üzerinde iç köşenin tam geometrik konumunu belirleyemez. Bu nedenle, izotermelerin geometrik konumu, kare iç köşe için geometrik olarak ayarlanmalıdır. Bu ayarlamaların nasıl yapılacağı ilgili kaynakta detaylı biçimde incelenebilir [15].

2.16. Döküm Simülasyonu

Benzetim olarak da adlandırılan simülasyon, analiz yaparken geniş ve çok yönlü düşünmeyi sağlayan bir teknolojidir. Başka bir deyişle gerçek hayatta var olan bir sürecin ya da sistemin genellikle bilgisayar ortamında taklit edilmesidir. Gerçekte var olan ya da gelecekte var olmasını istediğimiz ama sonuçlarının ve görüşünün nasıl olacağını bilmediğimiz durumlar konusunda yardımcı olur. Gerçeği ya da gelecekte planladığımız işi bilgisayar ortamında taklit ederek bizlere yön verir. Bilgisayar ortamında gördüğümüz duruma göre de sistemin uygulanabilir ya da uygulanamaz olduğunu bizlere gösterir. Bu sebeple de genelde tasarım aşamasında olan projeler, üzerinde araştırma yapılmamış projeler ya da çok karmaşık olmasından kaynaklı hayata geçirmeye cesaret edilemeyen projeleri modelleyerek sistemin davranışı önceden kestirilir ve daha yapım aşamasında olmayan bir proje için dahi iyileştirmeler başlayabilir. Böylece hem zamandan hem maliyetten hem de projede çalışan insanların enerjilerinden tasarruf edilmiş olur [29].

Simülasyon ayrıca gerçek sistemin erişemediği veya tehlikeli sistemlerin uygulanmadığı

zamanlarda da kullanılır. Simölasyondaki temel hususlar, önemli özelliklerin ve davranışların seçimi hakkında geçerli kaynak bilgilerinin edinilmesini, simölasyonda yakınlaştırma ve varsayımların basitleştirilmesinin kullanımı ve simölasyon sonuçlarının doğruluğu ve geçerliliğini içerir. Model doğrulaması ve geçerliliğı için prosedürler ve protokoller simölasyon teknolojisinde veya uygulamasında, özellikle bilgisayar simölasyonu alanında, akademik çalışma, arıtma, araştırma ve geliştirme alanlarında devam eden bir branştır.

Simulasyon programının kullanılmasındaki avantajlar ;

1. Yapılması öngörülen sistemi inceler ve sonraki adımlar hakkında bilgi verir böylece sistemi kurup deneme yanılma yoluyla görülmesinden simülasyon programı kullanılarak daha avantajlı durum oluşur.
2. Değişen parametrelerle birlikte sistemin nasıl ilerleneceği tahmin edilir ve gerekiyorsa önlem alınır.
3. Bilgisayar ortamında yapılmasından dolayı tüm veriler kaydolur ve sonradan tekrar kontrol edilmek üzere saklanır.
4. Kurulması planlanan sistem için hangi konularda eksik olduğu fark edilir ve bu eksiklik simülasyon programının verileri ile tamamlanır.

Simulasyon programının kullanılmasındaki dezavantajlar ;

1. Simulasyon kurulumu çok masraflıdır.
2. Simulasyon kullanacak personellere yatırım yapılması, teknik bilgiler öğretilmesi gerekmektedir.
3. Simülasyon verilerini, rastlantısal olmasından dolayı, yorumlamak zordur.

Simülasyon kurmanın ve analiz etmenin 8 kuralı vardır ;

1. Sistemin tanımının yapılması
2. Modelin formülasyonu
3. Verilerin toplanıp düzenlenmesi
4. Bilgisayar programının formüle edilmesi
5. Modelin geçerliliğin kontrol edilmesi
6. Stratejik planlama
7. Deneme ve duyarlılık analizleri
8. Uygulama ve belgeleme

Yaygın kullanılan Bazı simülasyon programları; Magmasoft, NovaCast, SolidCast, Altair Inspire Cast, MATLAB-Simulink, ANSYS ve benzerleridir [29].

Bu tez çalışmasını tamamlamak için seçilen simülasyon programı Magmasoft®'tur. Magmasoft, kendini kanıtlamış bir döküm simülasyon yazılımı olarak maksimum üretim

parametrelerini anlamada yardımcı olurken bir yandan da daha belirgin ve etkili araçları ile döküm kalitesini iyileştirmede yardımcı olmaktadır. Bunlara ek olarak da maliyetleri düşürmeye de yardım etmektedir. “Görsel Analiz” ve “Otonom Optimizasyon” modülleri yardımıyla; ürün tasarımlarını rahatlıkla belirlemekte ve tüm kimyasal kompozisyona özel olarak üretim girdilerini ve tasarımlarını kolaylıkla belirleyebiliyor. Ayrıca pota metalurjisi ya da ısıtma işlemi vs. gibi işlemleri aynı anda yürütebilmektedir.

En yüksek kalitede döküm parçalarının üretilmesinin sebepleri; modüler program içeriğinin döküm işlemlerinin tüm adımlarını içermekle birlikte, tasarımsal ve prototipleme aşamasını takip eden döküm ve sonrasında gerçekleşen ısıtma işlemlere kadar simülasyon yapılabilmesidir. Örneğin döküm simülasyonlarını gerçekleştirirken en son meydana gelen sıcak noktaları (hot-spot) “Kare Mesh” sistemini kullanarak belirlemektedir [30].

Magmasoft özelliklerini aşağıdaki şekilde sıralayabilmekteyiz:

- Bütün alaşım tiplerini ve ergitme, ısıtma işlemi, model ve maça yapımı, taşlama ve tamirat dahil olmak üzere bütün proses adımlarını destekleyen yazılım veritabanı
- Döküm hatalarını minimuma indirmek amacıyla üretim riski olmadan sanal ortamda inceleme yapma imkanı
- Kalite, verimlilik ve gelir-gider noktalarını açığa kavuşturma
- Olabilecek en iyi seviyede üretim şemaları oluşturma
- Projelerin bütün girdileri hakkında çabuk karar alma ve termin zamanlarını kısaltmaya yardımcı olma
- Üretimde bulunan değişebilecek maddelerin kalite hakkında etkilerini irdemeleyi sağlama ve etkili kalite yönetimine yardımcı olmak
- Tasarımcılar için doğru ürünü oluşturma ve üretim geliştirme noktalarında sağlam ve doğru geri dönüş sağlama

Bu çalışmada, belirlenen döküm parçalarının iki boyutlu kesitleri için BA yaklaşımına göre daha önce verilen eşitliklerle ilenilerek katılma izotermi bilgisiyle AutoCAD programında çizdirilecek, daha sonra Magmasoft simülasyon programında aynı parçanın simülasyonu yapılarak, BA yaklaşımına göre bulunan sıcak noktalar (hot spot), Magmasoft simülasyonuna göre bulunan sıcak noktalar ile karşılaştırılacak ve BA yaklaşımının doğru sonuçlar verip vermediği araştırılacaktır.

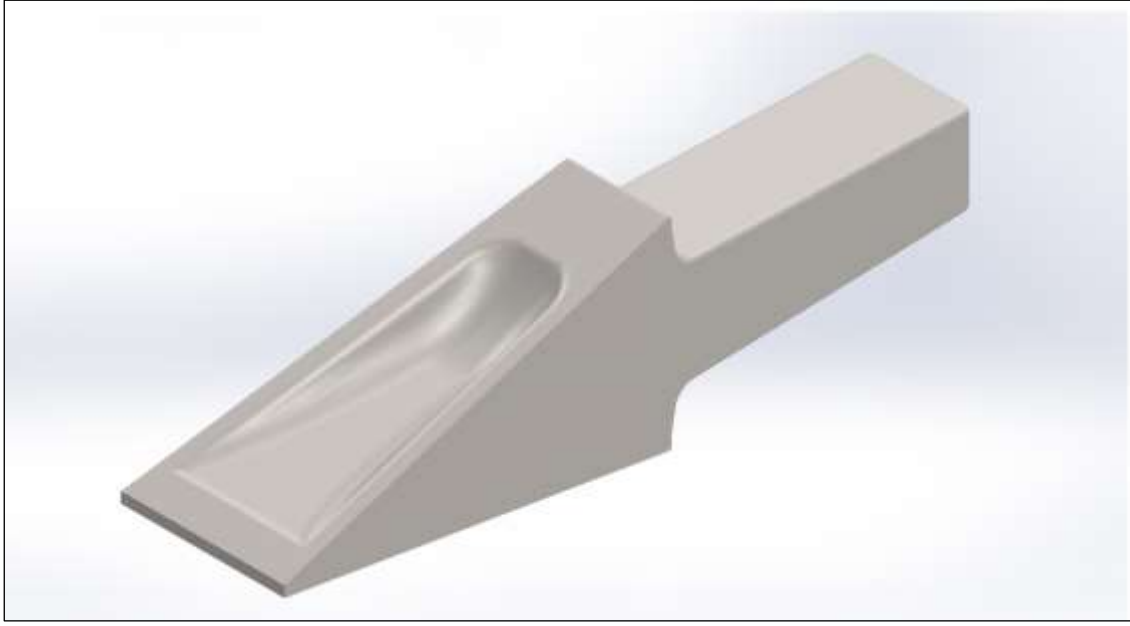
3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Tezin bu bölümünde Birim Alan yaklaşımının karmaşık döküm parçalarının kesitlerine uygulanma yöntemi anlatılacaktır. Bu amaçla üç tane döküm parçası Birim Alan yöntemine göre analiz edilmek amacıyla seçilmiştir. Bu parçalar:

Basit Seviyedeki Karmaşık Geometrik Şekil: Karmaşıklık seviyesi düşüktür ancak üzerinde Birim Alan yaklaşımının sağladığı kare dış köşe ile kare iç köşe modellerinin tam olarak uymadığı 90° den farklı birçok açılı bağlantı ve kavislendirilmiş köşeler bulunmaktadır. Birim Alan yaklaşımının açılı birleştirmelere ve kavisli köşelere uygulanıp uygulanamayacağı araştırılacaktır. Bu parçayı en iyi temsil edebilecek tek bir kesit üzerinden analiz edilmeye çalışılacaktır. Analiz sonucunda parçanın hangi bölgesinde makro çekme hatası oluşabileceği araştırılacaktır. Tezin devamında 1 numaralı parça olarak da bahsedilmektedir.

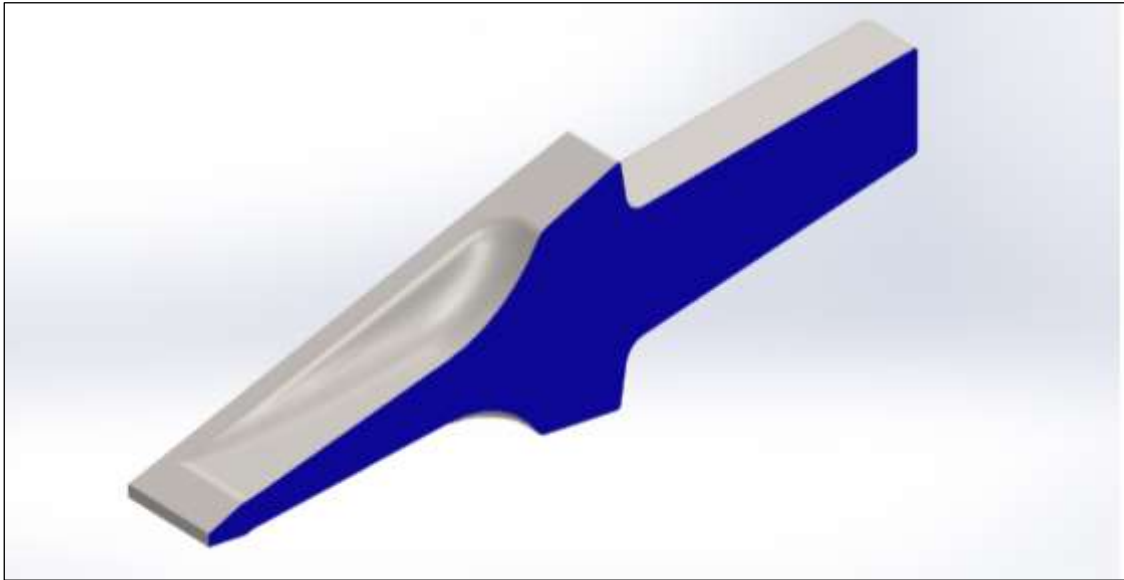
Orta Seviyedeki Karmaşık Geometrik Şekil: 1 numaralı parçaya göre karmaşıklık seviyesi artırılmış tek bir kesit üzerinden analiz edilmektedir. Bu parça üzerinde dikdörtgen kesitli bölümlerle birlikte açılı bağlantılar ve silindirik yüzeylerin oluşturduğu bağlantılar yer almaktadır. Birim Alan yaklaşımının bu farklı bağlantı türlerine uygulanabilirliği araştırılacaktır. Aynı zamanda parça üzerinde iki tane ince kanat yer almaktadır. Birim Alan yaklaşımına göre analiz yapılırken bu tip ince kanatların çözüme dahil edilip edilmeyeceği belirlenerek, buna göre nasıl analiz yapılması gerektiği açıklanmaya çalışılacaktır. Analiz sonucunda parçanın hangi bölgesinde veya bölgelerinde makro çekme hatası oluşabileceği araştırılacaktır. Tezin devamında 2 numaralı parça olarak da bahsedilmektedir.

Yüksek Seviyedeki Karmaşık Geometrik Şekil: 1 ve 2 numaralı parçalara göre karmaşıklık düzeyi en yüksek düzeyde seçilmiş parçadır. Bu parçanın tamamı tek bir kesit üzerinden analiz edilemeyeceği için, iki farklı yönde kesitleri alınacak, her iki kesit üzerinde Birim Alan yaklaşımına göre analiz yapılacak ve kesitlerin ortak analizi ile olası makro hata noktası veya noktaları belirlenmeye çalışılacaktır. Bu parçanın kesitleri üzerinde de kare dış köşeler, kare iç köşeler, silindirik dairesel yüzeyler, silindirik düzlemsel yüzeyler, açılı bağlantılar ve en yakın teğet birleştirmeler yer almaktadır. Tezin devamında 3 numaralı parça olarak da bahsedilmektedir.



Şekil 3.2 .Bir numaralı parçanın Solidworks katı modeli

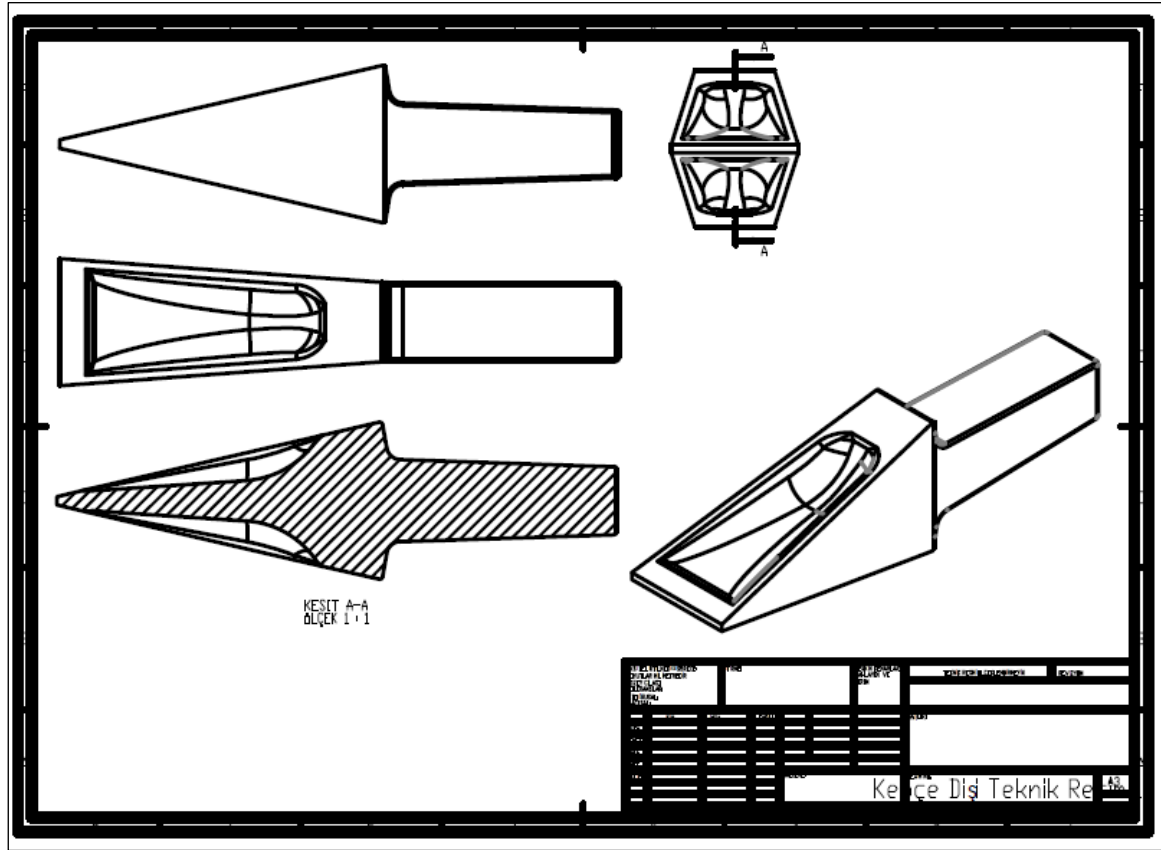
1 numaralı parçanın Birim Alan yöntemine göre AutoCAD programında analizi yapılacak olan döküm parça kesiti Şekil 3.3’deki mavi yüzey ile belirtilmiştir.



Şekil 3.3 Bir numaralı parçanın Solidworks katı modeli üzerinden kesitinin alınması

Şekil 3.4’te çalışması yapılan ilk şeklin Solidworks programında katı modelden dönüştürülen teknik resimleri verilmiştir. Bu teknik resimde 1 numaralı parçanın ön, yan ve üst görüşleri ile birlikte parça boyunca uzunlamasına alınan kesit görünüşü ve üç boyutlu katı modeli de bulunmaktadır. A-A kesitinde görülen taralı alan, Şekil 3.3’teki Solidworks

görüntüsündeki mavi alanı göstermektedir. Bu kesit, dwg. dosya biçiminde kaydedildikten sonra AutoCAD programında açılarak üzerinde çalışılabilmesini sağlanmıştır.

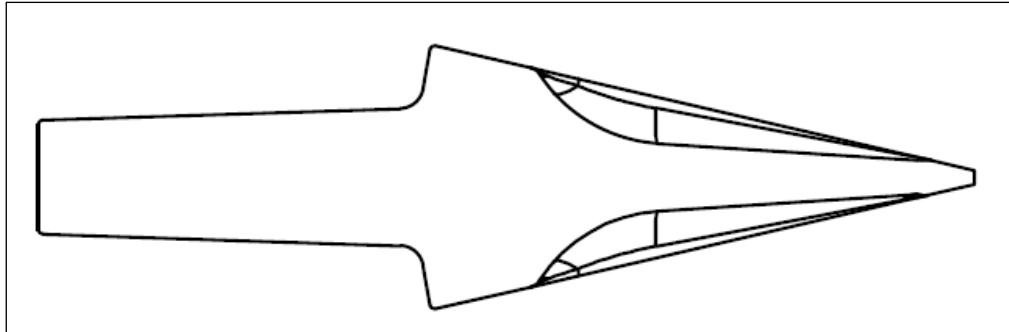


Şekil 3.4. Bir nunaralı parçanın görünüşleri, perspektifi ve uzunlamasına kesiti

Resim 3.1’de Birim Alan yaklaşımına göre katılaşma izotermlerinin, kavşak noktalarının (veya köşelerin) izoterm noktalarının hesaplanması için Visual Basic 6.0 programında tasarlanan basit hesap makinası görülmektedir. Bu hesap makinası dört temel bölümden oluşmaktadır. Bu bölümler sırasıyla, dış köşeler, silindirik dairesel köşeler, silindirik düzlemsel köşeler ve iç köşelerden oluşmaktadır. Analiz edilecek olan döküm kesiti üzerindeki kısım bu dört elemandan hangisine en yakın ise, hesap makinasının o bölümü kullanılarak izotermilerin köşe noktaları farklı t_p oransal zaman değerleri için belirlenmektedir.

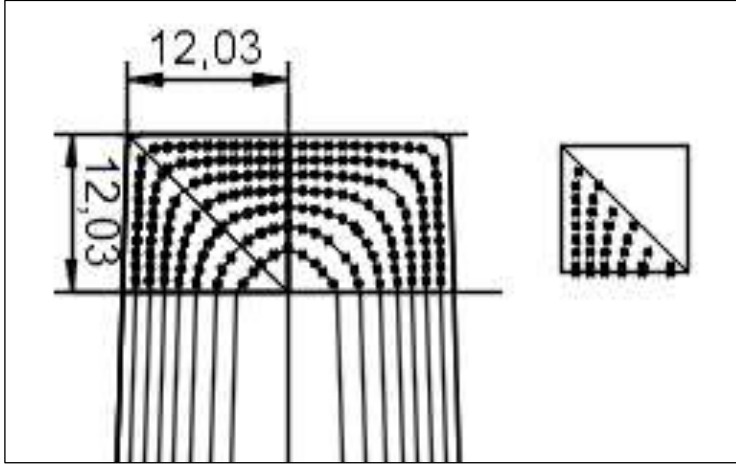
UA 2-D HESAPLAYICI DIŞ KÖŞELER	UA 2-D HESAPLAYICI SİLİNDİR FLAT FACE
tp	tp
x veya y değeri	x veya y değeri
NOKTA HESAPLA	NOKTA HESAPLA
Sonuç y veya x	Sonuç y veya x
UA 2-D HESAPLAYICI SİLİNDİR ROUND FACE	UA 2-D HESAPLAYICI İÇ KÖŞELER
tp	tp
x veya y değeri	x veya y değeri
NOKTA HESAPLA	NOKTA HESAPLA
Sonuç y veya x	Sonuç y veya x

Resim 3.1. Visual Basic hesap makinası kullanıcı ara yüzü



Şekil 3.5. Bir numaralı parçanın kesit görünüşünün, tarama çizgileri silinerek, Birim Alan yaklaşımına göre izotermilerin çizimi için hazırlanması.

Şekil 3.5'te, AutoCAD programı üzerinde parçanın sol kısmından BA yaklaşımına dayalı izoterm çizim çalışması yapılmaya başlanmıştır. Sol kısımda görüldüğü üzere 2 tane düşük açılı (yaklaşık) kare dış köşe bulunmaktadır. Öncelikle bu karenin sol tarafındaki kenarın uzunluğu ölçülerek ve sonra bu ölçü ikiye bölünerek oluşturulacak olan karenin bir kenar uzunluğu hesaplanmıştır ve Visual Basic programı ile noktaların koordinatları belirlenmiştir. Bu koordinatlar AutoCAD ortamında kesit üzerine işaretlendiği zaman Şekil 3.6'daki tamamlanmış dış köşe izotermi ortaya çıkmaktadır.



Şekil 3.6. Birinci parçada Birim Alana dayalı izotermilerin kare dış köşe üzerine çizilmesi

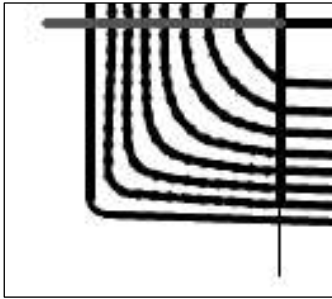
Kullanılan hesap makinasında görüldüğü üzere dış köşe, iç köşe, silindir dairesel yüzey ve silindir düzlemsel yüzey olmak üzere toplam 4 farklı hesaplama şekli vardır. 1 numaralı parça üzerinde yukarıda anlatılan ilk bölümde kullanılan hesap makinası alanı “BA 2-D Hesaplayıcı Dış Köşeler” olmuştur.

İzotermier oluşturulmaya başlanırken öncelikle parça en uzun noktalarından 2 ye bölünmüştür. Şeklin alt kısmındaki izotermier tamamlanarak AutoCAD programında aynalama yöntemi (Mirror komutu) ile yukarı yansıtılmış ve böylelikle şekil tamamlanmıştır. Çizime 1 numaralı parçanın kesitinde en sol alt köşesi ile başlanmıştır Şekil 3.6. Şekil 3.6’de bulunan karenin köşegenleri birleştirilip iki dik üçgen haline getirilmiştir. Bir üçgen AutoCAD sayfasında 0,0 noktasına taşınmıştır. Bu üçgen içinde noktaların görünür biçimde basılması için kullanılan “Donut” lar (AutoCAD’deki içi dolu simit veya nokta komutu) Resim 3.1’deki hesap makinası yardımıyla hesaplanan değerlere göre tamamlanmıştır ve üçgen şeklin içindeki kopyası alınmış halinin üzerine doğru açıyla yapıştırılmıştır. Tamamlanan bir dik kenar üçgenin aynalama (Mirror) komutu ile Şekil 3.6’te görüldüğü üzere kare dış köşe tamamlanmıştır.

Oransal zaman, tp değerine 1,2,3,4,5,6,7 atanmış ve şekli AutoCAD’de çizerken temel aldığımız kenarın uzunluğuna istinaden X değeri girilmiştir. Her bir tp değeri için farklı X koordinatları girilerek Y değeri hesaplanmıştır. Böylece X ve Y koordinatları belli olmuştur. Her bir nokta AutoCAD 2020 programında “Donut” komutu ile belirginleştirilmiştir. Noktalar kendi merkezlerinden birbirlerine bağlanarak her bir izoterm oluşmuştur. tp değerine ne kadar değeri girilirse o kadar çok izoterm görülebilir. Bu tez için katılşmanın en

temiz ve anlaşılır şekilde ilerlenmesi amaçlandığından dolayı 7 izoterm yeterli bulunmuştur, Şekil 3.7.

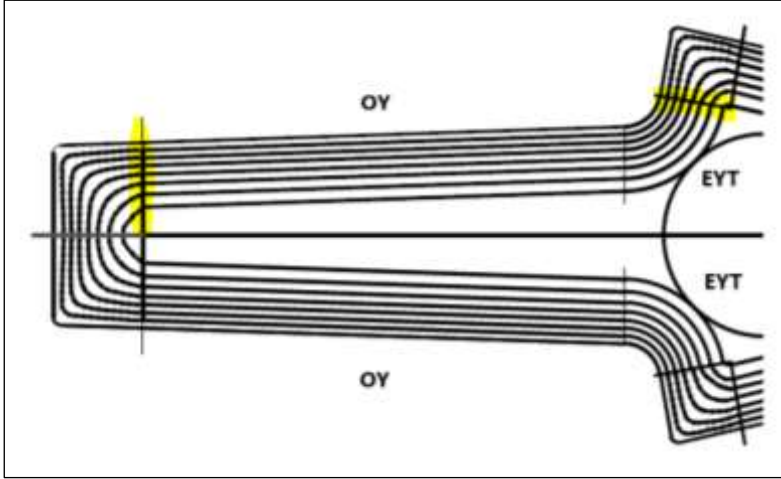
Aşağıda Şekil 3.7’de bulunan izotermi çizilmiş halinin görülebileceği 1 numaralı parçanın izoterm çizilmeye başlandığı üst üste iki dış köşe vardır. Bu köşelerin bir kenar uzunluğu 12,03 mm olmasından dolayı X değeri maksimum 12,03 tür. Yine aynı şekilde aşağıda görebileceğiniz tablolarda bu izotermi oluşturmamızda yardımcı olan koordinatlar vardır. Her bir koordinat “Donut” komutuyla belirlenmiştir ve donutlar merkez noktalarından “Polyline” komutu ile birleştirilerek şekil son görünümüne ulaşmıştır.



Şekil 3.7. Birinci parçada tamamlanmış kare dış köşe izotermi

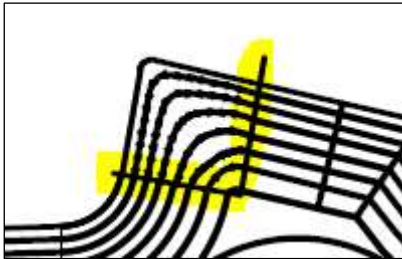
Oransal zaman, t_p değeri ne ise X değeri o sayının bir fazlasıdır. Çizimi daha detaylandırarak kolaylaştırmak adına ölçüleri birer artırarak değil bazı ondalık sayılar da verilebilir. Koordinatların gösterildiği tablolardan $t_p=6$ değerinde bu şekilde yol izlenerek koordinat belirleme tamamlanmıştır.

Bir numaralı parçanın uzun ve kavisli kenarları, AutoCAD’te “Offset” komutu kullanılarak tamamlanmıştır. Her bir kenarın uzunluğu konusunda donutlarla birleştirilmiş olan bölgedeki izotermi uzunluğu temel alınmıştır.



Şekil 3.8. Birinci parçada dış köşelerin karelerle tanımlanması

Yine aynı şekil üzerinde uzun kenarların bitiminde bir dış köşe bulunmuştur (Şekil 3.8 sağ üst ve sağ alt, Şekil 3.9). Bu dış köşenin koordinatlarını belirleyebilmemiz için kare oluşturulmuştur. Bu karenin bir kenar uzunluğu 9,56 mm'dir. Bu sebeple X in alabileceği maksimum değer 9,56'dır.



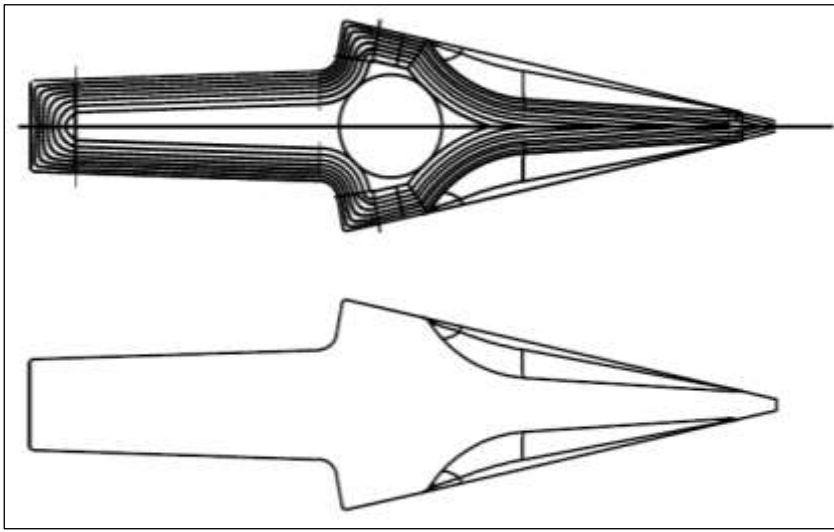
Şekil 3.9. Birinci parçada açılı kare dış köşe köşenin görüntüsü

Yukarıdaki şekilde bulunan, sarı renk ile sınırlanan iki kenarı işaretlenen karenin, öncelikle köşgenleri birleştirilerek oluşturulan dik üçgenin AutoCAD programında 0,0 noktasına taşınması ile birlikte belirlenen koordinatlar tablolar oluşturularak kaydedilmiştir. Bu değerler Visual Basic hesap makinasında bulunan "Dış Köşe" hesaplama alanı ile hesaplanmıştır.

Köşenin açılı olması nedeniyle ve Birim Alan yaklaşımının sadece dik açılı köşeleri modellemesinden dolayı, köşenin yarısını oluşturan izotermier AutoCAD programının 0,0 noktasında çizildikten sonra, izotermier kesitteki açı kadar açılardırma işlemi uygulanması gerekmektedir. Dik üçgen üzerinde bulunan noktalar belirlenerek ve "Polyline" ile

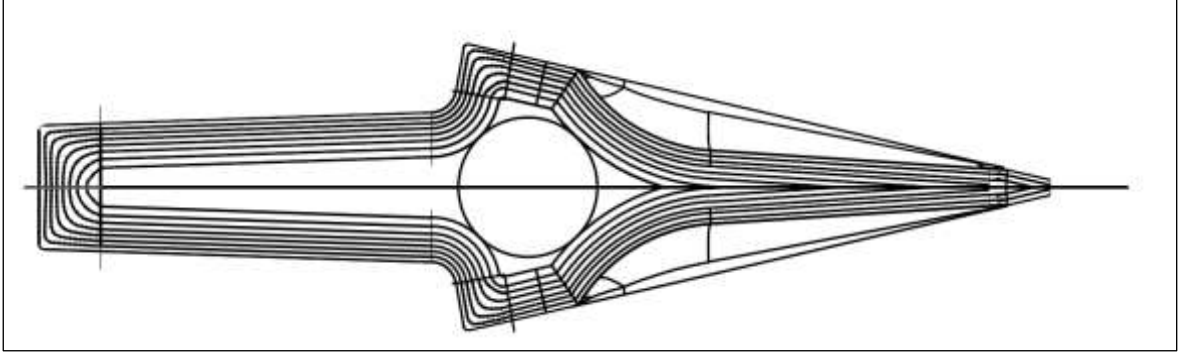
birleştirilerek şeklin üzerinde doğru açı ile yapıştırılmıştır. “Mirror” komutu ile yine aynalama yapılmış ve kare köşenin çizimi tamamlanmıştır.

Kesitin üst yarısında bulunan dış köşelerde bulunan izotermilerin tamamlanmasından sonra uzun ve kavisli kenarlar bu köşelerden gelen uçların “Offset” komutu ile parçanın kalan bölümlerine uzatılmaları yöntemiyle tamamlanmış ve mirror komutu ile şekil tamamlanmıştır. “Mirror” komutu ile kesişen çizgiler, ortada şekli tam ikiye bölen çizgiyi geçen kısımlar kırpılmıştır.



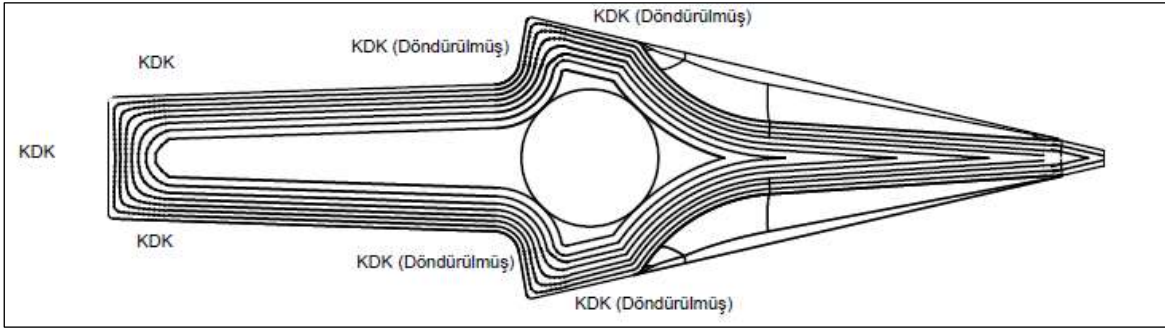
Şekil 3.10. Bir numaralı parçanın tamamlanmış ve tamamlanmamış görüntüsü

Şekil 3.11. üzerinde verilen kesit üzerinde AutoCAD 2020 programı ile çizilen izoterm görüntüleri vardır. Bir numaralı parçanın sol tarafı tamamlandıktan sonra sağ tarafında bulunan sağa doğru daralan kısım için öncelikle orta nokta belirlenmesi ile birlikte “Offset” komutuyla kare dış köşenin izotermi arasındaki mesafe ölçülerek paralel çizgiler oluşturulmuştur.



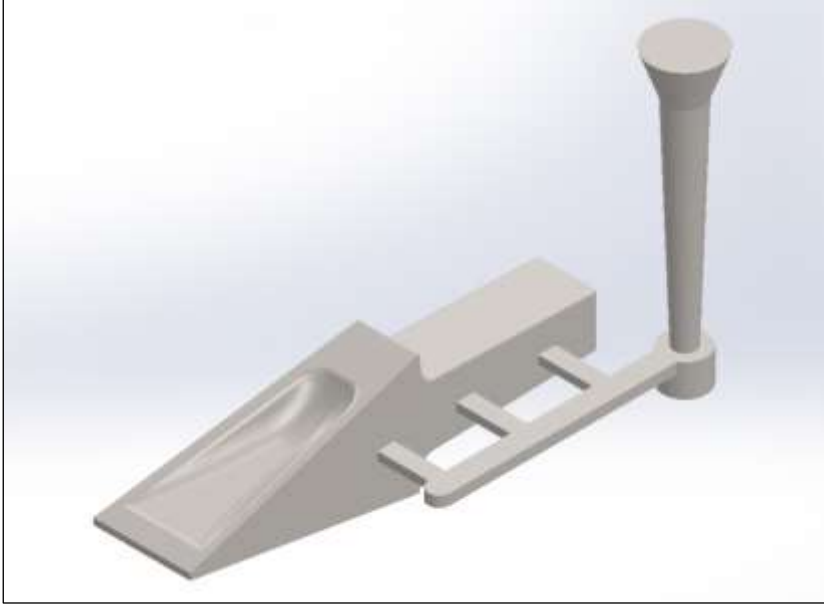
Şekil 3.11. Bir numaralı parçanın kesiti alınmış katılaşıma izoterm görüntüsü

Şekil 3.12. de AutoCAD çizimi tamamlanan bir numaralı parçanın ortasına en büyük çaplı teğet daire çizilmiştir. Bu daire Birim Alan'a göre çizilen izotermelere bağlı olarak, döküm sırasında sıvı metalin beslemeye yetmeyeceği olası alanı göstermektedir.



Şekil 3.12. Bir numaralı parçanın AutoCAD'de tüm izotermeler tamamlanmış görüntüsü

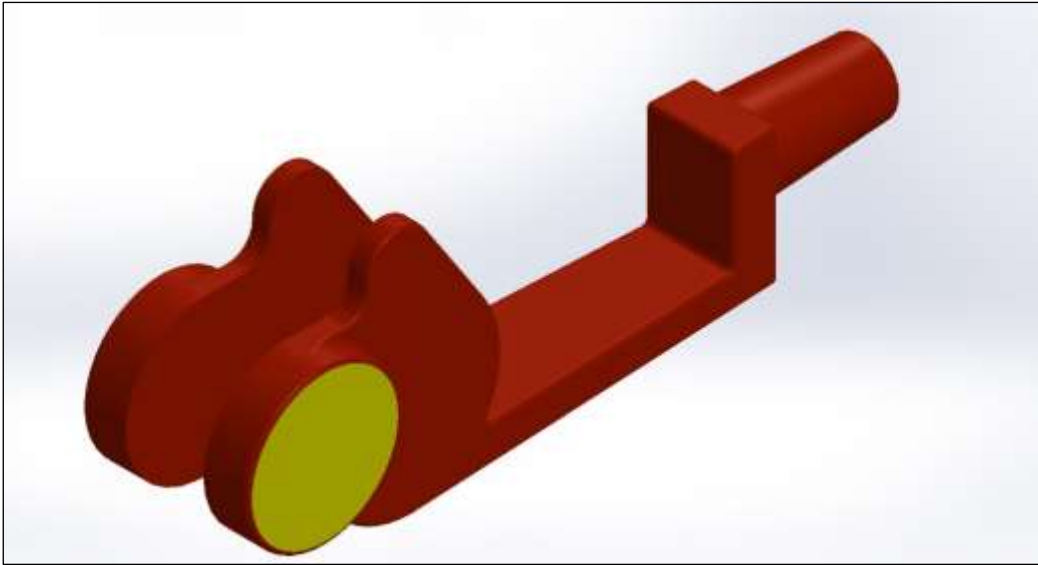
Magmasoft simülasyon çalışması için bir numaralı parça için tasarlanan yolluk sisteminin Solidworks katı model görüntüsü Şekil 3.13'te görülmektedir.



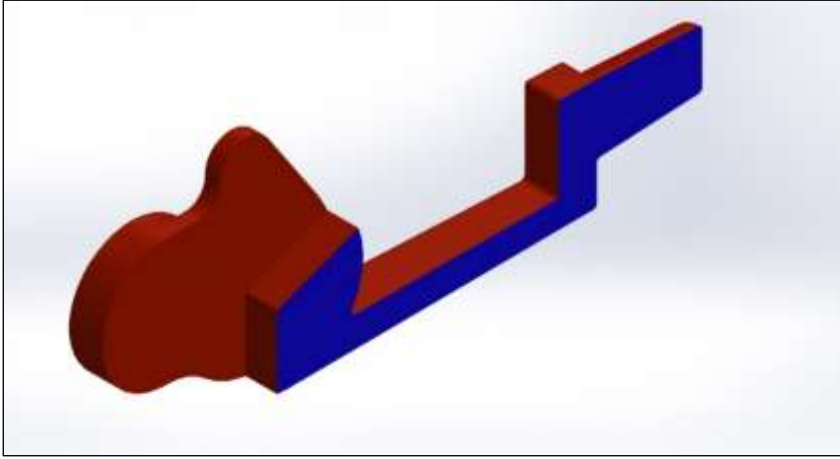
Şekil 3.13. Bir numaralı parçanın yolluk tasarımı

3.2. Orta Seviyedeki Karmaşık Geometrik Şeklin İzotermmlerinin Belirlenmesi

Deneysel çalışmalarda kullanılacak iki numaralı döküm parçasının katı modeli Şekil 3.14’de verilmiştir. Bu katı model üzerinde, Birim Alan yaklaşımına göre, katılma izotermmlerinin çizilebilmesi için zemin oluşturacak ve parçayı en iyi ifade edebilecek kesit ise Şekil 3.15’te verildiği gibi seçilmiştir.

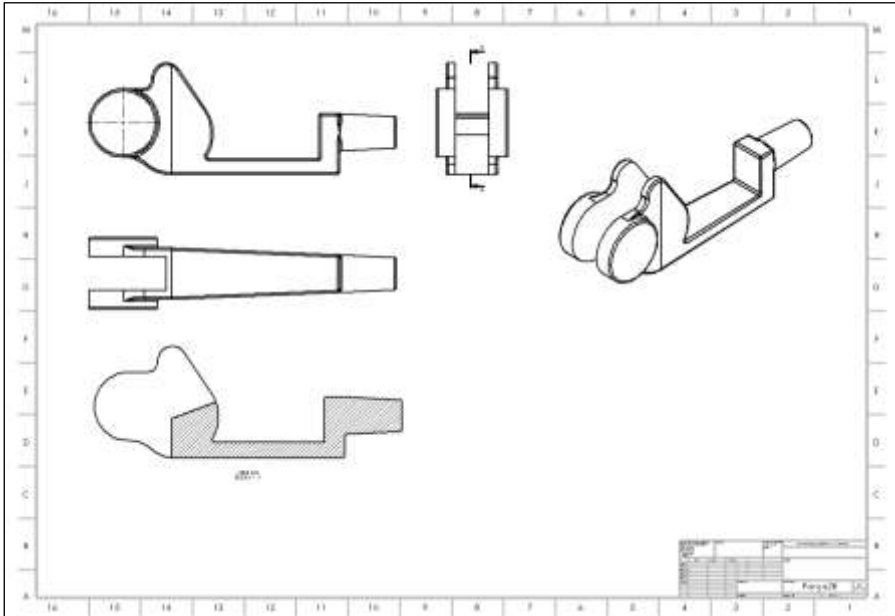


Şekil 3.14. İki numaralı parçanın Solidworks katı modeli



Şekil 3.15 .İki numaralı parçanın Solidworks katı modelinden kesit alınması

İki numaralı parçanın solidworks ortamında dönüştürülmüş Solidworks teknik resmi ise Şekil 3.16’da verilmiştir. Bu çizimde parçanın ön, profil, üst görünüşleri ile birlikte, uzunlamasına kesit görüntüsü (A-A kesiti) ve üç boyutlu katı modeli de birlikte görülmektedir. A-A kesitinde görülen taralı alan, Şekil 3.15’teki Solidworks görüntüsündeki mavi alanı göstermektedir. Bu kesit, dwg. dosya biçiminde kaydedilerek ve AutoCAD programında açılarak üzerinde çalışılabilmesini sağlamıştır. Bu kesit Birim Alan formülüne göre katılama izotermilerinin çizimi için zemin olarak kullanılmıştır.



Şekil 3.16. İki numaralı parçanın Solidworks teknik resmi

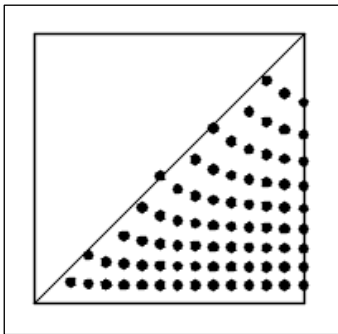
İki numaralı parçayı incelediğimizde kare dış köşe, kare iç köşe ve silindir dairesel yüzey görmekteyiz. İzoterm çizmeye şeklin sağ tarafından başlanmıştır. Sağ taraf Şekil 3.16’da

görülebileceği üzere kare dış köşe formülüne göre Visual Basic programında tp değeri; 1,2,3,4,5,6,7,8 ve 9 alınarak çizilmiştir. Daha çok izoterm çizilmesi halinde bu izoterm parçanın geometric merkezlerinde kaybolmaktadır.

Bu parça için Resim 3.1'deki Visual Basic programında bulunan "UA 2-D HESAPLAYICI DIŞ KÖŞELER, UA 2-D HESAPLAYICI İÇ KÖŞELER ve UA 2-D HESAPLAYICI SİLİNDİR ROUND SURFACE" kısımlarında noktaların koordinatları belirtilmiştir. İki numaralı şeklin en sağ kenarının ölçüsü alınarak izoterm çizmeye başlamadan kare dış köşeyi tanımlamak için öncelikle karenin bir kenar uzunluğunun ne olacağına karar vermemiz gerekmektedir. En sağ kenarın uzunluğu 30,12 mm'dir. Parçanın sağ tarafındaki iki köşeye iki kare sığdırılacağından dolayı, sağ kenarın uzunluğunun ölçüsünün yarısı bize karenin bir kenar uzunluğunu verecektir. Bu uzunluk 15,06 mm olarak ölçülmüştür.

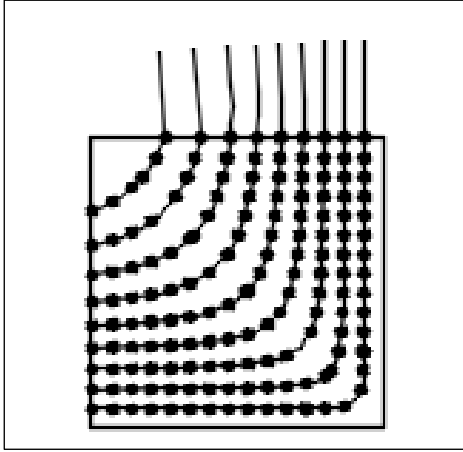
AutoCAD programında, sol alt köşesi $x=0, y=0$ noktasına yerleştirilecek şekilde çizilen kare dış köşe izotermlerinin görüntüsü Şekil 3.17'de verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi, kare dış köşenin izotermlerinin alt yarısının çizimi Birim Alan yaklaşımına göre elde edildikten sonra, üst yarısı da kare dış köşe izotermi olacağından dolayı, alt yarıdaki izotermilerin üst yarıya simetrik ayna kopyası yapılarak eksik bölgenin izotermi tamamlanabilir.

Bir bölgesinin izotermi tamamlanarak diğer bölgelere simetrisi alınabileceğinden dolayı sadece tek bir kısmın koordinatlarının belirlenmektedir, Şekil 3.17.



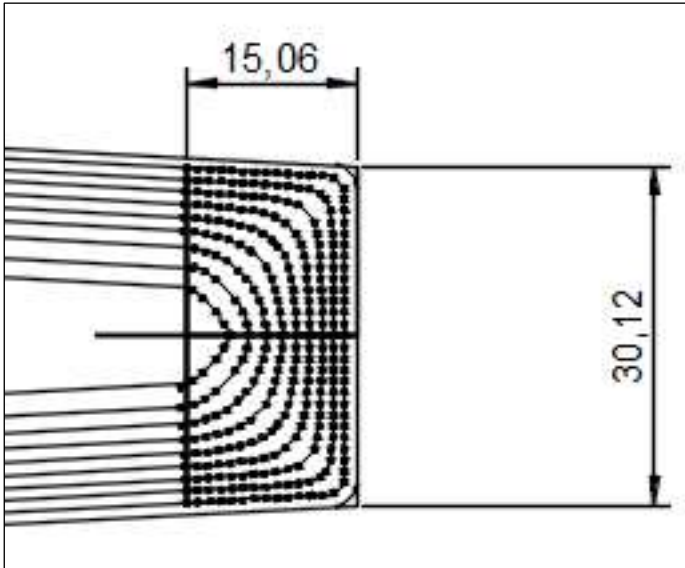
Şekil 3.17 .İkinci parçanın ilk köşesinin koordinatlarının belirlenmiş görüntüsü

İzoterm noktaları belirlendikten sonra AutoCAD ortamında bulunan "Polyline" komutu ile noktalar birleştirilerek bir bölgedeki izotermi tamamlanmıştır. Aynalama komutu ile karenin içi doldurulmuştur. İzotermi tamamlanmış kare Şekil 3.18'de görülmektedir.



Şekil 3.18. İkinci parçanın ilk köşesinin Polyline komutu ile izotermilerin son halinin oluşturulduğu görüntüsü

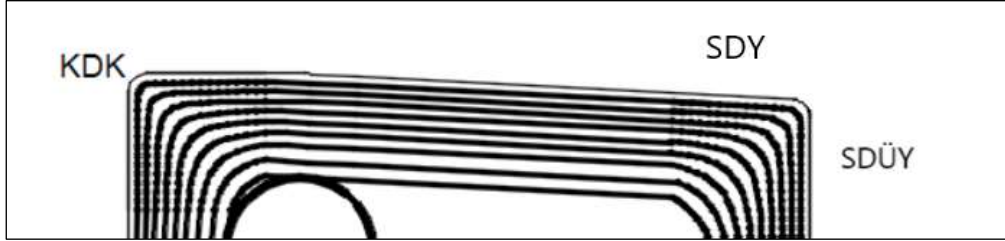
İzotermi tamamlanan karenin sağ alt köşesi, iki numaralı parçanın sağ alt köşesine taşınmış ve kopyalanmıştır. Şekil 3.19’da görüldüğü gibi, sağ kenarın orta noktası temel alınarak bu sefer yukarıya doğru aynalama komutu kullanılmış ve parçanın sağ tarafı tamamlanmıştır. Şekil 3.19’da orta noktanın bir çizgi ile belirlendiği ve aynalama komutu yapılırken bu çizginin temel alındığı görülmektedir.



Şekil 3.19. İki numaralı parçanın kare dış köşelerinin birbirine bağlandığı görüntüsü

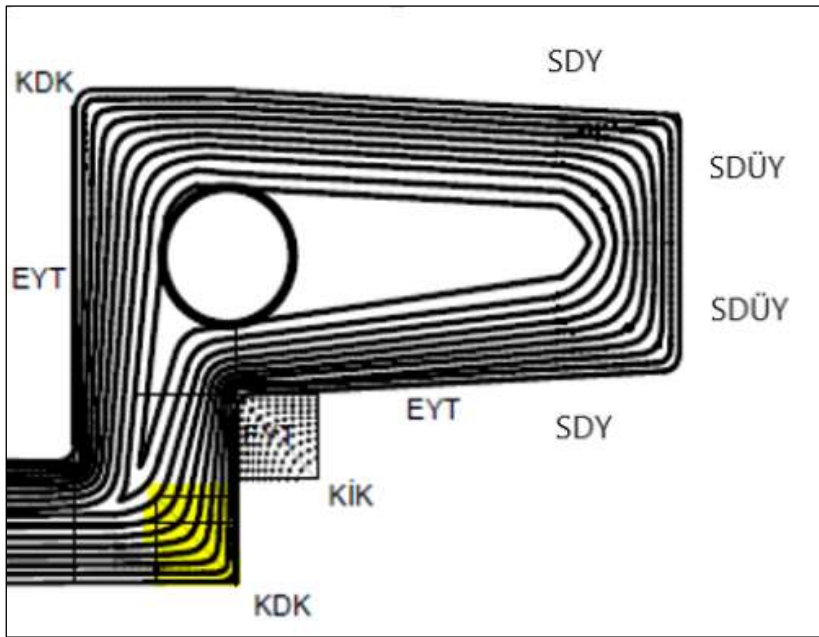
Parçanın sol tarafına doğru ilerlerken iki kare dış köşe, iki kare iç köşe görülmektedir. Kare dış köşe KDK, kare iç köşe ise KİK kısaltmaları ile şeklin üzerinde verilmiştir. Daha önce bilgisayarda çizilmiş bulunan kare dış köşelerden birinin ayna simetriği alınarak Şekil

3.20’de görüldüğü gibi sol üst köşeye yerleştirilir ve sağ taraftaki izotermiler ile sol taraftaki izotermiler birleştirilir, Şekil 3.20.



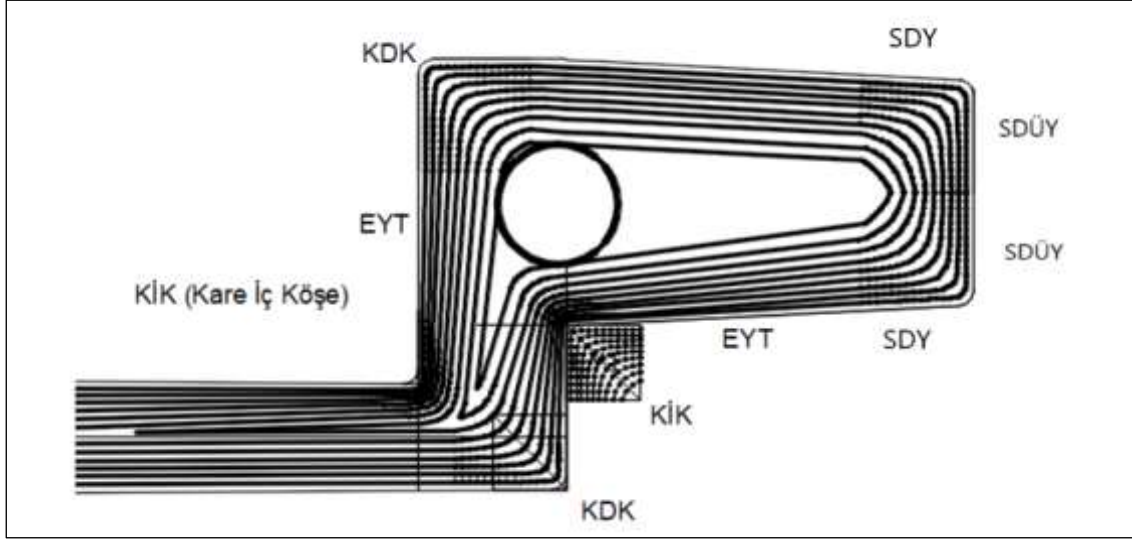
Şekil 3.20. İkinci Parçanın sol tarafındaki kare dış köşenin, sağ köşedeki izotermiler ile bağlanması

Şekil 3.21’de sağ alt tarafta sarı renk ile gösterilen kare dış köşe için, bulunduğu konumdan dolayı yeni bir kare ve koordinatlar belirlenerek ayrı bir izoterm karesi oluşturulur ve yerleştirilir. Sarı ile belirtilen köşede karenin kenarları da görülebilmektedir.



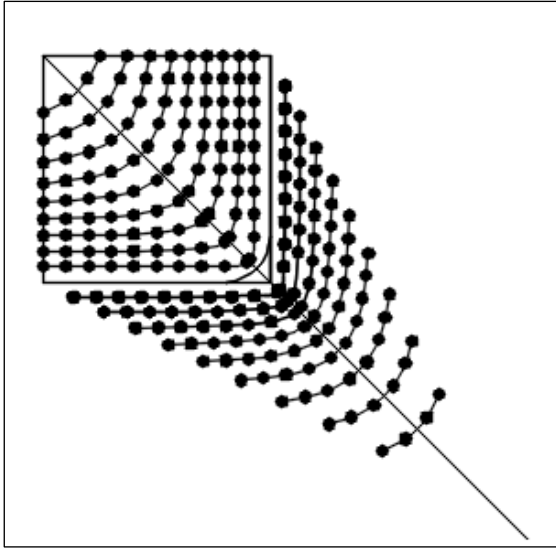
Şekil 3.21. İki numaralı parçanın sağ alt köşesinin AutoCAD görüntüsü

Bu aşamadan sonra kare iç köşelerinin izotermilerinin çizilmesi için oluşturulacak olan kare konusunda Şekil 3.21’de sarı renk ile gösterilen kareye denk olması için aynı ölçüler ile ilerlenmiştir. Visual Basic hesaplama programındaki “UA 2-D HESAPLAYICI İÇ KÖŞELER” ile koordinatlar belirlenmiştir.

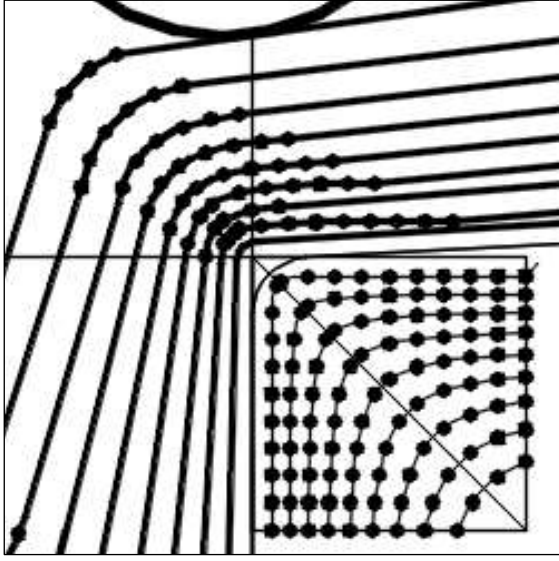


Şekil 3.22. İki numaralı parçada iç ve dış köşelerin birbirine bağlanması

Şekil 3.22’de görüldüğü gibi öncelikle iç köşelere kareler yerleştirilir ve 45° açı ile şeklin kenarı temel alınarak parçanın içine doğru izotermi taşınır. Şekil 3.23’te görüldüğü üzere bu iç köşe izotermi tamamlanan karenin uygun köşelerine doğru simetriler alınarak taşınmaktadır. Şekil 3.22’nin iki numaralı parçadaki kare iç köşeye taşınmış hali Şekil 3.24’te, diğer köşelerdeki izotermiyle birleştirilmiş hali ise Şekil 3.25’te görülmektedir.

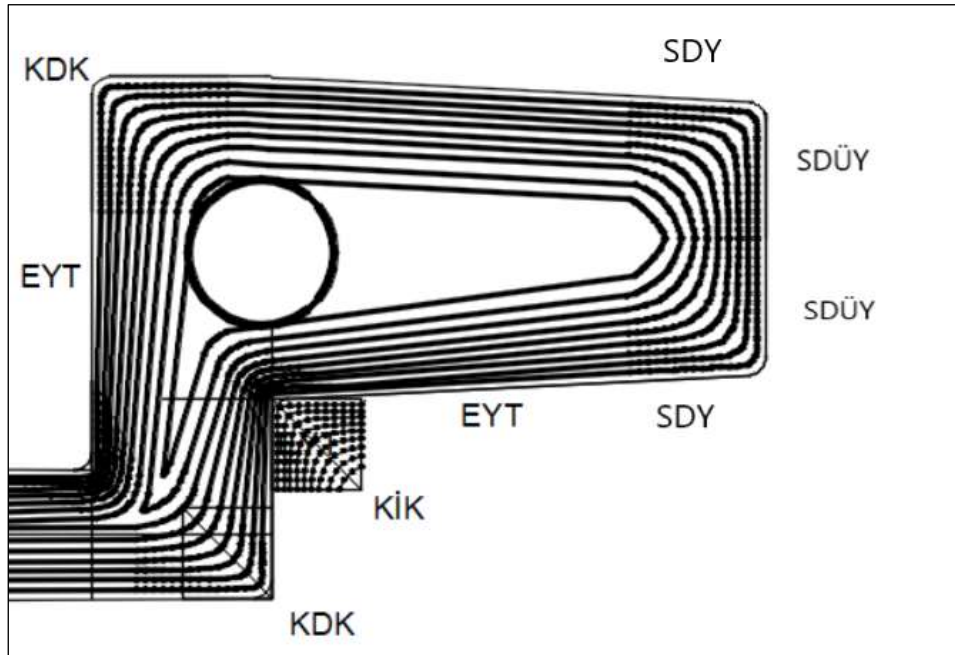


Şekil 3.23. İki numaralı parçanın iç köşe izotermi



Şekil 3.24. İki numaralı parçanın iç köşe izotermelerinin parçanın içine taşınması

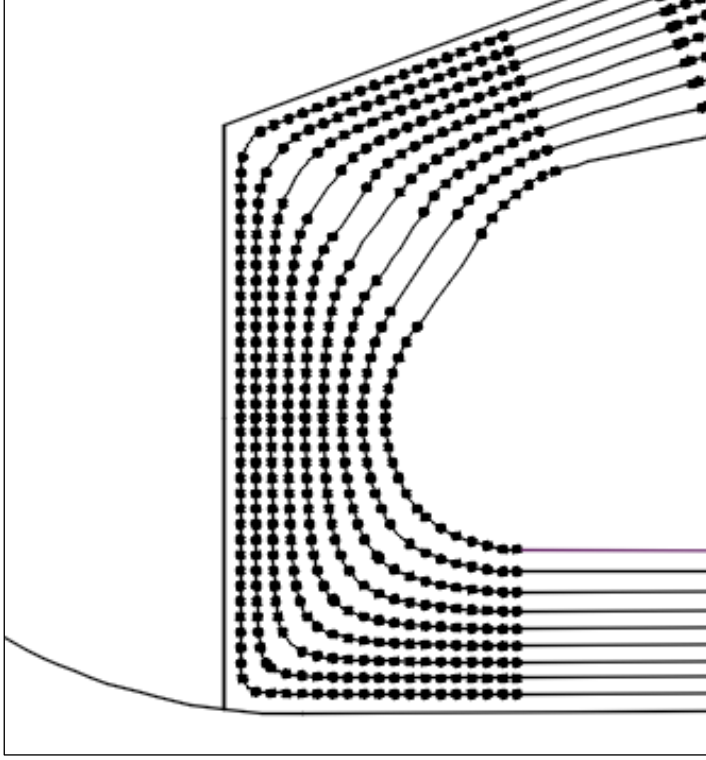
İkinci parçanın sağ tarafı bütün kareler doğru yerlere yerleştirildikten sonra izotermiği birleştirilmiştir. Parçanın sağ tarafının son görüntüsü Şekil 3.25'te görülmektedir.



Şekil 3.25. İki numaralı parçanın sağ kısmının tamamlanmış izotermiği

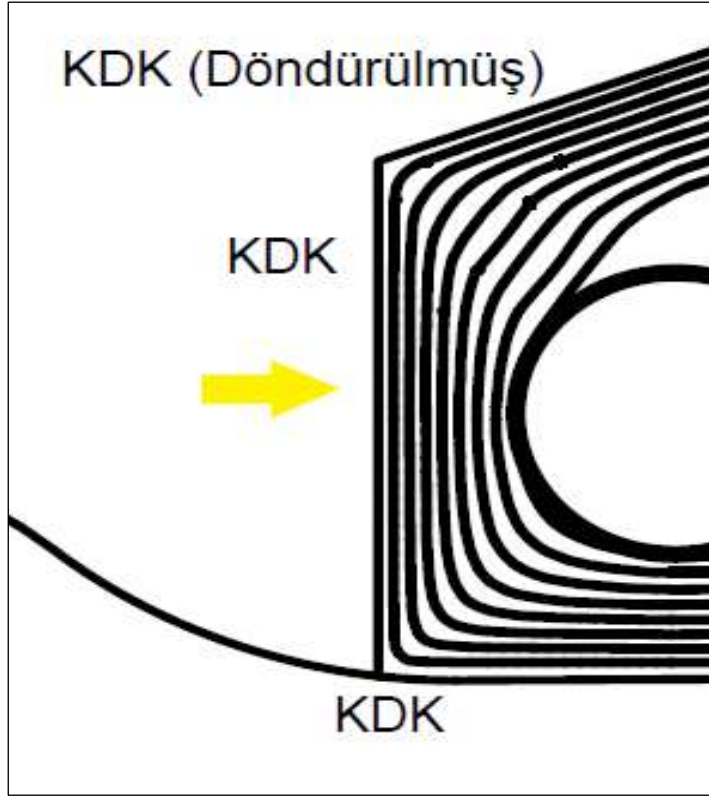
Parçanın sol tarafına gelindiğinde iki tane kare dış köşe olduğu görülmektedir. Bunlardan alttaki köşe 90° , üstteki ise $>90^\circ$ dir. 90° 'den büyük açılı köşede, köşenin üst yarısında döndürme (açı verme) işlemi uygulanmıştır. Şekil 3.21 ve 3.22'de daha önce çizilmiş

bulunan kare dış köşe, ebatların aynı olması nedeniyle parçanın sol tarafına kopyalanarak yerleştirilmiştir, Şekil 3.26.



Şekil 3.26. İkinci parçada kare dış köşenin açı ile döndürülmüş halinin görüntüsü

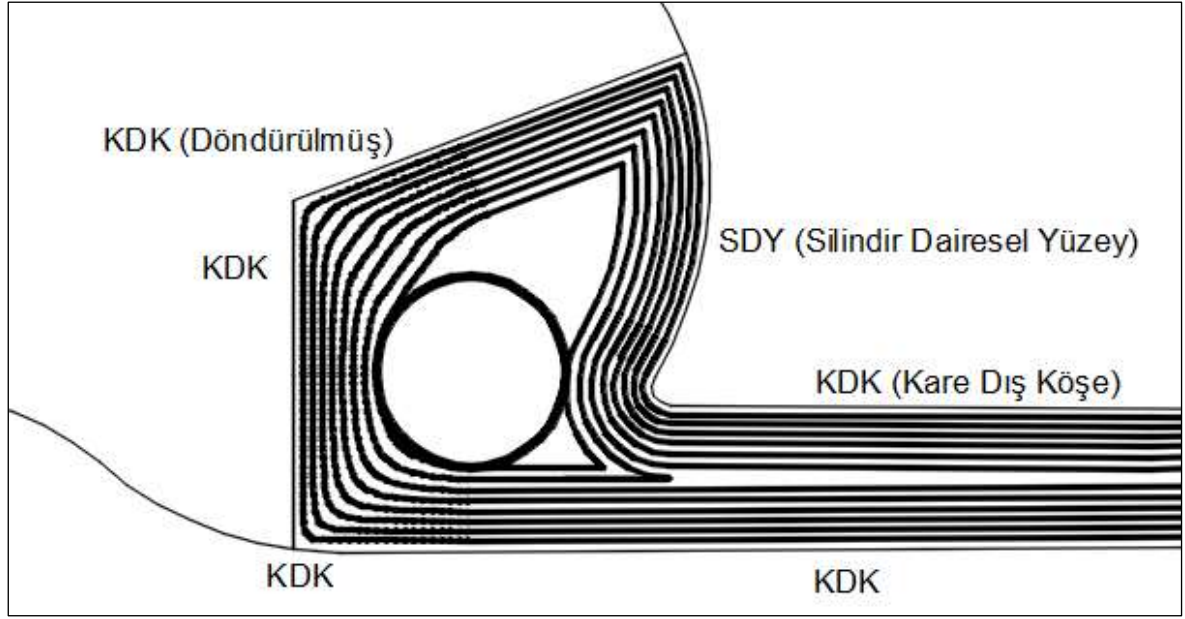
Şekil 3.27’de sarı ok ile gösterilen kenarın orta noktası temel alınarak Şekil 3.21 ve 3.22’deki izotermi tamamlanmış kare dış köşe yerleştirilir. Sonraki adımda, orta nokta temel alınarak yukarıya doğru AutoCAD’de bulunan aynalama komutu ile simetrisi alınır. Fakat görüldüğü üzere parçanın yukarısı açılıdır. 90° açı ile izotermi tamamlanmış karenin kenarlarına ve izotermine açı verebilmek için döndürülmesi gerekmektedir. Bu durumda aynalama yönteminden sonra karenin üst kenarı ile parçanın eğimli olan kenarının arasındaki açı ölçülür. Çıkan açı derecesine göre de izotermi tamamlanmış kare dış köşenin yarısı ölçülen açıya göre döndürülür. Şekil 3.27’de görülen noktaların arasındaki düz çizgiler eğim sonrasında izotermilerin birleştirilmesi ile oluşturulmuştur.



Şekil 3.27. İki numaralı şeklin sol tarafının detaylı izoterm görüntüsü

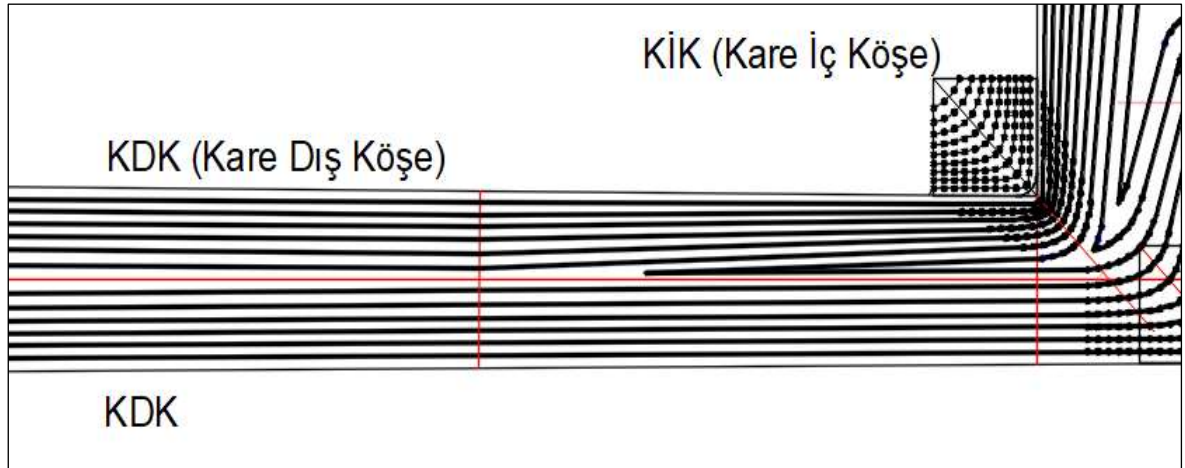
İzotermelerin yukarıda verildiği gibi birleştirilmesinden sonra silindir dairesel yüzey çalışması yapılmıştır. Burada izotermeler Şekil 3.28'deki noktalar temel alınarak oluşturulmuştur. Bu noktaların koordinatları Visual Basic programındaki “UA 2-D HESAPLAYICI SİLİNDİR ROUND FACE” formüllerinin bulunduğu kısımda hesaplanmıştır.

AutoCAD programında “Offset” komutu ile Şekil 3.27’de bahsedilen noktaların uzaklıkları temel alınarak oluşturulan izotermeler Şekil 3.28’de görülmektedir. Takiben, buradaki bütün izotermeler birleştirilmiştir.



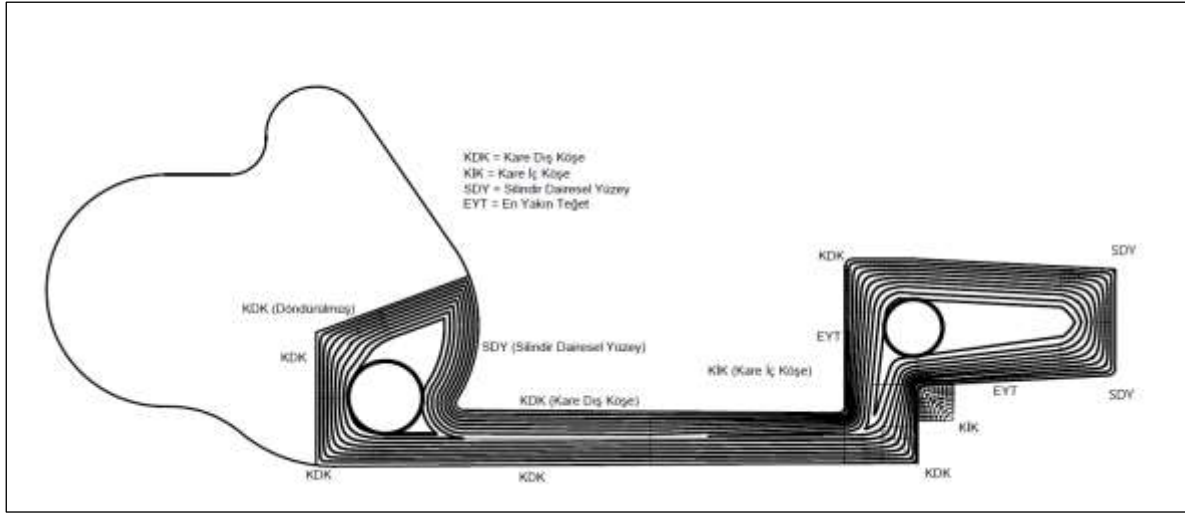
Şekil 3.28. İkinci parçada AutoCAD “Offset” komutu ile oluşturulan izoterm

İki numaralı parçanın sağ ve sol tarafı tamamlandığında izotermier uzatılarak birbirlerine bağlanmıştır, Şekil 3.29. Kolaylık olması ve anlaşılması açısından şeklin ortası yatay ve dikey olarak orta noktaları kırmızı çizgi ile belirtilmiştir. Böylece köşelerden gelerek ortada birleşen izotermier daha doğru bir şekilde tanımlanmıştır.



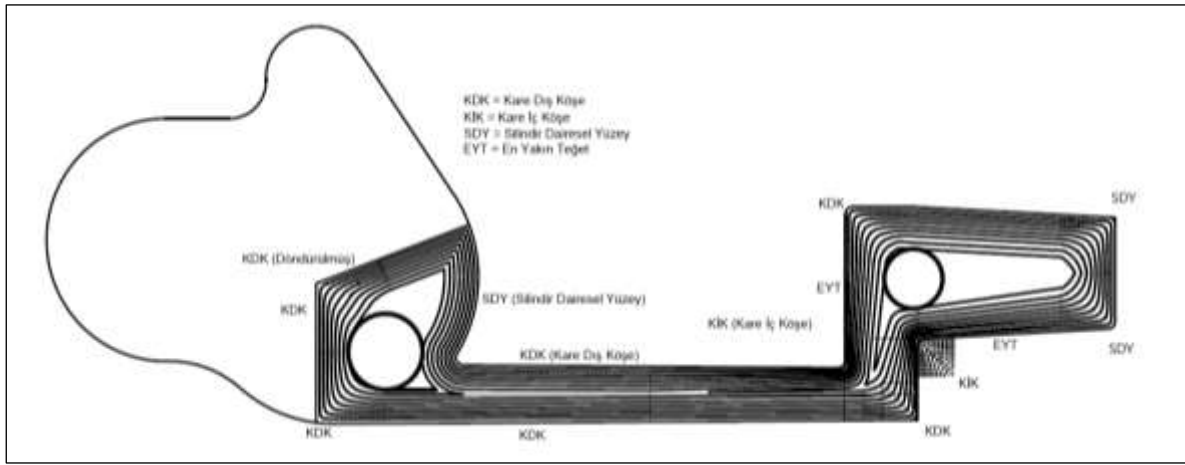
Şekil 3.29. İkinci parçada izotermier birleştirilerek parçanın ortasının tamamlanması

Şekil 3.30’da bütün köşelerden uzatılan bütün izotermier birbirlerine bağlandıkları görülmektedir. Parçanın sağ ve sol tarafında, kütlenin en fazla olduğu yerlerde bağlanacak bir izoterm yoktur. Buralardaki boşluklara çizilebilecek en büyük çaplı daire, kenarlara üç noktadan teğet olacak şekilde AutoCAD programında çizilmiştir.



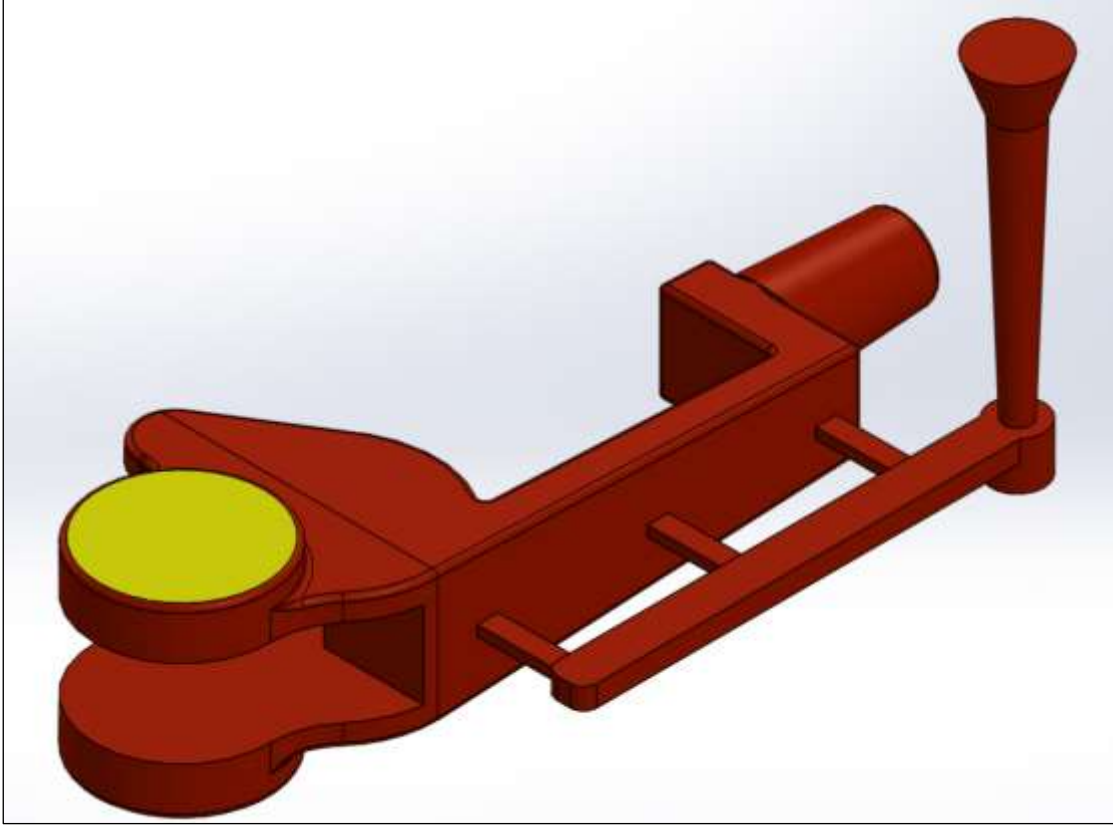
Şekil 3.30. İki numaralı parçada AutoCAD üzerinde tamamlanmaya yakın görüntüsü

Şekil 3.30'da iki numaralı parçanın bitmiş hali görülmektedir. AutoCAD çiziminin sonucu olarak da dairelerin bulunduğu kısımda sıvı metal yetersizliği yaşanabileceği hakkında bize uyarı vermektedir.



Şekil 3.31. İki numaralı parçada AutoCAD üzerinde tamamlanan bütün izotermier

Şekil 3.31'de bulunan, çekme ihtimali yüksek olarak yorumlanan kısımların Magmasoft döküm simulasyon programında gerçeğe yakın halinin döküm simulasyonu için yolluk tasarımı yapılmıştır. Bu yolluk tasarımı Şekil 3.32'de görülmektedir.

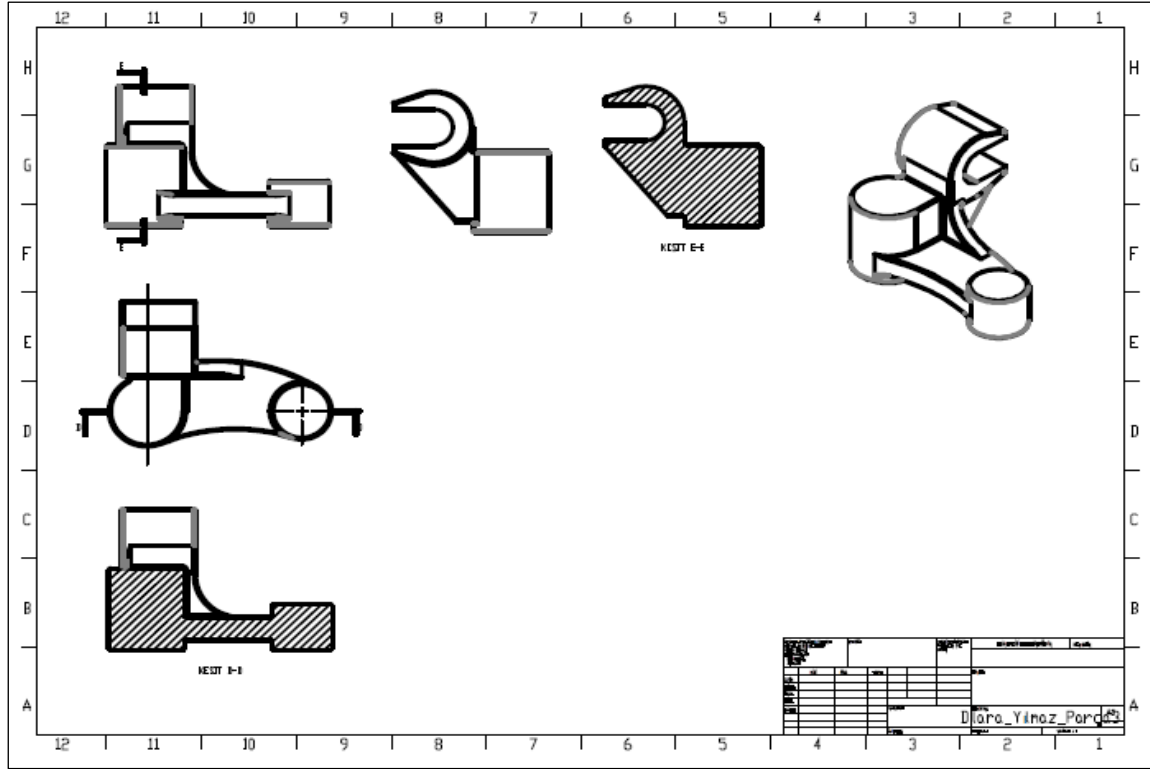


Şekil 3.32. İki numaralı şeklin yolluk tasarımı

3.3. Yüksek Seviyedeki Karmaşık Geometrik Şeklin İzotermilerinin Belirlenmesi

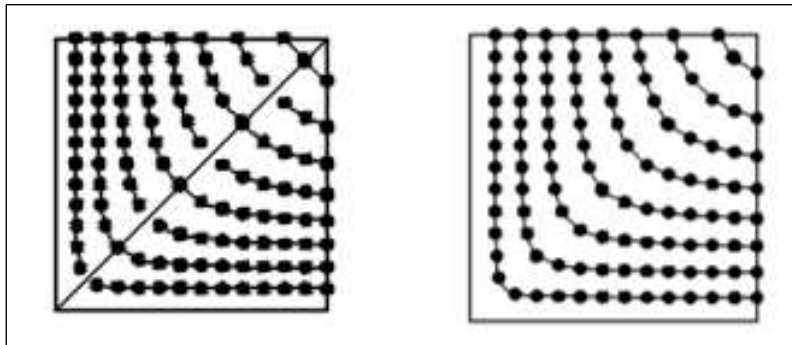
Üç numaralı parçanın teknik çizimi Şekil 3.33'te görülmektedir. Bu parçanın şeklinin daha karmaşık olmasından dolayı iki farklı kesit üzerinde çalışma yapılmıştır. AutoCAD programı üzerinde Birim Alan çalışmaları taralı yüzeylerde yapılmıştır. Taralı yüzeylere göre dikdörtgen görünen parçaya A-A kesiti, diğer kanca şeklinde görülen parçaya ise B-B kesiti adı verilmiştir.

A-A kesitine bakıldığı zaman silindir dairesel ve silindir düzlemsel yüzeyler görülmektedir. B-B kesitine bakıldığı zaman ise silindir dairesel ve düzlemsel yüzeyle birlikte düz yüzey de görülmektedir.



Şekil 3.33. Üç numaralı parçanın teknik resmi

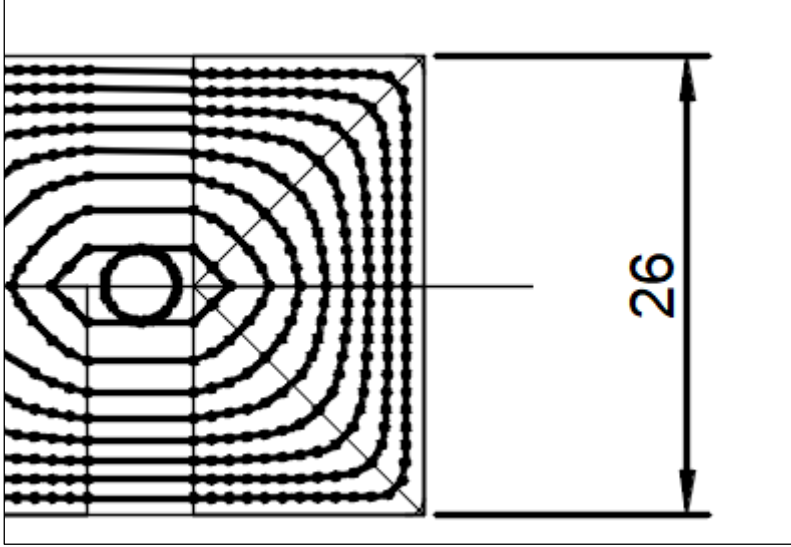
İlk olarak üç numaralı parçanın A-A kesitinin BA yaklaşımına dayalı olarak katılma izotermilerinin çizimi amacıyla AutoCAD çalışmasına başlanmıştır. A-A kesitinin sol tarafında bulunan, görüntü olarak döküörtgen ama asıl şekilde silindir olan yüzey çalışması için Visual Basic programındaki “UA 2-D HESAPLAYICI SİLİNDİR ROUND FACE” ve “UA 2-D HESAPLAYICI SİLİNDİR FLAT SURFACE” hesaplayıcısı ile koordinatlar belirlenmiştir. Şekil 2.34’te görüldüğü üzere karenin izotermi tamamlanmıştır.



Şekil 3.34. Üçüncü parçada silindir dairesel ve silindir düzlemsel yüzey izotermi

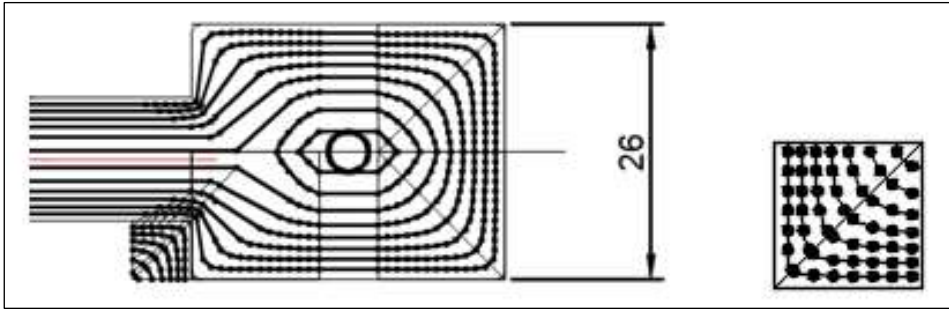
Şekil 3.34’te görüldüğü gibi orta nokta temel alınarak ve kenarın uzunluğu hesaplanarak izoterm oluşturulacak olan karenin ölçüleri belirlenmiştir. Şekil 3.35’te bulunan izoterm

doğru köşelere yerleştirilmiş ve sonrasında yukarıya doğru AutoCAD ‘de bulunan “Mirror” komutu ile simetrisi alınmıştır.



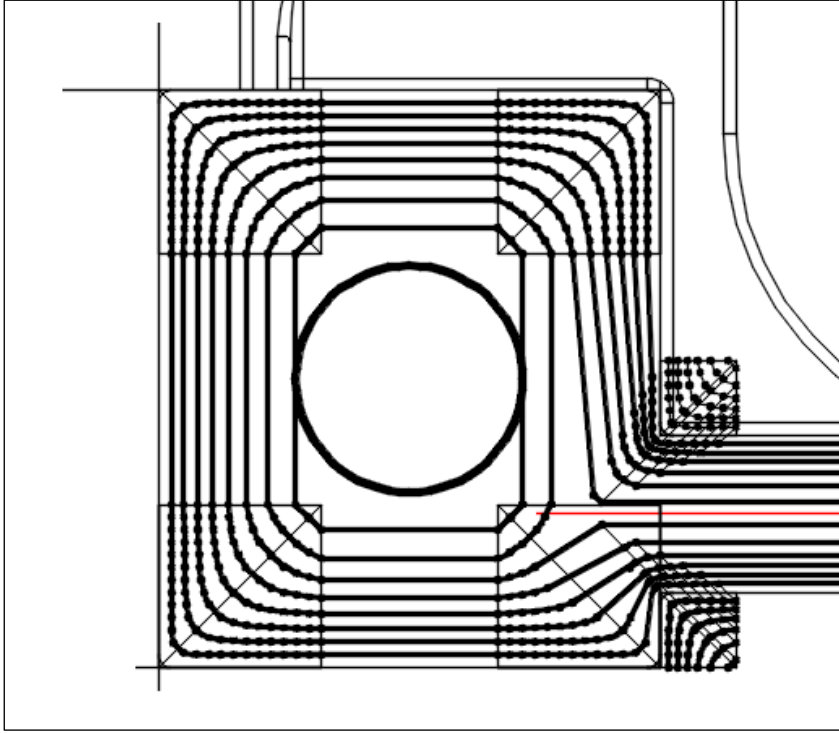
Şekil 3.35. Üçüncü parçada silindir dairesel yüzeyin izotermelerinin birleştirilmesi

Şekil 3.36’da görüldüğü üzere iki silindir köşesi bulunurken iki de iç köşe bulunmaktadır. Parçanın orta kesimlerinin nasıl yerleştirildiği Şekil 3.36’da verilmiştir. Daha önce iki numaralı parçada da belirtildiği gibi, 45° derece açı ile yerleştirilen iç köşe izotermelerinin yukarıya doğru simetrisi alınarak üst kısım da tamamlanmıştır.



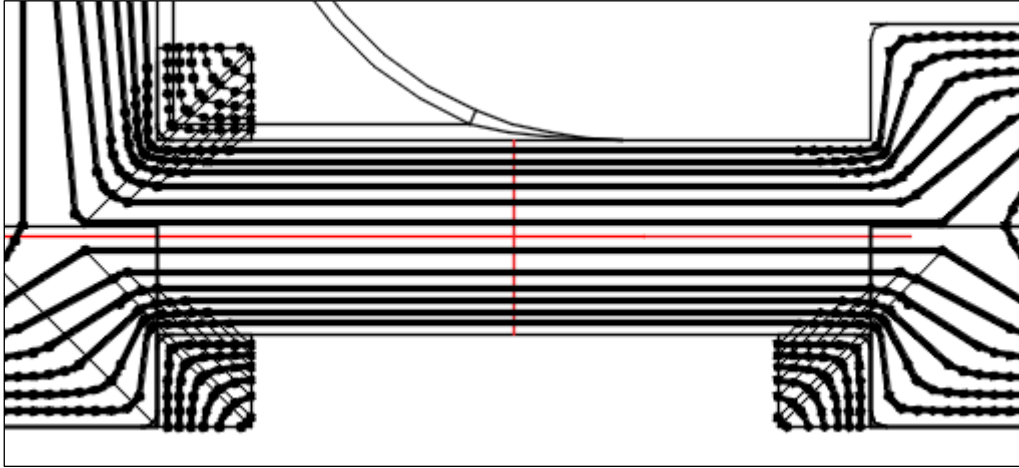
Şekil 3.36 .Üçüncü parçada A-A kesitinin tamamlanmış sağ kısmı (solda) ve iç köşe izotermeleri (sağda)

A-A kesitinin sol tarafına gelecek olursak, parçanın diğer kısımlarında hesaplanan izotermeler doğru simetritelerle birlikte köşelere yerleştirilmiştir. Şekil 3.37’de, parçada köşelerin nasıl oluşturulduğu ve nasıl yerleştirildiği görülmektedir. Kesit üzerinde iki tane iç köşe vardır ve 45° derecelik açı ile izotermeler içeri taşınarak diğer köşelerin izotermeleri ile birleştirilmiştir.



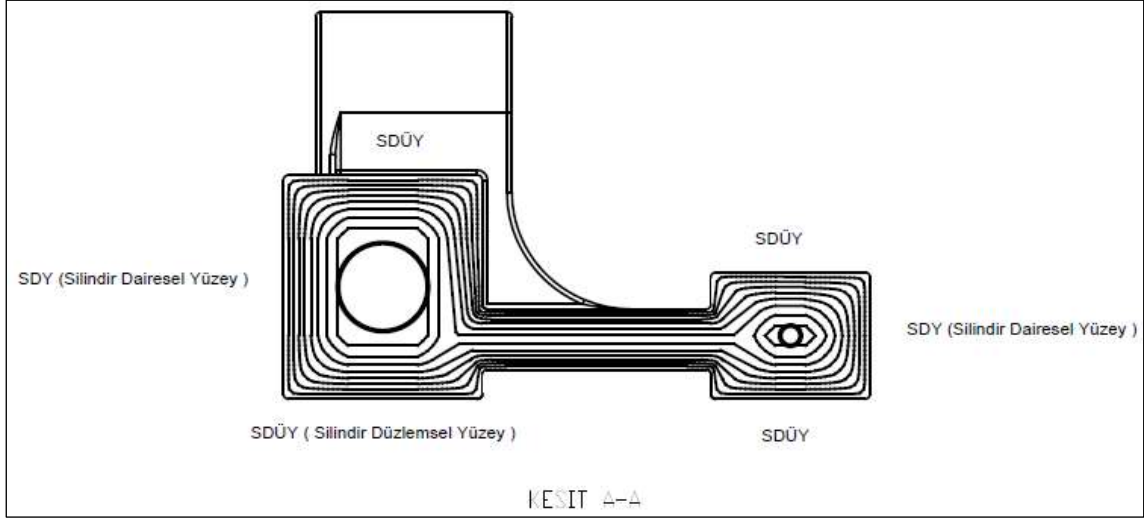
Şekil 3.37. Üçüncü parçada A-A kesitinin tamamlanmış sol kısmı

Şekil 3.38’de A-A kesitinin orta kısmının izotermelerinin nasıl birleştirildiği görülmektedir. Orta kısımları kırmızı ile belirtilmiştir.



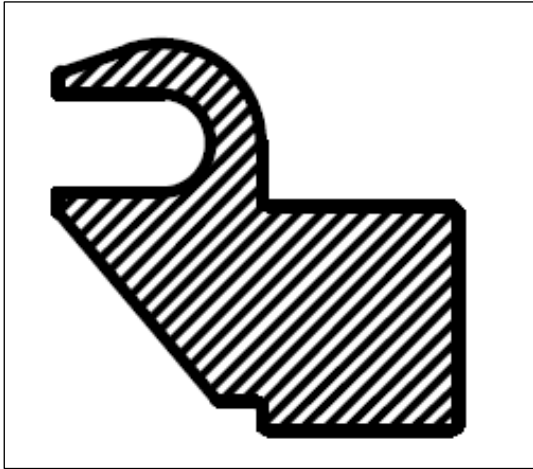
Şekil 3.38 .Üçüncü parçada A-A kesitinin orta kısmının tamamlanması

Şekil 3.39’da A-A kesitinin tamamlanmış hali verilmiştir. AutoCAD programında izotermelerin bulunmadığı büyük boşluklara teğet daireler çizilmiştir.



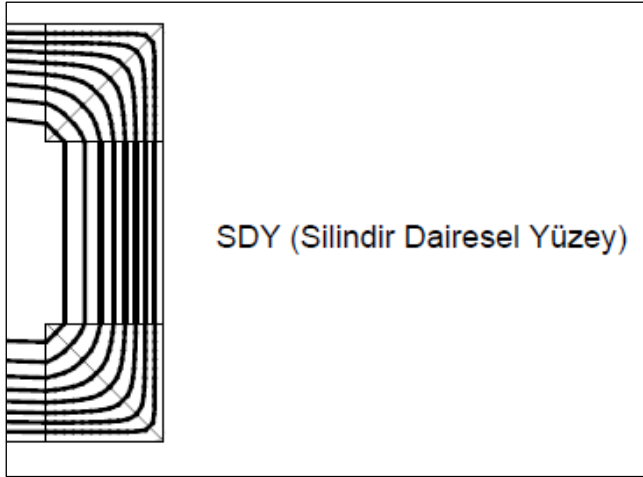
Şekil 3.39. Üçüncü parçada A-A kesitinin izotermi tamamlanmış görüntüsü

A-A kesitinin tamamlanmasından sonra B-B kesiti üzerinde çalışılmaya başlanmıştır, Şekil 3.40. B-B kesiti için Birim Alan yaklaşımına dayalı olarak katılma izotermi çizimi amacıyla AutoCAD çalışmasına başlanmıştır.



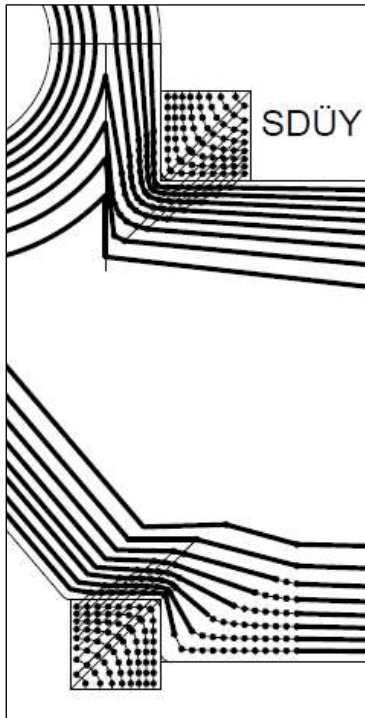
Şekil 3.40. Üç numaralı parçanın B-B kesitinin görüntüsü

Benzerlik nedeniyle, A-A kesiti için daha önce hesaplanan silindir dairesel yüzey izotermi B-B kesitinde oluşturulan köşelere yerleştirilmiştir ve aynalama komutu ile çizimin sağ kısmı tamamlanmıştır. Şekil 3.41’de izotermi birleştirilmiş hali görülmektedir.



Şekil 3.41. Üçüncü parçada B-B kesitinin izoterm çizimlerine başlandığı kenarın görüntüsü

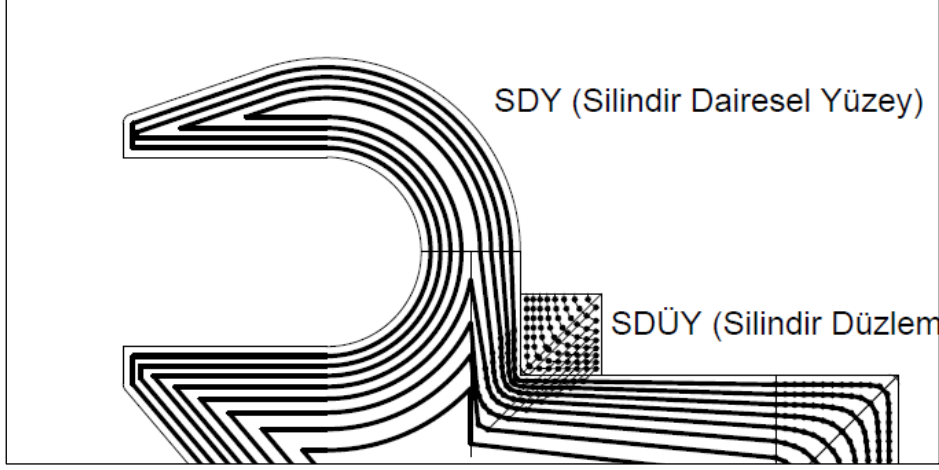
B-B kesitinin sol tarafına doğru ilerlediğimizde iki tane iç köşe görülmektedir. Bu iç köşeler Şekil 3.41’de bulunan izoterm döründürölüp köşelere yerleştirilmiş ve bütün izoterm birleştirilmiştir. Şekil 3.42’de birleştirilen iç köşeler görölmektedir.



Şekil 3.42. Üç numaralı parçanın B-B kesitinin iç köşelerinin görüntüsü

B-B kesitinin kanca biçimli kısmı yapılırken bir orta nokta belirlendi ve izoterm oluşturulurken bu orta nokta dikkate alındı. Silindir dairesel yüzey için oluşturulan kare izoterm noktalarının uzaklıkları ölçölerek B-B kesitinin yüzeyinden “Offset” (öteleme) komutu ile çalışılmıştır ve aşağıdaki görüntü elde edilmiştir, Şekil 3.43. Toplamda sekiz adet

olan izotermin dördünün şeklin kanca biçimli kısmının içine doğru ilerlerken, kalan dördünün ilerleyemeyip parçanın diğer kısmına kadar uzandığı görülmektedir, Şekil 3.43.



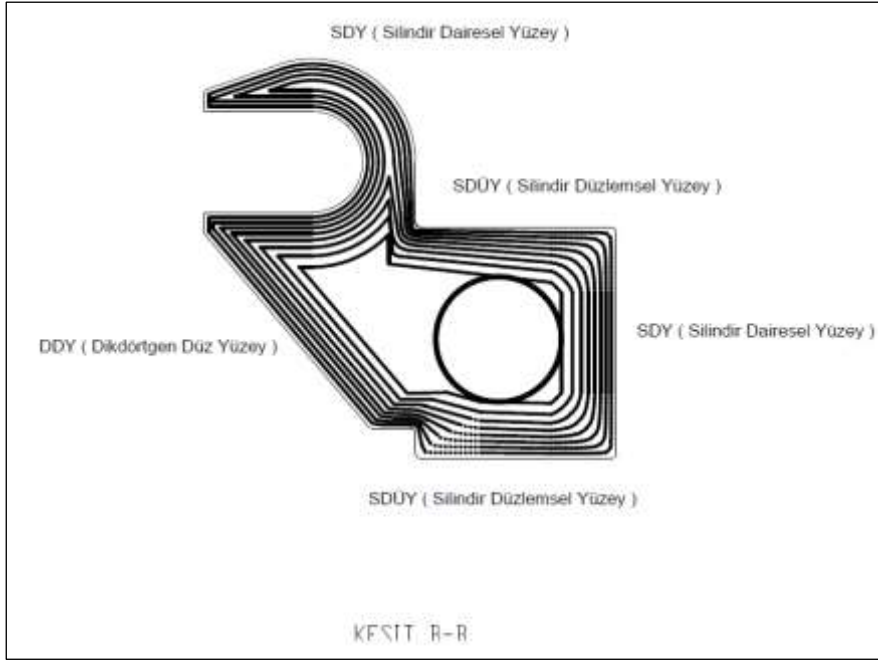
Şekil 3.43. Üç numaralı parçada B-B kesit izotermelerinin ilerme şekli ve birleşmesi

Şekil 3.44'te ki DDY kısmı için kare dış köşe izotermelerinin, karenin çevresine olan uzaklıkları hesaplanarak $t_p=1$ den $t_p=8$ 'e kadar olan izotermeleri "Offset" komutu ile çizilmiştir.



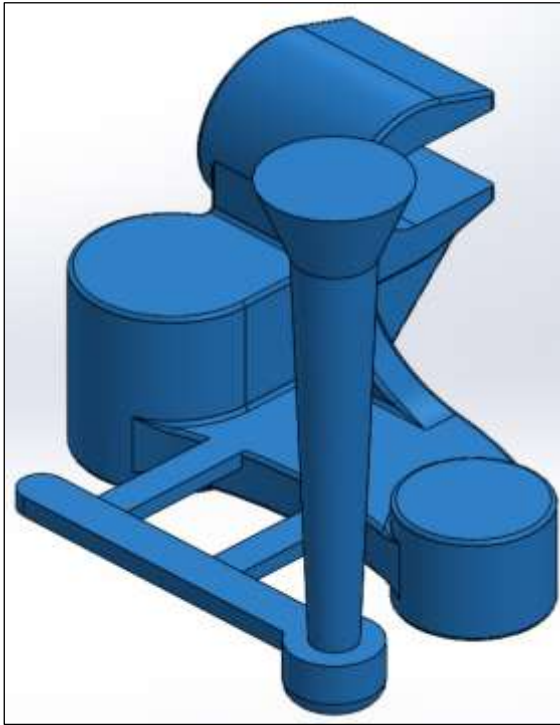
Şekil 3.44. Üç numaralı parçada B-B kesitinin izotermelerinin birleştirilmesi

Üç numaralı şeklin B-B kesitinin Birim Alan yaklaşımına dayalı katılma izotermelerinin tamamlanmış hali Şekil 3.45'te verilmiştir. Parçanın orta kısmında bulunan en büyük boşluğa teğet daire çizilmiştir.



Şekil 3.45. Üç numaralı parçada B-B kesitinin AutoCAD çizimin tamamlanmış görüntüsü

Magmasoft simülasyonunda değerlendirilmesi için parçaya yolluk tasarımı yapılmıştır, Şekil 3.46.



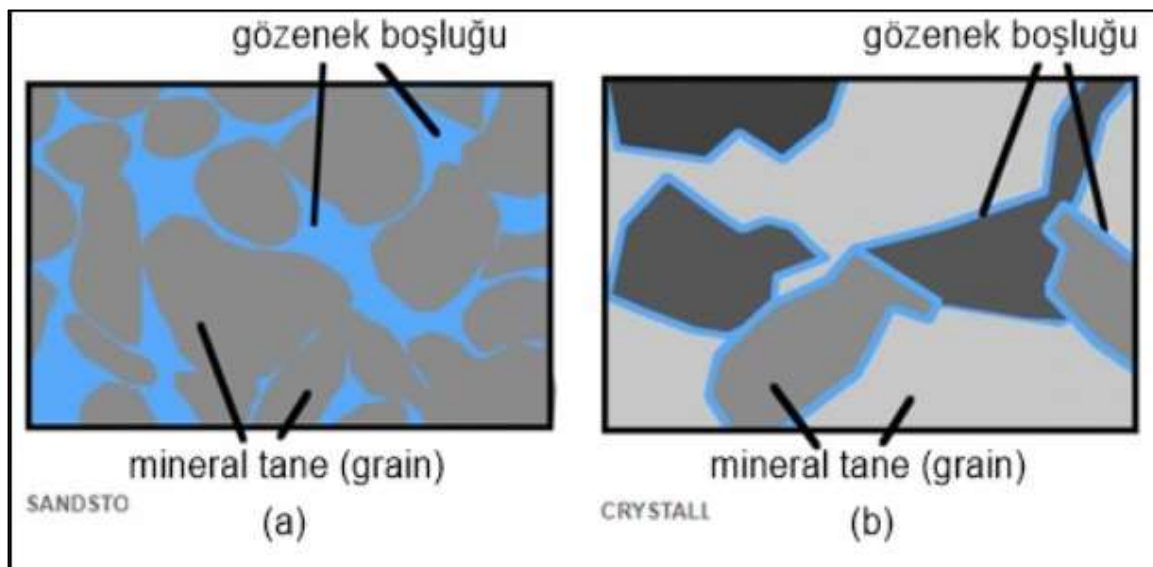
Şekil 3.46. Üç numaralı parçaya ait yolluk tasarımı

4. SONUÇLARIN MAGMASOFT® İLE DOĞRULANMASI

Bu bölümde, daha önce tezin iki numaralı bölümünde verilen üç döküm parçası için, Birim Alan yaklaşımına göre elde edilen katılma izotermelerinin vermiş olduğu hata noktalarının, dünyada bu alanda kendini kanıtlamış bulunan Magmasoft® döküm simulasyon programı ile karşılaştırılmaları amaçlanmıştır.

Magmasoft® simulasyon sonuçları, Şekil 4.2 ile 4.29 arasında görülebileceği üzere, “%Porosity” kriteri ve “Hot Spot FSTime” kriteri kullanılarak iki farklı simulasyon modunda elde edilmişlerdir. %Porosity kriteri, malzemedeki gözenekliliği gösteren bir simulasyon modudur. Hot Spot FSTime kriteri ise, katı yüzdesi zamanına bağlı sıcak nokta anlamına gelmektedir ve katılmanın belli bir zamanında kritik eriyik metalin bulunabildiği aşamayı göstermektedir. Bu kriter Magmasoft® tarafından tanımlanmıştır. Hot Spot FSTime; katılma çekmesinin neden olduğu riskleri değerlendirmek için yararlı bir kriterdir [31].

Yukarıda anlatılan her iki kriter için ikişer farklı simulasyon elde edilmiştir. %Porosity kriteri için yolluksuz (dolumsuz), yolluklu (dolumlu) olmak üzere iki farklı tip ve Hot Spot FSTime kriteri için de yolluksuz (dolumsuz), yolluklu (dolumlu) olmak üzere iki farklı tip simulasyon uygulanmıştır.



Şekil 4.1. Porosity kriterinin şematik anlatımı [32]

Parçaların Hot Spot FSTime görüntüsünde bulunan renkler, resimlerin hemen sağ tarafındaki ölçekte bulunan zamanla ilişkilendirilmiştir, zamanın birimi saniyedir. Tüm parça temel alınarak her bir noktasında zamana bağlı hangi sırayla katılacağı görülebilmektedir. Bu sebeple bir şeklin yolluksuz hali ile yolluklu halindeki renkler farklılık göstermektedir. Magmasoft sonuçlarında en önemli açıklama ve neticeyi Porosity resimleri göstermektedir.

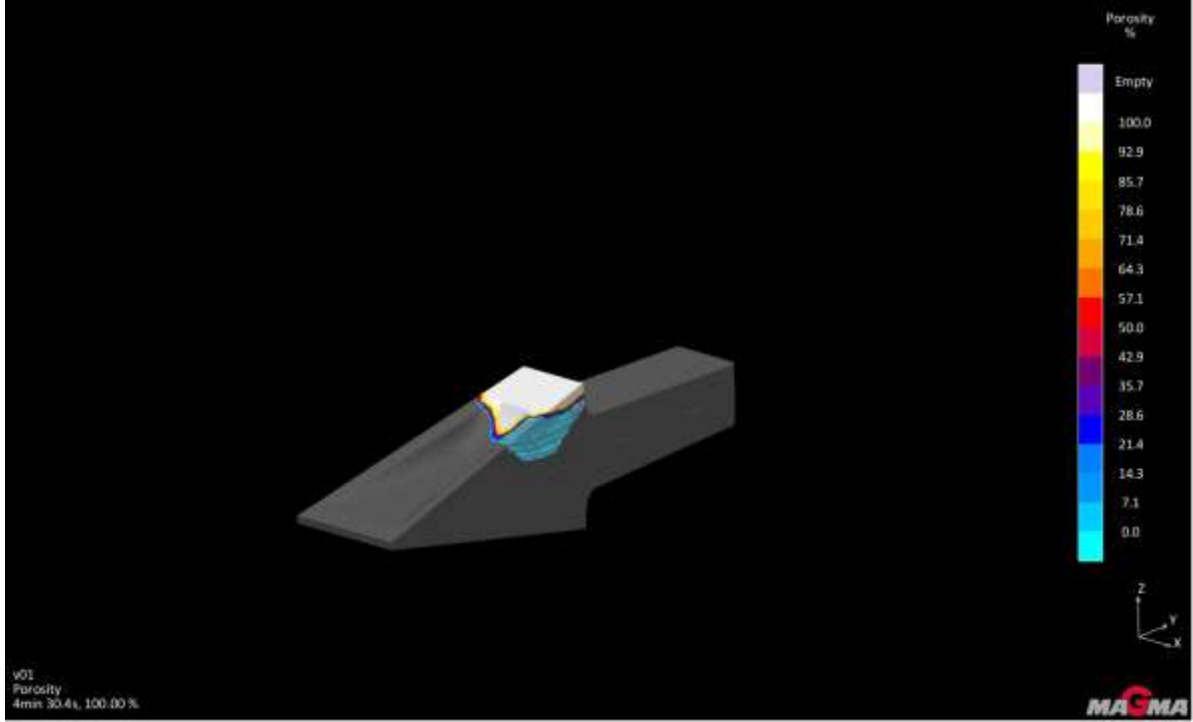
Porosity resimlerinin sağ tarafında bulunan renk ölçeği katılma yüzdesini göstermektedir. Renkli kısımlar parçanın en sıcak noktasını, en son katılma noktasını yani çekme noktalarının olacağı yerleri göstermektedir. Bir parçanın Hot Spot FSTime görüntüsünde renkli kısımlar parçanın çekme ihtimalinin olacağı yerler hakkında bilgi vermektedir ancak tek başına yorumlanmamaktadır. Eğer bir parçanın Hot Spot FSTime kısmında renkli kısımlar, Porosity görüntüsünde de aynı yerlerde renkli görünüyorsa (renkli balonların olması) parçanın o kısımlarında çekme olma ihtimali çok yüksek, hatta kesin olduğunu anlatmaktadır. Fakat eğer bir parçanın Hot Spot FSTime görüntüsünde renkli olan kısımlar Porosity görüntülerinde renksiz olarak bulunuyorsa, parçanın o kısımlarında çekme yani sıvı metal yetersizliği olmayacağı anlamına gelmektedir. Tezin 4. bölümünde bulunan bütün simülasyon görüntüleri Magmasoft® Türkiye tarafından sağlanmıştır.

4.1. Basit Seviyedeki Karmaşık Geometrik Şekle Sahip Parça

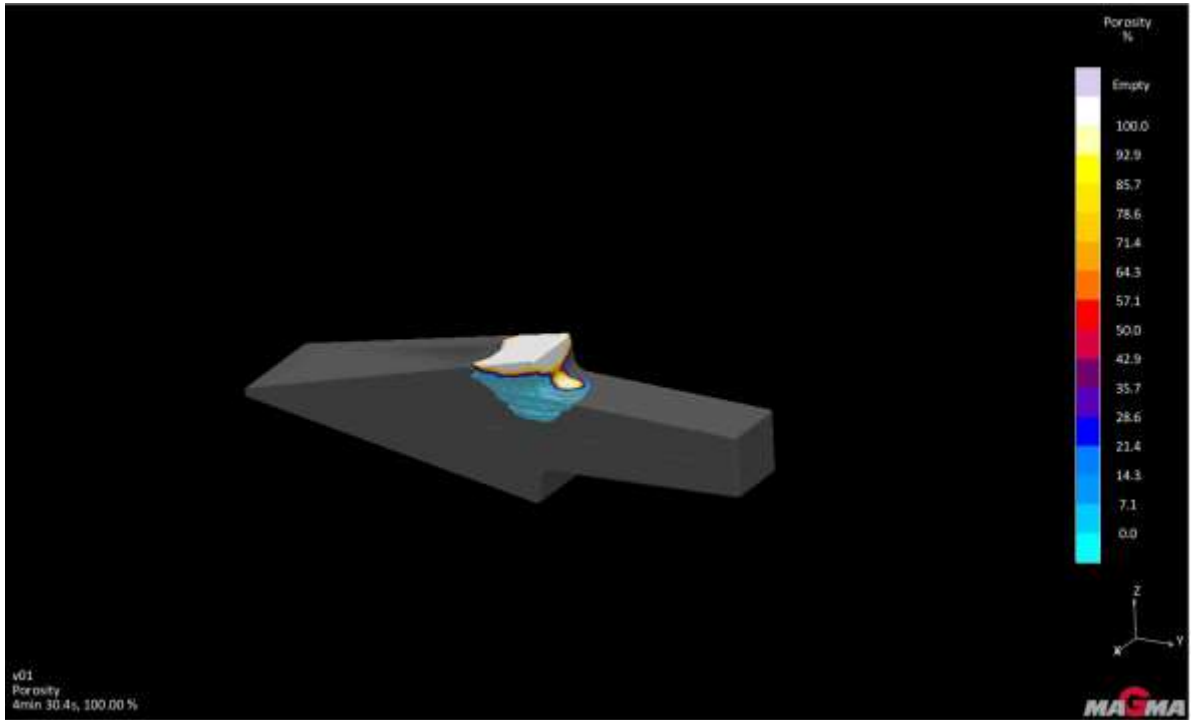
Aşağıda bir numaralı döküm parçasına ait Magmasoft® simülasyonları verilmiştir.

4.1.1. Porosity simülasyonları

Bir numaralı parçanın yolluksuz porosity görüntüleri Şekil 4.2 ve 4.3'te verilmiştir. Şekillerin sağ tarafında porosity yüzdesine göre sıvı metalin dökülmesi ile birlikte son sıcak kalan bölgelerin nereler olduğunu görebilmekteyiz. Sıvı metalin boşluk yaratacağı kısımlar yolluğa ve şeklin duruş şekline göre değişebilir. Yan yatmış olan parçada sıvı metal en üst kısmına en son gelecektir. Aşağıdaki şekilde de bu kısımlar beyaz olarak gözlemlenebilmektedir. Çalışma sırasında Manganlı Çelik alaşım tanımlaması kullanılmıştır. Mangan oranı %11-12 olarak Magmasoft çalışması istenilmiştir. Beyaz olan kısım sıvı metalin en son geleceği kısımdır. Renklendirmeler manganlı çeliğin çekme oluşturabileceği kısım hakkında ön bilgi vermektedir.



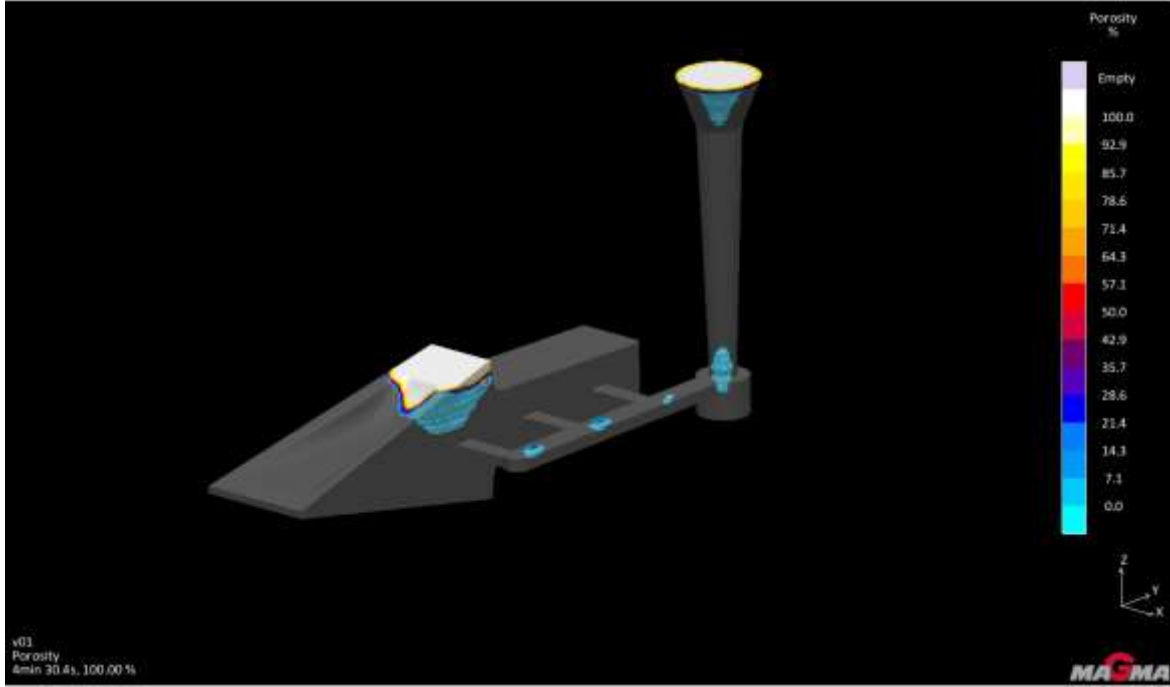
Şekil 4.2. Bir numaralı parçanın yolluksuz porosity görüntüsü



Şekil 4.3. Bir numaralı parçanın farklı açıdan yolluksuz porosity görüntüsü

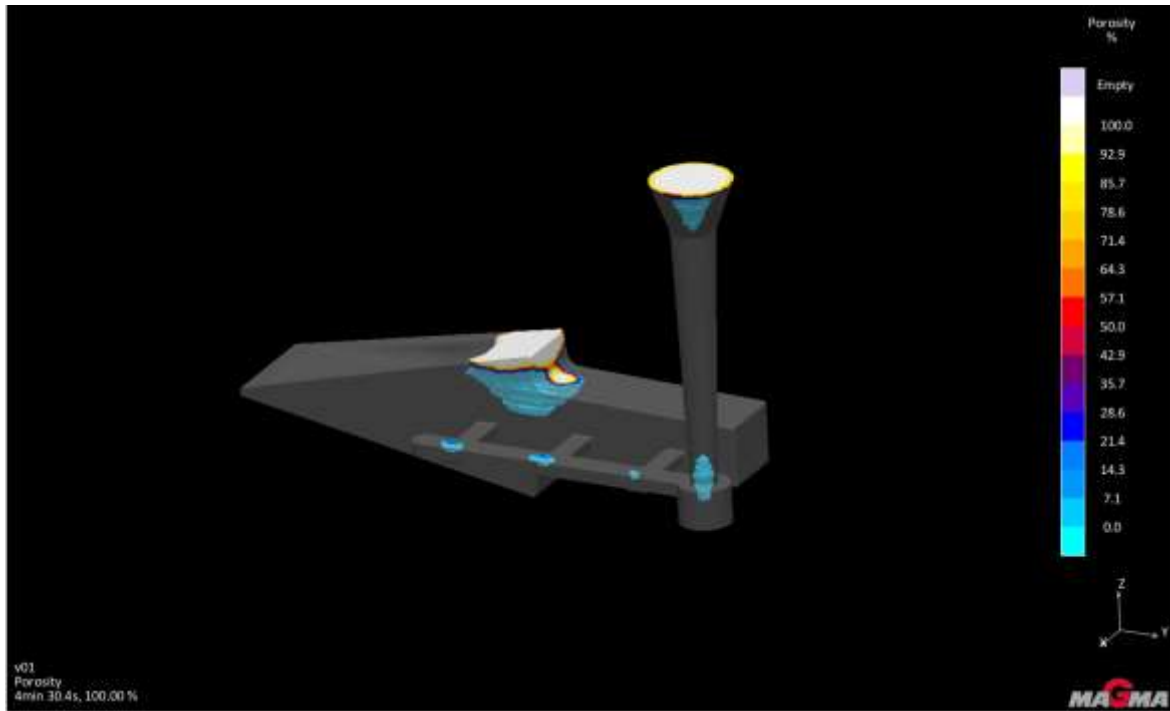
Şekil 4.4 ve 4.5 bir numaralı parçanın yolluklu porosity görüntüsüdür. Resmin sağ tarafında porosity yüzdesine göre sıvı metalin dökülmesi ile birlikte son sıcak kalan bölgelerin nereler olduğunu görebilmekteyiz. Sıvı metalin boşluk yaratacağı kısımlar yolluğa ve parçanın

duruş şekline göre değişebilir. Yan yatmış olan parçada sıvı metal en üst kısmına en son gelecektir. Aşağıdaki resimde de bu kısımlar beyaz olarak gözlemlenebilmektedir.



Şekil 4.4. Bir numaralı parçanın yolluklu porosity görüntüsü

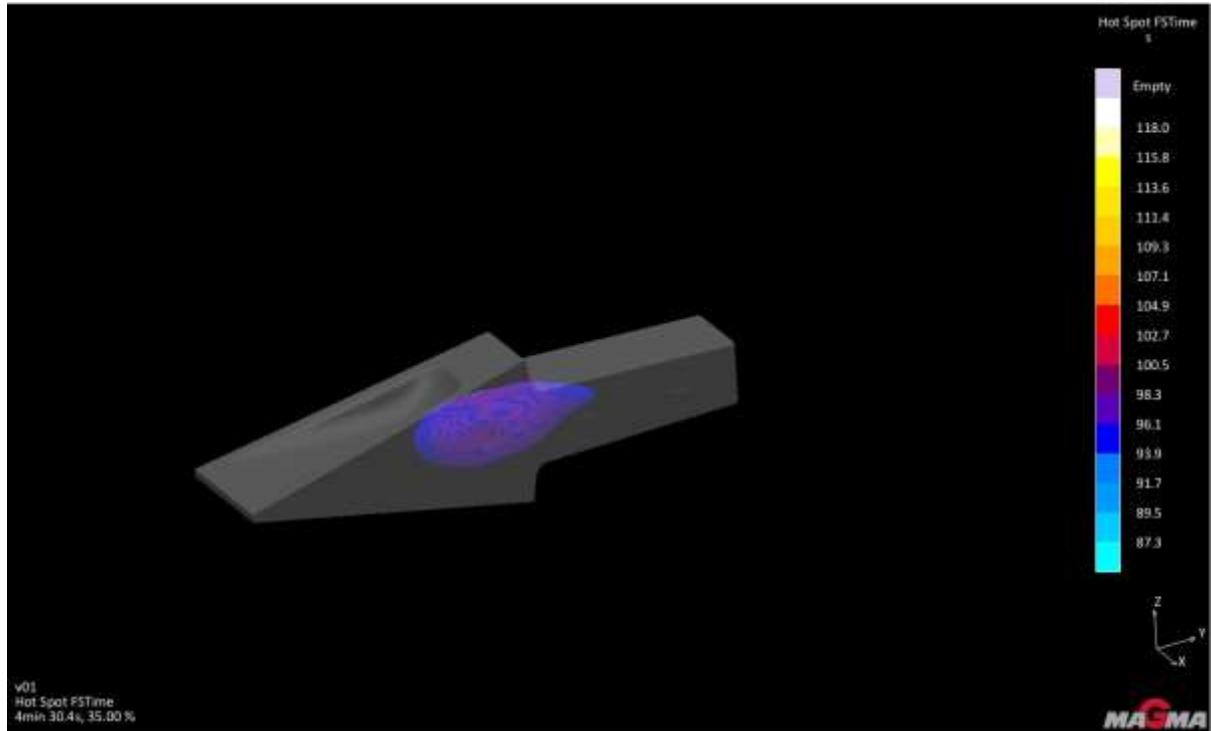
Şekil 4.5. bir numaralı parçada Şekil 4.4'ün farklı açıdan görüntüsünün alınmış halidir.



Şekil 4.5. Bir numaralı parçanın farklı açıdan yolluklu porosity görüntüsü

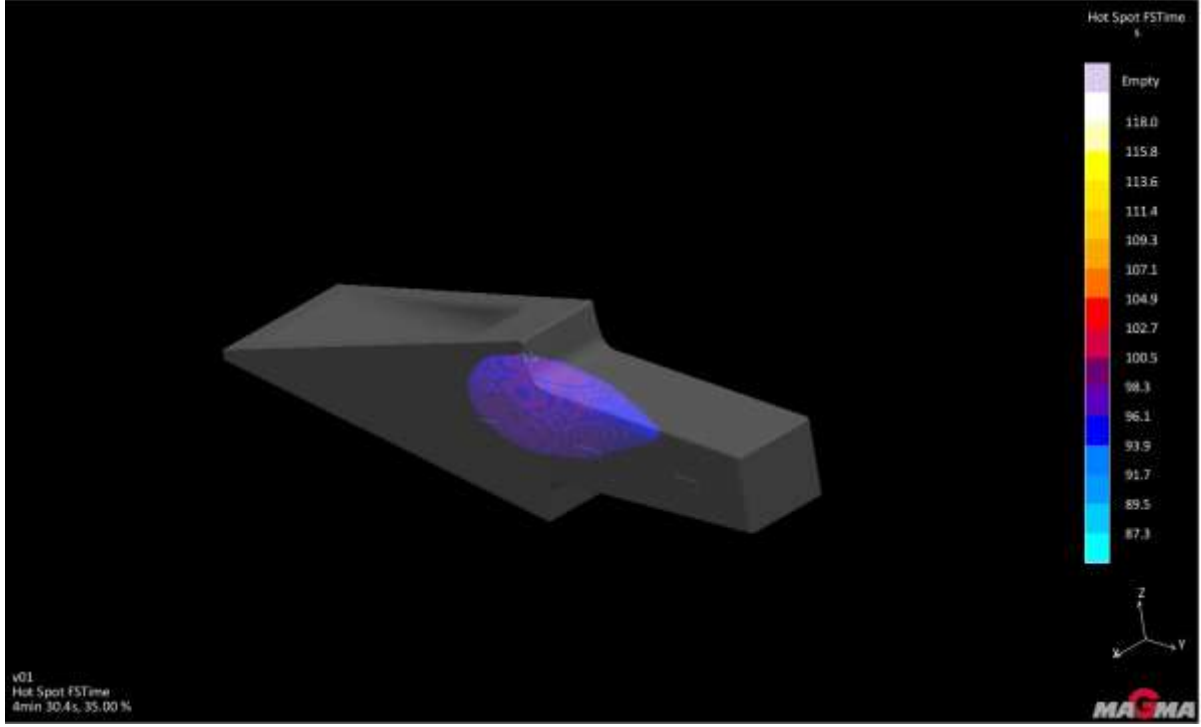
4.1.2. Hot Spot FSTime simulasyonları

Şekil 4.6 Hot Spot FSTime görüntüsünü yolluksuz olarak gözlemlemekteyiz. Renklerin farklılık göstermesinin sebebi yolluk olmadığından dolayıdır. Tek parça kısmında zaman oranına göre yapılan renklendirme çalışmasında en son katılacak olan kısmın orta kısmı olduğunu görebilmekteyiz. AutoCAD çiziminde (Şekil 3.12) orta kısmın tam olarak aşağıdaki resimde görülen renkli kısmı işaret ettiği görülebilmektedir.



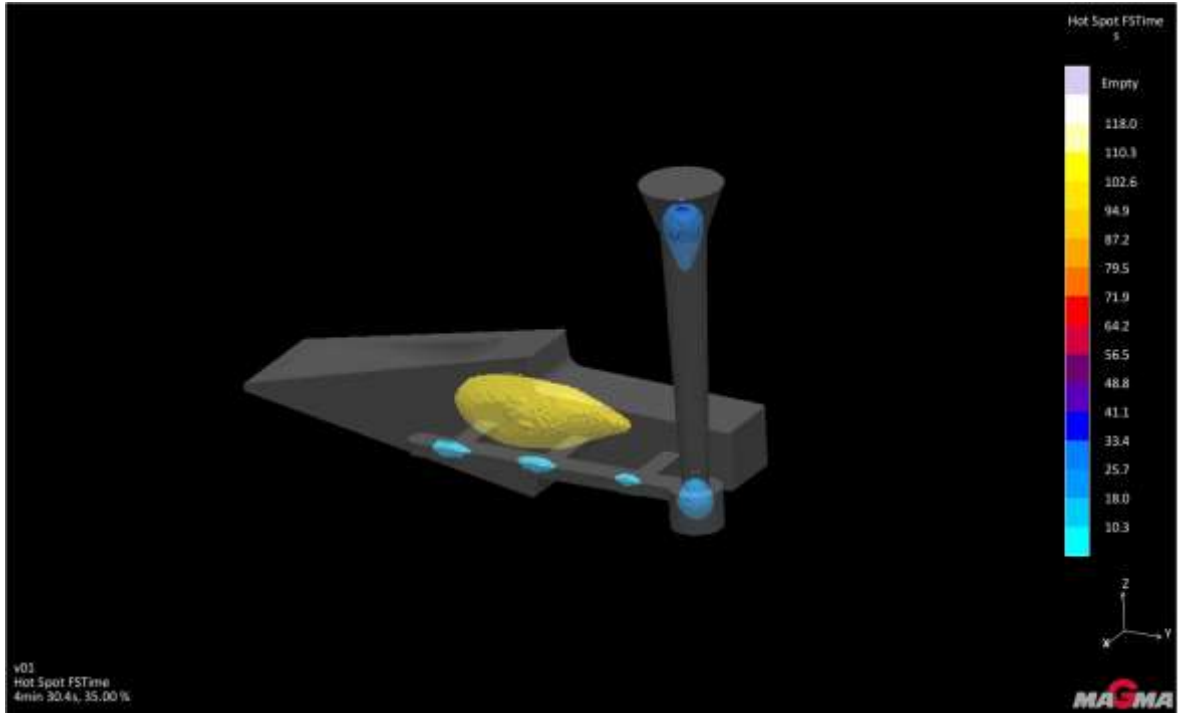
Şekil 4.6. Bir numaralı parçanın yolluksuz Hot Spot FSTime görüntüsü

Şekil 4.7’de yolluksuz Hot Spot FSTime görüntüsünün farklı açıdan görüntüsü bulunmaktadır.



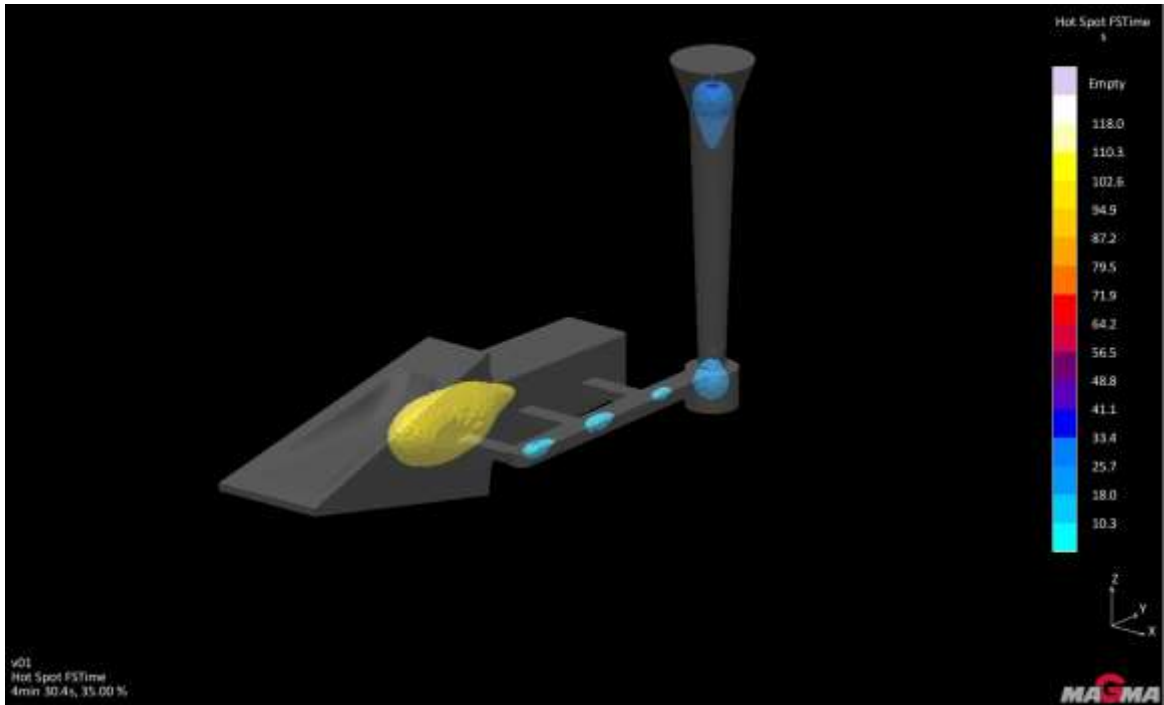
Şekil 4.7. Bir numaralı parçanın farklı açıdan yolluksuz Hot Spot FSTime görüntüsü

Şekil 4.8’de bir numaralı parçanın Hot Spot FSTime görüntüsü bulunmaktadır. Hot Spot FSTime görüntüsü Porosity görüntüsü ile birlikte değerlendirilmektedir. Sağ taraftaki renk ölçeğine bakılarak zamana bağlı olarak sıvı metal katılaşması hakkında yorum yapılabilmektedir. Orta alan beyaza en yakın renktir, burada sarıdır. En geç soğumanın olacağını ve buna bağlı olarak da çekmenin görülebileceği hakkında yorum yapabilmekteyiz. Ortak renklendirme noktasının parçanın ortası olduğu konusunda hem fikir olarak bu kısımda çekme olabileceği hakkında yorum yapabilmekteyiz.



Şekil 4.8. Bir numaralı parçanın yolluklu Hot Spot FSTime görüntüsü

Şekil 4.9, bir numaralı parçada Şekil 4.8 ‘in farklı açıdan görüntüsünün alınmış halidir.



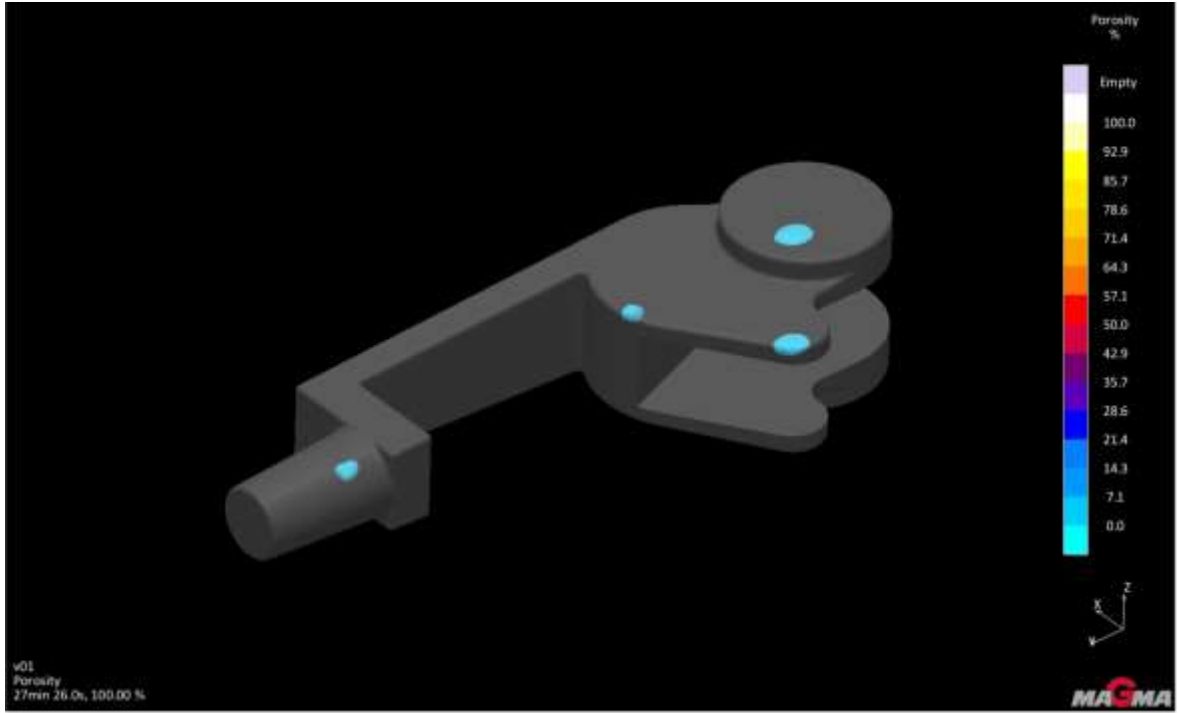
Şekil 4.9. Bir numaralı parçanın farklı açıdan yolluklu Hot Spot FSTime görüntüsü

4.2. Orta Seviyedeki Karmaşık Geometrik Şekle Sahip Parça

Aşağıda iki numaralı döküm parçasına ait Magmasoft® simülasyonları verilmiştir.

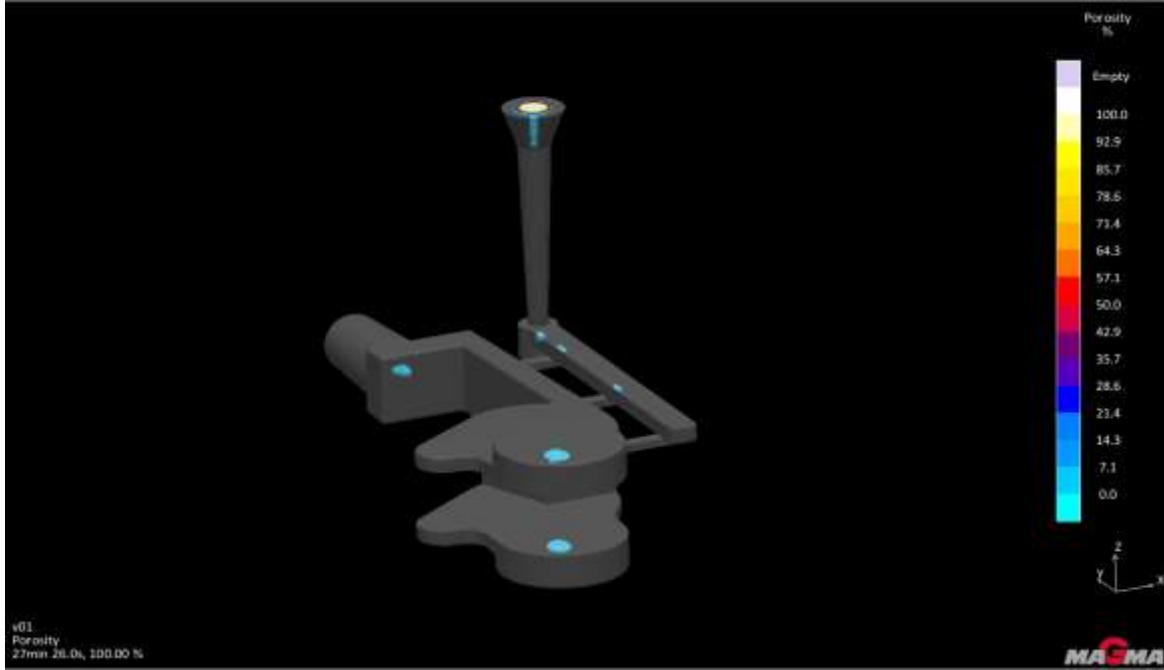
4.2.1. Porosity simülasyonları

Şekil 4.10'da iki numaralı parçada yolluksuz porosity sonuçlarını görebilmekteyiz.



Şekil 4.10. İki numaralı parçanın yolluksuz porosity görüntüsü

İki numaralı parçanın yolluklu Magmasoft görüntülerinde görüldüğü üzere üç bölge renklendirilmiştir, Şekil 4.11 Porosity oranına bakarak çekmenin olabileceğini ama çekme yüzdesinin düşük olacağı konusunda yorum yapabiliriz. Bu parça için Dökme Demir (Sfero) alaşım tanımlaması yapılmıştır ve simülasyon sırasında bu sıvı metale göre görüntüler elde edilmiştir.



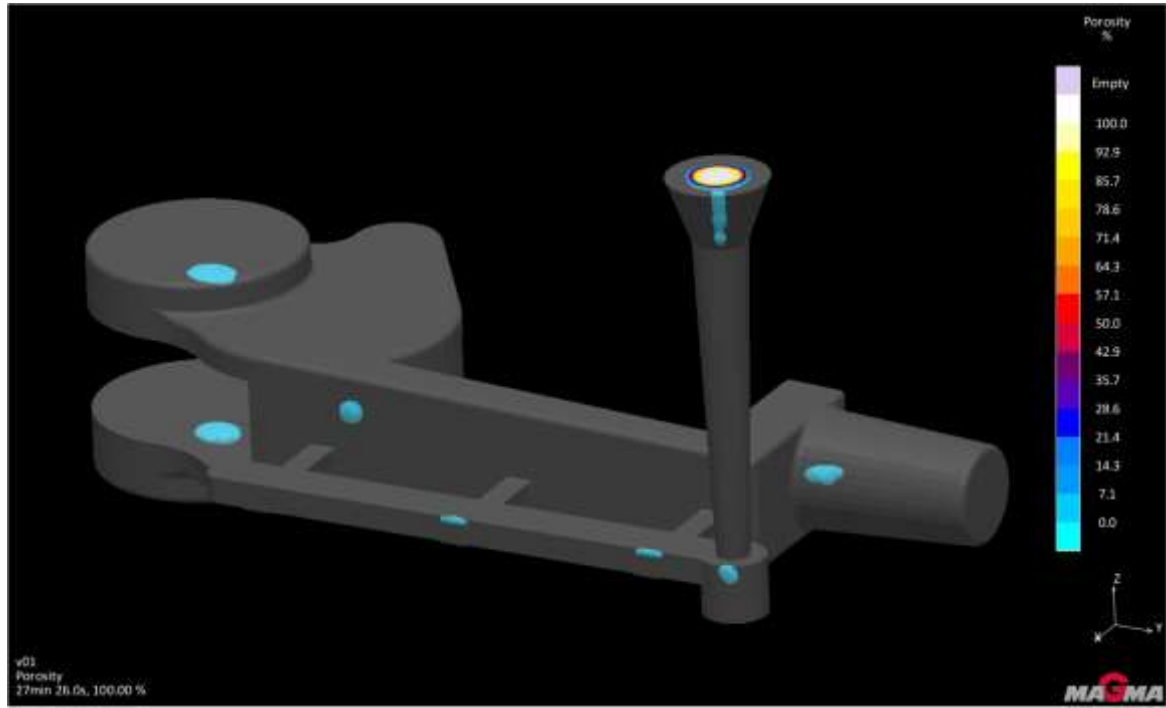
Şekil 4.11. İki numaralı parçanın yolluklu porosity görüntüsü

Farklı açıdan bakıldığında, Şekil 4.12, renkli bölgenin üç değil dört tane olduğunu görmekteyiz. Bu bölgeler parçadaki büyük kütleli bölgelerdir. Şekil 3.30'a bakarak karşılaştırarak, Birim Alan yaklaşımına dayalı AutoCAD çizimlerindeki büyük dairelerin bu renklendirme bölgelerine denk geldiğini görebilmekteyiz.

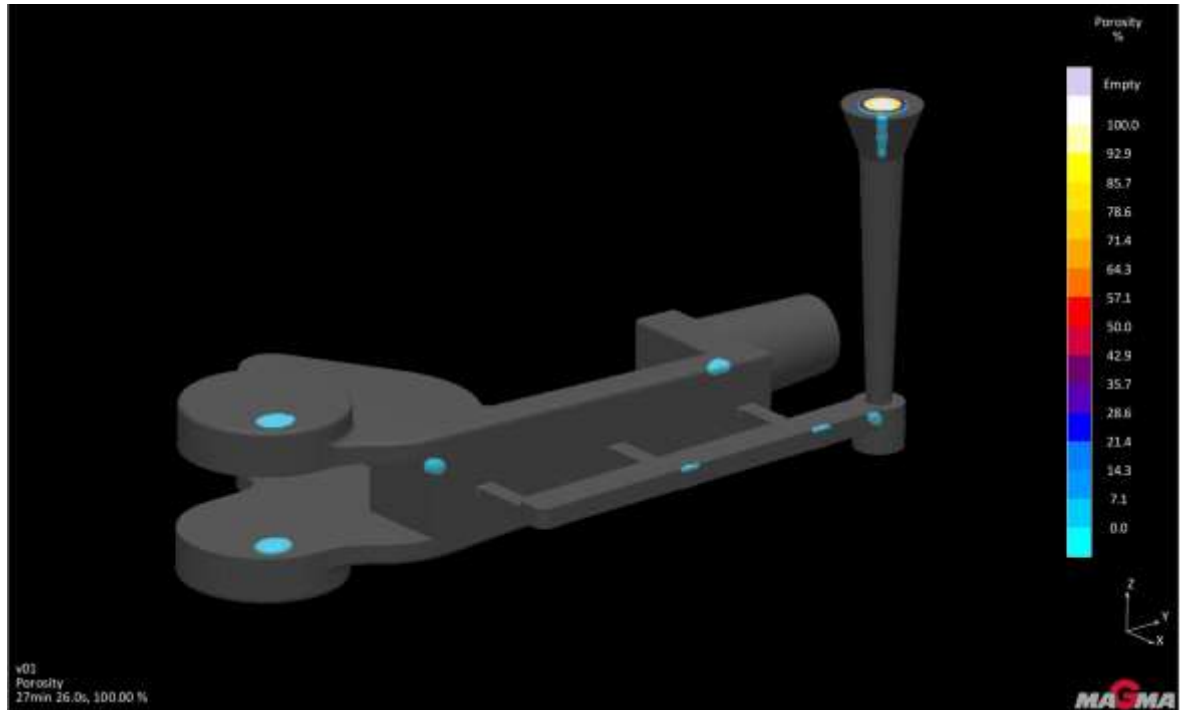


Şekil 4.12. İki numaralı parçanın farklı açıdan yolluklu porosity görüntüsü

İki numaralı parçanın farklı açıdan görüntüleri Şekil 4.13 ve 4.14'te verilmiştir.



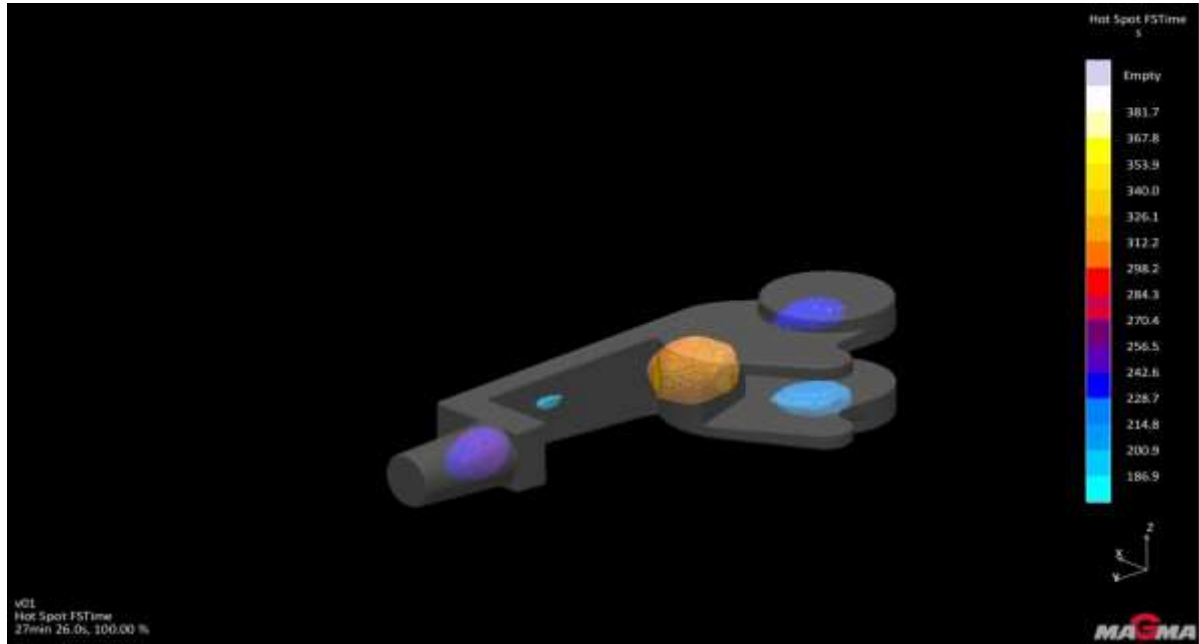
Şekil 4.13. İki numaralı parçanın farklı açıdan yolluklu porosity görüntüsü



Şekil 4.14. İki numaralı parçanın farklı açıdan yolluklu porosity görüntüsü

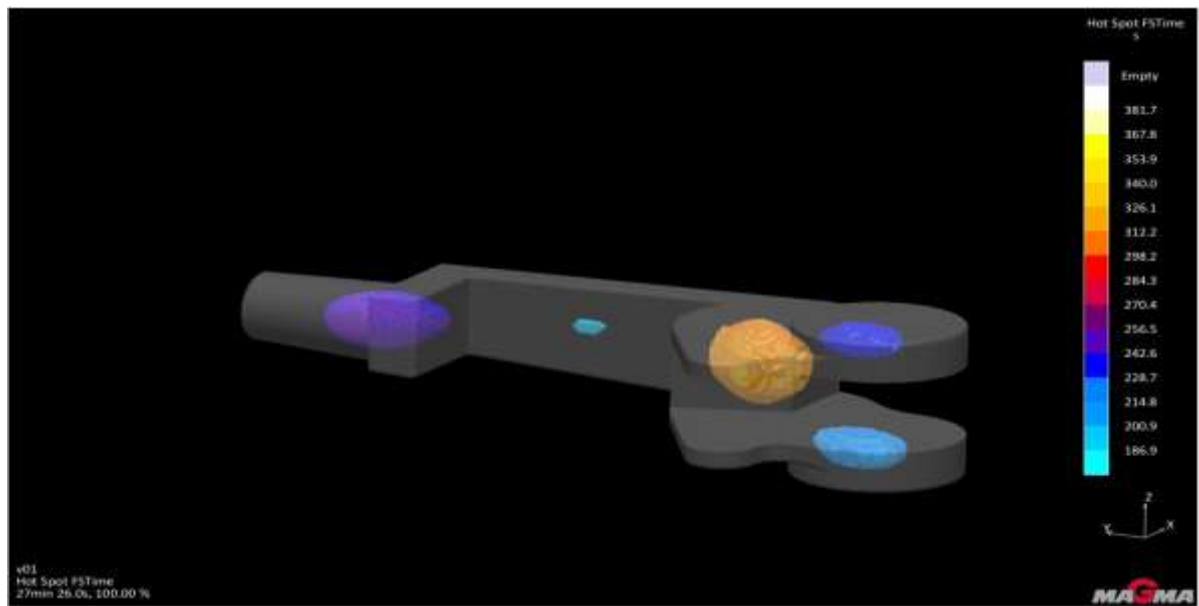
4.2.2. Hot Spot FSTime simulasyonları

İki numaralı parçanın yolluksuz Hot Spot FSTime görüntüleri Şekil 4.15 ile 4.12’de verilmiştir. Burada renklerin farklı olmasının sebebi, yolluk kısmının ayrılması ile birlikte parça bütününe göre katılma sürelerinin sıralamasının farklı olmasıdır.



Şekil 4.15. İki numaralı parçanın yolluksuz Hot Spot FSTime görüntüsü

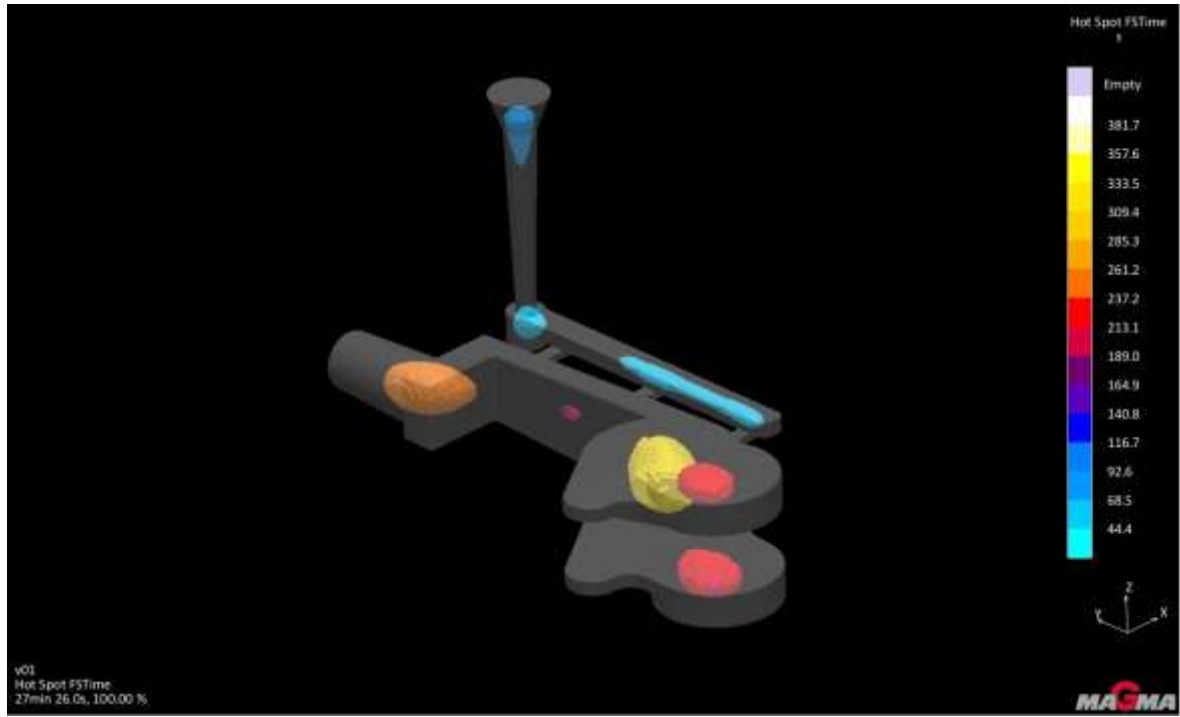
İkinci prça için Şekil 4.15’in farklı açıdan görüntüsü Şekil 4.16’da gösterilmiştir.



Şekil 4.16. İki numaralı parçanın farklı açıdan yolluksuz Hot Spot FSTime görüntüsü

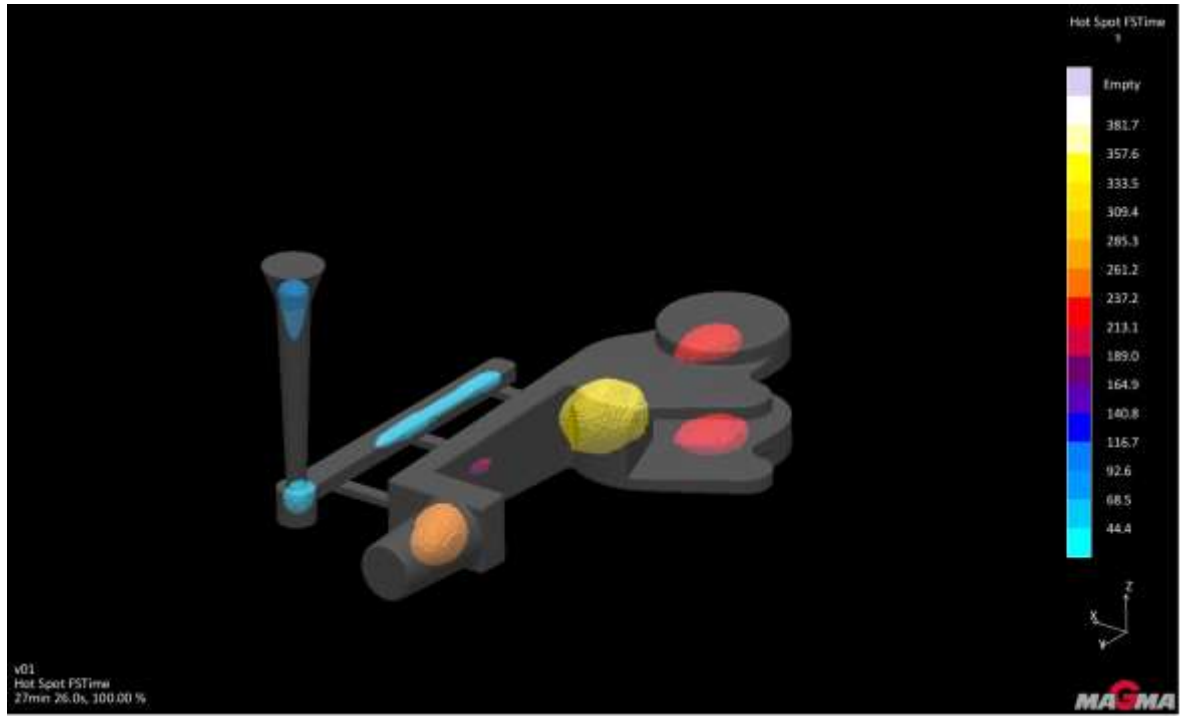
Şekil 4.17’de iki numaralı parçanın yolluklu Hot Spot FSTime görüntüsü aşağıda paylaşılmıştır. Zamana bağlı olan renklendirmeye göre renkli balonların olduğu kısımlar en son katılacak olan kısımlardır. Sarı olan kısım diğer bölgelere oranla çekme olma ihtimalinin en yüksek olduğu kısımdır. Sarı bölgeyi turuncu ve kırmızı bölgeler takip etmektedir. Bu yorum sağ tarafta bulunan renk cetveline bakarak yapılabilmektedir.

Porosity görüntüsünde parçanın uzun ve ince olan orta kısmında renkli balon yok iken Hot Spot FSTime görüntüsünde vardır. Bu parçanın orta kısmında çekme olmayacağı anlamına gelmektedir. Eğer her ikisinde de aynı bölgede renkli balon varsa çekme olacağı şeklinde yorum yapılabilmektedir.

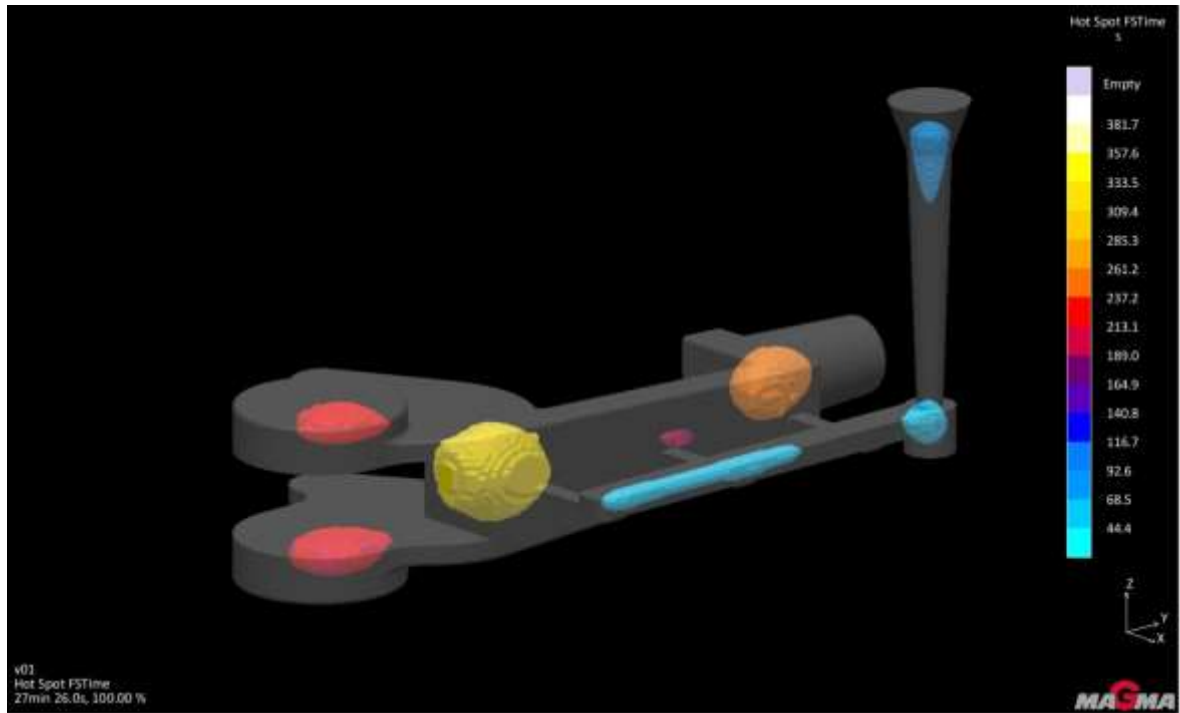


Şekil 4.17. İki numaralı parçanın yolluklu Hot Spot FSTime görüntüsü

Şekil 4.18 ve Şekil 4.19’da iki numaralı parçanın farklı açıdan Hot Spot FSTime görüntüsü verilmiştir.



Şekil 4.18. İki numaralı parçanın yolluklu Hot Spot FSTime görüntüsü



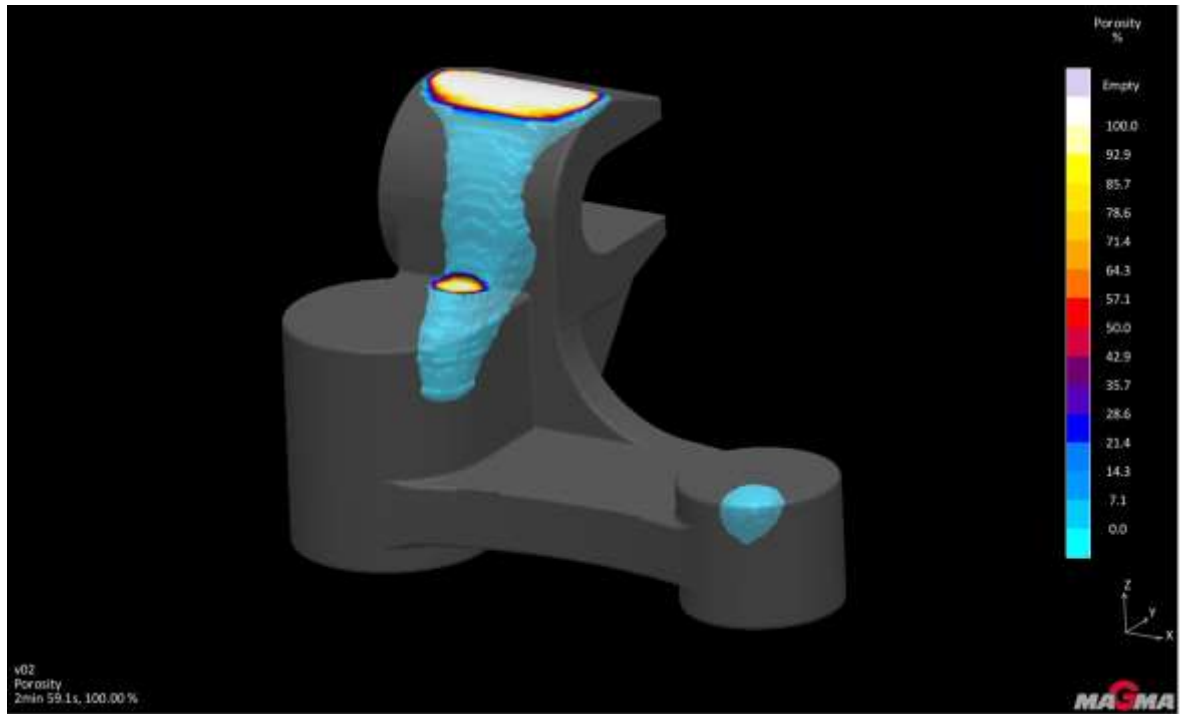
Şekil 4.19. İki numaralı parçanın yolluklu Hot Spot FSTime görüntüsü

4.3. Yüksek Seviyedeki Karmaşık Geometrik Şekle Sahip Parça

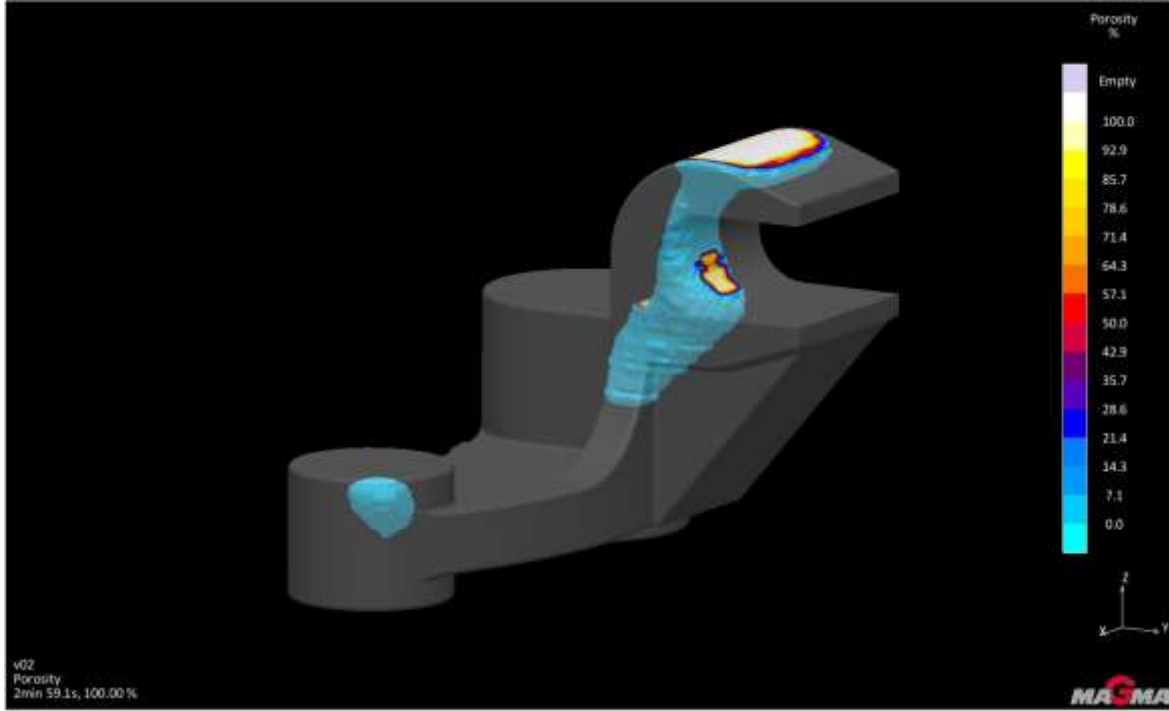
Aşağıda üç numaralı döküm parçasına ait Magmasoft® simülasyonları verilmiştir.

4.3.1. Porosity simülasyonları

Üç numaralı döküm parçasının yolluksuz porosity simülasyon sonuçları Şekil 4.20 ile 4.21’de verilmiştir.

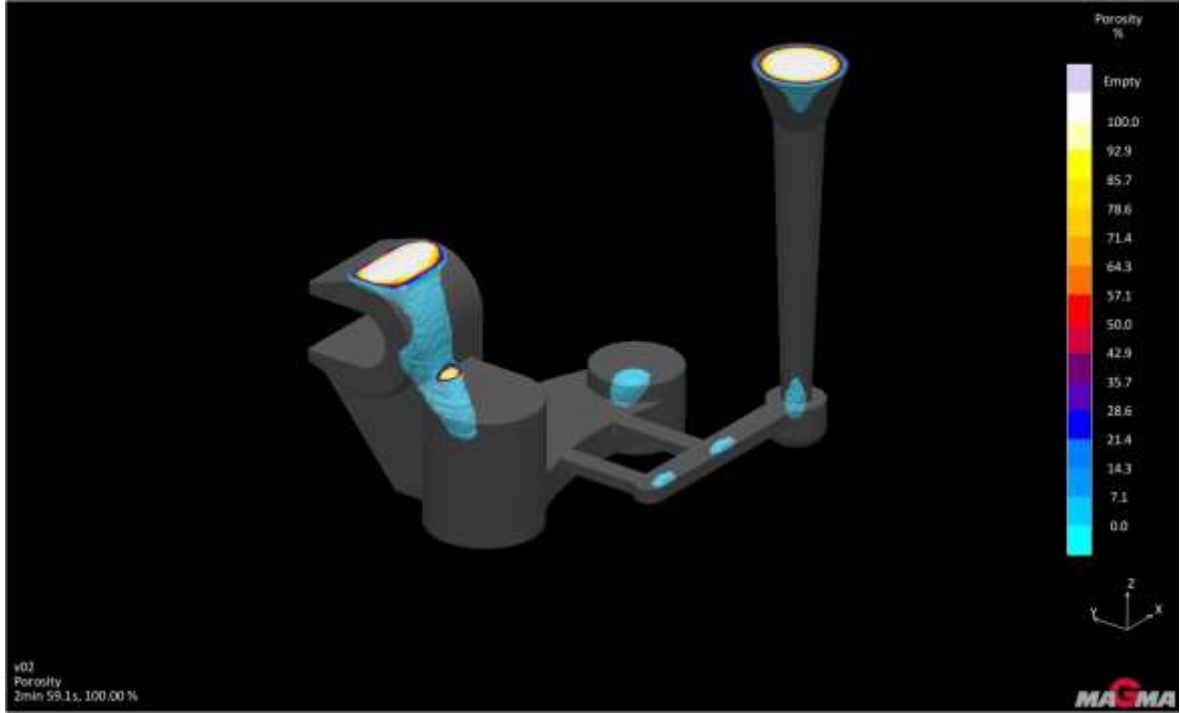


Şekil 4.20. Üç numaralı parçanın yolluksuz porosity görüntüsü



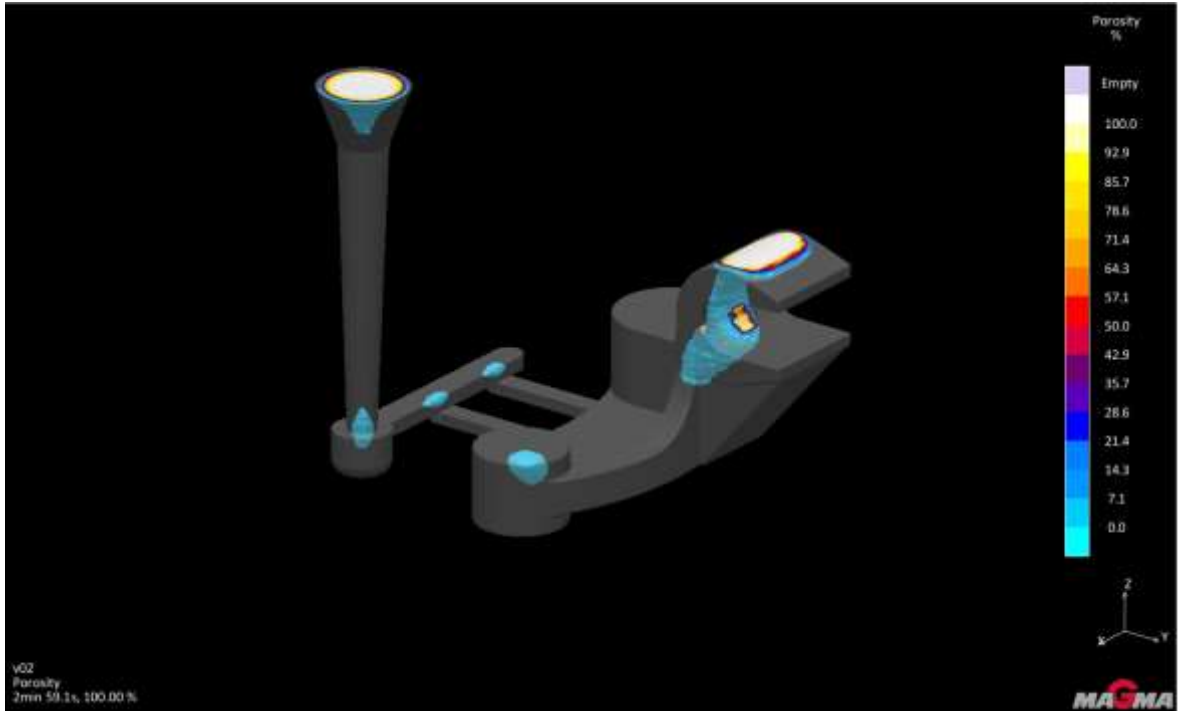
Şekil 4.21. Üç numaralı parçanın yolluksuz porosity görüntüsü

Üç numaralı parçanın yolluklu çiziminin Porosity görüntüleri aşağıdadır. Aşağıdaki görüntülere bakarak şeklin kütlelerinin büyük olan kısmında ciddi bir çekme durumuyla karşı karşıya kalacağını yorumlayabilmekteyiz. Parçada en son katılacak olan kısım kanca tarafının üst kısmıdır. Renk cetvelindeki renklerin yüzdelerinden açık mavi kısmın beyaz olan kısma göre sorunsuz katılma yapabileceği konusunda yorum yapabilmekteyiz. Bu parça için (Mavi) Dökme Çelik alaşım tanımlaması yapılmıştır ve simulasyonda bu özellikteki sıvı metale göre aşağıdaki simülasyonlar elde edilmiştir.

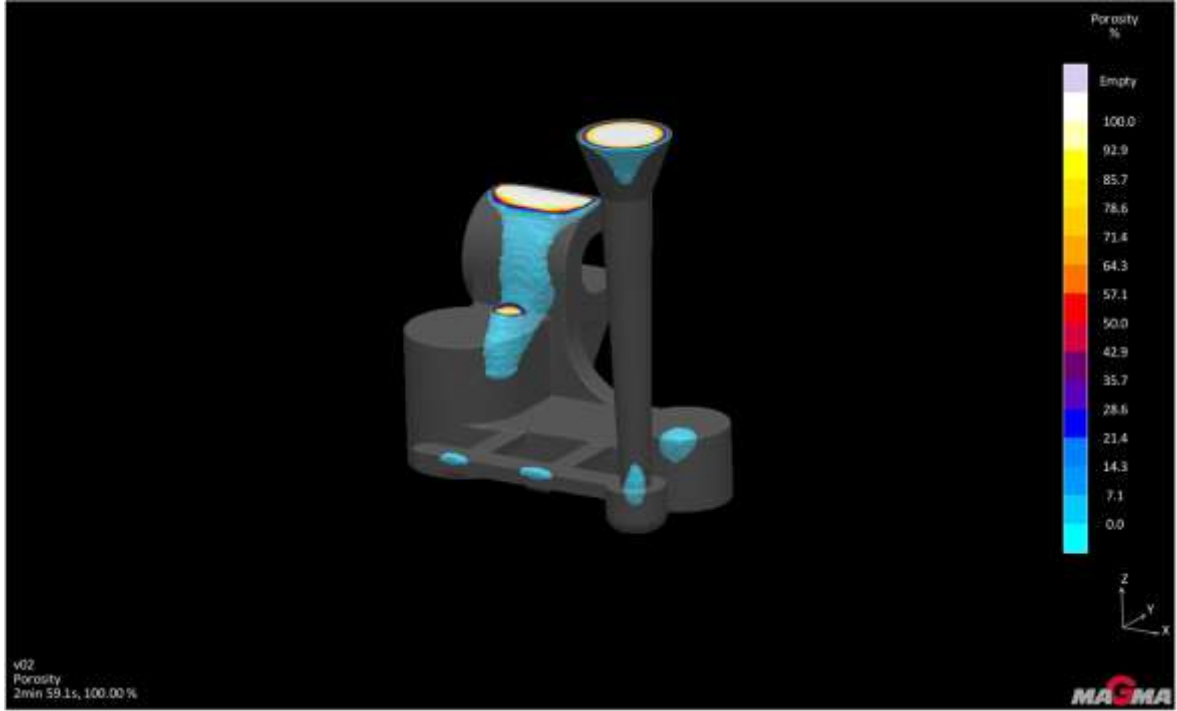


Şekil 4.22. Üç numaralı parçanın yolluklu porosity görüntüsü

Şekil 4.22, 4.23 ve 4.24'te yolluklu olan üç numaralı parçanın farklı açılardan Porosity görüntülerini görebilmekteyiz.



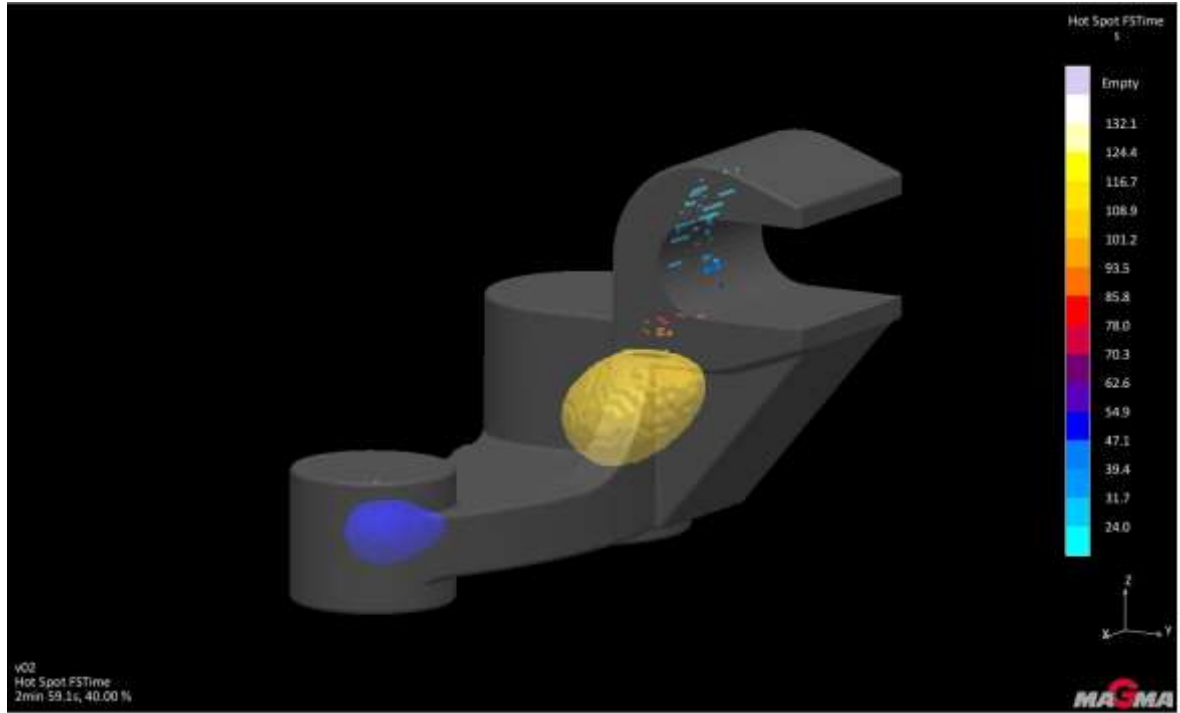
Şekil 4.23. Üç numaralı parçanın farklı açıdan yolluklu porosity görüntüsü



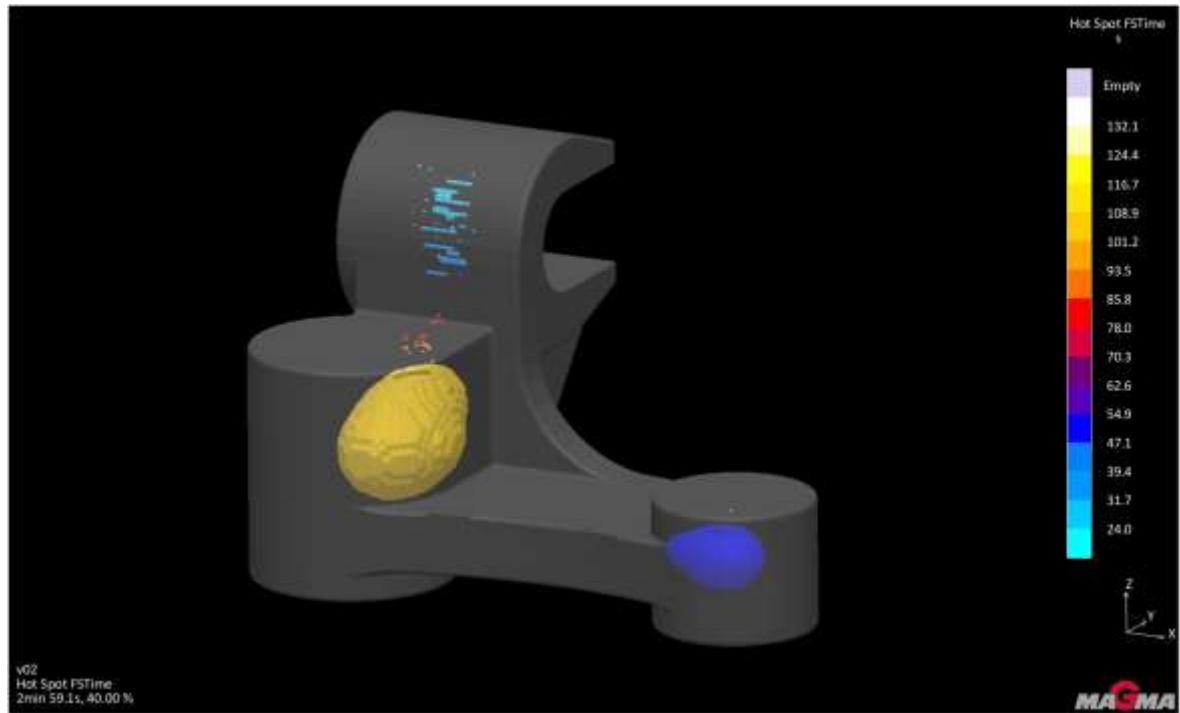
Şekil 4.24. Üç numaralı parçanın farklı açıdan yolluklu porosity görüntüsü

4.3.2. Hot Spot FSTime simülasyonları

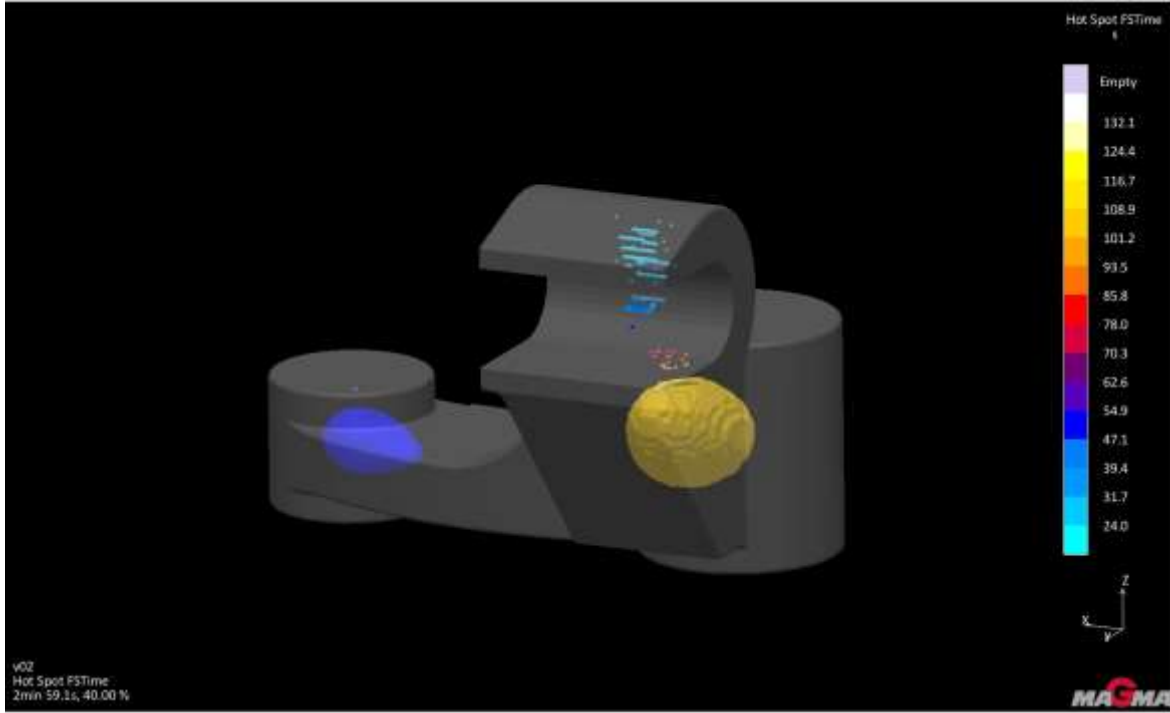
Şekil 4.25, 4.26 ve 4.27’de üç numaralı parçanın yolluksuz Hot Spot FSTime görüntülerini görebilmekteyiz. Sarı olan kısım parçanın en büyük kütlesinin olduğu kısımdır ve renk cetvelinden de en son katılacak olan bölge olduğunu anlamaktayız.



Şekil 4.25. Üç numaralı parçanın yolluksuz Hot Spot FSTime görüntüsü

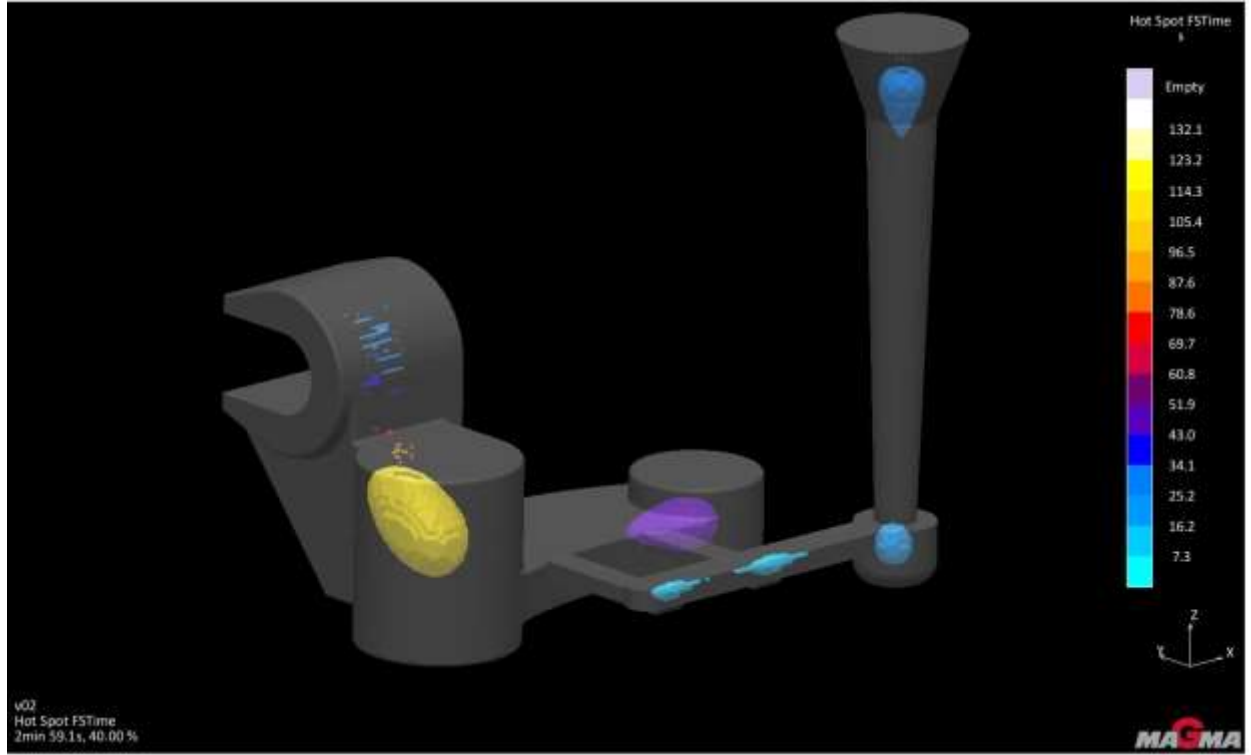


Şekil 4.26. Üç numaralı parçanın yolluksuz Hot Spot FSTime görüntüsü

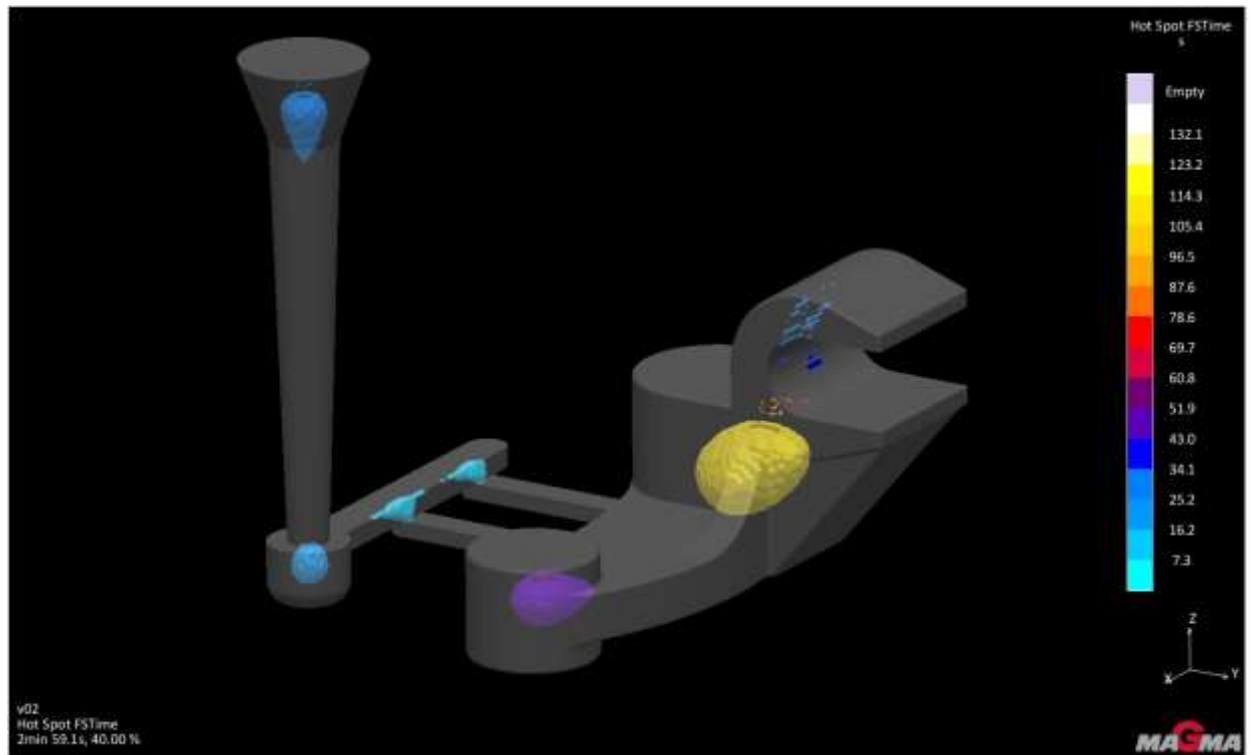


Şekil 4.27. Üç numaralı parçanın yolluksuz Hot Spot FSTime görüntüsü

Şekil 4.28 ve 4.29’da üç numaralı parçanın yolluklu halinin Hot Spot FSTime simülasyonları bulunmaktadır. Bu renklendirmelerden iki kısımda çekmenin olacağını anlamaktayız. Parçanın kancaya benzer bölümünde küçük çekmeler olacağını görebilmekteyiz. Porosity görüntülerinde aynı bölgelerde renkli balonlar olmasından dolayı çekmenin gerçekleşeceği şeklinde %100’e yakın bir yorum yapabilmekteyiz.



Şekil 4.28. Üç numaralı parçanın yolluklu Hot Spot FSTime görüntüsü



Şekil 4.29. Üç numaralı parçanın yolluklu Hot Spot FSTime görüntüsü

5. DENEY SONUÇLARI

Bu bölümde Birim Alan yaklaşımına dayalı modelden elde edilen sonuçlar ile Magmasoft döküm simülasyon programından alınan sonuçlar tezde incelenen üç farklı döküm parçası için ayrı ayrı karşılaştırılacaktır. Birim Alan yaklaşımında katılma yönü hakkında bilgi verecek olan izoterm çizgilerinin dışında, şeklin ortasında görüntülenen daire, parçanın katılma sırasında çekmenin olacağı yeri göstermektedir. Çekmenin olacağını gösteren kısım ise beslenmesi gereken yeri vermektedir.

5.1. Basit Seviyede Karmaşık Geometrik Şekle Sahip Döküm Parçası (1. Parça)

5.1.1. Bir numaralı parça, yolluksuz, gözeneklilik kriteri

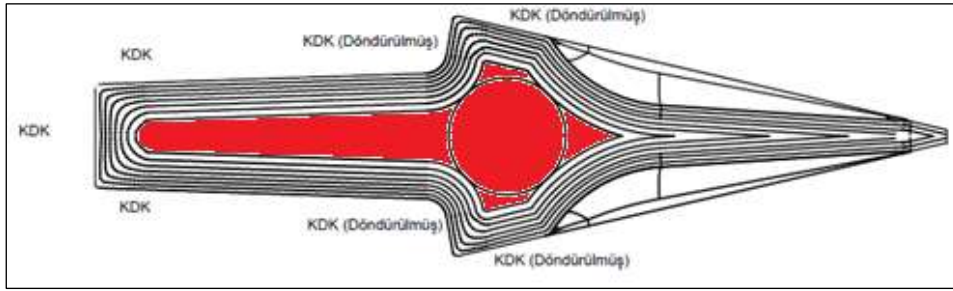
Bir numaralı parçanın Magmasoft simülasyon programında yolluksuz (dolum simülasyonu olmadan) gerçekleştirilen gözeneklilik (porosity kriteri) sonuçları Şekil 4.2 ile 4.3’de verilmiştir. Bu şekiller Birim Alan yaklaşımına dayalı sonucun verildiği Şekil 3.11 ile karşılaştırıldığı zaman, Birim Alan yaklaşımının verdiği merkez hata bölgesine göre, Magmasoft simülasyonunda aynı bölgenin yukarısına, parçanın üst sınırına kaydığı gözlenmektedir. Bunun nedeni, gözenek oluşma mekaniğinin, metalin son dolan bölgesinde toplanma özelliği ile ilişkili olmasıdır. Burada Birim Alan yaklaşımı bir hata bölgesi uyarısı vermekte ancak gözeneklerin oluştuğu yeri tam olarak gösterememektedir. Burada Birim Alan yaklaşımı kullanılırken metalin son dolan kısmına göre yorum yapılması gerekmektedir.

5.1.2. Bir numaralı parça, yolluklu, gözeneklilik kriteri

Bir numaralı parçanın Magmasoft simülasyon programında yolluklu (dolum simülasyonu ile birlikte) gerçekleştirilen gözeneklilik (porosity kriteri) sonuçları Şekil 4.4 ile 4.5’te verilmiştir. Bu şekiller Birim Alan yaklaşımına dayalı sonucun verildiği Şekil 3.11 ile karşılaştırıldığı zaman, yukarıdaki yolluksuz Magmasoft simülasyonu ile benzer bir durum söz konusudur. Birim Alan yaklaşımı bir hata bölgesi uyarısı vermekte ancak gözeneklerin oluştuğu yeri tam olarak gösterememektedir.

5.1.3. Bir numaralı parça, yolluksuz, Hot Spot belirleme kriteri

Bir numaralı parçanın Magmasoft simülasyon programında yolluksuz (dolum simülasyonu olmadan) gerçekleştirilen Hot Spot belirleme (Hot Spot FSTime kriteri) sonuçları Şekil 4.6 ile 4.7’de verilmiştir. Bu şekiller Birim Alan yaklaşımına dayalı sonucun verildiği Şekil 3.11 ile karşılaştırıldığı zaman, Birim Alan yaklaşımının Hot Spot noktasını tam olarak verdiği görülmektedir. Hot Spot bölgesinin şeklini ise Magmasoft programı daha hassas biçimde iki yöne uzamış bir balon şeklinde vermektedir. Bu noktada birçok eşitliğe ve hassasiyeti daha yüksek bir numerik modele göre çözümleme yapan Magmasoft yazılımının daha hassas sonuç vermesi beklenmektedir, ancak Birim Alan yaklaşımı da Hot Spot noktasını yüksek kesinlikle vermekte, şekli ise Şekil 5.1’deki gibi bir boyama işlemi uygulanmasını takiben Hot Spot bölgesinin bir miktar öne ve arkaya doğru uzayabileceği hakkında fikir de verebilmektedir.



Şekil 5.1. Şekil 3.11’de verilen Birim Alan yaklaşımına dayalı modelin merkez boşluğunun boyanmış hali

5.1.4. Bir numaralı parça, yolluklu, Hot Spot belirleme kriteri

Bir numaralı parçanın Magmasoft simülasyon programında yolluklu (dolum simülasyonu ile birlikte) gerçekleştirilen Hot Spot belirleme (Hot Spot FSTime kriteri) sonuçları Şekil 4.8 ile 4.9’da verilmiştir. Bu şekiller Birim Alan yaklaşımına dayalı sonucun verildiği Şekil 3.11 ile karşılaştırıldığı zaman, yolluklu halde, yolluksuza göre bağlantı noktalarına yakın yerlerde Hot Spot şeklinde çok küçük baskılanmalar görülmekle birlikte, genel sonucun değişmediği ve Magmasoft ile Birim Alan modeli arasında Hot Spot yeri belirleme konusundaki yüksek uyumun yolluksuz Hot Spot belirleme kriterinde olduğu gibi devam ettiği görülmektedir.

5.2. Orta Seviyede Karmaşık Geometrik Şekle Sahip Döküm Parçası (2. Parça)

5.2.1. İki numaralı parça, yolluksuz, gözeneklilik kriteri

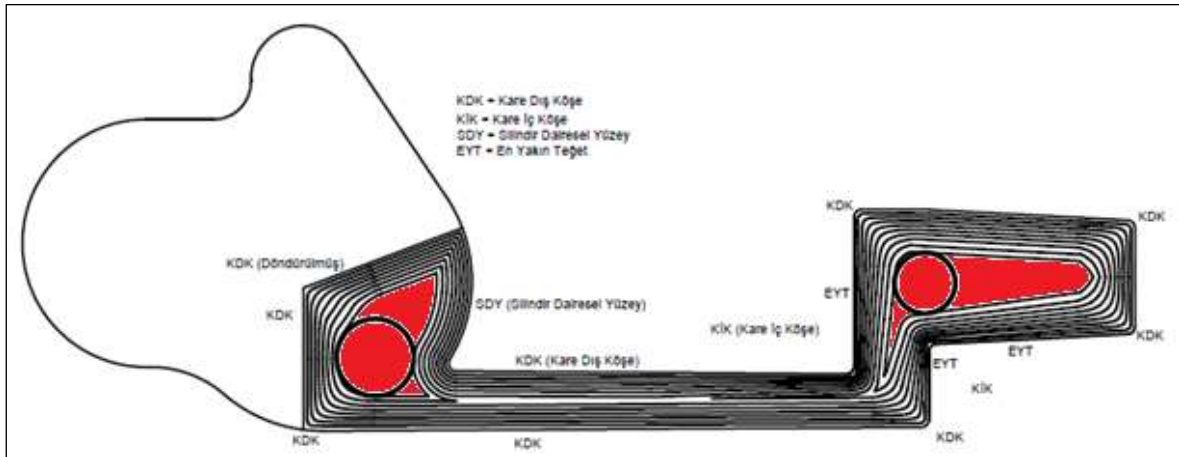
2 numaralı parçanın Magmasoft simülasyon programında yolluksuz (dolum simülasyonu olmadan) gerçekleştirilen gözeneklilik (porosity kriteri) sonuçları Şekil 4.10'da verilmiştir. Bu şekil Birim Alan yaklaşımına dayalı sonucun verildiği Şekil 3.30 ile karşılaştırıldığı zaman, Magmasoft simülasyonunda dört farklı noktada gözeneklilik bulunmasına rağmen, Birim Alan yaklaşımına dayalı modelde iki büyük boşluk görülmektedir. Bunun nedeni, Birim Alan yaklaşımına dayalı model uygulanırken parça üzerinden alınan tek kesit düzleminin, parçanın arka bölümünde ikiye ayrıldığı kısımlarda yer alan ince pulları ifade edememesidir. Bu parçanın Birim Alan yaklaşımına dayalı modellemesi yapılırken, parçanın ikiye ayrıldığı kısımların ince olduğu ve herhangi bir hataya yol açmayacağı varsayılmıştır. Bu nedenle, bu tip parçalarda Birim Alan yaklaşımına dayalı model uygulanırken, birden çok kesit alınarak parçanın farklı yerlerinin analizinin yapılması daha yararlı olacaktır. Bu yönde bir çalışma Bölüm 3.3'te verilen 3 numaralı parçada yapılmıştır. Birim Alan yaklaşımına dayalı model, alınan kesitte var olan iki gözeneklilik noktası hakkında fikir verebilmiştir.

5.2.2. İki numaralı parça, yolluklu, gözeneklilik kriteri

İki numaralı parçanın Magmasoft simülasyon programında yolluklu (dolum simülasyonu ile birlikte) gerçekleştirilen gözeneklilik (porosity kriteri) sonuçları Şekil 4.11 ile 4.13'te verilmiştir. Bu şekil Birim Alan yaklaşımına dayalı sonucun verildiği Şekil 3.30 ile karşılaştırıldığı zaman, yukarıdaki yolluksuz gözeneklilik sonuçlarına benzer biçimde, Magmasoft simülasyonunda dört farklı noktada gözeneklilik bulunmasına rağmen, Birim Alan yaklaşımına dayalı modelde iki büyük boşluk görülmektedir. Bunun nedeni, yukarıda verilen neden ile aynıdır ve Birim Alan yaklaşımına dayalı model uygulanırken parçadan birden çok kesit alınması yararlı olabilir. Birim Alan yaklaşımına dayalı model, alınan kesitte var olan iki gözeneklilik noktası hakkında fikir verebilmiştir.

5.2.3. İki numaralı parça, yolluksuz, Hot Spot belirleme kriteri

İki numaralı parçanın Magmasoft simülasyon programında yolluksuz (dolum simülasyonu olmadan) gerçekleştirilen Hot Spot belirleme (Hot Spot FSTime kriteri) sonuçları Şekil 4.15 ile 4.16'da verilmiştir. Bu şekiller Birim Alan yaklaşımına dayalı sonucun verildiği Şekil 3.30 ile karşılaştırıldığı zaman, Birim Alan yaklaşımının iki ana Hot Spot noktasını yakın büyüklük ve şekillerde verebildiği görülmektedir. Şekil 4.15 ile 4.16'da görülen ve parçanın ikiye ayrıldığı arka bölümdeki pullar üzerinde yer alan iki küçük Hot Spot noktası ise Birim Alan yaklaşımı tarafından bu bölgeden ikinci bir kesit alınmaması nedeniyle belirlenememiştir. Şekil 4.31'de Birim Alan yaklaşımına dayalı model tarafından belirlenen iki Hot Spot boşluğunun boyanmış hali bulunmaktadır. Bu şekil Şekil 4.15 ile 3.16 ile karşılaştırılarak Birim Alan yaklaşımının hassasiyeti hakkında fikir sahibi olunabilir.



Şekil 5.2. Şekil 3.30'da verilen Birim Alan yaklaşımına dayalı modelin merkez boşluklarının boyanmış hali

5.2.4. İki numaralı parça, yolluklu, Hot Spot belirleme kriteri

İki numaralı parçanın Magmasoft simülasyon programında yolluklu (dolum simülasyonu ile birlikte) gerçekleştirilen Hot Spot belirleme (Hot Spot FSTime kriteri) sonuçları Şekil 4.17 ile 4.19 arasında verilmiştir. Bu şekiller Birim Alan yaklaşımına dayalı sonucun verildiği Şekil 3.30 ile karşılaştırıldığı zaman, yukarıda verilen yolluksuz Hot Spot belirleme durumu ile benzer sonuçlar elde edilmiştir. Yolluklu sistemde, parçanın ikiye ayrıldığı arka bölümünde yer alan Hot Spot noktalarının bir miktar küçüldüğü ve Hot Spot oluşma zamanlarının bir miktar kısaldığı şekiller üzerindeki ölçeklerden okunarak anlaşılabilmektedir. Bu küçük Hot Spot'lar Birim Alan ile modellenmemiştir.

5.3. Yüksek Seviyede Karmaşık Geometrik Şekle Sahip Döküm Parçası (3. Parça)

5.3.1. Üç numaralı parça, yolluksuz, gözeneklilik kriteri

Üç numaralı parçanın Magmasoft simülasyon programında yolluksuz (dolum simülasyonu olmadan) gerçekleştirilen gözeneklilik (porosity kriteri) sonuçları Şekil 4.20 ile 4.21’de verilmiştir. Bu şekiller Birim Alan yaklaşımına dayalı sonucun iki ayrı kesitte verildiği Şekiller 3.37 ve 3.45 ile karşılaştırıldığı zaman, Magmasoft simülasyonunda yer alan iki ana gözeneklilik noktası, Birim Alan yaklaşımı ile yakın korelasyonla tanımlanabilmiştir. Benzer biçimde Magmasoft simülasyonunda kanca kısmında hafif bir gözeneklilik eğilimi görülebilmektedir, Şekil 4.26 ve 4.27. Bu gözeneklilik eğilimi, Şekil 4.20’de kancanın merkez hattı boyunca Birim Alan yaklaşımına dayalı izotermeler arasındaki açıklık olarak görülmektedir ve Şekil 5.3b’de kesikli çizgi halinde gösterilmiştir. Bu açıklığı sadece Birim Alan çıktısına bakarak gözenek oluşabilir veya oluşmayabilir şeklinde yorumlanması ancak deneyime bağlı bir görüşün gelişmesi ile sağlanabilir.

5.3.2. Üç numaralı parça, yolluklu, gözeneklilik kriteri

Üç numaralı parçanın Magmasoft simülasyon programında yolluklu (dolum simülasyonu ile birlikte) gerçekleştirilen gözeneklilik (porosity kriteri) sonuçları Şekil 4.22 ile 4.24 arasında verilmiştir. Bu şekil Birim Alan yaklaşımına dayalı sonucun verildiği Şekil 3.37 ve 3.45 ile karşılaştırıldığı zaman, yukarıdaki yolluksuz gözeneklilik sonuçlarına benzer biçimde, Magmasoft simülasyonunda üç farklı noktada gözeneklilik bulunmasına rağmen, Birim Alan yaklaşımına dayalı modelde iki büyük boşluk görülmektedir. Bunun nedeni, yukarıda verilen neden ile aynıdır. Birim Alan yaklaşımına dayalı model, alınan kesitte var olan iki büyük gözeneklilik noktası hakkında fikir verebilmiştir. Kanca içinde kalan kısmın, Şekil 5.3b, kesikli çizgi, sadece Birim Alan çıktısına bakarak gözenek oluşabilir veya oluşmayabilir şeklinde yorumlanması ancak deneyime bağlı bir görüşün gelişmesi ile sağlanabilir.

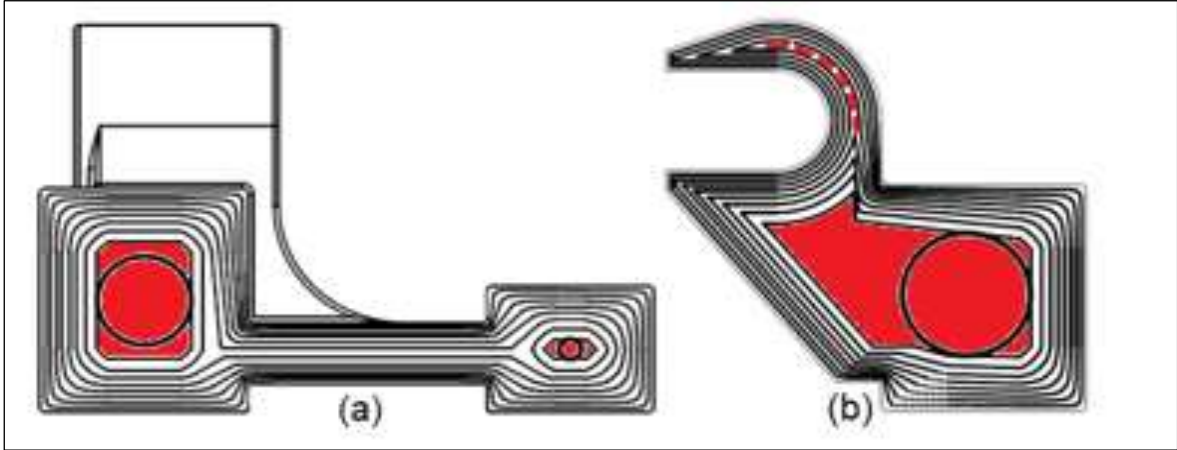
5.3.3. Üç numaralı parça, yolluksuz, Hot Spot belirleme kriteri

Üç numaralı parçanın Magmasoft simülasyon programında yolluksuz (dolum simülasyonu olmadan) gerçekleştirilen Hot Spot belirleme (Hot Spot FSTime kriteri) sonuçları Şekil 4.25 ile 4.29 arasında verilmiştir. Bu şekiller Birim Alan yaklaşımına dayalı sonucun verildiği

Şekil 3.37 ve 3.45 ile karşılaştırıldığı zaman, Birim Alan yaklaşımının iki ana Hot Spot noktasını yakın büyüklük ve şekillerde verebildiği görülmektedir. Magmasoft simülasyonunun verdiği ve kanca içinde yer alan üç numaralı küçük Hot Spot noktası ise, yukarıda anlatıldığı gibi, Birim Alan modelinde Şekil 4.29'daki kesikli çizgi ile ifade edilmektedir ve sadece Birim Alan modeline bakarak Hot Spot olup olmadığı deneyime bağlı bir görüşün gelişmesi ile sağlanabilir.

5.3.4. Üç numaralı parça, yolluklu, Hot Spot belirleme kriteri

Üç numaralı parçanın Magmasoft simülasyon programında yolluklu (dolum simülasyonu ile birlikte) gerçekleştirilen Hot Spot belirleme (Hot Spot FSTime kriteri) sonuçları Şekil 4.28 ve 4.29'da verilmiştir. Bu şekiller Birim Alan yaklaşımına dayalı sonucun verildiği Şekil 3.37 ve 3.45 ile karşılaştırıldığı zaman, Birim Alan yaklaşımının iki ana Hot Spot noktasını yolluksuz Magmasoft simülasyonu gibi, yakın büyüklük ve şekillerde verebildiği görülmektedir. Magmasoft simülasyonunun verdiği ve kanca içinde yer alan üç numaralı küçük Hot Spot noktası ise, yukarıda anlatıldığı gibi, Birim Alan modelinde Şekil 5.3b'deki kesikli çizgi ile ifade edilmektedir ve sadece Birim Alan modeline bakarak Hot Spot olup olmadığı deneyime bağlı bir görüşün gelişmesi ile sağlanabilir.



Şekil 5.3. Şekil 3.37 ve 3.45'te üç numaralı parça için iki farklı kesit üzerinde verilen Birim Alan yaklaşımına dayalı modellemelerin merkez boşluklarının boyanmış hali

5.4. Birim Alan Yaklaşımı ile Chvorinov'un Çalışmalarının Karşılaştırılması

Giriş bölümünde anlatıldığı gibi, Chvorinov'un döküm modülü ile geliştirilmiş döküm modülü yaklaşımlarında şekil tanıma özelliği bulunmamaktadır. Birim Alan yaklaşımında ise, dış köşeler, iç köşeler, silindir dairesel yüzeyler ve silindir düzlemsel yüzeyler ayrı ayrı modellenebildiği için, çok daha karmaşık, eldeki kesit üzerindeki kenarlar ile çok daha uyumlu, Magmasoft döküm simülasyon programı ile oldukça yakın korelasyon sağlayan modelleme sonuçları elde edilebilmektedir. Birim Alan yaklaşımının basit matematik formüllerinin Kartezyen koordinat sistemine uygunluğu nedeniyle, herhangi bir döküm kesiti üzerindeki köşeler, AutoCAD programında 0,0 koordinat noktasında kolaylıkla çizilebilmekte ve sonra kesit üzerindeki yerine taşınarak (gerekirse döndürülerek) istenen katılma izotermi elde edilebilmektedir. Döküm kesiti üzerinde oluşturulan köşe izotermi en yakın teğet alma yöntemiyle birbirine bağlanabilmekte ve Hot Spot'ların yerlerini gösteren bir katılma profili elde edilebilmektedir. Yapılan literatür taramalarında, şekil tanıma özelliği bulunan ve her şekil için ayrı formül üretebilen başka bir geometri tabanlı katılma modeline rastlanmamıştır.

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

6.1. Birim Alan Yöntemine Göre Yapılan Çalışmalar ve Sonuçları

1. Birim Alan yaklaşımı, döküm kesitlerinin iki boyutlu katılma izotermelerini belirlemek için kullanılabilen geometri tabanlı şekil tanıma özellikli bir matematik modellemedir. Bu yaklaşım kullanılarak döküm kesitleri üzerinde dış köşe, iç köşe, silindir dairesel yüzey köşe izotermeleri, silindir düzlemsel yüzey köşe izotermeleri belirlenebilmekte ve bu belirlenen köşe izotermelerinin araları “en yakın teğet” ile “paralel alma” yöntemleri ile doldurulabilmektedir. Bunun sonucunda üzerinde çalışılan döküm kesitleri üzerinden katılmanın başlangıcından sonuna kadar katılma profili grafik olarak elde edilebilmekte ve katılmanın sonucunda döküm kesiti üzerinde olası hata noktalarının yerleri hakkında fikir vermektedir. Bu çalışmada yukarıda sayılan dört köşe elemanı sayesinde, döküm kesitlerinin çoğunluğu için sonuç verebilecek bir modelleme elde edilmektedir.
2. Birim Alan yaklaşımı uygulanırken, öncelikle analizi yapılacak olan parçanın katı modeli uygun bir CAD programında üç boyutlu olarak çizilmektedir. Bu modelin istenilen yer veya yerlerinden iki boyutlu kesitler elde edilebilmektedir. Bu kesitler “.dwg” dosya formatına dönüştürülerek AutoCAD programında açılmaktadır. Bu sırada basit UA izoterm hesaplayıcıları kullanılarak Birim Alan yaklaşımına dayalı katılma izotermeleri hesaplanmakta, elde edilen izoterm koordinat noktaları tablolara kayıt edilmekte ve iki boyutlu kesit üzerine basılmaktadır. Elde edilen katılma profilinde kalan en büyük boşluk veya boşluklar, daire ile işaretlenerek olası makro çekme boşlukları tespit edilmeye çalışılarak analiz tamamlanmaktadır.
3. İki numaralı maddede anlatılan katı model çizme aşaması eğer istenirse atlanabilir ve dökümün kesiti doğrudan AutoCAD ortamında çizilerek diğer işlemler bu kesit üzerinde yapılabilir.
4. Birim Alan yaklaşımına görece karmaşıklık derecesi düşük döküm parçalarında tek bir kesit alınarak analiz yapılabilir.

5. Birim Alan yaklaşımının dış köşe elemanı, döküm kesiti üzerinde dar ve geniş açılı köşeler bulunması halinde, bu köşelere uyum sağlayacak biçimde dönüştürülebilmektedir.
6. Birim Alan yaklaşımı, köşe izotermelerinin devamında bulunan dairesel veya kavisli alanların, ilgili köşe izotermelerinin bu dairesel yüzeylere doğru “paralel alma” yöntemiyle uzatılması sayesinde çizilebilmesine olanak sağlamaktadır.
7. Birim Alan yaklaşımına göre makro döküm hatası analizi yapılırken, bazı döküm parçalarında tek kesit üzerinde çalışma yapmak sağlıklı sonuçlar üretmek için yeterli olmamaktadır. Bunun için döküm parçası üzerinden birden çok kesit almak gerekebilmektedir. Bu kesitler alınırken, kesitlerin dökümün hata çıkma öngörüsü olan yerlerinde kesişecek biçimde seçilmeleri daha yararlı sonuçlar vermektedir. Bu yolla her iki kesitte dökümün aynı yerinde hata göstermesi halinde, bu iki kesit analizi birbirini sağlamış olacaktır.

6.2. Birim Alan Yaklaşımı ile Magmasoft Simulasyon Sonuçlarının Karşılaştırılması

1. Bir numaralı parçada, dolumsuz ve dolumlu (yolluksuz ve yolluklu) Magmasoft porosity sonuçları incelendiğinde, gözenekler Birim Alan yaklaşımının gösterdiği merkez boşluk yerine, bu boşluğun daha üst kısımlarında toplanmıştır. Bunun nedeni, gözenekliliğin metalin son dolan kısımlarına doğru yayılmasıdır. Birim Alan yaklaşımı gözeneklilik açısından bir uyarı vermekte ancak yerini tam olarak gösterememektedir. Birim Alan yaklaşımını kullananların, gözeneklilik tahmini yaparken, merkez hata noktasının metalin son dolan bölgelerine doğru kayacağını dikkate alması gerekmektedir. Birim Alan yaklaşımı gözenekliliğin yerini bir miktar sapma ile gösterebilmiştir.
2. Bir numaralı parçada, dolumsuz ve dolumlu (yolluksuz ve yolluklu) Magmasoft Hot Spot FSTime hata noktaları ile Birim Alan yaklaşımının verdiği hata noktaları döküm kesitinin aynı yerlerinde oluşmaktadır. Birim Alan yaklaşımı Hot Spot noktasının yerini tam olarak göstermektedir. Her iki yaklaşımın Hot Spot noktalarının büyüklükleri de birbirine yakın olmakla birlikte, şekli ise Magmasoft simülasyonunda daha hassas ve yumuşatılmış hatlarla gösterilmektedir. Magmasoft, numerik tabanlı gelişmiş bir döküm yazılımı olduğu için arada bu düzeyde bir şekil farklılığı olmasının normal kabul edilmesi

gerekmektedir. Birim Alan yaklaşımı burada Hot Spot noktalarının yerlerini yüksek hassasiyetle gösterebilmiştir.

3. İki numaralı parçada, dolumsuz ve dolumlu (yolluksuz ve yolluklu) Magmasoft porosity sonuçları incelendiği zaman, parça üzerinde dört farklı noktada gözenek bölgelerinin olduğu gözlenmektedir. Bu gözenek bölgelerinden iki tanesi parçanın ana gövdesi üzerinde oluşmuştur. Ana gövde üzerinde oluşan gözenek bölgeleri Birim Alan yaklaşımının gösterdiği hata noktaları ile aynı yerlerdedir. Dolayısıyla Birim Alan yaklaşımı çalışıldığı kesit üzerindeki gözenek oluşum hatalarını göstermektedir. Bunun dışında, Magmasoft porosity simülasyonunda parçanın ikiye ayrıldığı arka tarafında bulunan ince pulların merkezlerinde de gözenek oluşumu gözlenmektedir. Birim Alan yaklaşımında tek kesit üzerinden çalışıldığı için bu iki nokta elde edilememiştir. Sonuçlar göstermektedir ki, Birim Alan yaklaşımına göre katılma analizi yapılırken, döküm parçalarının farklı düzlemlerde bulunan görece ince bölümleri de dikkate alınmalıdır ve tek kesit dikkate alındığı zaman bu bölümler kesitin içinde kalmıyorsa, bu durumda birden çok kesit alınarak inceleme yapılmalıdır.
4. İki numaralı parçada, dolumsuz ve dolumlu (yolluksuz ve yolluklu) Magmasoft Hot Spot FSTime sonuçları incelendiği zaman, parça üzerinde dört farklı noktada Hot Spot bölgelerinin olduğu gözlenmektedir. Bu gözenek bölgelerinden iki tanesi parçanın ana gövdesi üzerinde oluşmuştur. Ana gövde üzerinde oluşan gözenek bölgeleri Birim Alan yaklaşımının gösterdiği hata noktaları ile aynı yerlerde bulunmaktadırlar. Dolayısıyla Birim Alan yaklaşımı çalışıldığı kesit üzerindeki Hot Spot oluşum hatalarını göstermektedir. Bunun dışında, Magmasoft porosity simülasyonunda parçanın ikiye ayrıldığı arka tarafında bulunan kalın pulların merkezlerinde de Hot Spot oluşumu gözlenmektedir. Birim Alan yaklaşımında tek kesit üzerinden çalışıldığı için bu iki nokta elde edilememiştir. Sonuçlar göstermektedir ki, Birim Alan yaklaşımına göre katılma analizi yapılırken, döküm parçalarının farklı düzlemlerde bulunan görece ince bölümleri de dikkate alınmalıdır ve eğer tek kesit alındığı zaman bu bölümler kesitin içinde kalmıyorsa, bu durumda birden çok kesit alınarak inceleme yapılmalıdır. Bir numaralı parçada olduğu gibi, Hot Spot noktalarının yerleri Birim Alan yaklaşımı tarafından incelenen kesit üzerinde olması gereken yerlerde gösterilmiştir ve bu noktalar Magmasoft Hot Spot FSTime simülasyonu tarafından da doğrulanmıştır. Hot Spot noktalarının şekilleri ise, yine Magmasoft simülasyonunda yumuşatılmış hatlara sahip iken, Birim

Alan yaklaşımında bir miktar keskin hatlarla gösterilen Hot Spot noktalarının şekilleri, Magmasoft simülasyon sonuçlarına oldukça yakındır.

5. Üç numaralı parçada, dolumsuz ve dolumlu (yolluksuz ve yolluklu) Magmasoft porosity sonuçları iki farklı kesit alınarak incelendiği zaman, parça üzerinde iki farklı kaynak noktasında gözenek bölgelerinin oluştuğu gözlenmektedir. Bu gözenek bölgeleri parçanın ana gövdesi üzerinde oluşmuştur. Ana gövde üzerinde oluşan gözenek bölgeleri Birim Alan yaklaşımının gösterdiği hata noktaları ile aynı yerlerdedir. Dolayısıyla Birim Alan yaklaşımı çalışıldığı kesit üzerindeki gözenek oluşum hatalarını göstermektedir. Ancak, kanca kısmının altından başladığı düşünülen büyük gözenek bölgesi, kanca kısmının üstüne doğru yayılmıştır. Birim Alan yaklaşımı merkezdeki noktayı vermekle birlikte, kancaya doğru yayılan bölgeyi ise yoruma açık şekilde bırakmaktadır. Şekil 5.3b'deki kanca kısmının içinde kalan ve kesikli çizgi ile gösterilen alanı yorumlamak deneyim gerektirmektedir.
6. Üç numaralı parçada, dolumsuz ve dolumlu (yolluksuz ve yolluklu) Magmasoft Hot Spot FSTime sonuçları incelendiği zaman, parça üzerinde iki ana noktada Hot Spot bölgelerinin oluştuğu gözlenmektedir. Bu iki gözenek bölgesi parçanın ana gövdesi üzerinde oluşmuştur. Ana gövde üzerinde oluşan gözenek bölgeleri Birim Alan yaklaşımının gösterdiği hata noktaları ile aynı yerlerde bulunmaktadır. Dolayısıyla Birim Alan yaklaşımı çalışıldığı kesit üzerindeki Hot Spot oluşum hatalarını göstermektedir. Bunun dışında, Magmasoft Hot Spot FSTime simülasyonunda parçanın kanca kısmının içine yayılmış kısımda hafif bir Hot Spot oluşum eğilimi gözlenmektedir. Birim Alan yaklaşımının kanca bölümü için vermiş olduğu merkez hattı boyunca ilerleyen küçük boşluk Şekil 5.3b'de kesikli çizgi ile verilmiştir ve Hot Spot oluşumunu gösterip göstermeyeceğini yorumlamak deneyim gerektirmektedir. Birim Alan yaklaşımı temel iki Hot Spot noktasını net biçimde gösterebilmiş, üç numaralı Hot Spot eğilimini ise yoruma açık biçimde göstermiştir.
7. Üç numaralı parçada iki kesit alınmış ve her iki kesit üzerinde yer alan büyük Hot Spot noktaları birbirinin sağlamasını yapmıştır. İki numaralı kesitin alınmasının başka bir yararı ise, kanca kısmındaki hafif Hot Spot eğiliminin görülebilmesidir.

6.3. Tezin Bütünü Hakkında Genel Değerlendirmeler

1. Birim Alan yaklaşımına göre karmaşık parçaların katılma izotermi AutoCAD ortamında basit izoterm hesaplayıcıları kullanılarak çizilebilmektedir.
2. Birim Alan yaklaşımının elde sadece dört farklı şekil için dört farklı tip eşitliği bulunmasına rağmen, oldukça farklı döküm kesitlerine uygulanabilmesi en önemli avantajlarından biridir.
3. Birim Alan yaklaşımına dayalı katılma izotermi, katılmanın başlangıcından ileri aşamalarına kadar herhangi bir bozulmaya uğramadan, parçaların geometrik şekillerine sadık kalarak ilerlemektedirler. Bu özellik olası hata noktalarının belirlenmesinde kolaylık sağlamaktadır.
4. Birim Alan yaklaşımına göre çizilen katılma izotermi incelenen karmaşık parçalarda olası makro hata noktalarını yüksek isabetle verebilmektedir.
5. Birim Alan'a göre elde edilen katılma izotermi ile Magmasoft programından elde edilen sonuçlar birbiriyle yüksek korelasyon göstermektedir. İncelenen döküm parçalarında gözeneklilik tespitinde, Birim Alan yaklaşımı gözenek kaynak noktalarını gösterebilmiştir. Ancak, gözenek yayılımı noktasında bir miktar yetersiz kaldığı söylenebilir. Birim Alan yaklaşımı sadece geometri tabanlı bir matematik modelleme olduğu için bu derece hata payının olağan karşılanması gerekmektedir. Hot Spot tespiti noktasında ise Birim Alan yaklaşımının gözenek tespitine oranla daha başarılı sonuçlar verdiği gözlenmiştir. Hot Spot noktası tespitinde yüzde yüze yakın doğrulukta başarılıdır. Hot Spot bölgesinin şekli konusunda ise Birim Alan yaklaşımının verdiği şekiller geometri uyumlu oldukları ve basit matematik eşitliklere dayandığı için gerçek şekillerden bir miktar sapma göstermişlerdir. Ancak bu durum Hot Spot bölgelerinin sağlıklı olarak belirlenmesi açısından bir sorun oluşturmamaktadır.
6. Birim Alan yaklaşımına göre elde edilen katılma izotermi daha büyük alanlarda olabilecek çekmeleri gösterirken, Magmasoft programında sadece büyük kütleli olan kısımlarda çekmenin olma ihtimalini değil, parçanın diğer kısımlarında da sıvı metal sorunu olma konusunda bizi uyarmaktadır. Bu noktada Birim Alan'a göre elde edilen

katılma izotermi ile Magmasoft programından elde edilen sonuçlar birbiriyle farklılıklar göstermektedir. Birim Alan yaklaşımı bu aşamada sadece parça içi katılma sıralamasını geometri ile ilişkilendirerek gösterdiği için çoklu parametrelerle numerik analizler yapan Magmasoft programının daha detaylı bilgiler vermesi beklenen bir sonuçtur.

7. Magmasoft porosity ve Hot Spot FSTime simülasyonlarında yolluksuz veya yolluklu döküm yapmanın genel hata gösterimi hakkında incelenen parçalarda çok belirgin bir etkisinin bulunmadığı gözlenmiştir. Birim Alan yaklaşımı özellikle Hot Spot FSTime simülasyonları ile uyumlu sonuçlar vermektedir.
8. Geometri tabanlı Birim Alan yaklaşımı herhangi bir özel yazılıma gerek duyulmadan dökümlerin ön tasarımı için kullanılabilir.
9. Birim Alan yaklaşımına göre çizilen katılma izotermlerinin maliyet ve zaman açısından iyi yönü olduğunu düşünebiliriz. Bu yöntemle hemen anında sonuç alabiliriz ve parçanın dökümü konusunda hızlı yorumlar yapabiliriz.
10. Birim Alan yaklaşımının yetersiz kaldığı yönleri düşünecek olursak; sıvı metalin yetmediği noktalar sadece parçaların büyük kütleli kısımlarında değil diğer bazı noktalarda da meydana gelebilir. Bunu döküm ve katılma sonrasında laboratuvar ortamında gerçek deneylerden sonra görebilir ve deneyimleyebiliriz.
11. Birim Alan çalışması yapılarak daha fazla şekil üzerinde çalışarak ve gerçekliğe yakınlığı kısmında görüntüler yayınlayarak döküm işletmelerine yayılabilir ve insanların planlamalarına, deneylerine, gerçek döküm işlerine yardımcı olunabilir.
12. Birim Alan yaklaşımı halen bir bilgisayar programı haline getirilmeden döküm kesitleri üzerine manuel olarak uygulanabilecek bir yaklaşım olarak görünmekle birlikte, ileride bir bilgisayar yazılımı haline getirilebilir. Bu yazılım, içine aktarılan döküm kesiti üzerinde otomatik veya manuel olarak köşe (kavşak) noktalarının ve sınırlarının belirlenmesi, köşe izotermlerinin koordinat noktalarının ve izoterm eğrilerinin çizilmesi, çizilen köşe izotermlerinin en yakın teğet ve paralel taşıma yöntemleriyle birbirine bağlanması işlemlerini yürütebilir.

13. Birim Alan yaklaşımı döküm ön tasarımında, simülasyon öncesi ilk tasarımda, deneme dökümleri yapılmadan önceki ilk tasarım aşamasında, döküm hatalarını önlemek için eklenecek besleyici, çil vb. elemanların yerleşiminde fikir verici olarak, deneyimsiz mühendis ve teknik elemanlara katılma sonucu olabilecek hataları göstermek için bir eğitim aracı olarak kullanılabilecek düşük maliyetli bir matematik modellemedir.
14. Bundan sonra yapılacak Birim Alan çalışmalarında karmaşık şekillere besleyici ya da yolluk eklenerek sonuçlar tartışılabilir.

KAYNAKLAR

1. Chvorinov, N. (1940). Theory of Solidification of Castings, *Giesserei*, 27(2), 177-225.
2. Kotschi, R.M. and Plutshack, L.A. (1981). An Easy and Inexpensive Technique to Study the Solidification of Castings in Three Dimensions. *AFS Transactions*, 117(3), 601-610.
3. Neises, SJ, Uicker, J.J. and Heine, RW. (1987). Geometric Modeling of Directional Solidification Based on Section Modulus. *AFS Transactions*, 9(4), 25-30.
4. Upadhyay, G., Paul, A.J. (1994). Solidification Modeling: A Phenomenological Review. *AFS Transactions*, 75(2), 69- 80.
5. Kim, J.M.H., Loper C.R. and Kang C. S. (1985). Experimental Analysis of Wave Isotherms in Standard Casting Sections and in Finned Castings. *AFS Transactions*, 12(5), 463-474.
6. Pao, W.K.S., Ransing, R.S., Lewis, R.W. and Lin, C. (2004). A Medial-Axes-Based Interpolation Method for Solidification Simulation. *Finite Elements in Analysis and Design*, 6(2), 577- 593.
7. Taylor, H.F. (1959). *Foundry Engineering* (First Edition). New York:John Wiley & Sons, 67-68.
8. Sirilertworakul, N., Webster P.D. and Dean T.A. (1993). Computer Prediction of Location of Heat Centres in Castings. *J. Mater. Science. Technology*, 8(2), 923- 928.
9. Heine, R.W. and Uicker J.J., (1983). Riserling By Computer Assisted Geometric Modeling. *AFS Transactions*, 82(3), 127-36.
10. Heine, R.W., Uicker J.J. and Gantenbein D. (1984). Geometric Modeling of Mold Aggregate, Superheat, Edge Effects, Feeding Distance, Chills, and Solidification Macrostructure. *AFS Transactions*, 9(2), 135-50.
11. Pao, W.K.S., and Ransing R.S., (2006). A New Geometric Reasoning Technique for Hot Spot Prediction in Sand. *AFS Transactions*, 4(1), 9-10.
12. Ransing, R.S., Pao W.K.S., Lin C., Sood M.P. and Lewis R.W. (2005). Enhanced Medial Axis Interpolation Algorithm and Its Application to Hot Spot in a Mould Assembly. *International Journal of Metals Research*, 5(3), 1-12.
13. Özdemir, S. (1989). *Besleyicilerin Boyutlandırılmasında Yeni Bir Yaklaşım*, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 5-6.
14. Ozdemir, S. and Atasoy, E. (1995). A New Approach to Feeder Dimensioning. *Cast Metals*, 8(2), 129-137.
15. Ozdemir, S., and Tuzunalp, K.K., (2019). A Geometry-Based Model for Determining Solidification Isotherms of Basic Casting Sections. *Materials Chemistry and Physics*, 233(3), 27-45.

16. İnternet: Minkesh P.S. (2006). A Novel Geometry Based Approach for Casting Process Optimisation. URL : <https://cronfa.swan.ac.uk/Record/cronfa42352> Son Erişim Tarihi: 06.12.2020
17. Ravi, B. and Rinivasan, M.N. (1996). Casting Solidification Analysis by Modulus Vector Method. *International Journal of Cast Metals Research*, 9(1), 1-7.
18. Tiryakioğlu M., Tiryakioğlu E. and Askeland D.R. (1997). The Effect of Casting Shape and Size on Solidification Time: A New Approach. *International Journal of Cast Metals Research*, 9(2), 259-67
19. Tiryakioğlu, M., Tiryakioğlu E. and Askeland, D.R. (1997). Statistical Investigation of The Effects of The Shape, Size and Superheat on Solidification Times of Castings. *AFS Transactions*, 10(3), 907-913.
20. Tiryakioğlu, M., Tiryakioğlu E. and Campbell, J.A. (2001). Comparative Study of Optimum Feeder Models for Castings. *International Journal of Cast Metals Research*, 10(3), 25-30.
21. Rakotondrandisaa, A., Danailaa I. and Danaila L. (2019). Numerical Modelling of A Melting-Solidification Cycle of A Phase-Change Material with Complete or Partial Melting. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 9(3), 57-71.
22. Skrzypczak, T., Wegrzyn-Skrzypczak E. and Sowa L. (2018). Numerical Modeling of Solidification Process Taking Into Account The Effect of Air Gap. *Applied Mathematics and Computation*, 11(2), 768-779.
23. Soni, V., Kumar A. and Jain V.K. (2019). A Novel Solidification Model Considering Undercooling Effect for Metal Based Low Temperature Latent Thermal Energy Management. *Journal of Energy Storage*, 21(2), 528-542.
24. Reisa, A., Houbaertc Y., Xub Z., Tol R.V., Santosa A.D., Duartea J.F. and Magalhaes A.B. (2008). Modeling of Shrinkage Defects During Solidification of Long and Short Freezing Materials. *Journal of Materials Processing Technology*, 8(2), 428-434.
25. Skrzypczak, T. and Wegrzyn-Skrzypczak E. (2012). Mathematical and Numerical Model of Solidification Process of Pure Metals. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 55(1), 4276-4284.
26. Kanga, H.W., Park J.H. and Cho D.W. (2012). A Pixel Based Solidification Model for Projection Based Stereolithography Technology. *Sensors and Actuators A: Physical*, 178(29), 223-229.
27. Uzan, A.Y., Kozak Y., Korin Y., Harary I., Mehling H. and Ziskind G. (2017). A Novel Multi-Dimensional Model for Solidification Process with Supercooling. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 8(29), 91-102.
28. Tüzünalp, K.K. ve Özdemir Ş. (2008). Birim Alan Yaklaşımına Göre Katılma İzotermelerinin Belirlenmesi ve Gerçek Döküm Koşulları ile Karşılaştırılması. *Politeknik Dergisi*, 11(2), 161-168.

29. İnternet: Burgaçoğlu A. (2018). Simulasyon Nedir ve Nerelerde Kullanılır?. URL: <https://adelburgac.wordpress.com/2018/06/12/simulasyon-nedir-ve-nerelerde-kullanilir/> Son Erişim Tarihi : 06.12.2020
30. İnternet: Magmasoft (2021). Website. URL: https://www.magma-soft.de/en/support/interact/?gclid=Cj0KCQjwg7KJBhDyARIsAhrAXaE7-tMQ9c089vfnjQeDuGUX3q55Mb5L3DjGsgAlIAe5veBau--M07IaAs6rEALw_wcB Son Erişim Tarihi : 06.12.2020
31. İnternet: Magmasoft (2019). MAGMA Academy Newsletter. URL: https://www.magma-soft.de/en/magmaacademy/newsletter/magmaacademy-newsletter_april_2019.html Son Erişim Tarihi : 06.12.2020
32. İnternet: University of Wisconsin-Madison (2020). Wisconsin Geological and Natural History Survey. URL: <https://wgnhs.wisc.edu/maps-data/data/rock-properties/understanding-porosity-density/> Son Erişim Tarihi : 06.12.2020



GAZİ GELECEKTİR...