
GAZİ ÜNİVERSİTESİ
Gazi
1926

PLASTİK ENJEKSİYON KALIPLARINDA TABAKALI OBJE İMALATI YÖNTEMİ İLE ŞEKİL UYUMLU SOĞUTMA KANALI ÜRETİMİ VE DENEYSEL İNCELENMESİ

Mustafa GÖKTAŞ

DOKTORA TEZİ
İMALAT MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

NİSAN 2021

ETİK BEYAN

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

- 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 çalışmasında 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.

İmza
Mustafa GÖKTAŞ
26/04/2021

PLASTİK ENJEKSİYON KALIPLARINDA TABAKALI OBJE İMALATI YÖNTEMİ İLE ŞEKİL UYUMLU SOĞUTMA KANALI ÜRETİMİ VE DENEYSEL İNCELENMESİ

(Doktora Tezi)

Mustafa GÖKTAŞ

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Nisan 2021

ÖZET

Plastik enjeksiyon kalıplarında soğutma sistemi üretim maliyeti ve ürün kalitesi üzerinde belirleyici bir role sahiptir. Yapılan bu çalışmada plastik enjeksiyon kalıplarında daha verimli bir soğutma sistemi için şekil uyumlu soğutma kanalları kullanılmıştır. Şekil uyumlu soğutma kanallarının oluşturulması için sistematik bir tasarım metodu geliştirilmiştir. Eğimli yüzeylerden oluşan karmaşık geometrili bir plastik parça belirlenerek parça yüzeyini uyumlu bir şekilde takip eden soğutma kanalları tasarlanmıştır. Deneysel çalışma öncesinde Moldflow yazılımı kullanılarak giriş yeri, dolum, ütüleme, çarpılma ve soğuma analizleri gerçekleştirilmiştir. Elde edilen analiz sonuçlarına göre kalıp tasarımı gerçekleştirilmiştir. Şekil uyumlu spiral kanallara sahip plastik enjeksiyon kalıbı imal edilmek üzere bilgisayar destekli tasarı6m yazılımı kullanılarak modellenmiştir. Şekil uyumlu soğutma kanallarının üretimi için vakumlu sert lehimleme metodu kullanılmıştır. Kalıp çekirdeklerinin katı modelleri katmanlara bölünerek plakaların üretimi planlanmıştır. Birleşme yüzeyleri taşlanarak parlatılan plakalar bilgisayar denetimli freze tezgâhı ile işlenerek soğutma kanalını oluşturacak boşluklar oluşturulmuştur. Hazırlanan plakalar vakumlu sert lehimleme yöntemi ile birleştirilmiştir. Plakaların birleştirilmesi ile elde edilen ve içinde şekil uyumlu soğutma kanalı bulunan kalıp çekirdekleri bilgisayar denetimli freze tezgâhında tekrar işlenerek kalıp boşlukları oluşturulmuştur. Deneysel olarak karşılaştırmak üzere geleneksel olarak kullanılan doğrusal soğutma kanalları bulunan kalıp çekirdekleri de imal edilmiştir. Üretilen plastik enjeksiyon kalıbı plastik enjeksiyon makinesine bağlanarak baskı denemeleri yapılmıştır. Yapılan deneylerde sıcaklık, soğutma süresi ve plastik parça üzerinde oluşan çarpılma miktarları incelenmiştir. Baskı denemeleri sonucunda şekil uyumlu soğutma kanalı kullanımı ile soğuma süresi %22 oranında kısalırken çarpılma miktarı ise %50 oranında azalmıştır. Yapılan bu çalışma ile şekil uyumlu soğutma kanalı bulunan plastik enjeksiyon kalıbı düşük maliyetli bir yöntem kullanılarak üretilmiş, üretim hızı ve ürün kalitesinde artış sağlanmıştır.

Bilim Kodu	:	91438
Anahtar Kelimeler	:	Plastik Enjeksiyon Kalıplama, Şekil Uyumlu Soğutma Kanalları, Katmanlı Sert Lehimleme, Plastik Parçaların Çarpılması
Sayfa Adedi	:	167
Danışman	:	Prof. Dr. Abdulmecit GÜLDAŞ

PRODUCTION AND EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF CONFORMAL COOLING CHANNEL WITH LAYERED OBJECT MANUFACTURING METHOD IN PLASTIC INJECTION MOLDS

(Ph. D. Thesis)

Mustafa GÖKTAŞ

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

April 2021

ABSTRACT

In injection molds, the cooling system has a significant role in production cost and product quality. In this study, conformal cooling channels are used for a more efficient cooling system in plastic injection molds. A systematic design method has been developed to create conformal cooling channels. A complicated geometry plastic part with curved surfaces has been chosen and cooling channels are designed which follow the surface of the parts conformably. Before the experimental study, gate location, filling, packing, warpage and cooling analyzes were performed using Moldflow software. According to the obtained results of the analysis, the mold was designed. The plastic injection mold with spiral conformal channels is modeled using computer-aided design software to manufacture. The vacuum brazing method is used for the production of conformal cooling channels. Solid models of mold cores are divided into layers and production of plates is planned. The plates, which are polished by grinding the joining surfaces, are machined with a CNC milling machine to create gaps to form the cooling channel. The prepared plates were combined with the vacuum brazing method. The mold blocks, which are obtained by joining the plates and which have conformal cooling channels, were re-machined on the CNC milling machine and mold cavities are created. Mold cores with straight cooling channels were also produced to compare experimentally. The produced plastic injection mold was mounted on the plastic injection machine and filling tests were made. In the experiments, temperature, cooling time and warpage on the plastic parts were examined. As a result of the experiments, with the use of conformal cooling channels, the cooling time was reduced by 22% while the warpage decreased by 50%. With this study, the plastic injection mold with conformal cooling channels was produced using a low-cost method and an increase in production speed and product quality was achieved.

Science Code	:	91438
Key Words	:	Plastic Injection Molding, Conformal Cooling Channels, Laminated Brazing, Warpage of Plastic Parts
Page Number	:	167
Supervisor	:	Prof. Dr. Abdulmecit GÜLDAŞ

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışması süresince manevi desteklerinden dolayı değerli büyüğüm Sadettin ERBAŞ'a, Eşim Emine GÖKTAŞ'a, anneme, babama ve çocuklarıma teşekkür ediyorum. Tez çalışması boyunca yanımda olan, danışman hocam Prof. Dr. Abdulmecit GÜLDAŞ'a, tez izleme komisyonu üyeleri Prof. Dr. Onuralp ULUER ve Prof. Dr. Mustafa GÜNAY hocalarıma teşekkür ederim.

Tez çalışmalarında 07/2018-08 numaralı projeye desteğinden dolayı Gazi Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projelerine teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET iv

ABSTRACT v

TEŞEKKÜR vi

İÇİNDEKİLER vii

ÇİZELGELERİN LİSTESİ x

ŞEKİLLERİN LİSTESİ xi

RESİMLERİN LİSTESİ xv

SİMGELER VE KISALTMALAR xvi

1. GİRİŞ 1

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI ÖZETİ 5

3. KAVRAMSAL TEMELLER 29

3.1. Plastik Malzemeler 29

3.2. Plastik Enjeksiyon Kalıplama 31

3.2.1. Plastik enjeksiyon makinesi 32

3.2.2. Plastik enjeksiyon kalıbı 34

3.3. Kalıplarda Soğutma Sistemi Tasarımı 40

3.3.1. Soğutma sisteminin gerekliliği 40

3.3.2. Soğutma kanallarının tasarımı 45

3.4. Soğutma Süresi Hesabı 52

3.5. Fırında Sert Lehimleme 56

3.5.1. Sert lehimleme 56

3.5.2. Sert lehimlemede işlem parametreleri 57

3.5.3. Fırında sert lehimleme 62

Sayfa

3.5.4. Katmanlı üretim ve sert lehimleme 63

4. MATERYAL VE METOT 65

4.1. Plastik Parça Tasarımı 65

4.2. Şekil Uyumlu Soğutma Kanallarının Tasarımı 66

4.2.1. Tasarım algoritması 66

4.2.2. Kanal tasarım prosedürü 68

4.3. Giriş Yeri Analizi 74

4.4. Kalıp Tasarımı 75

4.5. Kalıp Çekirdeklerinin Üretimi 76

4.6. Sert Lehimleme 78

4.7. Kalıp Çekirdeklerinin İşlenmesi ve Montajı 79

4.8. Sayısal Metot İle Simülasyon Analizi 81

4.9. Enjeksiyon Parametreleri 88

4.10. Sıcaklık Ölçümü 89

4.11. Çarpılmanın Ölçülmesi 90

4.12. Plastik Parça Ağırlıklarının Ölçülmesi 91

5. BULGULAR VE TARTIŞMA 93

5.1. Şekil Uyumlu Soğutma Kanalı Tasarım Metodu 93

5.2. Şekil Uyumlu Soğutma Kanallarının Üretimi 93

5.3. Soğut Süresi Hesabı 97

5.4. Analiz Sonuçları 98

5.5. Deneysel sonuçlar 108

5.6. Soğutma Parametrelerinin Soğutma İşlemi Üzerindeki Etkileri 117

5.6.1. Soğutma süreleri 117

Sayfa

5.6.2. Çarpılma miktarları 120

5.6.3. Kalıntı gerilme 122

5.6.4. Soğutma suyu sıcaklık değişim ve basınç kaybı 124

6. SONUÇ VE ÖNERİLER 127

KAYNAKLAR 131

EKLER 144

EK-1. Kalıp çekirdeklerinin ayrıldığı katmaların CAD modelleri 144

EK-2. Kalıp çekirdekleri üzerindeki sıcaklık dağılımları 147

EK-3. Şekil uyumlu kanal ile üretilen parçanın CMM tezgahında ölçüm raporu 149

EK-4. Doğrusal kanal ile üretilen parçanın CMM tezgahında ölçüm raporu 157

ÖZGEÇMİŞ 165

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge **Sayfa**

Çizelge 3.1. Plastik malzemelerin kalıplanması için uygun kalıp sıcaklıkları 41

Çizelge 3.2. Kalıptan çıkarma sıcaklıkları 42

Çizelge 3.3. Parça cidar kalınlığına göre soğutma kanalı boyutları 46

Çizelge 3.4. Bazı metaller için ilave dolgu metalleri ve lehimleme sıcaklıkları..... 58

Çizelge 4.1. ABS malzemesinin fiziksel özellikleri..... 65

Çizelge 4.2. Kalıp çekirdeklerinin ayrıldığı katman kalınlıkları 77

Çizelge 4.3. Çekirdek malzemesinin kimyasal bileşimi 78

Çizelge 4.4. Lehim malzemesinin özellikleri..... 79

Çizelge 4.5. Sayısal ağda kullanılan eleman sayıları 84

Çizelge 4.6. Çözüm ağı (mesh) istatistikleri 84

Çizelge 4.7. Kalıp malzemesinin termal özellikleri..... 85

Çizelge 4.8. Analizde kullanılan sınır şartları..... 86

Çizelge 4.9. Sayısal analizde kullanılan değişken değerleri 87

Çizelge 4.10. Deneyde kullanılan enjeksiyon parametreleri..... 89

Çizelge 5.1. Kalıp çekirdeklerinin yaklaşık üretim maliyetleri 95

Çizelge 5.2. Baskı denemelerinde elde edilen işlem süreleri..... 111

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil **Sayfa**

Şekil 3.1. Plastik malzemelerin moleküler yapıları 30

Şekil 3.2. Amorf ve Yarı-kristalin malzemelerin ısı karşısındaki davranışı 31

Şekil 3.3. Plastik enjeksiyon makinesinin bölümleri 32

Şekil 3.4. Plastik enjeksiyon kalıplamada üretim safhaları 33

Şekil 3.5. Plastik enjeksiyon kalıbının genel yapısı 34

Şekil 3.6. Ürün salkımı üzerindeki bölümler 35

Şekil 3.7. Yolluk burcunun yapısı 36

Şekil 3.8. Dağıtıcı kanal uzunluklarının eşit uzunlukta tasarımı 37

Şekil 3.9. Dağıtıcı kanal kesitleri 37

Şekil 3.10. Giriş tipleri 38

Şekil 3.11. Kalıp ayırma çizgisi 38

Şekil 3.12. Maça hareketi ile parçanın kalıptan çıkması 39

Şekil 3.13. Uygun itici konumları 40

Şekil 3.14. Çevrim süresinde işlemlerin zaman aralıkları 42

Şekil 3.15. Yüzey sıcaklık farkı nedeniyle çarpılmanın oluşumu 43

Şekil 3.16. Kalıp sıcaklığın zamanla değişimi 45

Şekil 3.17. Kalıp şartlandırıcı ile yapılan ön ısıtma 45

Şekil 3.18. Plastik enjeksiyon kalıplamada soğutma sistemi 46

Şekil 3.19. Soğutma kanallarının konumları 47

Şekil 3.20. Erkek kalıp plakasının soğutulması 47

Şekil 3.21. Dişi kalıp plakasının soğutulması 48

Şekil 3.22. Seri ve Paralel bağlantı tipleri 49

Şekil 3.23. a) Açılı delinmiş kanallar, b) Bölmeli (baffle) kanal, c) Kalıp yüzeyinden delinen kanal 50

Şekil **Sayfa**

Şekil 3.24. a) İç fıskiyeli (bubbler) kanal, b) Helezonik bölmeli (baffle) kanal, c) Lokmalı helis kanal 51

Şekil 3.25. a) Doğrusal soğutma kanalı, b) Şekil uyumlu soğutma kanalı 51

Şekil 3.26. Şekil uyumlu soğutma uygulamaları 52

Şekil 3.27. Isı taşınım katsayısının Reynolds sayısına göre değişimi 56

Şekil 3.28. Lehim oluşum mekanizması 58

Şekil 3.29. Lehimleme aralığı-birleştirme dayanımı ilişkisi 59

Şekil 3.30. Katı yüzey üzerindeki damlacığın temas açısı, a) $\theta<90°$, b) $\theta>90°$ 60

Şekil 3.31. Sert lehimlemede zaman-sıcaklık çevrimi 61

Şekil 4.1. Tasarlanan plastik parça 65

Şekil 4.2. Kanal tasarımı algoritmasının şematik gösterimi 67

Şekil 4.3. Ofsetlenerek elde edilen referans yüzeyler 68

Şekil 4.4. İç yüzeyin ofsetlenmesiyle elde edilen referans yüzey 69

Şekil 4.5. Ofset kenarı üzerinde oluşturulan çember 69

Şekil 4.6. Tüp şeklindeki yüzeyin oluşumu 70

Şekil 4.7. Ara kesit eğrisinin elde edilmesi 70

Şekil 4.8. Ara kesit tekrarı ile eğrilerin elde edilmesi 71

Şekil 4.9. Bağlantı eğrilerinin eklenmesi, kırpma ve yuvarlatma 71

Şekil 4.10. Kanal kesit profilinin kanal hattı boyunca süpürülmesi 72

Şekil 4.11. a) Dişi ve b) Erkek kalıp yarımında soğutma kanallarının elde edilmesi 72

Şekil 4.12. Zikzak ve spiral şekil uyumlu soğutma kanal 73

Şekil 4.13. Soğutma kanallarının su giriş ve çıkışları 73

Şekil 4.14. Doğrusal soğutma kanalları, a) Endüstriyel, b) Eş hacimli 74

Şekil 4.15. Giriş yeri analizi ve yolluk tasarımı 75

Şekil 4.16. Giriş ve kanal kesitleri 75

Şekil **Sayfa**

Şekil 4.17. Tek gözlü plastik enjeksiyon kalıbı tasarımı 76

Şekil 4.18. Kanal girişlerine yerleştirilen conta..... 76

Şekil 4.19. Kalıp çekirdeğinin CAD modeli ve katmanlara ayrılması 77

Şekil 4.20. İtici pim deliklerinin konumu 80

Şekil 4.21 a) Doğrusal, b) Eş hacimli doğrusal ve c) Şekil uyumlu soğutma kanalları . 81

Şekil 4.22 Analizde kullanılan ağ tipleri a) Midplane, b) Dual Domain, c) 3D 83

Şekil 4.23. Plastik parça üzerindeki giriş (gate) noktası..... 85

Şekil 4.24. Soğutma kanalları üzerindeki giriş ve çıkış noktaları..... 86

Şekil 5.1. Kalıp çekirdeğinin parçalı olarak üretimi 95

Şekil 5.2. Tabakalı obje imalat yönteminde işlenmiş plakalar 96

Şekil 5.3. Kalıp boşluğunun dolum süresi 98

Şekil 5.4. Çıkarama sıcaklığına erişim sürelerindeki sıcaklık dağılımları..... 100

Şekil 5.5. Kalıp üzerindeki sıcaklık dağılımları..... 102

Şekil 5.6. Çarpılma değerlerinin dağılımı..... 104

Şekil 5.7. Yüzeylerdeki mutlak sapma değerlerinin dağılımı..... 105

Şekil 5.8. Plastik parça üzerindeki kalıntı gerilmeler 106

Şekil 5.9. Şekil uyumlu kanallarda ortalama iletim mesafesinin kısalması..... 108

Şekil 5.10. Plastik parçaların çıkarma sıcaklığına erişim süreleri 111

Şekil 5.11. Baskı demelerine göre kalıptan çıkan parçalarının yüzey sıcaklıkları 112

Şekil 5.12. Kalıp sıcaklığının dengeye gelme süreleri..... 113

Şekil 5.13. Plastik parça üzerinde düzlemsel yüzeydeki sapma derinlikleri 114

Şekil 5.14. Ortalama sapma derinlikleri 114

Şekil 5.15. Deney parçalarının yüzeyindeki çarpılma miktarı dağılımı 115

Şekil 5.16. Plastik parçaların ortalama ağırlıkları..... 116

Şekil **Sayfa**

Şekil 5.17. Soğutma süresinin cidar kalınlığına göre değişimi 118

Şekil 5.18. Soğutma süresinin kanal çapına göre değişimi 118

Şekil 5.19. Soğutma süresinin kalıp malzemesine göre değişimi 119

Şekil 5.20. Soğutma süresinin soğutma suyu debisine göre değişimi 120

Şekil 5.21. Çarpılma miktarının cidar kalınlığına göre değişimi 120

Şekil 5.22. Kalıp malzemesi ve cidar kalınlığının çarpılma miktarına etkisi 121

Şekil 5.23. Çarpılma miktarının soğutma suyu debisine göre değişimi 122

Şekil 5.24. Kalıntı gerilmenin cidar kalınlığına göre değişimi 123

Şekil 5.25. Cidar kalınlığı ve kanal çapının kalın gerilmeye etkisi 123

Şekil 5.26. Soğutma suyunun giriş çıkış sıcaklık farkının kanal çapına göre değişimi .. 124

Şekil 5.27. Soğutma suyunun sıcaklık farkının cidar kalınlığına göre değişimi 125

Şekil 5.28. Soğutma kanalındaki basınç kaybının kanal çapına göre değişimi 125

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim **Sayfa**

Resim 3.1. Sert lehimleme işlemi için atmosfer kontrollü ısıl işlem fırını 62

Resim 3.2. Sert lehimle birleştirme bölgesinde mikro yapı 62

Resim 4.1. İşlenmiş çekirdek plakaları 78

Resim 4.2. Fırında sert lehimleme ile birleştirilmiş çekirdek plakaları 79

Resim 4.3. İşlenmiş kalıp çekirdekleri 80

Resim 4.4. Çekirdeklerin kalıba montaj edilmiş hali 81

Resim 4.5. Deneyde kullanılan kızılötesi termometre ve termokupl- multimetre 89

Resim 4.6. Plastik parça üzerindeki çarpılmanın ölçülmesi 90

Resim 4.7. 3B yüzey taraması için kullanılan optik tarayıcı 91

Resim 5.1. Metal boruların bükülerek kalıp içine yerleştirilmesi 97

Resim 5.2. Üretilen plastik parça numuneleri 110

SİMGELER VE KISALTMALAR

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

Simgeler	**Açıklamalar**
mm	Milimetre
dm^3	Desimetreküp
s	Saniye
dk	Dakika
l	Litre
g	Gram
kg	Kilogram
Pa	Pascal
MPa	Mega Pascal
°C	Santigrat Derece
K	Kelvin
J	Joule
W	Watt
l	Litre
$\boldsymbol{T}$	Sıcaklık, °C
$\boldsymbol{x}$	Mesafe, mm
$\boldsymbol{k}$	Isıl iletkenlik, W/m.°C
$\boldsymbol{t}$	Zaman, s
$\boldsymbol{\alpha}$	Isıl yayınım, m^2/s
$\boldsymbol{\rho}$	Yoğunluk, kg/m^3
$\boldsymbol{c_p}$	Özgül ısı, J/g.°C
$\boldsymbol{h}$	Plastik parça kalınlığı, m
$\boldsymbol{Q}$	Isı, Watt
$\boldsymbol{S_e}$	Şekil faktörü
$\boldsymbol{d}$	Kanal çapı, m

Simgeler	**Açıklamalar**
$\boldsymbol{Re}$	Reynold sayısı
$\boldsymbol{u}$	Akış hızı, m/s
$\boldsymbol{v}$	Kinematik viskozite, m^2/s
$\boldsymbol{\gamma}$	Faz sınır açısı, °

Kısaltmalar	**Açıklamalar**
ABS	Akrilonitril Butadien Stiren
ASTM	American Society for Testing and Materials
CAD	Computer Aided Design (Bilgisayar Destekli Tasarım)
CMM	Coordinat Measurement Machine **(**Koordinat Ölçme Tezgâhı)
CNC	Computer Numerical Control (Bilgisayarlı Sayısal Kontrol)
PP	Polipropilen
SLM	Selective Laser Melting (Seçkili Lazer Ergitme)
UV	Ultra Viole

1. GİRİŞ

Plastikler, petrolün enerji amaçlı kullanımının gittikçe yaygınlaştığı dönemlerde, rafine edildikten sonra atık olarak yok edilmeye çalışılan değersiz bir madde olarak görülmekteydi. 19. yüzyılın ikinci yarısından sonra içine eklenen katkı maddeleriyle ürüne dönüştürülebilir bir malzeme olduğu keşfedilmiştir. Plastik malzemeler sağladığı önemli avantajlar sayesinde geleneksel malzemeler olan ahşap, seramik ve metallerin yanında yerini almıştır. Ucuzluğu, hafifliği, seri üretime uygunluğu, yalıtkan oluşu, kimyasal kararlılığı gibi birçok özelliği sayesinde plastik malzemeler, günümüzün vaz geçilmez üretim malzemesi haline gelmiştir ve günlük hayatın hemen her alanında kullanılmaktadır. Plastik malzemelerin varlığı, kullanıldığı otomotiv, medikal, ambalaj, elektronik, uzay ve havacılık gibi pek çok alanın da gelişmesine hız kazandırmıştır.

Plastik malzemelerin ürüne dönüştürülmesi için çok sayıda üretim yöntemi geliştirilmiştir. Plastik malzemeler ısı karşısında yumuşayarak ergiyik haline gelebilmektedirler. Kullanılan üretim yöntemlerinde plastik malzemelerin bu özelliğinden faydalanılmaktadır. Enjeksiyon kalıplama, ekstrüzyon kalıplama, şişirme, vakum kalıplama, dönel kalıplama; plastik malzemelerin ürüne dönüştürülmesinde en yaygın kullanılan yöntemler arasındadır.

Plastik malzemelerin şekillendirilerek ürün haline getirilmesinde kullanılan en yaygın yöntemlerden birisi de plastik enjeksiyon kalıplama yöntemidir. Bu yöntem ile üretilen plastik ürünler genellikle ikincil bir işleme ihtiyaç duyulmadan nihai haline gelmiş olurlar. Farklı boyut ve geometriye sahip plastik ürünlerin özdeş ve seri olarak üretilmesini sağlayan bu yöntem üretim maliyetlerinde de avantaj sağlamaktadır.

Kalıplama işlemi, plastik enjeksiyon makinesine bağlanarak çalıştırılan kalıp sayesinde gerçekleştirilir. Kalıplama esnasında sıcaklık, basınç, zaman ve hız para metreleri kontrol edilerek en uygun şartlar oluşturulmaya çalışılır. Kalıp, genellikle iki yarımdan oluşur ve seri bir şekilde kapanıp açılabilir.

Plastik enjeksiyon kalıplama işlemi; dolum, ütüleme, soğutma, kalıptan çıkarma gibi temel safhalardan oluşur. Isıtılarak ergiyik haline getirilmiş olan plastik malzeme, çelik plakalar üzerine işlenmiş, ürün geometrisine uyumlu kalıp boşluklarına basınç ile enjekte edilir.

Kalıp içine dolan plastik malzeme soğumaya başlar. İstenen katılaşma seviyesine ulaşıncaya kadar kalıp doldurulmaya çalışılarak basınç altında tutulur. Ergiyik plastiğin soğuyarak katılaşmasıyla plastik ürün kalıptan çıkarılır. Bu işlemlerin arka arkaya tekrarı ile seri üretim gerçekleştirilmiş olur. Plastik enjeksiyon kalıplama işlemi döngüler halinde gerçekleşir. Üretim çevrimi için geçen süre üretim hızını belirler.

Plastik enjeksiyon kalıplamada bir çevrim süresi içinde en fazla zaman alan safha, soğutma işlemidir [1]. Kalıp içindeki ergiyik plastiğin katılaşması için soğutmaya ihtiyaç duyulur. Soğutma işlemi ise kalıp üzerinde bulunan soğutma sistemi ile kontrollü ve hızlı bir şekilde yapılır. Soğutma süresi, üretim hızını doğrudan etkilediği için bu işlemin mümkün olduğunca kısa sürede gerçekleşmesi istenir. Soğutma işlemi, çevrim süresini etkilediği gibi plastik ürünün kalitesini de önemli ölçüde etkiler. Plastik malzeme soğurken parça üzerinde oluşacak çarpılmalar, parça için beklenen boyutsal ve geometrik toleransların aşılmasına neden olabilmektedir. Bu nedenle plastik enjeksiyon kalıpları üzerinde bulunan soğutma sistemlerinden kısa sürede soğutabilme yeteneğinin yanında kaliteli soğutmanın gerçekleştirebilmesi de istenmektedir.

Plastik enjeksiyon kalıplarının hızlı ve kontrollü bir şekilde soğutulabilmesi için kalıp plakalarına matkap ile delmek suretiyle açılan soğutma kanallarından soğuk su akışı gerçekleştirilmektedir. Bu sayede ergiyik plastik üzerindeki ısı kalıba aktarılmaktadır. Kalıp üzerindeki ısı ise soğutma suyu ile uzaklaştırılmaktadır. Plastik enjeksiyon kalıplarına soğutma kanalları açılırken kanalların kalıp boşluklarına yakın olan bölgeler tercih edilir. Ancak doğrusal hatlara sahip olmayan, karmaşık formlu plastik ürünler kalıplanmak istendiğinde doğrusal soğutma kanalları kalıp boşluklarına uyumlu olacak şekilde yanaşamamaktadır. Soğutma kanalları bazı bölgelerde kalıp boşluğuna yaklaşırken bazı bölgelerde ise uzaklaşmaktadır. Bunun sonucu olarak ergiyik plastik malzemenin bazı bölgeleri daha erken soğuyup katılaşırken diğer bölgeler daha geç katılaşmaktadır. Plastik parça üzerindeki farklı katılaşma bölgelerinde farklı çekme oranlarından dolayı plastik parçalar çapılmaya maruz kalmaktadır. Bu durum ise plastik parça kalitesini olumsuz olarak etkilemektedir.

Kalıp boşluğuna dolan ergiyik plastiğin daha eş sıcaklık dağılımı ile soğutulabilmesi için plastik parçanın geometrisine uyumlu soğutma kanallarına ihtiyaç duyulmaktadır. Şekil uyumlu soğutma kanalları plastik malzemenin daha düzgün ve hızlı soğutulabilmesini

sağlamaktadır. Bunun yanında karmaşık formlu soğutma kanallarına sahip kalıpların nasıl üretileceği ise kalıp üreticileri için çözülmesi gereken bir problem haline gelmektedir. Ayrıca karmaşık formlu soğutma kanallarının nasıl tasarlanacağı da açıklığa kavuşturulması gereken ayrı bir sorunu teşkil etmektedir.

Yapılan bu çalışmada şekil uyumlu soğutma kanallarının tasarımı için sistematik bir yaklaşım sunulmaktadır. Önerilen tasarım algoritması, BDT yazılımlarında otomatik hale getirilebilecek bir yöntemdir. Bu çalışmada ayrıca şekil uyumlu soğutma kanallarının nasıl üretileceğine dair endüstriyel olarak uygulanabilir bir yöntem sunulmaktadır. Kalıp çekirdeklerinin plakalar halinde parçalı olarak üretimi ve vakumlu sert lehimleme yöntemi ile birleştirilmesini ön gören deneysel bir çalışma yapılmıştır.

Karmaşık formlu bir plastik parça için şekil uyumlu soğutma kanallarına sahip plastik enjeksiyon kalıbı yine bu çalışma kapsamında geliştirilen tasarım yöntemi ile tasarlanmıştır. Şekil uyumlu soğutma kanallarına sahip kalıp çekirdekleri plakalar halinde üretilmiştir. Üretilen çekirdek plakaları vakumlu sert lehimleme yöntemi ile birleştirilmiş ve kalıp boşlukları işlenmiştir. Plastik enjeksiyon kalıbının üretiminden sonra baskı denemeleri yapılarak üretim süreci incelenmiştir. Hem doğrusal kanallar hem de şekil uyumlu soğutma kanalları ile yapılan deneyler sonucunda, soğutma süreleri ve plastik parça üzerindeki çarpılma miktarları gözlemlenmiştir. Önerilen yöntemim kullanımıyla soğutma ve çevrim süresinin kısaldığı, plastik parçalar üzerindeki çarpılma miktarlarının da azaldığı belirlenmiştir.

Şekil uyumlu soğutma kanallarına sahip plastik enjeksiyon kalıplarının tasarımı ve üretimi için endüstriyel olarak uygulanabilir ve düşük maliyetli bir yöntem geliştirilmiştir.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI ÖZETİ

Plastik malzemeler sahip oldukları özelliklerden dolayı günlük hayatın hemen her alanında yaygın olarak kullanılmaktadır. Hafiflik, şeffaflık, korozyon direnci, sızdırmazlık, kolay işlenebilme, düşük maliyet ve temin edilebilirlik gibi pek çok özellik plastik malzemelerin tercih sebepleri arasındadır. Buna paralel olarak plastik ürünlerin üretim yöntemleri de sürekli bir gelişme içerisinde olmuştur. Plastik ürünlerin üretilmesinde en çok kullanılan yöntemlerin başında ise enjeksiyon kalıplama gelmektedir. Karmaşık geometrili plastik ürünlerin ikincil bir işleme gerek duyulmadan seri bir şekilde üretilmesini sağladığı için bu üretim yöntemi geniş bir yaygınlık kazanmıştır [2].

Plastik enjeksiyon kalıplama yönteminde granül haldeki plastik malzeme ergitilerek kalıp içerisine basınç altında enjeksiyon yapılmaktadır. Kalıp kontrollü bir şekilde soğutulurken doldurma basıncı devam etmektedir. Soğuyarak katılaşan plastik parça, açılan kalıptan çıkarılmaktadır. Enjeksiyon kalıplamada belirtilen bu adımlar döngüler halinde devam etmektedir.

Plastik enjeksiyon kalıplama; sıcaklık, basınç, zaman ve hız parametrelerin üretim şartlarına uygun olarak ayarlanabilmesi ile gerçekleştirilmektedir. Yapılan araştırmalarla, üretim hızının ve ürün kalitesinin artırılması, enerji sarfiyatı ve maliyetlerin düşürülmesi için bu üretim parametrelerinin en uygun değerleri belirlenmeye çalışılmaktadır. Bunun için deneysel, analitik ve sayısal birçok çalışma mevcuttur.

Plastik enjeksiyon kalıplama işlemi; dolum, ütüleme, soğutma gibi çevrimlerle sürekli olarak tekrar eden çevrimler halinde gerçekleşmektedir. Kalıbın kapanmasından bir sonraki kapanmasına kadar geçen süre, kalıplamada bir çevrim süresi olarak anılmaktadır. Çevrim süresi içinde %80‘lere kadar varan oranla en uzun süren safha soğutma süresidir [1]. Bu nedenle soğutma işleminin etkinliği üretim hızının belirlenmesinde önemli bir rol oynamaktadır.

Soğutma işlemi gerçekleşirken plastik malzemenin tüm bölgelerinin eşit bir soğutma hızı ile soğuması istenir. Katılaşma hızının farklı bölgelerde değişken olması plastik parça üzerinde çarpılmalara neden olmaktadır. Üretim hızını ve ürün kalitesini doğrudan etkilediği için

plastik enjeksiyon kalıplarının soğutulması çok kritik bir safhadır [3, 4].

Plastik enjeksiyon kalıbı içerisindeki ergiyik plastiğin ürün kalitesi ve üretim verimliliği açısından en uygun biçimde soğutulabilmesi için gerekli soğutma sisteminin nasıl tasarlanması gerektiği konusunda birçok çalışma yapılmış ve yeni çalışmalar da devam etmektedir. Yapılan çalışmalar deneysel, sayısal, tasarım algoritması geliştirme ve üretim yöntemi gibi birçok yönden ele alınabilir.

Analitik çalışmalar:

Soğutma süresi, üretimde hız ve zaman yönetimi açısından önemli bir role sahiptir. Soğutma süresinin gerçeğe yakın ve pratik bir yöntemle hesaplanabilmesi için önerilen modeller değerlendirilmiş ve yeni bir denklem elde edilmiştir [5]. Sistem parametreleri kullanılarak soğutma süresi yaklaşık olarak hesaplanmıştır.

Plastik parça üzerinde oluşabilecek çarpılma miktarının tahmin edilebilmesi için bir yapay sinir ağı modeli geliştirilmiştir. Soğutma kanalı boyutları ve yerleşim konumu parametreleri kullanılarak çarpılma miktarları hesaplanmaya çalışılmıştır. Elde edilen sonuçların yapılan sayısal analiz sonuçları ile uyuştuğu gözlemlenmiştir [6].

Amorf ve yarı kristalin plastiklerin kalıplanmasında soğutma sürelerinin tahmin edilebilmesi için yarı analitik model geliştirilmiştir. Geliştirilen model yapılan sayısal analizler ile test edilmiş ve birbirleri ile uyumlu sonuçlar elde edilmiştir [7].

Sayısal çalışmalar:

Doğruluğu kanıtlanmış sayısal modellerle yapılan analizlerle kalıp içerisindeki tüm bölgelerde sıcaklık dağılımı belirlenebilmektedir. Deneysel ölçümler ise sınırlı sayıda ve ancak belirli bölgelerden yapılabilmektedir. Bu nedenle sayısal modeller kalıp tasarımcılarına soğutma sistemlerinin iyileştirilmesi için pratik bir yol sunmaktadır [8]. Bunula beraber hesaplama maliyetlerini düşürecek ve güvenilirlik oranlarını artıracak daha pratik sayısal hesaplama modelleri üzerinde de çalışmalar devam etmektedir [1, 9].

Çok gözlü bir plastik enjeksiyon kalıbında kanal boyutu, kanal konumu ve soğutma suyu

debisinin sıcaklık dağılımına etkileri incelenmiştir. Soğut kanalı ile cidar kalınlığının yüksek olduğu feder dibi gibi bölgeler arasında mesafeler kısaltılarak kanal tasarımı optimize edilmeye çalışılmıştır. Elde edilen yeni tasarın sonlu elemanlar yöntemi ile test edilmiştir. Yapılan optimizasyon ile eş sıcaklık dağılımı oranı %32'lerden %84 sevilerine çıkarılmıştır [10].

Plastik enjeksiyon kalıplarında soğutma sisteminin optimum bir şekilde tasarlanabilmesi için soğutma hızının kısaltılması ve sıcaklık dağılımının iyileştirilmesi aynı anda göz önünde bulundurulmalıdır. Eş sıcaklık dağılımının iyi olmadığı kısa soğutma süresine sahip bir soğutma sistemi ya da eş sıcaklık dağılımının iyi olduğu ancak uzun zaman alan bir soğutma işlemi tercih edilmeyen durumlardır [11].

Plastik enjeksiyon kalıplamada soğutma sistemini iyileştirmek amacıyla kalıp yüzeyindeki zamana bağlı sıcaklık profilini belirlemek için "Sınır Elemanı Metodu" kullanılarak bir sayısal analiz yapılmamıştır. Analiz sonuçlarına göre; kalıp yüzey sıcaklığı ilk çevrim ile beraber sürekli artmıştır. Kalıp sıcaklığı dengelendikten sonra kalıbın yüzey sıcaklığı sabit bir dalgalanma seyri izlemektedir. Soğutma sisteminin ısı çekme kapasitesine göre kalıbın yüzey sıcaklığı her bir çevrim boyunca artmakta ve azalmaktadır [12].

Plastik parçaların kalıplamada malzemenin çekmesi, kalıplama sonundaki parça ölçülerini belirleyen önemli bir parametredir. Soğutma sisteminin plastik parça üzerindeki çekme oranları ve sıcaklık dağılımı üzerindeki etkilerini incelemek için sayısal bir çalışma yapılmıştır. Fiziksel modeli çözümlemek için sonlu hacimler yöntemi kullanılmıştır. Basınç-hacim-sıcaklık denklemleri ile plastik parça üzerindeki çekme oranları belirlenmeye çalışılmıştır. Prizmatik formlu bir plastik parçanın soğutulmasında, ürünün dış kısımlarının büzülme oranının iç kısımlara göre daha fazla olduğu belirlenmiştir. Soğutma kanallarının konumu kalıp ve parça üzerindeki sıcaklık dağılımına önemli ölçüde etki etmektedir. Bu nedenle soğutma sistemi düzgün bir sıcaklık ve çekme dağılımını sağlayacak özellikte olmalıdır [13].

Bükümlü ve köşeli formdaki plastik parçaların kalıplanmasında sıcaklık dağılımı ve çarpılma oranlarının dağılımını incelemek amacıyla sayısal bir çalışma yapılmıştır. Kalıplama esnasında kalıp yarımlarının eşit olarak ısınmadığı için kalıp yarımları üzerindeki sıcaklık dağılımları da farklı olmaktadır. Özellikle köşe bölgelerinin iç tarafındaki ısının

yeteri kadar uzaklaştırılamaması sıcaklığın yükselmesine neden olmaktadır. Soğutma sistemi tasarımı yapılırken, çarpılma miktarlarının azaltılabilmesi için kalıp yarımları arasında sıcaklık farklılıkları tasarımcılar tarafından göz önünde bulundurulmalıdır [14].

Plastik ürün üzerindeki çarpılma miktarlarını azaltmak için yapılan bir başka araştırmada endüstriyel olarak üretilen bir parçanın modeli kullanılarak durum çalışması yapılmıştır. Plastik bir şişe sepeti kalıbı üzerindeki çarpılmaları iyileştirmek için ilave soğutma kanalı kullanımı ve kalıp malzemesinin değiştirilmesi olmak üzere iki farklı yöntem denenmiştir. İlave soğutma kanalları eklenerek yapılan sayısal analiz sonucunda çarpılma miktarının %40 oranında azaldığı görülmüştür. Kalıp yapımında H-13 kalıp çeliği yerine Be-Cu alaşımı kullanımı ile çarpılma miktarı %70 oranında azaltılmıştır [15].

Deneysel çalışmalar:

Soğutma süresinin kısa olması üretim hızının artırılmasında önemli bir role sahiptir. Gaz destekli plastik enjeksiyon kalıplamada soğuma süresinin kısaltılması için deneysel bir çalışma yapılmıştır. Kalıp içerisinde basınç altındaki sıcaklığı yükselen gazın boşaltılarak yerine soğuk havanın basılması esasına dayanan yeni bir yöntem tavsiye edilmiştir. Geliştirilen bu yöntemle yapılan baskı denemelerinde %50 oranında daha verimli bir soğutmanın gerçekleştiği gözlemlenmiştir [16].

Ürün kalitesi ve üretim hızının önemli olduğu bir televizyon panelinin enjeksiyon kalıplama ile üretimi esnasındaki soğutma işlemi sayısal olarak modellenmiş ve elde edilen sonuçlar deneysel veriler ile karşılaştırılmıştır. Kalıp yüzeyinde belirlenen noktaların sıcaklıkları çevrim süresi boyunca ölçülmüştür. Sayısal ve deneysel verilerin büyük oranda örtüşmesi sayısal modelin başarısını yansıtmaktadır [17].

Soğutma sisteminin verimliliğini artırmak için soğutma kanalı iç yüzeyinin yüzey pürüzlülüğü düşürülmeye çalışılmıştır. Deneysel çalışmada demir esaslı metal tozundan katmalı imalat yöntemi ile üretilmiş plastik enjeksiyon kalıbı kullanılmıştır. Hacimce %8 oranında Al_2O_3 tanecikleri karıştırılmış solüsyonun kanal içerisinde 1,4 MPa giriş basıncı ile 1000 s boyunca akması sağlanmıştır. Stabil olmayan toz taneciklerinin ve yüzey pürüzlerinin azaltılmasıyla kanal iç yüzeyi iyileştirilmiştir. Yapılan deneyler sonucunda soğuma kanallarının ısı aktarım kabiliyeti artırılmış ve soğutma süresi %4 oranında

kısalmıştır [18].

Soğutma süresi, ergiyik sıcaklığı ve soğutma sıvısı akış hızının plastik parça üzerindeki çarpılma miktarına etkilerini incelemek için deneysel bir çalışma yapılmıştır. Prizmatik kutu şeklinde bir plastik parça deneme baskıları yapılarak üretilmiş ve ürünler lazer tarayıcı ile taranarak bilgisayar ortamına alınmıştır. Tarama geometrileri ve CAD geometrileri birbiri ile karşılaştırılarak çarpılma miktarları belirlenmeye çalışılmıştır. Soğutma süresinin, çarpılma miktarını düşürmek için en önemli parametre olduğu belirlenmiştir. Ergiyik sıcaklığı daha düşük bir etkiye sahipken soğutma sıvış akış hızının çarpılma üzerindeki etkisi ihmal edilebilir düzeydedir [19].

Tasarım yöntemleri:

Plastik enjeksiyon kalıplarında soğutma sistemi tasarlanırken karmaşık formlu plastik ürün bölümlere ayrılarak ele alınabilir. Bu amaçla plastik ürünün farklı bölümlerini soğutmak için birbirlerinden bağımsız ön tasarımlar yapılabilir. Sonrasında ön tasarımlar birleştirilerek tüm parça için uygun soğutma sistemi elde edilebilir. Böylece parçanın karmaşık geometrisinden kaynaklanan benzer olmayan tüm bölgeleri için daha uyumlu bir soğutma sağlanabilir. Bu strateji ile örnek bir çalışma yapılmış ve elde edilen tasarım sayısal olarak test edilmiştir [20].

Li ve arkadaşları soğutma sisteminin kalıp içerisindeki yerleşiminin otomatik olarak yapılabilmesi için bir tasarım algoritması geliştirmişlerdir. Yapılan çalışmada matkapla delinerek oluşturulacak soğutma kanalları için bir ön tasarım metodu sunulmuştur. Kalıbın grafik modeli kullanılarak olası soğutma kanalı yerleşimleri belirlenmiş ve bu aday kanalların üretilebilirlik ve fonksiyonellik yönünden uygun olanları tespit edilerek kapalı bir soğutma devresi oluşturulmuştur. Yalnızca seri devrelerin tasarlanabiliyor olması ise yöntemin bir sınırlılığı olarak belirtilmiştir [21].

Kalıp içerisindeki diğer kalıp elemanlarının (yolluk, itici vb.) soğutma kanallarının kalıp içerisindeki yerleşiminin belirlenmesinde sınırlılıklara neden olmaktadır. Soğutma kanallarının diğer kalıp elemanlarına müdahale etmeden otomatik olarak tasarlanabilmesi için bir grafiksel tasarım çalışması yapılmıştır. Kalıp plakaları üç eksende 0,15 mm çözünürlükte hücrelere ayrılmış ve soğutma kanallarının olası yerleşim yerleri belirlenmeye

çalışılmıştır. Aday soğutma kanalları fonksiyonellik ve üretilebilirlik yönünden değerlendirilerek elemeye tabi tutulmuştur [22]. Çalışmanın devamında kullanıcının otomatik tasarıma müdahalesine izin veren bir sistem eklenerek yöntemin sınırlılıkları giderilmeye çalışılmıştır [23].

Plastik enjeksiyon kalıplamada giriş yerinin kalıp üzerindeki sıcaklık dağılımına etkisini belirlemek için sayısal bir çalışma yapılmıştır. Durum çalışması için, üzerinde farklı iki cidar kalınlığı bölgeleri bulunan bir plastik parça geometrisi seçilmiştir. Parçanın üç farklı bölümünden girişlerin olacağı kalıp tasarımları sonlu hacimler metodu kullanılarak analiz edilmiştir. Analiz sonuçlarına göre ince cidar kalınlığının bulunduğu bölgeden giriş verildiğinde katılaşma süresinin daha kısa oldu belirtilmiştir. Ayrıca giriş yeri konumunun kalıp üzerindeki sıcaklık dağılımını önemli ölçüde etkilediğinden soğutma sistemi tasarlanırken bu durum tasarımcılar tarafından göz önünde bulundurulmalıdır [24].

Soğutma kanallarının konumu ve kesit profillerinin ergiyik plastiğin katılaşma hızına etkilerini incelemek için sayısal bir çalışma yapılmıştır. Daire, kare ve dikdörtgen kesitlere sahip kanallar ve kalıp boşluğuna farklı uzaklıklara yerleştirilerek analiz edilmiştir. Sonuçlara göre katılaşma hızı dikdörtgen kesitli kanalda en yüksek, daire kesitli kanalda en düşük çıkmıştır. Kanal kesitlerinin kalıp üzerindeki sıcaklık dağılımına önemli bir etkisi olmamıştır. Sıcaklık dağılımını asıl etkileyen faktörün kanalların yerleşim konumları olduğu belirlenmiştir [25, 26].

Plastik enjeksiyon kalıplarında soğutma sisteminin otomatik olarak tasarımı için bir algoritma geliştirilmiştir. Voxeller (üç boyutlu piksel) kullanılarak kalıp geometrisi sayısal ağa dönüştürülmüştür. Her bir voxel hücresine soğutma kanalı için kullanılıp kullanılamayacağı duruma göre değer atanmıştır. Kalıp üzerindeki uygun nokta kümeleri birleştirilerek soğutma devreleri oluşturulmuştur. Soğutma sisteminin tasarımında kalıp malzemesinin termal özelliklerinin yanında plastik parça geometrisinin de tasarım sınırlamaları ortaya çıkardığı ifade edilmiştir [27, 28].

Şekil uyumlu soğutma kanallarının tasarımı için yapılan bir çalışmada karmaşık geometriye sahip plastik parçalara uyumlu, spiral formdaki soğutma kanallarının tasarımı için bir algoritma önerilmiştir. Buna göre soğutulacak kalıp yüzeyi ofsetlenerek kanal eksenlerinin bulunması gereken yüzey elde edilmiştir. Sonrasında soğutma kanallarının birbirine olan

uzaklığını belirleyecek şekil bu yüzeyin eş yükselti elde edilmiştir. Eşyükselti eğrileri üzerindeki birbirine en yakın nokta çiftleri kullanılarak spiral formdaki kanal hatları oluşturulmuştur. Elde edilen yeni kanal tasarımı ile araştırmacıların önceki çalışmalarında voronoi diyagramı kullanarak oluşturdukları kanal tasarımı karşılaştırılmıştır. Moldflow ile yapılan analiz sonuçlarına göre spiral soğutma kanallarının kullanımı soğut etkinliğini artırmış ve soğuma süresi kısalmıştır. Ayrıca spiral kanalın seri bir devre olması kanal içindeki akış kontrolünü kolaylaştırmıştır [29].

Eklemeli imalat tekniklerinin gelişmesi sayesinde üretimi mümkün olan ve plastik enjeksiyon kalıplarında soğutma etkisini iyileştirip düzgün sıcaklık dağılımı sağlayan kanal tasarımları üzerinde çalışılmaktadır. Kendisinde destekli, tekrarlanabilir birim hücrelerden oluşan kafes formunda bir soğutma kanalı tasarımı önerilmiştir. Kafes gözeneklerinin akış girdapları oluşturarak ısı taşınımını iyileştireceği öngörülmüştür. Kafes tasarımının kalıp dayanımını da önemli ölçüde etkilediği belirtilmiştir.

SolidWorks Plastics Advanced yazılım ile yapılan soğutma analizlerin de konvansiyonel ve şekil uyumlu soğutma kanallarının etkinlikleri karşılaştırılmıştır. Önerilen kanal tasarımı sayesinde soğutma süresi %26.34 oranında azalmıştır [30].

Şekil uyumlu kanallar:

Karmaşık formlu plastik parçaların düzgün bir şekilde soğutulabilme olasılıklarının ve avantajlarını ele alan bir çalışmada şekil uyumlu ve konvansiyonel soğutma kanallarının performansları karşılaştırılmıştır. Plastik enjeksiyon kalıplamada dengeli soğutmanın, üretim hızını artırma ve ürün kalitesini artırmada önemli bir etkiye sahip olduğu belirtilmiştir. Özellikle metal tozlarının lazerle sinterlenerek parça üretebilen eklemeli imalat teknolojilerinin şekil uyumlu kanalların üretiminde önemli bir gelişme olduğu vurgulanmıştır. Yapılan örnek bir çalışmada şekil uyumlu soğutma kanalları sayesinde soğutma süresinin %20 oranında kısaldığı belirlenmiştir [31].

Üç boyutlu yazıcı teknolojilerinin gelişmesi, üretim hızı ve parça kalitesinde eşzamanlı iyileştirmelerin elde edilebileceğini göstermiştir. Eklemeli imalat alanındaki gelişmeler sayesinde yüksek performanslı ve karmaşık geometrili soğutma kanalları üretilebilir hale gelmiştir. Böylece kalıp tasarımcıları için üretim kısıtlamaları aşılabilir ve daha işlevsel

tasarımlar yapılabilir. Başarılı tasarımlarda ayrıca soğutma kanalı boyunca; basınç düşüşü, sıcaklık yükselmesi ve kalıp dayanımı gibi hususlar göz önünde bulundurulmalıdır [32].

Şekil uyumlu kanallarla ilgili sayısal çalışmalar:

Farklı tasarıma sahip dört farklı soğutma sisteminin karşılaştırılması için yapılan çalışmada Moldflow ticari yazılımı kullanılmıştır. Konvansiyonel, şekil uyumlu ve konvansiyonel birleşimi, şekil uyumlu ve baffle birleşimi ve şekil uyumlu soğutma kanalları birbirleri ile kıyaslanmıştır. Yapılan simülasyonlarda soğutma süresi, çarpılma miktarı, çökme izi ve çekme miktarı parametreleri karşılaştırılmıştır. Kıyaslama sonuncunda en etkili kanal tipinin şekil uyumlu soğutma kanalı olduğu görülmüştür [33].

Şekil uyumlu ve konvansiyonel soğutma kanallarının etkinlikleri bir simülasyon çalışması ile karşılaştırılmıştır. Bir şarjlı matkap gövdesi için tasarlanan soğutma kanalları Moldex3d ticari yazılımı kullanılarak analiz edilmiştir. Analiz sonuçları deneysel verilerle doğrulanmıştır. Simülasyon analizi yapılan ikinci model ise plastik bir şırınga gövdesidir. 3B yazıcı teknolojisi ile üretilebileceği ön görülen helezonik formdaki soğutma kanalları ile parçanın iç ve dış yüzeyleri düzgün bir sıcaklık dağılımı ile soğutulmaya çalışılmıştır. Su sıcaklığı ve debi değerleri kontrol edilerek kanal tasarımları yeniden revizyon edilmiştir [34].

Yapılan bir başka simülasyon çalışmasında; konvansiyonel, şekil uyumlu seri, şekil uyumlu paralel ve fazladan kanal eklenmiş şekil uyumlu soğutma kanallarının soğutma etkileri incelenmiştir. Simülasyon analizleri Moldflow yazılımı kullanılarak yapılmıştır. Analiz sonucuna göre Şekil uyumlu soğutma kanallarının kullanımı ile soğutma süresi kısalmış, çekme miktarı ve sıcaklık dağılımındaki farklılık azalmıştır. Şekil uyumlu kanallar arasında da sırasıyla fazladan kanal eklenmiş şekil uyumlu, şekil uyumlu paralel ve şekil uyumlu seri kanallar daha uyumlu ve etkin soğutma sağlamışlardır [35].

Şekil uyumlu soğutma kanallarının kesit profillerinin soğutma süresine etkisini belirlemek için bir simülasyon çalışması yapılmıştır. Dairesel, kare, dikdörtgen, eliptik ve yarım daire formundaki kesit profilleri incelenmiştir. Şekil uyumlu soğutma kanalları dişi kalıp içinde 8 mm adımlı helezonik formda tasarlamıştır. Kanalların kalıp boşluğu yüzeyine uzaklığı 4 mm’dir. Silindirik bir kap şeklindeki plastik parça deneme geometrisi olarak belirlenmiştir.

Plastik parça kalınlığı 1,5 mm'dir. Plastik malzeme olarak polipropilen (PP) seçilmiştir. Soğutma analizleri Ansys ile yapılmıştır. Soğutma analizi sonuçlarına göre en kısa soğutma süresi dikdörtgen kesitli soğutma kanalları ile elde edilmiştir [36, 37].

Şekil uyumlu soğutma kanallarının optimizasyonu için Yadegari ve arkadaşları tarafından sayısal bir çalışma yapılmıştır. Medikal bir takımın gövde parçası çalışma geometrisi olarak belirlenmiştir. Doğrusal ve zikzak formdaki şekil uyumlu soğutma kanallarının etkileri karşılaştırılmıştır. Moldflow ile yapılan analiz sonuçları ve analitik çözümler birbirini doğrulamıştır. Şekil uyumlu soğutma kanallarının doğrusal kanallardan daha uzun ve kalıp boşluğuna daha yakın oluşu ısı aktarımını iyileştirdiği belirtilmiştir. Soğutma süresi %50 oranında kısaltılmıştır [4].

2017 yılında yapılan bir simülasyon çalışmasında dört farklı formdaki soğutma kanalının soğutma performansları karşılaştırılmıştır. Konvansiyonel, baffle, şekil uyumlu-baffle birleşimi ve şekil uyumlu kanal tasarımları kâse şeklinde bir plastik parça kalıbının soğutulması için kullanılmıştır. Yapılan analizler sonucunda soğutma süresi ve çarpılma miktarları karşılaştırılmıştır. Moldflow kullanılarak yapılan simülasyon sonucunda en kısa soğutma süresi şekil uyumlu kanallar ile elde edilmiştir. Bunula beraber en yüksek çarpılma miktarı beklenilenin aksine yine şekil uyumlu soğutma kanalı ile ortaya çıkmıştır. Doğrusal kanal ile yapılan deneme sonucunda ise en uzun soğutma süresi ve en düşük çarpılma miktarı değerleri görülmüştür [38].

Şekil uyumlu soğutma kanallarının tasarımı sırasında kullanılan kesit profillerinin soğutma süresi ve ürün kalitesine etkilerini belirlemek için yapılan sayısal çalışmada daire, yarım daire, eliptik ve dikdörtgen kesitler karşılaştırılmıştır. Kanal yüzey alanları ve kanal hacimleri aynı olacak şekilde iki ayrı kesit grubu oluşturulmuştur. Moldflow Insight ile yapılan soğutma analizlerine göre yüzey alanları eşit olan kanalların soğutma etkileri arasında önemli bir fark olmadığı belirlenmiştir. Eşit hacme sahip kanal grubu arasında ise dikdörtgen kesitli şekil uyumlu soğutma kanalı en iyi performansı sağlamıştır. Yapılan çalıma, kanal kesiti formundan ziyade kanal kesitinin sınır uzunluğunun, soğutma verimi soğutma etkinliği üzerinde daha etkili olduğunu göstermiştir [39].

Seçkili lazer ergitme (SLM) ve CNC tezgâhta matkapla delme yöntemleri ile elde edilen soğutma kanallarının soğutma performansları karşılaştırılmıştır. Kanal çapı olarak 2 mm, 3

mm ve 4 mm boyutları seçilmiştir. Soğutma kanallarının iç yüzeylerindeki pürüzlülükler ölçülmüş ve SLM yöntemi ile üretilen kanal içindeki yüzey pürüzlülüğünün delinerek oluşturulan kanalınkinden çok daha büyük olduğu görülmüştür. Soğutma sıvısın debisi, giriş çıkış sıcaklıkları ve soğutma verimleri karşılaştırılmıştır. SLM ile elde edilen kanalın yüzey pürüzlülüğünün yüksek olması nedeniyle kesit daralmış, debi düşmüş ve kanal çapının büyütülmesi gereksinimi ortaya çıkmıştır. Yapılan deneylerle soğutma performansları karşılaştırılmış ve SLM ile üretilen soğutma kanalının soğutma performansının daha zayıf olduğu tespit edilmiştir [40].

Kanal kesitlerinin ve yerleşiminin plastik enjeksiyon kalıplarındaki soğutmaya etkisini incelemek için sayısal bir çalışma yapılmıştır. Daire, kare, elips ve paralel kenar kesitlerinin kullanımıyla elde edilen sonuçlar birbirleri ile karşılaştırılmıştır. Kesit boyutları belirlenirken hidrolik çapların aynı olmasına dikkat edilmiştir. Kalıp boşluğu ile kanal arası mesafe sabit kalacak şekilde kanal hatları uyumlu olarak tasarlanmıştır. Ayrıca daire kesitli doğrusal kanallar da tasarlanmış ve soğutma analizleri yapılmıştır. Analiz sonuçlarına göre şekil uyumlu kanalların kullanımıyla soğuma süresi önemli oranda kısalmıştır. Kesit profillerinin değişimiyle soğutma süresinde olan farlılıklar ise daha hafif kalmıştır. Kesit profilleri arasındaki en etkili olanı kare kesit olmuştur [41].

2019 yılında yapılan bir çalışmada plastik enjeksiyon kalıplama ile üretilen plastik parçalar üzerindeki çarpılmalar parça üzerindeki düzensiz soğuma ve çekme nedeniyle oluştuğu vurgulanmıştır. U şeklindeki bir plastik parçanın soğutulması için şekil uyumlu ve baffle tipinde soğutma kanalları tasarlanarak etkileri sayısal analizlerle karşılaştırılmıştır. Analiz sonuçlarına göre şekil uyumlu soğutma kanallarının kullanımı ile plastik parça üzerindeki çarpılma miktarı %21 oranında azalmıştır. Çarpılma miktarındaki azalmanın sağlanması soğutma verimliliğinin ve homojenliğinin iyileşmesine bağlanmıştır [42].

2018 yılında yapılan bir çalışmada değişken kesitli soğutma kanalları ile sabit kesitli soğutma kanallarının soğutma üzerindeki etkileri karşılaştırılmıştır. Kanal boyunca basınç düşüşünün önlenmesi ve kanal boyunca soğutma suyu sıcaklık dağılımının olumsuz etkilerinin giderilebilmesi için soğutma kanalının kesit çapı kanal boyunca belirli bir oranda büyütülmüştür. Kanal tasarımı yapılırken 1/2, 1/4 ve 1/6 oranları kullanılmıştır. Ayrıca karşıt yönlü akış hatları oluşturularak soğutma suyunun giriş ve çıkış yönleri ters olacak şekilde kanallardaki akış doğrultusu değiştirilmiştir. Yapılan soğuma analizi sonuçlarına göre çıkış

çapının büyümesi ile soğutma kanallarının ısı transfer kabiliyeti artmıştır. Isı transferindeki en iyi gelişmeyi sağlayan küçük çap/ büyük çap oranı 1/4 olarak belirlenmiştir. Kanal boyunca basınç düşüşünün de azaldığı tespit edilmiştir. Sabit çaplı kanal girişindeki basınç 1140 Pa iken 1/2, 1/4 ve 1/6 oranlı değişken çaplı kanal girişlerinde sırasıyla 760 Pa, 735 Pa ve 560 Pa olmuştur. Ayrıca karşıt akışlı soğutma sistemi düzeni ile de kalıp üzerindeki sıcaklık dağılımı iyileştirilmiştir [43].

Kapı kolu şeklinde ve 9 mm cidar kalınlığında olan bir plastik parçanın kalıplanmasında kullanılacak soğutma sisteminin tasarımı ile ilgili sayısal bir çalışma yapılmıştır. Analizler Moldflow ticari yazılımı ile yapılmış plastik malzeme olarak ABS seçilmiştir. Kanal çapı 8 mm, kalıp sıcaklığı 55 °C, soğutma suyu debisi 11.64 l/dk, ergiyik sıcaklığı 230 °C ve çıkarma sıcaklığı 90 °C olarak seçilmiştir. Moldflow ile yapılan soğutma analizlerinde şekil uyumlu ve doğrusal soğutma kanallarının etkileri karşılaştırılmıştır. Şekil uyumlu soğutma kanalları sayesinde soğutma süresi %18,2 oranın da kısalmıştır. 3B yazdırma teknolojileri sayesinde üretilebilen şekil uyumlu soğutma kanallarının kullanımı ile çevrim süresi kısalmış sıcaklık dağılımı daha düzgün hale gelmiştir [44].

Ansys yazılımı kullanılarak şekil uyumlu soğutma kanallarının soğut etkinliği mekanik dayanımı sayısal olarak incelenmiştir. Şekil uyumlu kanalların tasarımında en boy oranları 1,5 mm/2,5 mm değerinde sabit olacak şekilde üç farklı formda kesit profili kullanılmıştır. Soğutma analizlerinde soğutma suyu sıcaklığı 288 °C ile 298 °C arasında değişen altı faklı sıcaklık ve soğutma suyu debisi olarak 1 l ile 10 l arasında değişen altı farklı değer kullanılmıştır. Yapılan analiz sonuçlarına göre şekil uyumlu soğutma kanallarının kullanımı ile doğrusal soğutma kanallarına göre soğutma süreleri %10'dan %51,7' varan oranlarda kısalma sağlanmıştır. Ayrıca sıcaklık dağılımındaki homojenlik iyileşmiştir. Mekanik analiz sonuçlarına göre kalıbın yorulma dayanımı ve maksimum Von Mises gerilmelerinin endüstriyel işletim gereksinimlerini karşılayabilecek seviyede olduğu görülmüştür [45].

Şekil uyumlu kanallarla ilgili deneysel çalışmalar:

Plastik enjeksiyon kalıplamada çevrim süresinin kısalması ve plastik parça kalitesi istenen iki durum olmasına karşın genellikle bu iki hedefin aynı anda gerçekleştirilmesinin pek mümkün olmadığı düşünülmektedir. Soğutma süresini kısaltmaya çalışmak daha yüksel ergiyik sıcaklığı ile çalışmayı gerektirir. Bu durum ise plastik malzemenin daha fazla

çekmesine ve parça üzerinde çarpılmalara neden olur. Kalıbın hızlı ve eş sıcaklık dağılımı ile soğutulması istenen çözüm yoludur. Şekil uyumlu soğutma kanallarının kullanımı her iki hedefin de aynı anda yakalanabilmesini sağlayan bir soğutma yöntemidir.

Düzgün ve hızlı bir soğutmanın sağlanması amacıyla deneysel bir çalışma yapılmıştır [46]. Kalıp çekirdeklerinin arka yüzeyine, kalıp boşluğunun formuna uygun olarak soğutma kanalları işlenmiştir. Kalıp çekirdekleri kalıp plakasına montaj edilirken sızdırmazlığın sağlanması için o-ring kullanılmıştır. Hazırlanan kalıplar ile yapılan deneme baskılarında soğutma sisteminin ısı taşınım performansının iyileştiği görülmüştür. Plastik parça kalınlığı yeteri kadar kalın olmadığı içi plastik parçalar üzerindeki çarpılma miktarları konusunda kıyaslama yapılamamıştır.

Şekil uyumlu ve konvansiyonel soğutma kanallarının soğutma performanslarını karşılaştırmak amacıyla deneysel ve sayısal bir araştırma yapılmıştır. Dairesel plastik kâse formundaki bir plastik parça deneme numunesi olarak seçilmiştir. Dairesel kesitli doğrusal soğutma kanallarının delinerek oluşturulurken ve kare kesitli şekil uyumlu kanalları, kalıp plakaları frezelenerek oluşturulmuştur. Kare kesitli şekil uyumlu soğutma kanallarının kullanımıyla soğutma süresinin %35 oranında kısaldığı belirtilmiştir [47].

Şekil uyumlu soğutma kanallarının üretilebilmesi için kalıp bloğunun katmanlara ayrılıp parçalar üzerinde kanal boşluklarının oluşturulduktan sonra tekrar birleştirilmesi esasına dayalı bir deneysel çalışma yapılmıştır. Şekil uyumlu soğutma kanalını uygun çözünürlükte oluşturabilecek sayıdaki eşit kalınlıkta plakalar yerine plaka sayısının azaltılması için değişken katman kalınlıkları kullanılarak bir optimizasyon çalışması yapılmıştır. Kalıp plakaları lazer ile kesilerek kanal boşlukları oluşturulmuş ve lehimleme ile birleştirilmiştir. Şekil uyumlu soğutma kanallarının faydalarının tespit edilmesi için yapılan baskı denemeleri sonucunda soğuma süresinin %50 oranında azaldığı belirtilmiştir [48].

Bir ekran ön panelinin kare kesite sahip şekil uyumlu soğutma kanalı tasarımı yapılarak kanallar frezeleme yöntemi ile imal edilmiştir. Kalıp plakasının arkasında frezeleme ile oluşturulan kanallar ek bir plaka ile kapatılmıştır. Sızdırmazlık için plakalar arasına o-ring yerleştirilmiştir. Moldflow ile yapılan simülasyonlarda şekil uyumlu ve doğrusal kanalların soğutma süresi ve çarpılma miktarına etkileri incelenmiştir. Simülasyon sonuçları ile deney sonuçları birbiri ile uyuşmaktadır. Baskı denemeleri ile oluşturulan plastik parçaların düz

kenarlarındaki çarpılma miktarları CMM tezgâhında ölçülerek karşılaştırılmıştır. Şekil uyumlu soğutma kanalı bulunana kalıp ile üretilen plastik parçaların kısa kenarındaki çarpılma %14 uzun kenarındaki çarpılma %54 oranında azalmıştır. Önerilen yöntemin kullanımı ile soğutma süresi de %65 oranında kısalmıştır [49].

Şekil uyumlu soğutma kanallarının plastik enjeksiyon kalıplarındaki soğutma performansını incelemek için sayısal ve deneysel bir araştırma yapılmıştır. Şekil uyumlu soğutma kanalları tasarımcının tecrübesine göre oluşturulmuştur. Soğutma performansının belirlenebilmesi için çevrim süresi ve çarpılma miktarı değerlendirme kriterleri olarak göz önüne alınmıştır. Ergiyik sıcaklığı, dolum süresi, ütüleme basıncı ve süresi, soğutma sıcaklığı ve süresi tasarım parametreleri olarak belirlenmiştir. Soğutma performansı konvansiyonel soğutma sistemine göre önemli ölçüde iyileştirilmiştir. Yapılan sayısal analiz sonuçlarına göre tasarlanan soğutma sistemi, eklemeli imalat yöntemi ile üretilmiştir. Sayısal ve deneysel sonuçlara göre şekil uyumlu soğutma kanallarının çevrim süresini ve çarpılmayı düşürmede oldukça etkili olduğu görülmüştür. Soğutma süresi %53, çarpılma miktarı %46 oranında azalmıştır [50]. Çalışmanın devamında çok amaçlı optimizasyon tekniği uygulanarak soğutma süresi, çarpılma miktarı ve kalıplama kuvvetinin düşürülmesi amaçlanmıştır. Proses parametrelerinin düzenlenmesi ile belirtilen alanlarda önemli iyileşmeler sağlanmıştır [51].

2018 yılında yapılan bir deneysel çalışmada şekil uyumlu soğutma kanalları bulunan kalıp çekirdekleri üretilirken bakır malzemeden üretilmiş ek parçalar kalıp bloğu içerisine gömülmüştür. Bunun için lazer sinterleme yöntemi ile üretim yapılırken üretim durdurulmuş ve bakır parçaların gömüleceği bölgedeki tozlar temizlenmiştir. Bakır parçalar 3B yazdırma yöntemi ile üretilen kalıp çekirdeğinin içine gömüldükten sonra katmanlı üretim işlemi devam ettirilerek kalıp çekirdeğinin üretimi tamamlanmıştır. Ek parça ile kalıp bloğunun boşluksuz olarak birleşmesi için lehimleme işlemi yapılmıştır. Tomografi ile elde edilen kesit görüntülerinde ve mikroskop incelemelerinde ara yüzeyler arasında hava boşluğu kalıp kalmadığı kontrol edilmiş ve lehim malzemesinin yüzeyleri iyice ıslatması ile boşluksuz birleşmenin sağlandığı gözlemlenmiştir. Bakır parçaların gömüleceği yerlerin belirlenmesi için Moldflow ile ön analizler yapılmıştır. Analiz sonuçlarına göre şekil uyumlu soğutma kanalları ile kalıp boşluğu arasındaki bölgelerin ısıl iletkenliği yüksek olan saf bakır parçaların yerleştirilmesi için uygun olduğu belirlemiştir [52].

Park ve arkadaşları tarafından yapılan deneysel çalışmada şekil uyumlu ve baffle soğutma kanallarının etkinlikleri karşılaştırılmıştır. CAD ortamında oluşturulan modeller ile yapılan soğutma analizlerinde şekil uyumlu ve doğrusal-baffle soğutma kanalları ile elde edilen sonuçlar kıyaslanmıştır. Kanal tasarımı tasarımcının tecrübesine göre yapılmıştır. Buna göre şekil uyumlu soğutma kanalları sayesinde soğutma süresi %56,4 oranın kısalmıştır. Ayrıca kalıp üzerindeki sıcaklık dağılımını da daha düzgün olduğu belirtilmiştir. Karmaşık formlu bir plastik parça için şekil uyumlu soğutma kanallarının bulunduğu kalıp çekirdeği 3B metal yazdırma yöntemi ile üretilmiştir. Sonrasında yüzeyleri işlenerek parlatılmıştır. Yapılan baskı denemelerinde ölçülen soğutma süresi ile sayısal analizlerde hesaplanan soğutma sürelerinin oldukça yakın olduğu görülmüştür. Ayrıca 3B yazdırma maliyetlerinin çok yüksek olması yöntemin fayda maliyet yönü ile değerlendirilmesi gerektiği de vurgulanmaktadır [53].

11 mm cidar kalınlığına sahip bir otomobil yağ filtresi haznesinin kalıplanması için tasarlanan üç farklı soğutma sitemi sayısal ve deneysel olarak karşılaştırılmıştır. Birinci kanal tasarımı doğrusal kanallardan, ikinci kanal tasarımı ise şekil uyum tek bir kanaldan oluşmaktadır. Üçüncü tip tasarımda ise biyobenzetim yapılarak kan damarı formunda soğutma kanalları oluşturulmuştur. Akış ana arter ile başlamış sonrasında dallanmış ve küçük çaplı kılcal kanallara ayrılmıştır. Soğutma verimliliğinin iyileştirilmesi için ayrıca bakır alaşımlı kalıp insertleri de kullanılmıştır. 3B yazdırma teknolojileri ile üretilen kalıp insertleri kalıp içerisine yerleştirilmiştir. Üretilen kalıp ile yapılan baskı denemelerinde kalıp yüzeyi sıcaklıklarını ölçmek için termal kamere kullanılmıştır. Termal kamera ile elde edilen sıcaklık dağılımlarının sayısal analizle elde edilen sıcaklık dağılımı ile uyumlu olduğu belirtilmiştir. Beklendiği gibi kan damarı formundaki soğutma kanalları soğutma süresini kısaltırken sıcaklık dağılımı da daha iyi düzenlemiştir [54].

Alternatif üretim yönteminin araştırıldığı bir çalışmada plastik enjeksiyon kalıplarında soğutma sisteminin verimliliğinin artırılması için şekil uyumlu soğutma kanallarının etkisi incelenmiştir. Örnek uygulama için karmaşık geometrili bir plastik parça belirlenmiştir. Plastik enjeksiyon kalıbının soğutulması için düz ve şekil uyumlu spiral soğutma kanalları tasarlanmıştır. Kanal tasarımında soğutma kanallarının birbirlerine ve kalıp boşluğuna olan uzaklıkları bir tasarım algoritması ile kontrol edilmiştir. Şekil uyumlu soğutma kanalları bulunan kalıp çekirdekleri öncelikle plakalar halinde üretilmiştir. Üretilen plakalar vakumlu sert lehimleme yöntemi ile birleştirilmiştir. Tasarlanan soğutma kanallarının etkisini

incelemek için üretilen kalıp ile deneme baskıları yapılmıştır. Yapılan deneylerde soğutma süresinin değişimi ve plastik parça üzerindeki sıcaklık dağılımı gözlemlenmiştir. Düz soğutma kanalı ile yapılan soğutmaya göre şekil uyumlu soğutma kanallarının kullanımıyla soğutma süresi kısalmıştır. Şekil uyumlu soğutma kanalları ile yapılan denemelerde toplam çevrim süresi kısalmış ve üretim hızı artırılmıştır [55].

2019 yılında yapılan bir çalışmada plastik bir gruplama tepsisinin plastik enjeksiyon kalıplama sürecindeki soğutma işlemi incelenmiştir. Öncelikle kalıp için doğrusal soğutma kanalları üretilmiştir. Sonra aynı kalıp için şekil uyumlu soğutma kanalları tasarlanarak SLM yöntemi ile üretilmiştir. Yapılan baskı denemelerinde üretilen parçaların boyutları ölçülerek çarpılma miktarları belirlenmiştir. Denemelerde polipropilen ve yüksek yoğunluklu polietilen olmak üzere iki farklı malzeme kullanılmıştır. Her iki malzeme ile yapılan üretimlerde de plastik parça üzerindeki çarpılma miktarları azalmıştır. Şekil uyumlu soğutma kanalı kullanımı ile yüksek yoğunluklu polietilen ile üretilen parçadaki çarpılma miktarı 1,01 mm'den 0,32 mm'ye; polipropilen ile üretin parçadaki çarpılma miktarı 1,00 mm'den 0,11 mm'ye düşmüştür. Ayrıca şekil uyumlu soğutma kanallarının kullanımı başlangıç kayıplarını da düşürmüştür. Şekil uyumlu soğuma kanalı ile 5 baskı sonrasında kalıp sıcaklığı dengeye ulaşırken doğrusal kanalda 20 adet baskıya ihtiyaç duyulmuştur [56].

Şekil uyumlu kanallar için önerilen tasarım yöntemleri:

Şekil uyumlu soğutma kanallarının otomatik olarak tasarlanabilmesi için frezelenmiş oluk metodu önerilmiştir [57]. Sunulan yöntemle bir ütünün ana gövdesinin kalıplanması için şekil uyumlu soğutma kanalları tasarlanmıştır. Kalıp plakasının arka yüzeyinde kalıp boşluğuna uyumlu kanallar oluşturulmuştur. Sonrasın uygun bir ek parça ile plakanın arkası kapatılmıştır. Tasarlanan şekil uyumlu soğutma kanalları ve doğrusal soğutma kanalları sayısal analiz yapılarak karşılaştırılmıştır. Analiz sonuçlarına göre; tasarlanan şekil uyumlu soğutma kanalları, soğutma verimliliği ve plastik parça üzerindeki kalıntı gerilmelerde önemli derecede iyileşme sağlamıştır. 2011 yılında benzer bir çalışma Dang ve arkadaşı tarafından yapılmıştır [58]. Bir otomobil parçası seçilerek yapılan çalışmada kalıp boşluğu profiline uyumlu olarak kalıp plakasının arkasına frezeleme ile oluşturulabilecek u şekilde ki oluklar ve ek parçalardan oluşan şekil uyumlu soğutma kanalı tasarlanmıştır. Simülasyon sonuçlarında soğutma sisteminin etkinliği ve sıcaklık dengesinin iyileştiği belirlenmiştir.
Plastik enjeksiyon kalıplamada soğutma süresi ile birlikte çevrim süresinin de

kısaltılabilmesi için şekil uyumlu soğutma kanallarının kullanıldığı sayısal bir çalışma yapılmıştır. Seçilen plastik parça geometrisi için öncelikle giriş yeri analizi yapılarak en uygun giriş yeri tespit edilmiştir. Sonrasında şekil uyumlu soğutma kanallarının konumunu belirlemek için bir ön soğutma analizi yapılmıştır. Ön analiz sonuçlarına göre şekil uyumlu soğutma kanalları bulunan kalıbın CAD tasarımı yapılmıştır. Çalışmanın devamında şekil uyumlu soğutma kanallarının kullanımında, kalıp dayanımının da araştırılması gerektiği ifade edilmiştir [3].

Plastik enjeksiyon kalıplamada düzgün ve dengeli bir soğuma sağlayacak şekil uyumlu soğutma kanallarının otomatik tasarlanabilmesi için bir tasarım algoritması geliştirilmiştir. 3 mm kalınlığa sahip bir otomobil parçası için soğutma kanalları oluşturulmuştur. Kalıbın dolum safhasından sonra oluşan sıcaklık dağılımına göre soğutulacak kalıp yüzeyi alt bölgelere ayrılmıştır. Kalıp yüzeyine uyumlu olarak oluşturulan soğutma kanalları birleştirilmiştir. Kanal çapı, kanallar arası ve kalıp kanal arası mesafe değerlerine göre bir optimizasyon işlemi yapılmıştır. Elde edilen tasarım ile deneme analizleri yapılmıştır. Sonuçlara göre çevrim süresi kısalmış ve sıcaklık dağılımı iyileştirilmiştir. Bu sayede üretim verimliliği ve parça kalitesi artmıştır [59].

Plastik enjeksiyon kalıplarında soğutma verimliliğini artırmak ve kalıp maliyetlerini düşürmek amacıyla kalıpların bir dizi akış saptırıcı ile soğutulması üzerinde bir tasarım çalışması yapılmıştır. Kalıp plakasının arka yüzeyine, derinlikleri kalıp boşluğuna uyumlu olacak şekilde delikler delinmiş ve deliklere de akış saptırıcılar yerleştirilmiştir. Bu sayede kalıp üzerinde düzgün bir sıcaklık dağılımı elde edilmeye çalışılmıştır. Delik derinliklerinin, çaplarının ve aralıklarının belirlenmesi için enjeksiyon parametreleri, parça cidar kalınlığı ve kalıp malzemesine göre belirlenmesini sağlayan bir model geliştirilmiştir.

Plastik bir otomobil parçası için önerilen yöntem kullanılarak şekil uyumlu soğutma kanalları tasarlanmış ve sayısal olarak analiz dilmiştir. Sonuçlara göre soğuma süresi azalırken soğutma sisteminin verimliliği ve sıcaklık dağılımındaki denge iyileşmiştir. Önerilen yöntem, eklemeli imalat yöntemlerine göre kalıp maliyetlerini önemli ölçüde düşürmesine karşın soğutma sıvısında ki basınç kayıpları nedeniyle daha yüksek pompalama kaynağına gereksinim duyulmaktadır [60].

Şekil uyumlu soğutma kanallarının otomatik olarak tasarlanabilmesi için bir algoritma

geliştirilmiştir. Bu amaçla soğutulacak kalıp yüzeyi ofsetlenmiş ve bu ofset yüzeyinde "Merkezi Voronoi Diyagramı" ile akış hatları oluşturulmuştur. Bu yöntemin sağladığı katkı soğutma kanallarının parça geometrisine göre uyumlu olması ve tasarımın otomatik olarak gerçekleştirilebilmesidir. Tasarlanan soğutma kanallarının 3B yazıcı teknolojileri ile üretileceği ön görülmüştür. Moldflow ticari yazılımı kullanılarak yapılan analiz sonuçlarına göre tasarlanan şekil uyumlu soğutma kanalları doğrusal soğutma kanallarına göre daha eş dağılımlı bir soğutma sağlarken soğutma süresi de kısalmıştır. Önerilen yöntemde çok sayıda paralel akış hattının olması akış hızının tüm bölgelerde farklı olmasına neden olmaktadır [61].

Hızlı prototipleme teknolojileri sayesinde daireden farklı kesitlere sahip şekil uyumlu soğutma kanallarının üretimi mümkündür. Kanal kesitlerinin soğutma verimine etkisini incelemek için yapılan çalışmada daire ve yarım daire kesitli iki şekil uyumlu soğutma kanalının termal analizleri yapılmıştır. Ansys yazılımı kullanılarak kararlı ısı transferi analizi yapılmıştır. Analiz sonuçlarına göre ısı transferi oranı %14,6 oranında artırılmış ve sıcaklık dağılımı iyileştirilmiştir [62].

Plastik enjeksiyon kalıplarında düzgün sıcaklık dağılımının sağlanabilmesi için önerilen bir diğer yöntem de kalıp içerisinde soğutma sıvısının dolaşacağı gözenekli bir yapı oluşturmaktır. Bu yöntemin uygulandığı bir çalışmada kalıp bloğu kübik hücrelere bölünmüş ve soğutulması gereken bölgelerdeki hücreler tespit edilmiştir. Soğutma bölgesindeki hücreler birbirine bağlı açık gözeneklere dönüştürülerek soğutma sıvının dolaşacağı çok bağlantılı bir kanal elde edilmiştir. Tasarlanan soğutma sisteminin performansının belirlenmesi için bir soğutma simülasyonu yapılmıştır. Analiz sonucuna göre sıcaklık dağılımının iyileştiği ifade edilmiştir [63].

Şekil uyumlu soğutma kanallarının otomatik tasarımı için görünürlük tekniğinin kullanıldığı bir tasarım metodu önerilmiştir. Kalıp yüzeyleri öncelikle alt bölgelere ayrılmış sonrasında bu alt bölgelerini doğrudan gören noktalar belirlenmiştir. Belirlenen noktalardan bir akış hattı geçirilerek soğutma kanalı oluşturulmuştur. Oluşturulan soğutma kanalı düzlemseldir ve kalıp boşluğunu bulunduğu düzlemde takip etmektedir [64].

Plastik enjeksiyon kalıplamada kalıp yüzeylerinin düzgün bir şekilde soğutulması ve üretim hızının artırılabilmesi için biçimsel bir tasarım metodu önerilmiştir [65]. Buna göre parçanın

iç ve dış yüzeylerinin sabit bir sıcaklık dağılımında olduğu kabul edildiği durumda kalıbın ısı biriken belli bölgelerindeki eş sıcaklık eğrileri kullanılarak öncül yüzeyler elde edilmiştir. Sonra bu yüzeyler soğutma kanallarına dönüştürülmüştür. Elde edilen soğutma kanallarının yüzeylerinden eşit akıda ısı transfer edilmesi durumunda kalıp boşluğu yüzeylerinde eş bir dağılım elde edileceği var sayılmaktadır. Bu çalışma şekil uyumlu soğutma kanallarının tasarımı için biçimsel temele dayanan bir yöntem sunmakla beraber kalıp dayanımının test edilmesi gerekmektedir. Çalışmanın devamında öneril en yöntem ile tasarlanan şekil uyumlu soğutma kanallarına sahip kalıp çekirdekleri lazer sinterleme yöntemi ile üretilmiştir. Konvansiyonel ve şekil uyumlu soğutma kanallarının plastik parça üzerindeki çarpılma miktarına etkileri deneysel olarak incelenmiştir. Kutu şeklindeki plastik bir parça üretilerek düz kenarlarındaki çarpılma değerleri ölçülerek karşılaştırılmıştır. MCOOL adıyla anılan biçimsel tasarım metodu ile tasarlanan soğutma kanalları sayesin çarpılma miktarı kısa kenarda %11, uzun kenarda %19 oranında azalmıştır [66].

Plastik enjeksiyon kalıplamada soğutma esnasında kanal içerisinde dolaşan su kalıba girişinden itibaren çıkana kadar sürekli ısınır. Bu durum suyun giriş ve çıkış sıcaklıklarının farklı olmasına neden olur. Soğutma suyu kalıba ilk girdiği bölgelerde daha iyi ısı emme kabiliyetine sahipken kanal çıkışına doğru bu etki azalır. Bu düzensizlik nedeni ile plastik parça üzerindeki farklı çekmeler oluşu plastik parça çarpılır. Bu durumun önüne geçmek için yapılan bir çalışmada genellikle sabit olarak tasarlanan şekil uyumlu soğutma kanalı ile kalıp boşluğu arasındaki mesafeyi değişken olarak yeniden düzenleyen bir metot geliştirilmiştir. Soğutma suyundaki sıcaklık değişiminin soğutmaya olan olumsuz etkisini telafi edecek şekilde soğutma kanalları kalıp boşluğuna yaklaştırılmıştır. Tasarlanan yeni kanal ile yapılan simülasyon sonuçlarına göre sıcaklık dağılımı iyileşirken çevrim süresi de kısalmıştır [67].

Jahan ve arkadaşlarının 2016 yılında yaptıkları bir optimizasyon çalışmasında; kalıp malzemesinin mikro yapısı, kanal kesiti, kanal çapı, kanallar arası mesafe ve kalıp-kanal arası mesafe parametrelerinin soğutma üzerindeki etkileri incelenmiştir. Kalıp malzemesinin gözenekli halde üretilerek 3B yazdırma maliyetleri düşürülmeye çalışılmıştır. Model tasarımları için Creo, zamana bağlı soğutma analizleri için Ansys kullanılmıştır. Deneme geometrisi olarak silindirik bir kap formundaki plastik bir parça modeli seçilmiştir. Şekil uyumlu soğutma kanalları dişi ve erkek kalıp yarımları için helezonik şekilde tasarlanmıştır. Kanal kesiti olarak; 4-6-7 mm olan daire ve aynı kesit alanına sahip dikdörtgenler kullanılmıştır. Bağıl gözeneklilik oranları olarak 0,2593 ile 1 aralığında değişen dokuz farklı

değer seçilmiştir. Yapılan soğutma analizleri ile 6,5×4,3 mm'lik dikdörtgen kesit, kanallar arası mesafe 8 mm, kalıp kanal arası mesafe 7 mm ve %50-59 gözeneklilik oranı en optimum soğutmayı sağlayan değerler olduğu belirlenmiştir [68].

Yapılan bir başka çalışmada, plastik enjeksiyon kalıplama sürecinin en kritik safhalarından olan soğutma işleminin etkinliğini artırmak için gerçekleştirilmiştir. Üretim kalitesini artırmak ve üretim süresini kısaltmak amacıyla şekil uyumlu soğutma kanalı tasarımı için pratik bir yöntem sunulmaktadır. Kalıp yüzeyi ofsetlenerek uyumlu bir yüzey oluşturulmuştur. Bu yüzey sınırlarının yüzey üzerinde ofsetlenmesiyle elde edilen hatlar birleştirilerek soğutma kanalarına dönüştürülmüştür. Karmaşık geometriye sahip plastik parçalar için kanallar arası mesafe ve kalıp kanal arası mesafelerin düzgün olarak korunduğu bir algoritma geliştirilmiştir. Kullanıcı tecrübesinden etkilenmeyen sistematik bir yaklaşım önerilmiştir. Yapılan sayısal analizlerle soğutma kanallarının soğutma performansı sınanmıştır. Şekil uyumlu soğutma kanallarının soğutma etkinliğini artırarak çevrim süresini kısalttığı gözlemlenmiştir [69].

Bir grup araştırmacının 2017 yılında yaptıkları çalışmada ısıl-mekanik açıdan en uygun şekil uyumlu soğutma kanallarının tasarımını belirlemeye çalışmışlardır. Kanal çapı, kanallar arası mesafe, kanal- kalıp yüzeyi arası mesafe, kalıp üzerindeki sıcaklık dağılımı ve kalıp üzerinde oluşan gerime parametreleri kullanılarak soğutma sistemi tasarımı optimize edilmeye çalışılmıştır. Kalıbın 3B yazıcı ile üretileceği öngörülmüş ve kalıp malzemesi olarak PH1 paslanmaz çelik tozu seçilmiştir. Kalıp malzemesi ile aynı malzemeden üretilen mekanik test örnekleri ile yapılan mekanik testlerden elde edilen dayanım değerleri Ansys yazılımı ile yapılan mekanik analizlerde kullanılmıştır. Katı malzemenin ısıl iletkenliği 60,5 W/m-K iken 3B yazıcı ile üretilen kalıp malzemesinin ısıl iletkenlik değeri 13,8 W/m-K değerine düşmüştür. Deney tasarımı yapılarak ısıl-mekanik analizler gerçekleştirilmiştir. Analiz sonuçlarına göre en optimum değerler; kanal çapı 4 mm, kanallar arası mesafe 12 mm, kanal kalıp arası mesafe 6 mm olarak belirlenmiştir [70].

Plastik parça üzerindeki çarpılma miktarının şekil uyumlu soğutma kanalları ile azaltılması için yapılan optimizasyon çalışmasında "Tepki yüzeyi metodolojisi" ve "Glowworm Sürü Optimizasyonu" teknikleri kullanılmıştır. Soğutma süresi, soğutma suyu sıcaklığı, ergiyik sıcaklığı ve ütüleme basıncı parametreleri değişken olarak kullanılmış ve bu parametrelere göre çarpılma miktarını tahmin etmek için bir model geliştirmişlerdir. Geliştirile modele

göre çarpılma oluşumundaki en etkili parametrenin soğutma süresi olduğu belirlenmiştir. İkinci ve üçüncü en etkili parametreler sırasıyla soğutma suyu sıcaklığı ve ergiyik sıcaklığı olduğu görülmüştür. En optimum parametrelerin seçilmesi durumunda çarpılma miktarı %38,7 oranında azalmaktadır [71].

Şekil uyumlu soğutma kanallarının otomatik olarak oluşturulabilmesi için geliştirilen bir tasarım algoritmasında öncelikle doğrusal soğutma kanallarının soğutma etkinliğini kaybettiği bölgeler tespit edilmiştir. Sonrasında baffle soğutma kanalları için bir derinlik haritası oluşturulmuştur. Baffle soğutma kanalı matrisleri soğutma etkinliğinin düştüğü plastik parçaların sadece iç bükey bölgeleri için eklenmiştir. Elde edilen soğutma kanallarının geliştirilen farklı bir optimizasyon algoritması ile optimize edilmesi için kanal çapı, kanalları arası mesafe ve kanal kalıp yüzeyi arası mesafe değerlerinin soğutma verimine etkileri düzenlenmeye çalışılmıştır. Kanal tasarımı yönteminin kalp içerisindeki yolluk ve çıkarma sistemi gibi diğer unsurlarla uyumlu olduğu belirtilmiştir. Yapılan durum çalışmaları ile dört farklık geometrideki plastik parçalar için uyumlu soğutma kanalları tasarlanarak soğuma analizleri yapılmış ve yöntemi güvenilirliği test edilmiştir [72].

Şekil uyumlu soğutma kanallarının tasarımı için termal-akış topolojik optimizasyon algoritması geliştirilmiştir. Bu yöntemde kanallarının nereye konumlandırılacağı problemi, malzeme dağılım problemine dönüştürülmüştür. Kalıp içerisindeki dolu bölgeler seçilirken soğutma suyunun akış direnci, ısı iletimi ve ısı taşınımı parametreleri göz önüne alınmıştır. Algoritma ilkin iki boyutlu olarak oluşturulmuş sonra üç boyuta uyarlanmıştır. Algoritma oluşturulurken navier stokes, konveksiyon ve difüzyon denklemleri kullanılmıştır. Algoritma ile elde edilen morfolojik yüzey, soğutma kanalı olarak modellenmiş ve simülasyon yapılarak denenmiştir [73].

İnce uzun formdaki kalıp çekirdekleri ya da maçaların soğutma kanallarının tasarımı için bir yöntem sunulmuştur. Büyük çaplı bir kanal yerine çevresinde geri dönüş kanallarının bulunduğu, şemsiye mimarisindeki daha ince bir kanal grubu tasarlanmıştır. Merkezdeki kanalın çapı, çevredeki kanaların çapı ve sayısı, birleşme açıları ile ilgili fizik modeli tanımlayan bir bağıntı oluşturulmuştur [74].

Marin ve arkadaşları; baffle, helis ve akış bölücülerin olduğu şekil uyumlu soğutma kanallarının soğutma verimlerinin karşılaştırıldığı bir çalışma yapmışlardır. Örnek olarak

plastik bir otomobil parçası seçilmiştir. Şekil uyumlu soğutma kanallarının tasarımında genellikle akış kontrolünün zorluğu nedeniyle paralel kanal tasarımından kaçınılsa da bu çalışma özellikle paralel akışlı kanallar üzerinde durulmuştur. Baffle, helis ve şekil uyumlu kanalların kendi aralarında seri ve paralel bağlı olduğu kanal tasarımları ayrı ayrı karşılaştırılmıştır. Literatürdekinin aksine paralel soğutma kanallarının uygun kullanımı ile kalıbın kritik bölgelerin soğumayı iyileştirebileceği ve homojen bir sıcaklık dağılımının elde edilebileceği görülmüştür. Şekil uyumlu soğutma kanalları baffle soğutma kanalına göre önemli bir performans farkı göstermemiştir. Bu nedenle eklemeli imalat yöntemiyle şekil uyumlu soğutma kanallarının üretimi pahalı olduğu için yalnızca delik delmenin uygun olmayacağı durumlarda tercih edilmelidir. Önerilen yöntemle tasarlanmış soğutma kanallarının sadece eklemeli imalat yöntemi ile üretilebileceği öngörülmüştür [75].

Plastik enjeksiyon kalıplarında şekil uyumlu soğutma kanallarının tasarımı için bir topolojik optimizasyon yöntemi önerilmiştir. Kalıp boşluğu yüzeyini çepeçevre saran ağ formunda bir soğutma sistemi tasarlanmıştır. Optimizasyon işleminde ağ yapısı, kanal çapı ve kanal konumu parametreleri değerlendirilmiştir. Optimizasyon işleminden sonra kanal ağındaki gereksiz hatlar silinmiş ve kanallardaki keski dönüşler yumuşatılmıştır. Temsili olarak belirlenen iki ayrı geometri için denem analizleri yapılmıştır. Geliştirilen yöntem ile doğrusal ve baffle kanallar karşılaştırılmıştır. Analiz sonuçlarına göre topolojik optimizasyon algoritması ile tasarlanan şekil uyumlu soğutma kanalları soğutma verimliliğini ve ısıl homojenliği iyileştirmiştir [76].

Yapılan diğer bir çalışmada plastik enjeksiyon kalıplarının soğutma verimini artırmak için şekil uyumlu soğutma kanallarının etkisi araştırılmıştır. Sayısal analiz için karmaşık geometriye sahip bir plastik parça belirlenmiştir. Plastik enjeksiyon kalıbının soğutulması için düz, spiral ve zikzak formlu soğutma kanalları tasarlanmıştır. Kanal tasarımında soğutma kanallarının birbirine ve kalıp boşluğuna olan mesafeleri bir tasarım algoritması ile kontrol edilmektedir. Tasarlanan soğutma kanallarının etkisini incelemek için sayısal analiz yapılmıştır. Sayısal analizde, soğuma süresindeki değişim ve plastik kısımdaki sıcaklık dağılımı gözlemlenmiştir. Düz soğutma kanalı ile soğutmaya göre uyumlu soğutma kanalları kullanılarak soğutma süresi kısalmıştır. Şekil uyumlu soğutma kanalları ile yapılan analiz sonucunda daha homojen bir sıcaklık dağılımı elde edilmiştir. Spiral soğutma kanalı ile yapılan soğutma işleminin, zikzak soğutma kanalı ile yapılan soğutmaya göre daha kısa sürdüğü görülmüştür [77].

Plastik enjeksiyon kalıpların dış bükey kalıp yüzeylerinin ve maçaların düzgün soğutulabilmesi için kafes formunda soğutma kanalları tasarlanmıştır. Giriş hatları çıkış hattını çevrelemekte ve birleşerek eliptik bir eğri ile çıkış hattına bağlanmaktadır. Bu hücresel tasarım tekrarlanarak soğutulmak istenen bölge boyunca yayılmıştır. Kafes yapısının kalıp dayanımı nasıl etkilediğini tespit etmek için mekanik yük analizi yapılmıştır. Oluşan azami gerilmenin akma dayanımının altında olduğu belirlenmiştir. Önerilen yöntem ile dört farklı plastik parça geometrisi için soğutma kanalları tasarlanmıştır. Kafes formundaki soğutma kanalları plastik parçaların iç bükey bölgelerinin soğutulması için sadece kalıbın erkek yarımında oluşturulmuştur. Kalıbın diğer yarımı ise doğrusal soğutma kanalları ile soğutulmuştur. Yapılan soğutma analizleri sonunda kafes formunda kanalların kullanımı ile sadece doğrusal kanallarla yapılan soğutmaya göre daha etkin soğutma ve düzgün sıcaklık dağılımı elde edilmiştir [78].

Şekil uyumlu soğutma kanallarının üretimi için yapılan çalışmalar:

Şekil uyumlu soğutma kanallarına sahip bir kalıbın üretilebilmesi için yapılan deneysel bir çalışmada yeni bir yöntem denenmiştir. Soğutma kanalı alüminyum borudan bükülerek elde edilmiş ve boşaltılmış kalıp plakası içerisine yerleştirilmiştir. Sabitlenen soğutma kanalı ve kalıp plakası arasındaki boşluk alüminyum tozu katkılı reçine ile doldurulmuş ve sertleştirilmiştir. Yumuşak hızlı kalıplama adı verilen bu yöntem ile hazırlanan kalıp ile baskı denemeleri yapılmıştır. Üretilen kalıp ile 1250 adet parça sorunsuz olarak üretilmiş, çevrim süresi 35 s'den 70 s'ye çıkmıştır [79].

Fan biçimindeki örnek bir plastik parça için şekil uyumlu soğutma kanallarına sahip bir plastik enjeksiyon kalıbı üretilerek deneysel bir çalışma yapılmıştır. Fanın her bir kanadı için geometriye uyumlu dörder adet soğutma kanalı tasarlanmıştır. Ayrıca sayısal bir analiz ile kıyaslama yapmak için doğrusal soğutma kanalları da tasarlanmıştır. Şekil uyumlu soğutma kanallarına sahip kalıp çekirdekleri, lazer destekli doğrudan takım üretme tekniği ile üretilmiştir. Bu yöntemde P21 kalıp çeliği tozları lazer ile ergitilip katmanlar halinde birleştirilerek kalıp çekirdekleri elde edilmiştir. Sonrasında kalıp yüzey kalitesinin iyileştirilmesi için frezeleme, EDM ve lepleme yöntemleri kullanılmıştır. Üretilen kalıp ile yapılan baskı denemeleri sonucunda soğutma süresi 13 s sürmüştür. Doğrusal ve şekil uyumlu kanalların karşılaştırıldığı analiz sonuçlarına göre soğutma süresi %35 oranında kısalmış ve çarpılma miktarında da kayda değer bir iyileşme olduğu belirlenmiştir [80].

2015 yılında yapılan bir çalışmada şekil uyumlu soğutma kanallarını üretmek için mig-mag kaynak tekniği ile metal biriktirme yöntemi denenmiştir [81]. Yapılan deneysel çalışmada iç lüle ve akış saptırıcılı formlara sahip iki farklı soğutma sistemi üretilip soğutma etkinlikleri karşılaştırılmıştır. Yapılan baskı denemelerinde iç lüle formundaki şekil uyumlu soğutma kanalına sahip kalıp daha kısa sürede ve daha dengeli soğutulmuştur.

Eklemeli imalat teknolojilerindeki gelişmeler sayesinde karmaşık formadaki soğutma kanallarının üretimi mümkün olmakta ve kalıp tasarımcıları için sınırlılıklar ortadan kalkmaktadır. Bunula beraber 3B yazıcıların üretim maliyetlerinin yüksek oluşu, üretim hızının düşük oluşu, elde edilen malzemenin dayanım ve ısıl iletkenliğindeki düşüklüğü hala aşılması geren problemler arasındadır. Şekil uyumlu kanallara sahip kalıpları eklemeli imalat yöntemi ile üretilirken en uygun mikro yapının elde edilmesi ile ilgili bir optimizasyon çalışması yapılmıştır. Mikro yapıdaki malzeme hücresinin doluluk oranının kalıp üzerindeki sıcaklık dağılımı, çevrim süresi, kalıp ağırlığı ve üretim hızı üzerindeki etkisi belirlenmeye çalışılmıştır. Bunun için iki boyutlu ısıl-mekanik topoloji optimizasyon algoritması geliştirilmiştir [82].

Plastik enjeksiyon kalıpları kullanım ömürleri nedeniyle genellikle çelik malzemelerden üretilirler. Düşük hacimli üretim için uygunluğu, hızlı üretilebilmesi gibi avantajları nedeniyle epoksi reçine malzemelerden de kalıp imalatı yapılmaktadır. 2016 yılında yapılan bir çalışmada plastik enjeksiyon kalıbı, alüminyum tozu katkılı epoksiden imal edilmiştir. Epoksi malzemelerin ısıl iletkenliklerinin düşük oluşu kalıplama esnasında dezavantaja dönüşmektedir. Epoksi kalıplardaki soğutma verimini artırmak için şekil uyumlu soğutma kanallarının kullanımı yanında kanal ile kalıp boşluğu arasına ısıl iletkenliği yüksek olan metal parçaların gömülmesi çözüm olarak önerilmektedir. Bunun için deneysel bir çalışma yapılmıştır. Kanal kalıp boşluğu arasına alüminyum parça gömülerek üretilmiş plastik enjeksiyon kalıbı ile içinde iletken metal parça olmayan kalıplarla baskı denemeleri yapılmış ve soğutma süreleri karşılaştırılmıştır. Deney sonuçlarına göre soğutma süresi 983 s den 334 s'ye düşerek %66 oranında kısalmıştır [83].

Literatür incelemeleri sonucunda şekil uyumlu soğutma kanallarının tasarlanması ve üretimi için düşük maliyetli ve endüstriyel olarak uygulanabilir bir yönteme ihtiyacın olduğu tespit edilmiştir. Bu açığın kapatılması için şekil uyumlu soğutma kanallarının sistematik olarak tasarlanabilmesi için bir tasarım algoritması geliştirilmiştir. Ayrıca şekil uyumlu kanallara

sahip enjeksiyon kalıbının üretimi için tabakalı sert lehimleme yöntemi kullanılmıştır. Şekil uyumlu soğutma kanallarına sahip plastik enjeksiyon kalıplarının üretilebilmesi için yapılan bu çalışmada kalıp çekirdeklerinin plakalar halinde üretilip sert lehimleme ile birleştirilmesi prensibine dayanan bir yöntem sunulmuştur. Karmaşık formlu kalıp yüzeyine uyumlu soğutma kanalları tasarlandıktan sonra kalıp çekirdekleri katmanlara bölünmüştür. Her bir katman taşlanmış plakalardan üretilmiştir. Şekil uyumlu soğutma kanallarını oluşturacak kanal boşlukları CNC freze ile plakalar üzerine işlenmiştir. Sonrasında plakalar sert lehimleme ile birleştirilerek içinde soğutma kanalları bulunan kalıp çekirdekleri elde edilmiştir. Üretilen şekil uyumlu soğutma kanallarının etkisi, doğrusal kanallar ile baskı denemeleri yapılarak karşılaştırılmıştır. Deney sonuçlarına göre şekil uyumlu kanalların kullanımı ile soğutma süresi %22 oranında kısalmış ve plastik parça üzerindeki çarpılma %50 oranında azalmıştır [84].

3. KAVRAMSAL TEMELLER

3.1. Plastik Malzemeler

Sonradan ortaya çıkmalarına rağmen günlük yaşamın hemen her alanında yaygın olarak kullanılan plastikler geleneksel malzemeler olan ahşap, seramik ve metal malzemeler yanında yerini almıştır. Sahip oldukları avantajlar sayesinde büyük bir kullanım yaygınlığına kavuşmuş ve özellikleri de sürekli olarak geliştirilmektedir. Plastik malzemelerin tercih edilmesini sağlayan önemli özellikler arasında; düşük yoğunluklu olmaları, kolay işlenebilir olmaları, ısı ve elektriğe karşı yalıtkan olmaları, şeffaf olmaları, korozyon direnci, ucuz olmaları ve tekrar işlenebilir olmaları sayılabilir [85].

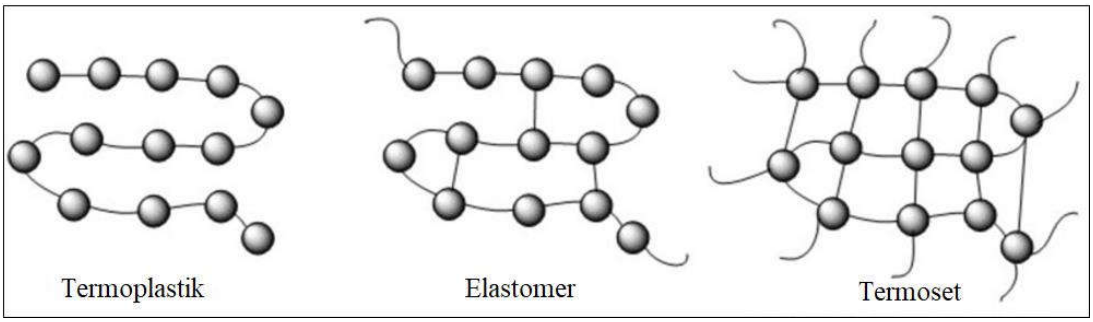
Polimerler, "mer" adı verilen, tekrarlanabilir birimlerden oluşurlar. Polimerler yüksek molekül ağırlığına sahip ve uzun zincirimsi bir yapıdadır. Örneğin polietilen polimeri, etilen molekülünün zincir şeklinde arka arkaya defalarca birleşerek oluşturduğu bir zincirdir. Polimerlere eklenen katkı maddeleri ile plastik malzemeler elde edilir. Mekanik yapının düzenlenmesi için plastikleştiriciler, ergiyik akışkanlığı iyileştirmek için yağlayıcılar, dolgu maddeleri, antioksidantlar, UV ve ısı dayanımı arttırıcılar gibi katkı maddeleri polimerlerin özelliklerini iyileştirerek endüstriyel olarak kullanılmalarını sağlarlar [86].

Plastik malzemeler Termoplastikler, Termoset plastikler ve Elastomerler olmak üzere üç sınıfa ayrılırlar (Şekil 3.1). Termoplastiklere ısı verildiğinde polimer zincirlerindeki hareketlilikler artmaya başlar. Polimer zincirlerinin birbiri üzerinde kaymaya başlamasıyla katı haldeki plastik malzeme ergiyerek akışkan hale gelir. Bu sayede termoplastik malzemeler şekillendirilerilebilir ve soğuma ile birlikte tekrar katılaşıp şekillerini korurlar. Termoplastikler için ısı ile ergime ve katılaşma tekrarlanabilir bir süreçtir. Bu tür malzemeden üretilen plastik ürünleri geri dönüşümü mümkündür [86, 87].

Termoset malzemeler ısı altında bir defa şekillendikten sonra dallanmış polimer zincirleri birbirleri içine geçerek daha mukavim bir yapı oluştururlar. Bu dallanmış yapının varlığı nedeniyle termoset malzemeler tekrar ısıtıldıklarında yumuşamazlar ve ergiyik haline gelmezler. Isı uygulanmaya devam edilmesi durumunda ise polimer zincirler tersinmez halde bozunurlar. Bu tür malzemelerden üretilen plastik ürünlerin geri dönüşümü söz konusu

değildir [85, 86].

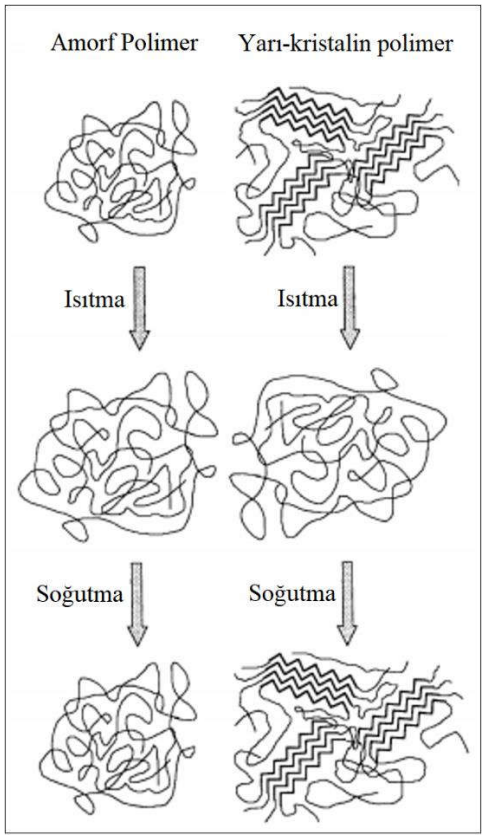
Elastomer malzemeler şekillendirildikten sonra pişirilerek polimer dalları arasında çapraz bağlar oluşturulur. Oda sıcaklığındayken esnek bir yapıya sahip oldukları için şişirilebilir özelliktedirler. Tekrar ısıya maruz kaldıklarında termoset plastiklerde olduğu gibi ergiyerek akışkan hale gelmezler [85, 86].



Şekil 3.1. Plastik malzemelerin moleküler yapıları [88]

Termoplastik malzemeler polimer zincirlerinin dizilimine göre Amorf ve yarı-kristalin olmak üzere iki guruba ayrılabilir (Şekil 3.2). Amorf yapıda polimer zincirleri tamamen düzensiz bir yapıdadır. Bu amorf yapı pişmiş spagettiye benzetilmiştir. Amorf yapılı plastik malzemeler şeffaftırlar. Bu tür malzemelere ısı uygulandığında polimer zincirler arasındaki mesafeler artar ve malzeme ergiyerek akışkan hale gelir [86, 89].

Yarı-kristalin yapıda malzemelerin tüm bölgelerinde oluşmamakla beraber bazı bölümlerde polimer zincirlerin diziliminde bir düzen görülür. Tekrar eden düzenli boşluklar ve dizilimler oluşur. Kristalleşme oranı ergiyik malzemenin soğuyarak sertleşme hızı ile ilgilidir. Soğuma süresinin kısalması kristalleşme oranını da düşürecektir. Kristal formun oluşması için yeterli süreyi bulamayan zincirler yine amorf bir yapı oluşturacaktır. Polimerlerin uzun zincir halindeki yapıları malzemenin tüm bölümlerinde kristal yapıların oluşmasına engel olur. Hacimsel olarak kristalin bölgelerin fazlalığı kalıplanan plastik malzeme üzerindeki çekme miktarını da artırmaktadır. Yarı-kristalin malzemeler genellikle opaktırlar ve ışığı geçirmezler [2, 86, 90].



Şekil 3.2. Amorf ve Yarı-kristalin polimer malzemelerin ısı karşısındaki davranışı [87]

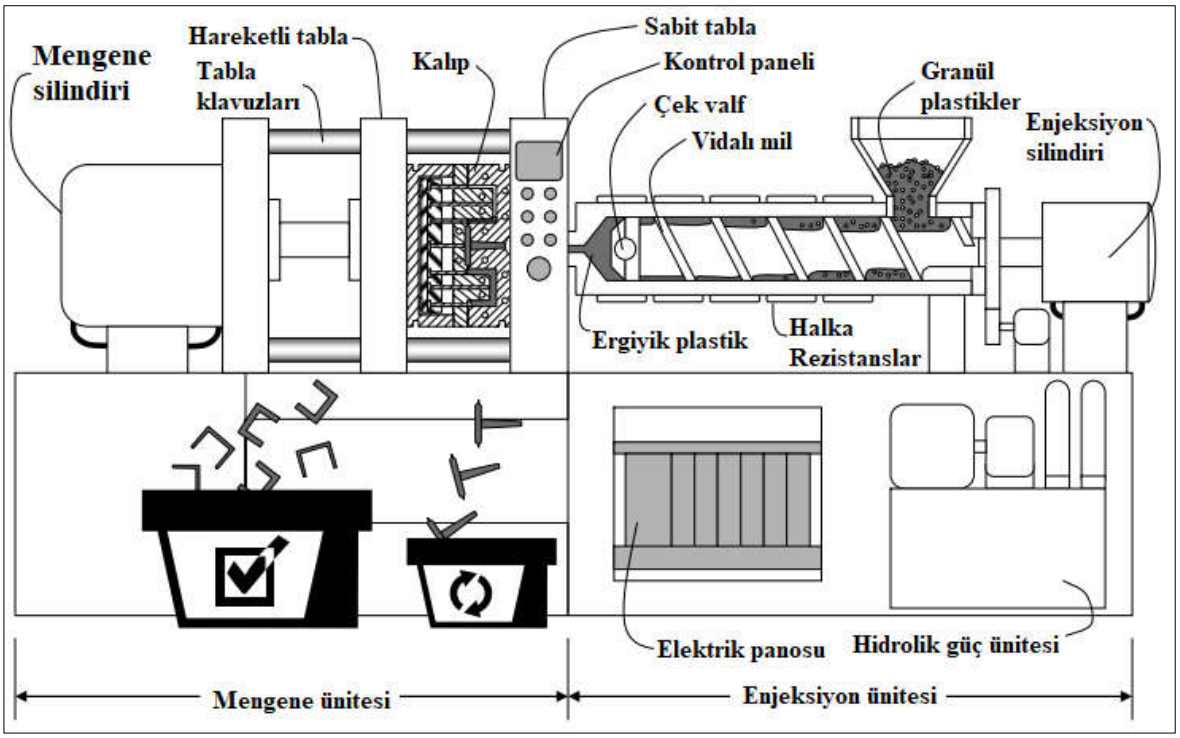
3.2. Plastik Enjeksiyon Kalıplama

Plastik malzemelerin ısı etkisi ile yumuşamaları ve akışkan hale gelmeleri seri bir şekilde üretim yapma kolaylığı sağlar. Plastik malzemelerin bu özelliği sayesinde kullanılan üretim yöntemleri arasında ekstrüzyon kalıplama, döner kalıplama, vakum kalıplama, şişirme kalıplama ve plastik enjeksiyon kalıplama sayılabilir.

Plastik malzemelerin en yaygın kullanılan işleme yöntemlerinden birisi plastik enjeksiyon kalıplamadır. Genellikle çelik esaslı malzemeden üretilen kalıp içerisindeki boşluğun ergiyik plastik ile doldurulması, soğutulması ve plastik ürünün kalıptan çıkarılması işlemlerini kapsar. Tüm işlemler plastik enjeksiyon makinesi adı verilen bir pres tezgâhı vasıtası ile tekrarlar halinde seri olarak yapılır.

3.2.1. Plastik enjeksiyon makinesi

Plastik enjeksiyon kalıplama işlemi plastik enjeksiyon tezgâhı ile gerçekleştirilir (Şekil 3.3). Plastik ürün için hazırlanan kalıp yarımları enjeksiyon tezgâhının sabit ve hareketli tablalarına bağlanarak kalıbın açılması ve kapatılması sağlanır. Enjeksiyon ünitesinde bulunan vidalı milin dönmesi ile sele içinde bulunan granül haldeki plastik malzeme kovan içerisine taşınır. Kovanın dışında bulunan rezistanslar kovanı ısıtır ve katı haldeki plastik malzeme ergiyik hale gelir. Vidalı milin dönme hareketi ile ergimiş plastik kovanın ön bölümündeki hazneye dolar ve enjeksiyon için hazır duruma gelmiş olur.



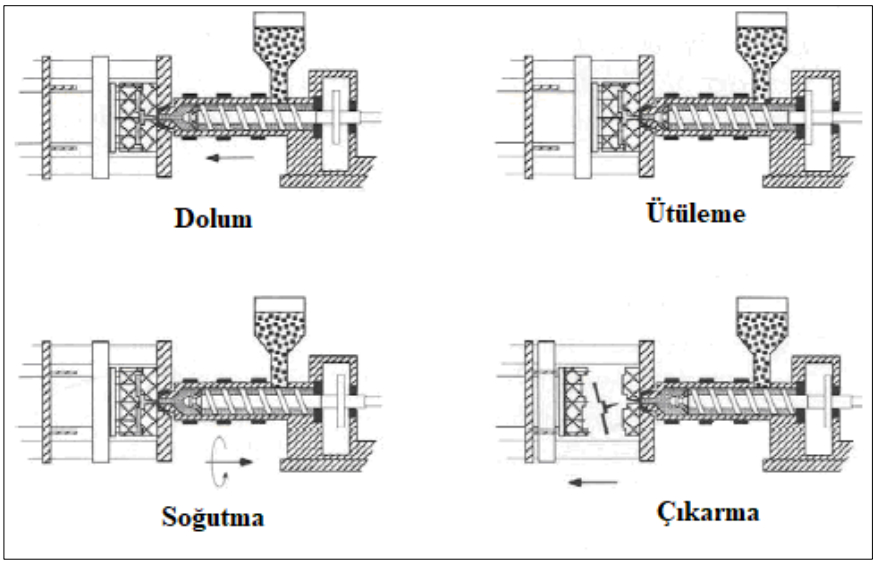
Şekil 3.3. Plastik enjeksiyon makinesinin bölümleri [91]

Plastik enjeksiyon kalıplama işlemi dört temel safhadan oluşur (Şekil 3.4). Bunlar; dolum, ütüleme, soğutma ve çıkarma safhalarıdır [92]. Enjeksiyon kovanın ön bölümündeki haznede ergiyik plastik hazır halde beklemektedir. Dolum safhasında vidalı milin eksenel hareketi ile kovan haznesindeki ergiyik malzeme kalıp içerisine enjekte edilir. Kalıp boşluğu tamamen dolarken kalıp içerisindeki hava kalıp ayırma hattından dışarıya itilir. Kalıp içerisine yüksek basınçla dolan ergiyik plastik kalıbı açmaya zorlar. Kalıbın kapalı tutulması için gereken kuvvet mengene ünitesi ile sağlanır.

Kabın dolumuyla birlikte soğuma süreci başlar ve kalıp içerisindeki plastik malzemenin sıcaklığı camsı geçiş sıcaklığının altına ininceye kadar devam eder. Bu esnada soğuyan plastik malzeme çekerek hacmi küçüldüğü için kalıp içerisine ergiyik basımı devam eder. Bu süreç ütüleme safhası olarak adlandırılır.

Soğuma safhası ergiyik malzeme kalıbın içerisine ilk giriş anından itibaren başlar ve kalıp açılana kadar devam eder. Kalıp sıcaklığının ergiyik sıcaklığından düşük olması nedeniyle ergiyik malzeme üzerindeki ısı sürekli olarak kalıba transfer olur. Soğuyarak çıkarma sıcaklığına ulaşan plastik malzeme şeklini koruyabilecek ürün haline gelir.

Plastik ürün yeterince soğuduktan sonra çıkarma safhasına geçilir. Mengene ünitesi kalıbı açarak kalıp yarımlarını birbirinden uzaklaştırır. İtici sitemi vasıtasıyla plastik ürün kalıptan dışarı itilerek çıkarılır. Sonraki üretim çevrimi için kalıp tekrar kapatılır. Gerçekleştirilen tüm hareketler için gerekli kuvvetler hidrolik sistem ile sağlanır.



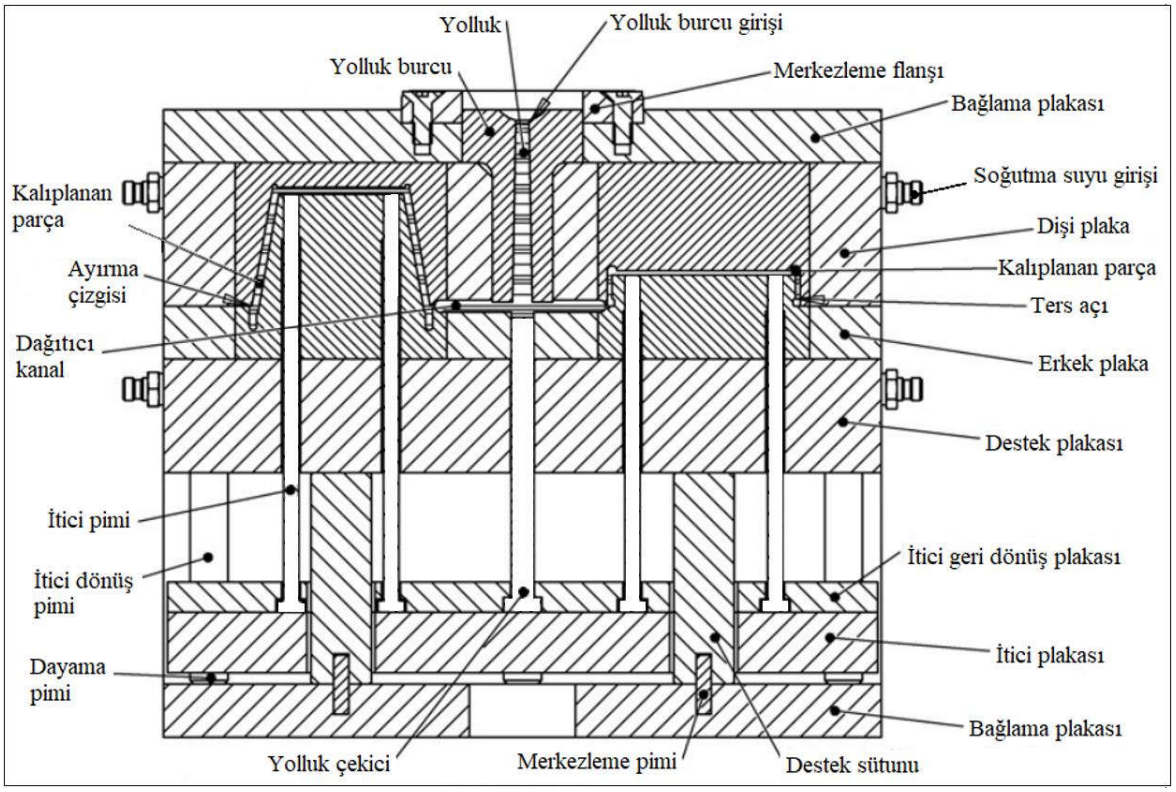
Şekil 3.4. Plastik enjeksiyon kalıplamada üretim safhaları [92]

Plastik enjeksiyon kalıplama işlemi sırasında kullanılacak tüm üretim parametreleri kontrol paneli ile kontrol edilir. Bu parametreler ergiyik sıcaklığı, kalıp sıcaklığı, enjeksiyon basıncı, ütüleme basıncı, dolum hızı, soğutma süresidir.

3.2.2. Plastik enjeksiyon kalıbı

Plastik enjeksiyon kalıplama yönteminin gerçekleşmesinin sağlandığı ana eleman enjeksiyon kalıbıdır. Ergiyik plastiğin kalıp boşluğuna ulaştırılması, ürün geometrisinin oluşturulması, soğutulması ve dışarı çıkarılması işlemleri plastik enjeksiyon kalıbının görevleridir. Plastik enjeksiyon kalıbı birçok işlemin aynı anda, seri ve hassas bir şekilde gerçekleştirildiği karmaşık bir sistemdir. Şekil 3.5'de bir plastik enjeksiyon kalıbının genel yapısı gösterilmiştir. Bir plastik enjeksiyon kalıbı genel anlamda iki yarımdan oluşsa da ana bölümleri aşağıdaki şekilde sıralanabilir [93].

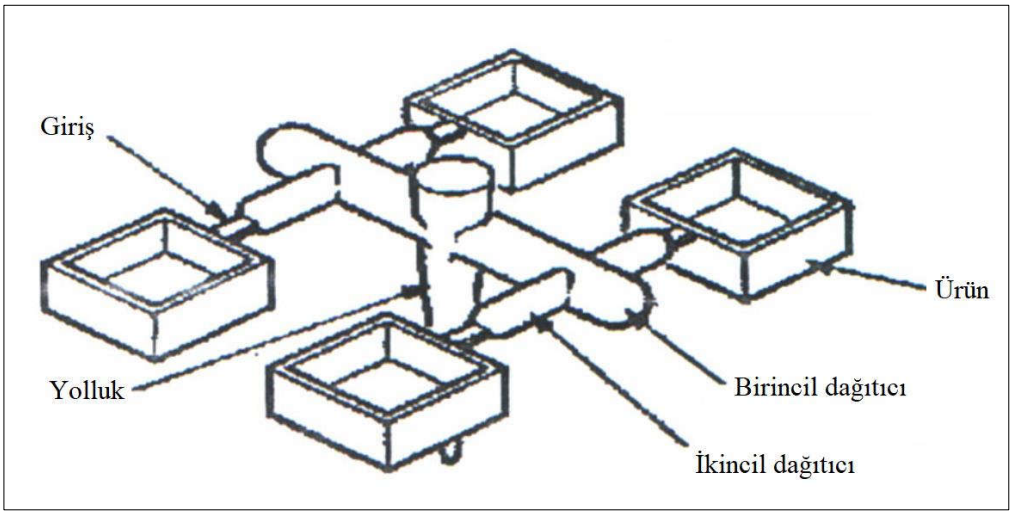
- Yolluk sistemi
- Kalıp boşluğu ve maça sistemi
- Soğutma sistemi
- Çıkarma sistemi



Şekil 3.5. Plastik enjeksiyon kalıbının genel yapısı [91]

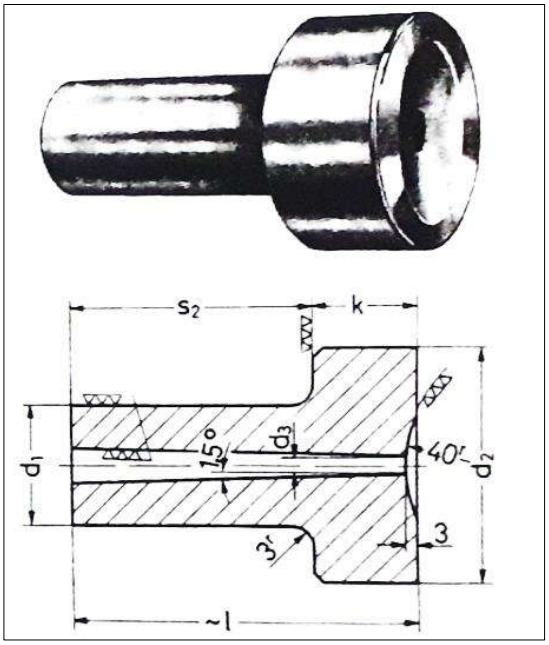
Yolluk sistemi

Plastik enjeksiyon makinesinin enjeksiyon sistemi ile yolluk burcuna kadar ulaşan ergiyik plastiğin kalıp boşluklarına kadar iletilip doldurulmasını sağlayan yol kalıbın iletim sistemini oluşturmaktadır. Ergiyik plastik, sırasıyla; yolluk burcu, dağıtıcı kanallar ve giriş kanalı yolunu takip ederek kalıp boşluğuna ulaşır. Şekil 3.6'da kalıptan çıkmış bir ürün salkımı üzerindeki yolluk sistemi görülmektedir.



Şekil 3.6. Soğuk yolluk bileşenleri [93]

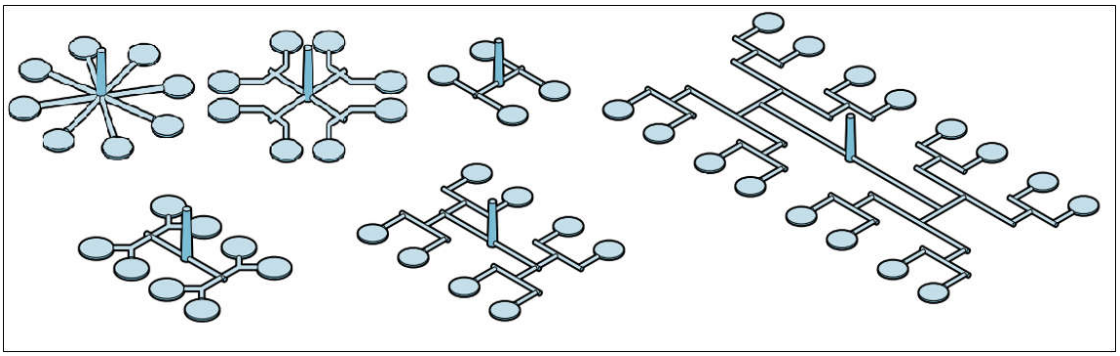
Yolluk burcu kalıbın dişi yarımında yer alır ve kalıbın dişi tarafı plastik enjeksiyon makinesinin sabit plakasına bağlanır. Merkezleme flanşı sayesinde yolluk burcu ile enjeksiyon memesi eksenel olarak birbirini karşılayacak şekilde bağlanır. Yolluk burcunun içinde bulunan kanal 1,5°'lik bir açı ile konik olarak imal edilmiş ve taşlanmıştır. Kalıp açıldığında plastik ürünle birlikte yolluk da kalıp dışına çıkarılır. Yolluk burcu standart bir kalıp elemanıdır. Yolluk burcunun yapısı ve ölçüleri Şekil 3.7'görülmektedir.



Şekil 3.7. Yolluk burcunun yapısı [94]

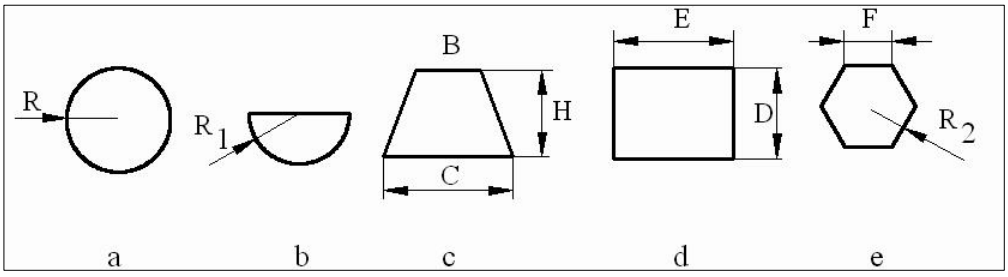
Yolluk burcu ile enjeksiyon memesinden kalıp ayırma hattına kadar ulaşan ergiyik plastik dağıtıcı kanallar ile kalıp boşluklarına kadar iletilir. Bu kanalların en düşük sıcaklık ve basınç kaybı ile ergiyik plastiği giriş kanalına kadar ulaştırması istenir. Plastik ürün ile birlikte dağıtıcı kanal içerisindeki plastik malzeme de donarak katılaşır ve plastik ürün ile birlikte kalıp dışına çıkarılır. Bu nedenle dağıtıcı kanallar kalıp ayırma yüzeyinde oluk şeklinde işlenerek imal edilirler.

Plastik enjeksiyon kalıbının tüm gözlerinden çıkan parçaların özdeş olabilmesi için kalıp gözlerinin eş zamanlı olarak dolması ve soğuması istenir. Bunun için kalıp gözlerine dağılan dağıtıcı kanalların uzunlukları eşit olmalıdır. Şekil 3.8'de çok gözlü kalıplar için alternatif tasarımlar görülmektedir.



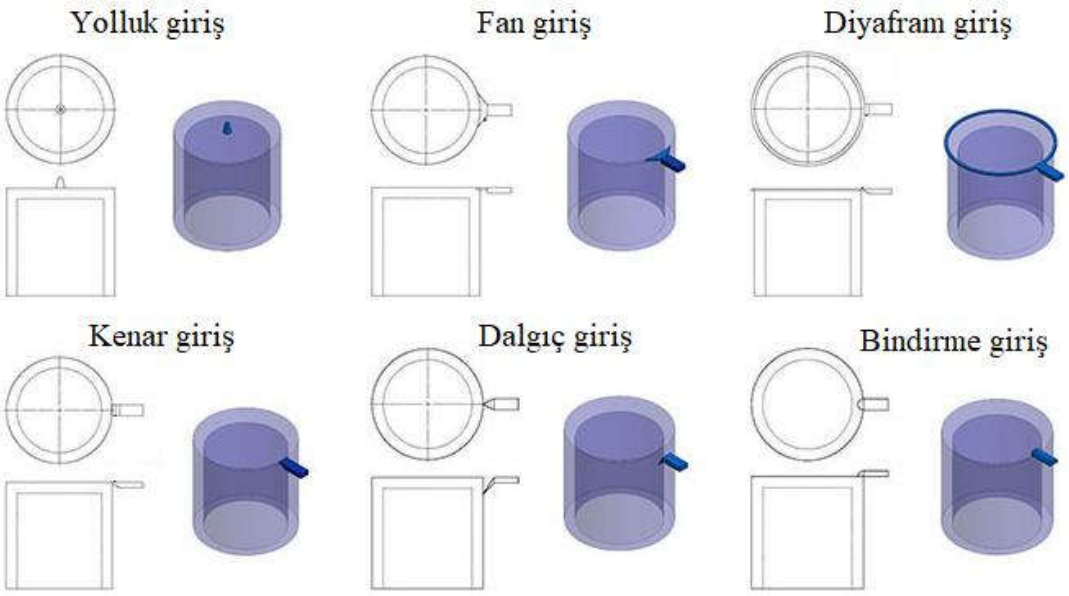
Şekil 3.8. Geometrik olarak dengelenmiş dağıtıcı kanal tasarımları

Dağıtıcı kanal içine dolan ergiyik plastiğin kanal yüzeyine temas eden kısmı hemen donarak katılaşır ve kanal merkezindeki sıcak bölgede ergiyik akışı devam eder. Akış kesitinin daralması nedeniyle basınç kayıpları artar. Bu nedenle kanal kesitinin uygun seçilmesi önemlidir. Genelde tercih edilen kanal kesiti tipleri; daire, yarım daire, trapez, dikdörtgen, altıgendir (Şekil 3.9).



Şekil 3.9. Dağıtıcı kanal kesitleri, a. Daire, b. Yarım daire, c. Trapez, d. Dikdörtgen,e. Altıgen [95]

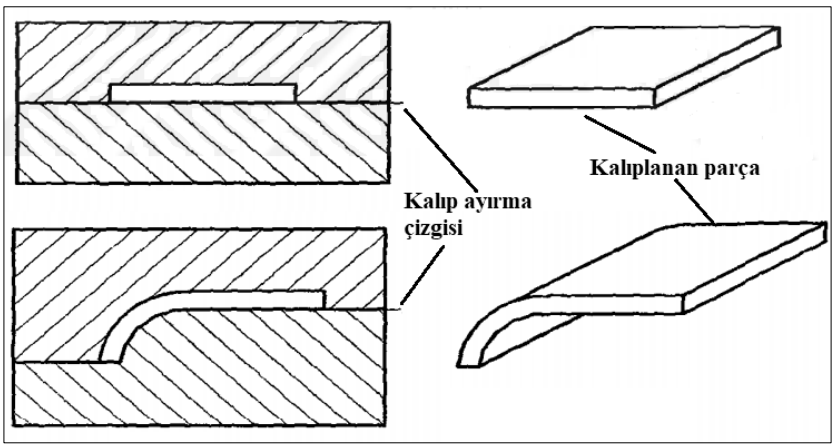
Dağıtıcı kanallardaki ergiyik plastiğin kalıp boşluğuna girişini sağlayan, nispeten daha küçük kesitli kanallar giriş olarak adlandırılır. Kalıplama işleminden sonra plastik ürün üzerinde giriş kanalının kesiti büyüklüğünde birleşme izi oluşacağından parçanın görselliği olumsuz olarak etkilenecektir. Ayrıca bu kesitin büyük olması parçanın yolluk sisteminden koparılması gibi ek bir işlem yapılmasını gerektirecektir. Bu nedenle giriş kesitlerinin plastik ergiyik akışını engellemeyecek şekilde mümkün olduğunca küçük olması istenir. Yaygın olarak kullanılan giriş tipleri Şekil 3.10'da gösterilmiştir.



Şekil 3.10. Giriş tipleri

Kalıp boşluğu ve maça sistemi

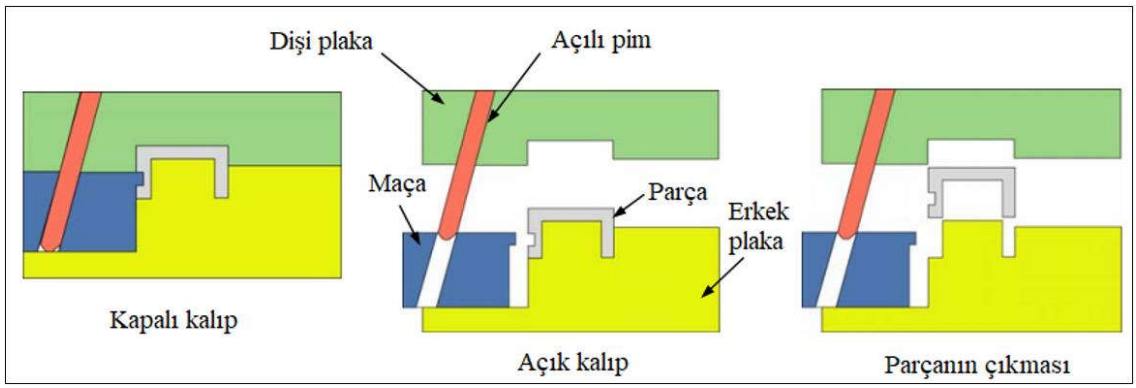
Kalıp plakası üzerindeki, ergiyik plastik malzemenin dolarak şekil aldığı boşluktur. Boşluk plastik ürün geometrisine uygun olarak işlenmiştir. Kalıp boşluğunun bir bölümü kalıbın sabit tarafında ve kalan diğer bölümü hareketli tarafta kalacak şekilde oluşturulur. Her iki taraftaki kalıp boşluğunu ayıran hatta kalıp ayırma çizgisi denir. Şekil 3.11'de kalıp ayırma çizgisi gösterilmiştir.



Şekil 3.11. Kalıp ayırma çizgisi [96]

Plastik malzemenin katılaşmasıyla beraber malzeme üzerinde hacimsel olarak çekme meydana gelir ve boyutları küçülür. Bu nedenle kalıp boşluğu, plastik ürünün nihai ölçülerinden çekme miktarı kadar büyük olacak şekilde üretilir.

Kalıplama işlemi sonunda plastik parçanın kalıptan kolayca çıkabilmesi için kalıp boşluğunun yan duvarları açılı olarak üretilir. Bu sayede parça kalıptan daha düşük bir sürtünme ile ayrılabilir. Plastik parça üzerindeki ters açılı bölgeler kalıptan çıkmaya engel teşkil edeceğinden kalıbın bu bölümü maçalı olarak üretilir (Şekil 3.12). Maçalar kalıp açılma yönüne dik hareket ederek parçanın kalıptan çıkmasını sağlar.



Şekil 3.12. Maça hareketi ile parçanın kalıptan çıkması [97]

Kalıp boşluğunun yüzey kalitesi üretilen plastik ürün kalitesini doğrudan etkilediğinden görselliğin önemli olduğu yüzeylerini oluşturan kalıp yüzeyleri parlatılır. Kalıp içerisindeki göz sayısına bağlı olarak birden fazla plastik ürünün aynı anda üretilmesi mümkündür.

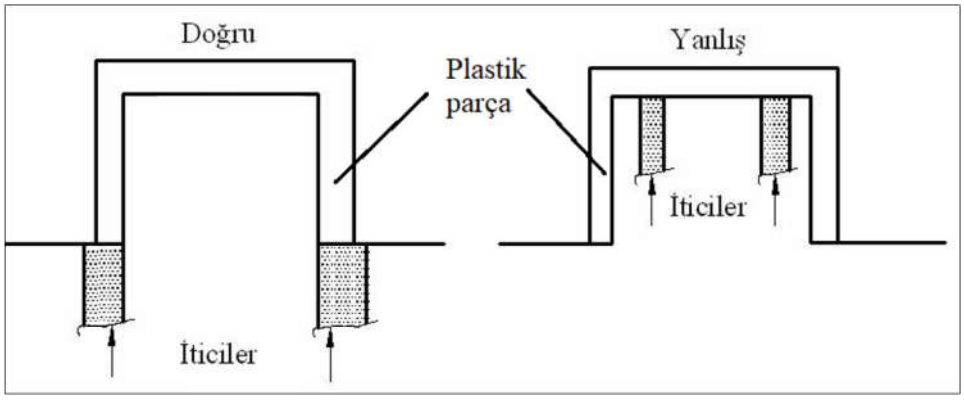
Soğutma sistemi

Kalıp içerisine dolan sıcak ergiyik malzemenin kontrollü bir şekilde soğutulabilmesi için soğutma sistemi kullanılır. Soğutma sistemi; kalıp içerisindeki soğutma kanalları, kalıp dışına uzanan bağlantı girişleri, chiller ve kalıp şartlandırıcısından oluşur. Soğutma sistemi kalıp içerisindeki soğutma kanallarından soğuk su dolaşması sağlanarak kalıp üzerindeki ısının uzaklaştırılmasını sağlar. Bu sayede hem plastik parçanın soğuma süresi kısalır hem de dengeli bir soğutma gerçekleştirilir. Üretim hızı ve parça kalitesi için soğutma sistemi büyük bir öneme sahiptir.

İtici sistemi

Plastik parçanın soğuma sürecinin tamamlanmasından sonra kalıp açılır plastik ürün kalıptan çıkarılır. Çıkar işlemi kalıp üzerinde bulunan bir itici sistemi ile yapılır. İtici sistemi kalıbın erkek tarafı olan hareketli yarım üzerinde yer alır. İtici sistemi plastik enjeksiyon makine üzerinde bulunan bir hidrolik silindir vasıtası ile tahrik edilir. İticiler plastik parçayı iterek kalıp dışına doğru çıkmaya zorlar.

Parçanın kalıptan sorunsuz olarak çıkması için iticilerin konumu, sayısı ve boyutları kritik öneme sahiptir. İticiler genellikle sürtünmeye neden olan, kalıp ayırma yüzeyine dik olan bölgelerden itilerek çıkarılırlar (Şekil 3.13). İtici uçlarının plastik parçaya batarak zarar vermemesi için itici çapları, itme basıncını yeteri kadar dağıtabilecek büyüklükte olmalıdır. Plastik parçanın kalıptan tamamen çıkmasının garantisi için yeterli sayıda itici kullanılmalıdır. Plastik parçanın kalıptan tamamen ya da kısmen çıkmaması durumunda kalıbın tekrar kapanması zarar görmesine neden olacaktır.



Şekil 3.13. Uygun itici konumları [95]

3.3. Kalıplarda Soğutma Sistemi Tasarımı

3.3.1. Soğutma sisteminin gerekliliği

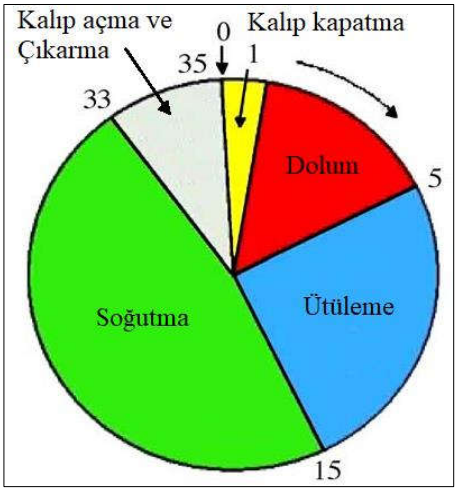
Plastik enjeksiyon kalıplama işleminde ergitilen plastik malzemenin şekillendirildikten sonra tekrar soğutulması gerekmektedir. Bu amaçla oluşturulan soğutma sistemi, soğutma işleminin kontrollü bir şekilde gerçekleştirilmesini sağlar. Ergiyik plastiğin kalıp içerisine

dolması ile kalıp sıcaklığı sürekli olarak yükselir. Kalıp sıcaklığının yüksekliği plastik malzemenin soğuyarak katılaşması için gereken süreyi önemli ölçüde artıracaktır. Kalıp sıcaklığının soğuk olması durumunda ise ergiyik plastik malzemenin kalıp içine dolumu sırasında soğuyarak katılaşacak ve kalıp boşluğunun tamamen dolmamasına neden olacaktır. İstenmeyen bu durum plastik ürünün eksik olması anlamına gelmektedir. Ergiyik plastiğin donmadan kalıbın tamamını doldurması için kalıp sıcaklığının belirli bir değerde olması gerekmektedir. Yaygın kullanılan bazı plastik malzemeler için uygun kalıp sıcaklıkları Çizelge 3.1'de gösterilmiştir.

Çizelge 3.1. Plastik malzemelerin kalıplanması için uygun kalıp sıcaklıkları [98]

Plastik Malzeme	Kalıp sıcaklığı (°C)
ABS	50-80
PP	20-100
POM	40-120
LDPE	20-60
HDPE	40-60
PVC-Yumuşak	20-55
PVC-Sert	20-70
PS	10-80
PA6	60-95
PA66	60-90
PMMA	10-80
PC	85-120

Plastik enjeksiyon kalıplama işlemi çevrimler halinde sürekli olarak tekrar eder. Kalıbın kapanması, ergiyik malzemenin kalıp boşluğunu doldurması, basınç altında tutma, plastiğin soğuması, kalıbın açılması ve parçanın kalıptan çıkarılması bir çevrim boyunca gerçekleştirilen işlemlerdir. Birim parça adedi için gerekli üretim süresi çevrim süresi ile belirlenir. Üretim hızını belirleyen en önemli parametre çevrim süresidir [1, 3, 16]. Şekil 3.14'de bir çevrim süresindeki zaman aralıkları gösterilmiştir. Çevrim süresini etkileyen en büyük etken soğutma süresi olduğu görülmektedir. Soğutma sisteminin performansı bu sürenin kısalmasını sağlamaktadır.



Şekil 3.14. Çevrim süresinde işlemlerin zaman aralıkları [3]

Plastik malzeme camsı geçiş sıcaklığının altında yeterince katılaşır ve şeklini koruyabilir. Kalıp boşluğundaki plastik malzemenin sıcaklığının camsı geçiş sıcaklığının altına inmesi plastik ürünün kalıptan çıkarılabilmesi için gereklidir. Ancak plastik parça kalıptan çıkarıldıktan sonra da soğumaya devam eder. Bu esnada parça soğumanın etkisiyle çekerek küçülecektir. Herhangi bir mekanik etki ya da dengesiz çekme nedeniyle parça geometrisinin bozulmaması için uygun bir çıkarma sıcaklığı belirlenmelidir. Çizelge 3.2'de yaygın kullanılan bazı plastikler için uygun çıkarma sıcaklıkları görülmektedir.

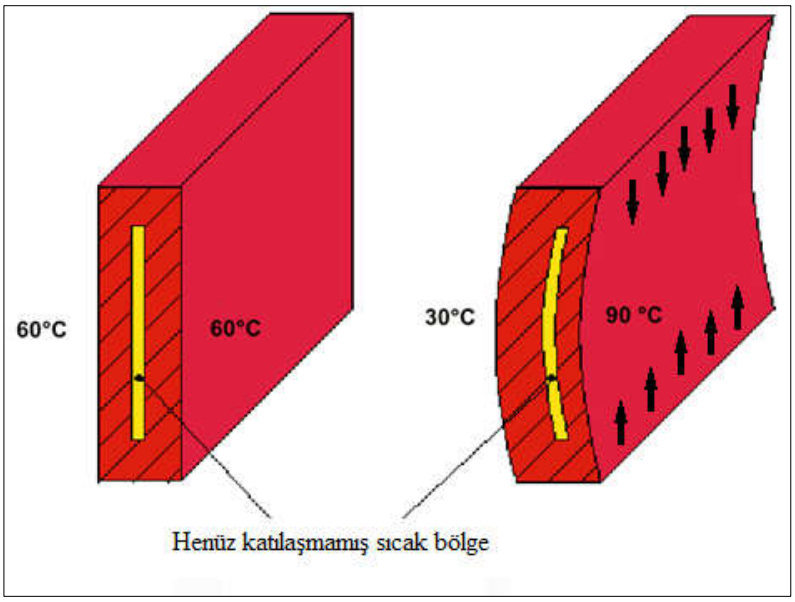
Çizelge 3.2. Kalıptan çıkarma sıcaklıkları [98]

Plastik Malzeme	Kalıptan çıkarma sıcaklığı (°C)
ABS	60-100
PP	60-100
POM	90-150
LDPE	50-90
HDPE	60-110
PVC-Yumuşak	60-100
PVC-Sert	60-100
PS	60-100
PA6	70-110
PA66	80-140
PMMA	70-110
PC	90-140

Plastik enjeksiyon kalıplamada soğutma süresinin kısa olmasının önemi yanında plastik ürün

kalitesi açısından düzgün bir sıcaklık dağılımının da sağlanması kritik öneme sahiptir. Isınarak ergiyik hale gelen plastik malzeme genleşir. Kalıp içine basılan malzeme soğurken tekrar büzülerek çekmeye başlar. Plastik malzemenin çekme oranlarına etki eden çok sayıda parametre vardır. Bunlar; malzeme cinsi, ergiyik sıcaklığı, basınç dağılımı, moleküler yönlenme, kristalleşme oranı, nem, katkı maddeleri ve soğutma hızıdır [99].

Soğuma ile birlikte plastik parça üzerindeki çekme dağılımının düzensiz olması parça geometrisinin bozulmasına neden olmaktadır. Polimer zincirlerinin kontrolsüz yönlenmesi, basınç ve sıcaklık dağılımının homojen olmaması parça üzerindeki çekmenin de düzgün dağılmasına engel olur. Kalıp üzerindeki soğutma sisteminden beklenen bir özellikte parçanın tüm bölgelerinin eşit hızda soğutulmasını sağlamasıdır. Aksi halde erken soğuyan bölgelerdeki çekme işlemi sona ermişken sıcak bölgeler çekmeye devam eder plastik parça çarpılır [100]. Şekil 3.15'de farklı sıcaklık dağılımı nedeniyle plastik parça üzerindeki çarpılmanın oluşumu görülmektedir [101, 102].



Şekil 3.15. Yüzey sıcaklık farkı nedeniyle çarpılmanın oluşumu [101]

Plastik enjeksiyon kalıplama işleminin seri olarak yapılabilmesi ve plastik parça kalitesinin sağlanabilmesi için uygun bir soğutma sistemine ihtiyaç duyulur. Soğutma sisteminin tasarımında kanal boyutları, kanalların konumu, soğutma suyu sıcaklığı ve debisi, soğutma üniteleri ve sıcaklık düzenleyiciler önemli rol oynamaktadır. Etkili bir soğutma sistemi için tasarım parametreleri uygun bir şekilde seçilmelidir.

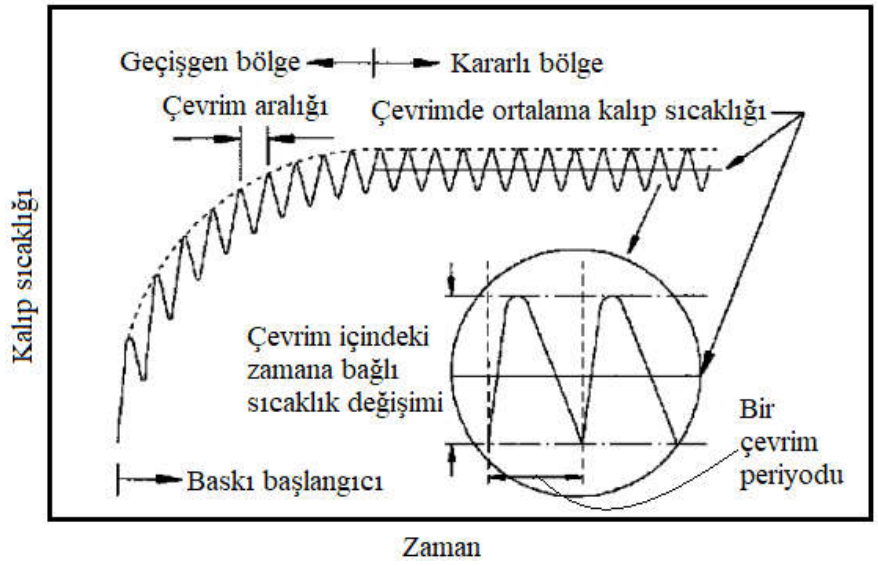
Soğutma sistemi elemanları

Plastik enjeksiyon kalıplamada soğutma işlemi kalıp içerisindeki soğutma kanallarından uygun sıcaklıktaki suyun dolaştırılarak kalıp sıcaklığının düzenlenmesi şeklinde yapılmaktadır. Bu sistem kapalı bir su devresi şeklinde çalışmaktadır. Soğutma işleminin gerçekleştirilmesi için gerekli olan soğutma sistemi elemanları; su soğutma ünitesi (chiller), harici sıcaklık kontrol ünitesi (kalıp şartlandırıcı), rakor ve hortumlar, soğutma kanalları ve sudur.

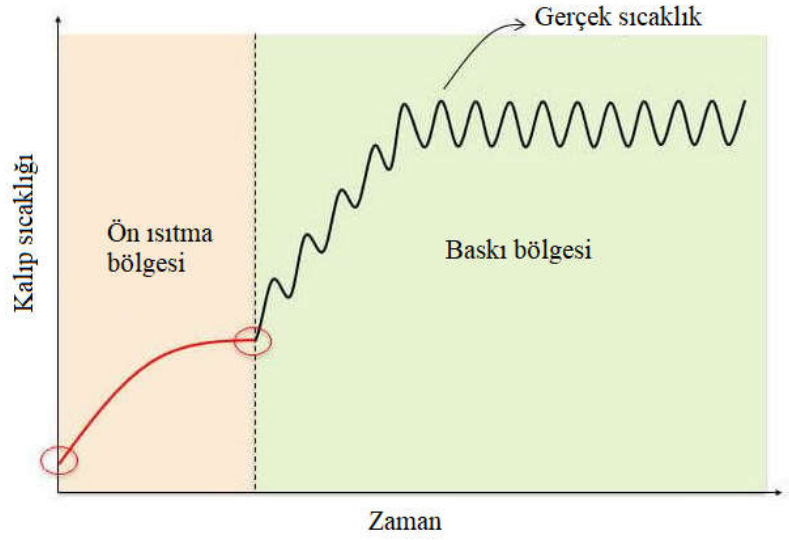
Kalıp soğutulurken kalıp üzerindeki ısı soğutma kanallarında dolaşan suya aktarılır. Soğutma veriminin düşmemesi için su tekrar kalıp içerisine gönderilmeden önce tekrar uygun sıcaklığa getirilmelidir. Soğutma suyu üzerindeki fazla ısının atılarak tekrar çalışma sıcaklığına getirilmesi için chiller adı verilen su soğutma ünitesi kullanılır [103, 104].

Kalıbın uygun sıcaklıkta tutulması, soğutma suyu sıcaklığının ve debisinin kontrol edilmesi için kalıp şartlandırıcı adı verilen harici bir sıcaklık kontrol ünitesi kullanılır. Şartlandırıcı kalıp ve su sıcaklığını sürekli olarak ölçmektedir. Suyun çalışma sıcaklığının düşük olması durumunda suyu ısıtarak uygun çalışma sıcaklığına yükseltir. Su sıcaklığının gerekenden daha yüksek olması durumunda chiller ünitesini devreye alarak su sıcaklığının soğutulmasını sağlar. Bu sayede kalıp içerisine giren suyun sıcaklığı sabit kalmış olur.

Şekil 3.16'te kalıp sıcaklığının zamana bağlı değişimi gösterilmiştir. Kalıp sıcaklığı dalgalanmalar halinde yükselerek belirli bir süre sonra kararlı hale gelmektedir. Plastik enjeksiyon kalıplamada kalıp sıcaklığı dengeye gelene kadar bir miktar ön baskı yapılmalıdır [17, 32]. Dengelenme öncesi yapılan baskılar uygun şartlarda gerçekleşmediği için plastik ürünler hatalı olarak üretilir. Bu kayıplar başlangıç maliyetlerinin artmasına neden olur. Kalıp şartlandırıcı kullanımıyla kalıpta ön ısıtma yapılarak çok daha düşük sayıdaki baskı adedi ile kalıp sıcaklığında dengelenme sağlanır (Şekil 3.17).



Şekil 3.16. Kalıp sıcaklığın zamanla değişimi [17]

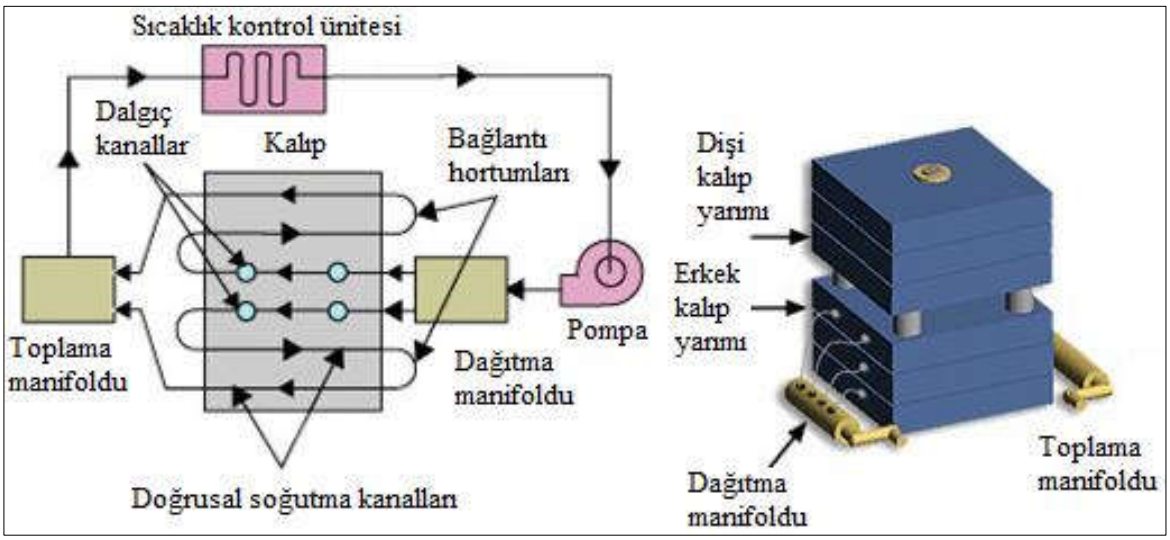


Şekil 3.17. Kalıp şartlandırıcı ile yapılan ön ısıtma [105]

3.3.2. Soğutma kanallarının tasarımı

Plastik enjeksiyon kalıplarının soğutulması işlemi, kalıp boşluğu çevresinden geçen kanallardan soğuk su geçirilerek kalıp üzerindeki ısının uzaklaştırılması yolu ile yapılmaktadır (Şekil 3.18). Soğutma kanalları genellikle matkap ile delerek oluşturulduğu için dairesel bir kesite sahiptir. Kanal çapı, kanalın kalıp boşluğuna uzaklığı ve kanalların birbirine uzaklıkları belirlenirken kalıplanan plastik parçanın cidar kalınlığı dikkate

alınmaktadır [10, 29, 35, 61]. Çizelge 3.3'te parça kalınlığına bağlı soğutma kanalı boyutları gösterilmiştir.

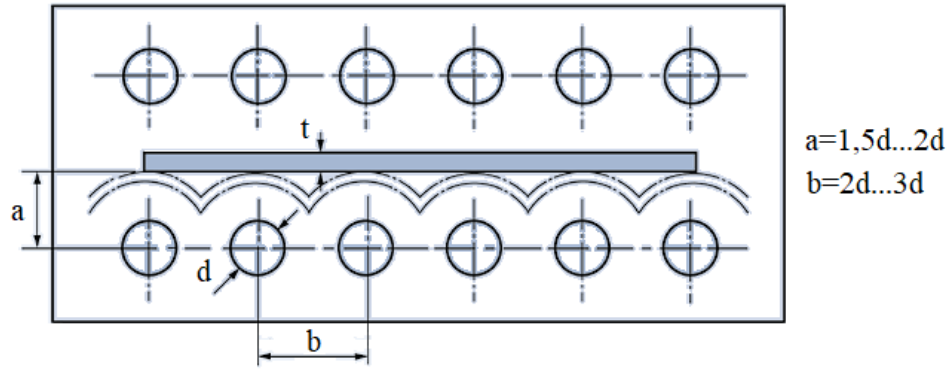


Şekil 3.18. Plastik enjeksiyon kalıplamada soğutma sistemi

Çizelge 3.3. Parça cidar kalınlığına göre soğutma kanalı boyutları [94]

Cidar Kalınlığı, mm	Kanal Çapı, mm
0-2	8-10
2-4	10-12
4-6	12-15

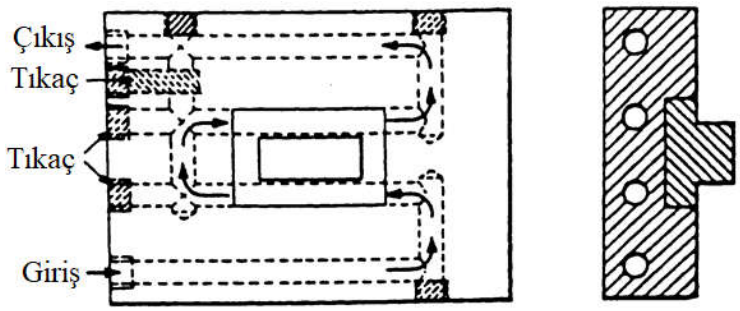
Kalıp boşluğu yüzeyinde düzgün bir sıcaklık dağılımının elde edilebilmesi için Şekil 3.19'da belirtildiği gibi soğutma kanallarının kalıp boşluğuna olan uzaklığı kanal çapının 1,5-2 katı ve kanalların birbirlerine olan uzaklıkları kanal çapının 2-3 katı olacak şekilde seçilmelidir [101].



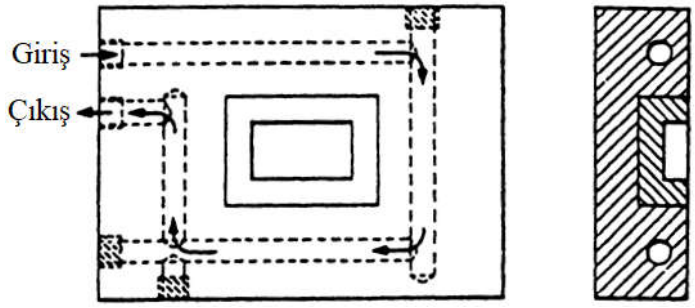
Şekil 3.19. Soğutma kanallarının konumları (a: kanal-kalıp arası mesafe, b: kanallar arası mesafe)

Kalıp parçalarının soğutulması

Kalıp plakalarının soğutulması için yaygın olarak kullanılan yöntem kalıp plakalarının kapalı bir su devresi oluşturacak şekilde matkap delinmesidir. Bu yöntem ucuz ve pratik olduğu için tercih edilir. Delerek oluşturulan kanallar kalıp boşluğunun çevresinden dolaşmaktadır. Delme işleminden sonra gerekli olmayan delik çıkışları tıkaçlar vasıtası ile kapatılır. Dişi ve erkek kalıp yarımlarında ayrı ayrı soğutma devreleri oluşturulur. Şekil 3.20 ve Şekil 3.21'de dişi ve erkek kalıp yarımlarının soğutma kanalları gösterilmiştir [106].



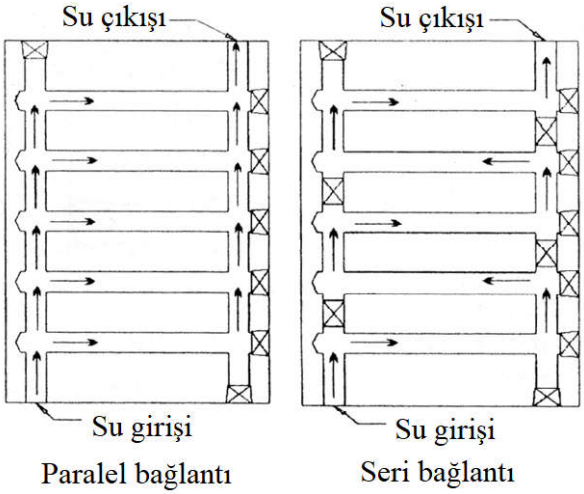
Şekil 3.20. Erkek kalıp plakasının soğutulması



Şekil 3.21. Dişi kalıp plakasının soğutulması

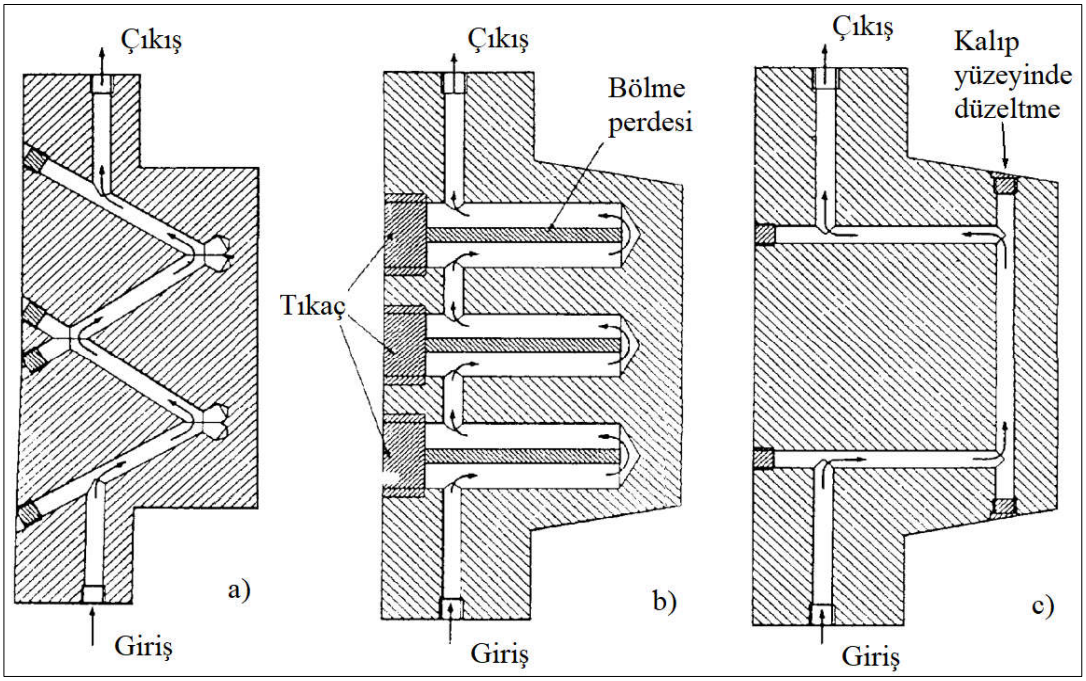
Düzlemsel kalıp plakalarının soğutulmasında kullanılan soğutma kanallarının iki tip bağlantı yöntemi söz konusudur (Şekil 3.21). Seri bağlantıda tek girişten giren su çıkışa kadar tek akış yolunu takip etmektedir. Seri bağlantı tipinde tek akış hattı olduğu için soğutma kanalının tüm bölgelerinde eşit debi sağlanabileceğinden akış hızı kolaylıkla kontrol edilebilir. Buna karşın bağlantı tipinde toplam akış yolunun uzaması nedeniyle basınç kayıpları artmaktadır. Ayrıca soğutma suyu nispeten daha uzun bir yol boyunca dolaşırken ısınmasından dolayı giriş ve çıkış sıcaklıklarının farklı olmasına neden olacaktır. Bu durumun düzgün sıcaklık dağılımını olumsu etkileyecektir.

Paralel bağlantı tipinde tek girişten giren su, kanallar içerisinde birden fazla akış dallarına ayrılmaktadır. Paralel bağlantı tipinde akış boyunca basınç kayıpları daha düşüktür. Farklı akış dallarından geçen suyun sıcaklığı giriş sıcaklığından çok farklı olmasa da soğutma suyu en düşük akış direncini bulunduğu yolu tercih edeceğinden tüm akış dallarındaki debi ve hızların kontrol edilmesi zordur.



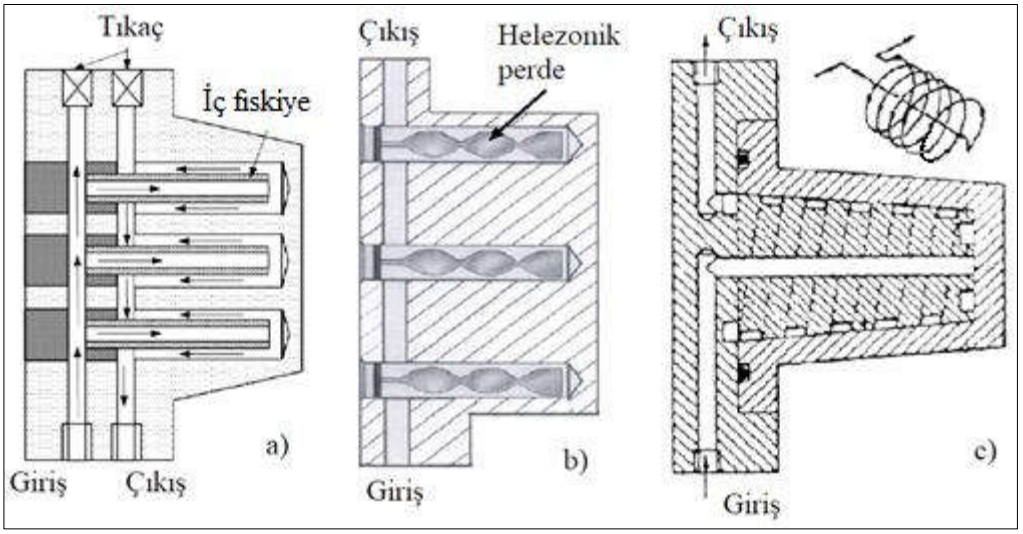
Şekil 3.22. Seri ve Paralel bağlantı tipleri

Çıkıntıların çok uzun olmadığı erkek plakalar ve dişi plakaların soğutulması kalıp plaklarına delinen deliklerle elde edilen soğutma kanalları ile yapılırken bu yöntem uzun çıkıntılı kalıp çekirdekleri ve maçaların soğutulması için uygun değildir. Erkek çekirdek maçaların iç bölgelerine doğru uzanan soğutma kanalları ile soğutma verimliliği artırılmaktadır. Şekil 3.23'de erkek çekirdeklerin soğutulması için tasarlanan soğutma kanalları görülmektedir. Şekil 3.23 (a)'da açılı delikler ile kalıp çekirdeğinin içine doğru uzanan kanallar oluşturulmuştur. Bu kanal tipinde soğutulması gereken yüzeylere yeterince yaklaşılamadığı görülmektedir. Şekil 3.23 (b)'de oluşturulan kanal tasarımında çekirdek içine doğru uzanan delik içerisine bir bölme perdesi yerleştirilerek gidiş dönüş hatları oluşturulmuştur. Bu tasarım tipinde soğutma yüzeylerine daha iyi yaklaşılmış ancak oluşan akış bölmelerinde hızların kontrolü zordur. Şekil 3.23 (c)'de ise kalıp boşluğu yüzeyinden delme işlemi uygulanmıştır. Bu yöntemin kalıp yüzeyinde ek bir düzeltme işlemi gerektirme bir dezavantaj olarak ön plana çıkmaktadır.



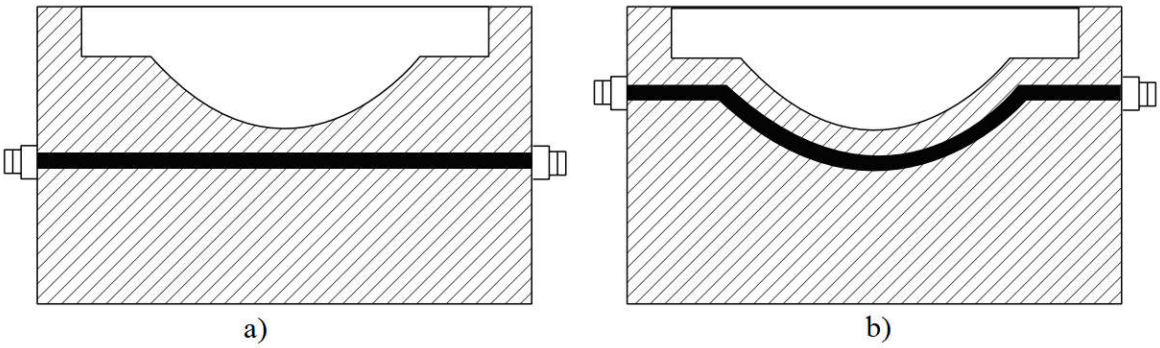
Şekil 3.23. a) Açılı delinmiş kanallar, b) Bölmeli (baffle) kanal, c) Kalıp yüzeyinden delinen kanal

Şekil 3.24'da erkek kalıp çekirdeklerinin soğutulması amacıyla tasarlanmış üç farklı yöntem görülmektedir. Şekil 3.24 (a)'da kalıp çekirdeğine açılan delik içine bir fıskiye yerleştirilmiştir. Fıskiye içerisinden gelen soğutma suyu fıskiye çevresinden tekrar geri dönmektedir. Bu yöntemin tasarımında fıskiye borusunun iç kesit alanı ile dış kesit alanı eşit olacak şekilde boyutlandırılır. Fıskiyeli tasarımda tüm kesit bölgelerinde akışkan hızını kontrol etmenin zorluğu yanında yer çekiminin etkisi ile bazı bölgelerde hava boşluğu kalma ihtimali bulunmaktadır. Şekil 3.24 (b)'de soğutma deliği helezonik bir perde ile bölünerek gidiş dönüş hatları oluşturulmuştur. Akış yolunun uzaması nedeniyle düz perdeye nispeten daha iyi soğuma sağlar. Şekil 3.24 (c) kalıp çekirdeğine üzerinde helis bir kanal bulunan lokma yerleştirilmiştir. Soğutulacak yüzeye daha uyumlu ve sabit akış kesitine sahip bir soğutma hattı oluşturulmuştur. Bu kanal tipinde tüm akış yolu boyunca hızların kontrol edilmesi daha kolaydır.



Şekil 3.24. a) İç fıskiyeli (bubbler) kanal, b) Helezonik bölmeli (baffle) kanal, c) Lokmalı helis kanal

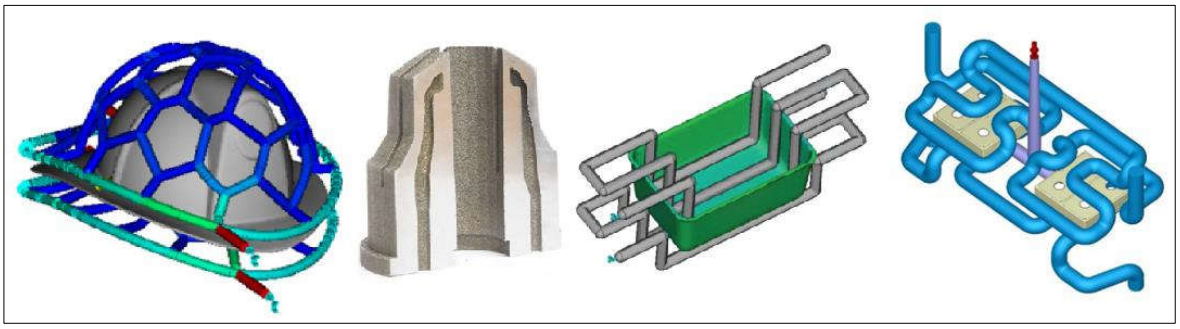
Geleneksel olarak kullanılan doğrusal soğutma kanalları, doğrusal kalıp boşluğu yüzeyleri için uygun olsa da eğimli yüzeylere sahip kalıp boşluğu yüzeylerinin dengeli soğutulması tam olarak sağlayamamaktadır. Kalıp boşluğu ile soğutma kanalı arasındaki mesafenin bölgelere göre değişiyor olması ısı aktarımının da farklı bölgelerde farklı olmasına neden olmaktadır (Şekil 3.25). Soğutma veriminin artırılması için soğutma kanallarının kalıp boşluğu yüzeyini uyumlu olarak takip ettiği şekil uyumlu soğutma kanalları tercih edilen bir başka kanal tipidir [35].



Şekil 3.25. a) Doğrusal soğutma kanalı, b) Şekil uyumlu soğutma kanalı

Şekil uyumlu soğutma kanalları ile kalıp boşluğu arasındaki mesafe düzgün bir şekilde korunduğu için tüm bölgelerdeki ısı aktarımı eşit olmakta ve kalıp yüzeyinde daha düzgün

bir sıcaklık dağılımı elde edilebilmektedir. Gelişen imalat teknolojileri sayesinde karmaşık formlu parçalar için şekil uyumlu soğutma kanallarının üretimi mümkündür. Şekil 3.26'de şekil uyumlu soğutma kanalları ile yapılmış çeşit uygulama örnekleri görülmektedir.



Şekil 3.26. Şekil uyumlu soğutma uygulamaları [35, 53, 61, 107]

3.4. Soğutma Süresi Hesabı

Zamandan bağımsız olarak plastik malzeme üzerindeki ısının kalıba iletimini ifade eden denklem Eşitlik 3.1'de gösterildiği gibidir.

$$\dot{Q}_{iletim} = k\frac{dT}{dx} \tag{3.1}$$

$\dot{Q}_{iletim}$, ısı aktarım oranını; k, ısıl iletkenliği; dT, sıcaklık değişimini ve x, mesafe değişimini göstermektedir. Eşitliğe göre kalıp malzemesinin ısıl iletkenliğini iyileştirmek ve soğutma kanallarının kalıp boşluğuna olan mesafesini kısaltmak plastik malzemenin soğumasını hızlandıracaktır.

Kalıp içine dolan plastik malzemenin soğuyarak zamanla sıcaklığının değişmesi kararsız bir durum olacağından bu durum zamana bağlı ve tek boyutlu Fourier soğuma denklemi ile modellenebilir (Eşitlik 3.2).

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \tag{3.2}$$

t, zamanı ifade eder. α, ısıl yayınımı göstermekte olup Eşitlik 3.3'te ifade edilmiştir.

$$\alpha = \frac{k_m}{\rho_m c_P} \tag{3.3}$$

Plastik malzemenin yoğunluğu, ρ_m ; özgül ısısı, C_p ve ısıl iletkenliği, k_m ile gösterilmiştir.

Eşitlik 3.2'deki diferansiyel denklemin analitik çözümü Eşitlik 3.4'de belirtildiği gibidir.

$$T_{x=0}(t) = T_{su} + (T_{ergiyik} - T_{su}) \sum_{m=0}^{\infty} \frac{(-1)^m}{2m+1} e^{-\frac{\pi^2(2m+1)^2}{h^2}t} \tag{3.4}$$

Eşitlik 3.4'te h, plastik parça kalınlığını göstermektedir. Zamanı hesaplanacak sıcaklık, plastik ürünün kalıptan çıkarılması için uygun olan çıkarma sıcaklığıdır. Bu sıcaklıkta plastik malzeme kendi şeklini koruyabilecek seviyede katılaşmıştır. Çıkarma sıcaklığı her plastik malzeme için özel olup ASTM D648 standart testlerinden ısıl eğilme sıcaklığı ve yük altında eğilme sıcaklığı testlerinin yapılması ile tespit edilebilir. Çıkarma sıcaklığına en kısa erişim süresinin tespiti için Eşitlik 3.4 yeniden düzenlenerek Eşitlik 3.5'deki şekline dönüşür.

$$t_s = \frac{h^2}{\pi^2 \alpha} ln\left(\frac{4}{\pi} \frac{T_{ergiyik} - T_{su}}{T_{çıkarma} - T_{su}}\right) \tag{3.5}$$

Bir plastik parçanın çıkarma sıcaklığına ulaşabilmesi gerekli minimum soğutma süresi Eşitlik 3.5 ile hesaplanabilir [91]. Bu hesaplama yönteminde kalıp yüzeyinin sıcaklığı sabit kabul edilmiş olsa da gerçekte ergiyik malzeme kalıp sıcaklığının yükselmesine neden olur. Bu da gerçek soğutma süresinin daha uzun olacağını göstermektedir. Daha doğru bir sonuç için ısı taşınım katsayısı dikkate alınmalıdır [108].

Plastik endüstrisinde soğutma süresinin pratik olarak hesaplanması için Eşitlik 3.6'da gösterilen denklem kullanılabilir [91].

$$t_s = 2{,}08h^2 \tag{3.6}$$

Plastik enjeksiyon kalıplarında gerçekleşen soğutma işlemi aslında iletim, taşınım ve ışınımdan oluşan bir ısı transferidir. Ergiyik plastiğin kalıba dolması ile kalıba gelen ısı iletim yolu ile kalıba transfer olmaktadır. Kalıptaki ısının büyük çoğunluğu soğutma sıvısı ile birlikte kalıptan uzaklaştırılmaktadır. Kalıba gelen ısının ihmal edilebilecek %5'lik kısmı iletim yolu ile plastik enjeksiyon makinesine, doğal taşınım ile havaya ve ışınım yolu ile çevreye aktarılmaktadır [11, 17]. Çevreye aktarılan ısı ihmal edilerek kalıptaki ısı dengesi Eşitlik 3.7'de belirtildiği gibi ifade edilmiştir. $\dot{Q}_{ergiyik}$, ergiyik malzeme ile kalıba giren ısı akısını, $\dot{Q}_{su}$, soğutma suyu ile kalıptan uzaklaştırılan ısı akısını temsil etmektedir.

$$\dot{Q}_{ergiyik} + \dot{Q}_{su} = 0 \tag{3.7}$$

Ergiyik malzeme ile kalıp içine giren ısı miktarı Eşitlik 3.8' belirtilen denklem ile bulunabilir [49, 58].

$$\dot{Q}_{ergiyik} = 10^{-3}[(T_{ergiyik} - T_{çıkarma})C_P]\rho_m \frac{h}{2} l \tag{3.8}$$

ρ_m, ergiyik malzemenin yoğunluğunu; l ise soğutma kanalının birim uzunluğunu göstermektedir.

Soğutma sistemi ile kalıptan uzaklaştırılan ısı akısı Eşitlik 3.9'de gösterilmiştir.

$$\dot{Q}_{su} = 10^{-3} t_s \left(\frac{1}{10^{-3} h_{su} \pi d} + \frac{1}{k_{st} S_e}\right)^{-1} (T_{kalıp} - T_{su}) \tag{3.9}$$

Suyun ısı taşınım katsayısı, h_{su} ile; kalıp çeliğinin ısı iletim katsayısı, k_{st} ile; kalıp sıcaklığı, $T_{kalıp}$ ile; soğutma suyunun sıcaklığı, T_{su} ile; soğutma süresi, t_s ile; kana çapı, d ile gösterilmiştir. S_e şekil faktörünü temsil etmektedir. Eşitlik 3.10'da kanal kesitinin şekil faktörünün hesaplandığı eşitlik gösterilmiştir.

$$S_e = \frac{2\pi}{\ln\left(\frac{2b \sinh\left(\frac{2\pi a}{b}\right)}{\pi d}\right)} \tag{3.10}$$

a, kalıp boşluğu ile soğutma kanalı arası mesafe; b, soğutma kanalları arası mesafeyi göstermektedir. Suyun ısı taşınım katsayısı, h_{su} Eşitlik 3.11'de ki gibi hesaplanmıştır.

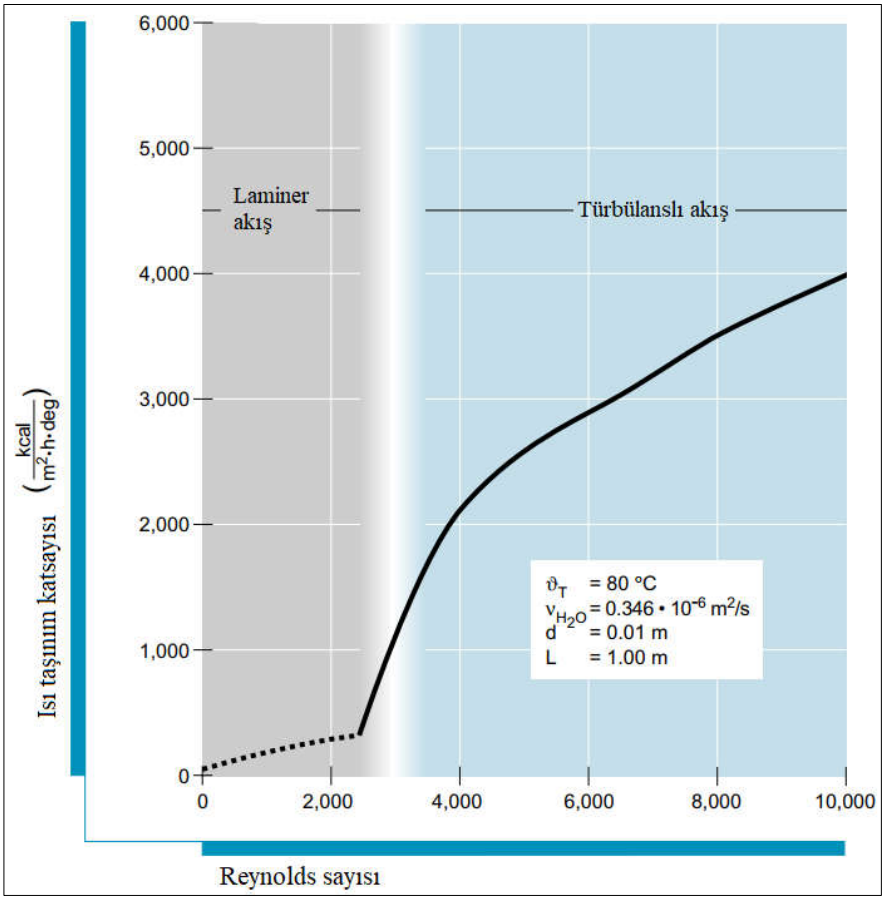
$$h_{su} = \frac{31{,}395}{d} Re^{0{,}8} \tag{3.11}$$

Re, Reynolds sayısını göstermektedir. Reynolds sayısı Eşitlik 3.12'de olduğu gibi ifade edilmiştir.

$$Re = u\frac{d}{v} \tag{3.12}$$

Soğutma suyunun hızı u ile kinematik viskozitesi v ile gösterilmiştir.

Şekil 3.27'de ısı taşınım katsayısının Reynolds sayısı ile değişimi görülmektedir. Soğutma kanalı içindeki akışkan hızının artması ile akış türbülanslı hale geçmiştir. Reynolds sayısının yaklaşık olarak 2400 seviyesinin üzerine çıkması ısı taşınım katsayısını artırmıştır. Kalıbın soğutulmasında ısı aktarımının iyileştirilmesi için soğutma kanalı içinde türbülanslı akışın sağlanacağı uygun hız için yeterli debi sağlanmalıdır.



Şekil 3.27. Isı taşınım katsayısının Reynolds sayısına göre değişimi [109]

Eşitlik 3.8 ile Eşitlik 3.9 eşitlenip t_s'nin yalnız bırakılması ile soğutma süresini ifade eden eşitlik, Eşitlik 3.13'de gösterilmiştir [49, 58, 110].

$$t_s = \rho_m \frac{h}{2} l C_P \left(\frac{1}{10^{-3} h_{su} \pi d} + \frac{1}{k_{st} S_e} \right) \left(\frac{T_{ergiyik} - T_{çıkarma}}{T_{kalıp} - T_{su}} \right) \tag{3.13}$$

3.5. Fırında Sert Lehimleme

3.5.1. Sert lehimleme

Metal parçaların sökülemez birleştirme yöntemlerinden birisi de sert lehimleme yöntemidir. Birleştirilecek iki yada daha çok parçanın malzeme yapısını değiştirmeden, 450°C'nin üzerinde bir dolgu metali ile metalürjik bağ kurarak yapılan birleştirme işlemine sert lehimleme denilmektedir [111]. Yumuşak lehimleme ile arasındaki fark 450°C sınırıdır.

Kaynaktan farklı olarak birleştirme esnasında birleştirilen malzemelerin katı olarak kalmasıdır. Genel olarak işlem sıcaklığı 540-160 °C arasında değişmektedir. Üfleçle lehimleme, fırında lehimleme, endüksiyonla lehimleme, elektrik direnci ile lehimleme ve daldırma yöntemi ile lehimleme gibi farklı teknikleri bulunmaktadır [112].

Sert lehimleme ile birleştirmenin sağladığı avantajlar aşağıdaki gibi sıralanabilir [113].
- Kompleks ve çok bileşenli montajların ekonomik imalatı
- Baz metaline yaklaşan ortak sıcaklık kabiliyeti
- Mükemmel gerilim dağılımı ve ısı transfer özellikleri
- Döküm malzemelerin ferforje metallere birleştirilmesi
- Farklı tip metalleri birleştirme kabiliyeti
- Boyutlarda geniş bir şekilde değişen metal kalınlıkları birleştirme kabiliyeti
- Metallerin özel metalürjik karakteristiklerini koruma kabiliyeti
- Hassas üretim toleransı için kabiliyet
- Güvenilir sızdırmazlık sağlaması

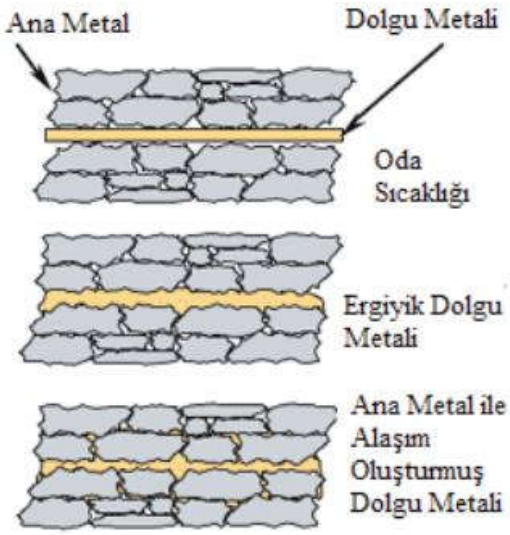
Sert lehimleme, sağladığı avantajlar nedeniyle kullanım alanı oldukça yaygındır. Otomotiv, havacılık, kuyumculuk, madencilik, müzik aletleri imalatı, ısı değiştiricileri imalatı ve türbin imalatı gibi pek çok alanda kullanılmaktadır.

3.5.2. Sert lehimlemede işlem parametreleri

Sert lehimleme işleminde sağlıklı bir birleştirmenin yapılabilmesi için kontrol altında tutulması gereken parametreler bulunmaktadır. Bunlar; lehimleme sıcaklığı, lehimleme aralığı, ıslatma kabiliyeti ve zaman olarak sayılabilir.

Sıcaklık

Sert lehimleme işlemi iki ayrı parçanın bir dolgu malzemesini ergitilerek birleştirilmesi prensibine dayanmaktadır (Şekil 3.28). Bu nedenle dolgu malzemesi, ergiyerek birleştirilecek malzemelere nüfuz edeceği uygun sıcaklık sağlanmalıdır. Birleştirme sürecinde hem birleşecek parçalar hem de dolgu malzemesi ısınır.



Şekil 3.28. Lehim oluşum mekanizması [114]

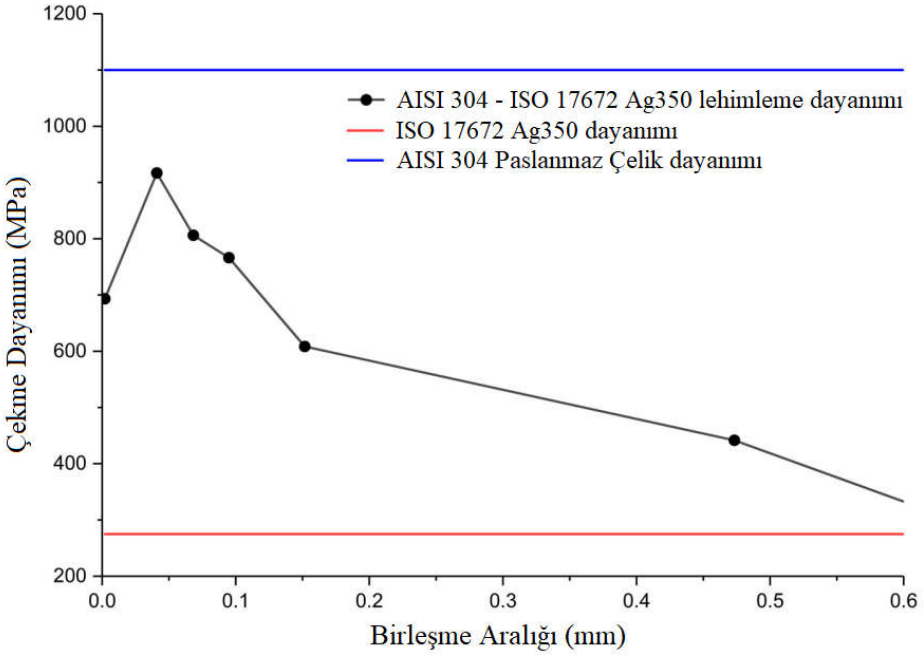
Fırında sert lehimleme için bakır, nikel ve gümüş esaslı pasta ya da püskürtülebilir sıvı formunda dolgu malzemeleri kullanılmaktadır. Pasta, bir çözücü içindeki lehim alaşımı tozunun bağlayıcı süspansiyon karışımıdır ve kolay bulunma ve düşük maliyet gibi sebeplerden dolayı yaygın bir şekilde kullanılmaktadır [115]. Sert lehimlemede seçilecek işlem sıcaklığı dolgu malzemesinin ergime sıcaklığının (likidüs) üstünde birleştirilecek malzemelerin tamamen katı oldukları solidüs sıcaklığının altında bir değer seçilir. Çizelge 3.4'de bazı metal parçaların lehimle birleştirilmesi için kullanılacak dolgu malzemeleri ve çalışma sıcaklıkları gösterilmiştir.

Çizelge 3.4. Bazı metaller için ilave dolgu metalleri ve lehimleme sıcaklıkları [116]

Lehimlenecek Ana Metal	AWS'ye Göre İlave Metal Dolgu Çeşidi	İlave Dolgu Metalinin		Lehimleme Sıcaklık Aralığı ℃
		Solüdüs Sıcaklığı ℃	Likidüs Sıcaklığı ℃	
Düşük Alaşımlı Çelik	B-Ag-1	607	618	618-760
	B-Ag-1a	629	635	635-760
	B-Ag-3	9632	688	688-817
Paslanmaz Çelik	B-Ni-1	977	1038	1066-1204
	B-Ni-2	971	999	1010-1177
Bakır Alaşımları	BCuP-2	710	793	793-843
	BCuP-3	643	813	813-816

Lehimleme aralığı

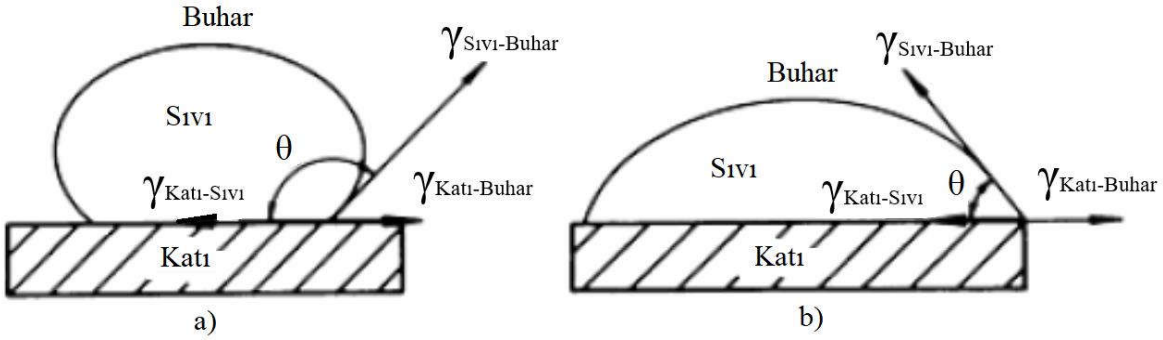
Birleştirilecek yüzeyler arasında bulunan mesafe birleşme dayanımı açısından kritik bir öneme sahiptir. Lehimleme aralığı gerekenden küçük olması durumunda dolgu malzemesi yeteri kadar nüfuz edemeyecektir. Aralık miktarının gerekenden büyük olması durumunda birleşme bölgesine gelen yük sadece dolgu malzemesi üzerine binerken ana malzemenin yükü dengelemesi sınırlı düzeyde kalacaktır [116]. Bu nedenle lehimleme aralığı uygun değerde seçilmelidir. Şekil 3.29'da lehimleme aralığının birleştirme dayanımına etkisi gösterilmiştir.



Şekil 3.29. Lehimleme aralığı-birleştirme dayanımı ilişkisi [117]

Islatma kabiliyeti

Lehimleme aralığının uygun seçilmesi, ergiyik dolgu malzemesinin kapiler etki ile birleştirme aralığını doldurmasını sağlar. Birleştirilecek parça yüzeylerinin ergiyik dolgu malzemesi ile iyi ıslatılabilmesi birleştirme mukavemeti için kritik bir durumdur. Bir sıvının katı bir yüzey üzerindeki ıslatma kabiliyeti yüzey üzerindeki damlacığın temas açısına (θ) bağlıdır (Şekil 3.30).

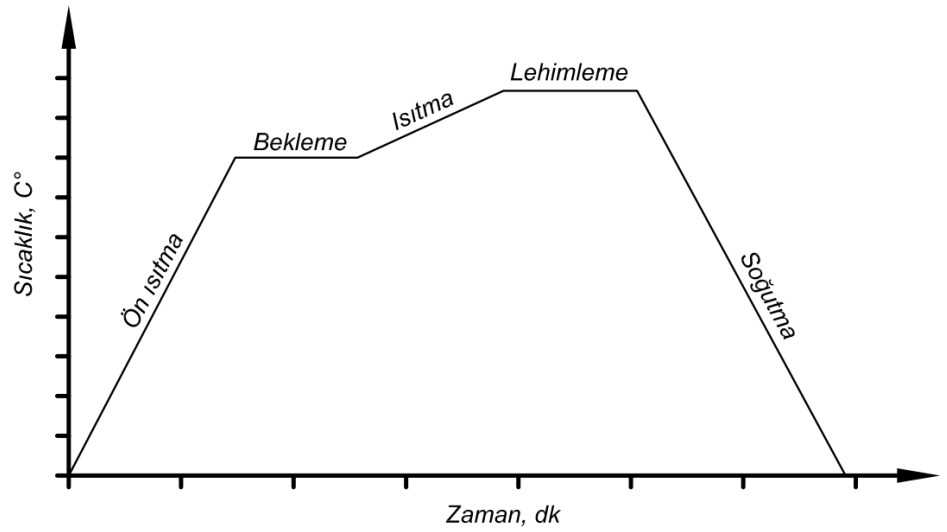


Şekil 3.30. Katı yüzey üzerindeki damlacığın temas açısı, a) θ<90°, b) θ>90° [117]

Temas açısının 90°'den büyük olması damlacığın katı yüzeyi üzerinde top halinde kalmasına neden olurken, temas açısının 90°'den küçük olması damlacığım yüzeye dağılarak yapışmasını sağlayacaktır. Islamayı etkileyen parametre yüzey enerjilerinin birbirine oranıdır. Temas açısının 90°'den küçük olabilmesi için, katı-buhar yüzey enerjisinin katı sıvı yüzey enerjisinden daha büyük olması gerektiğini göstermektedir. Örneğin; kurşun, demir ile alaşım oluşturmadığından ıslatamayacaktır ve yüzeyde topak halinde birikecektir. Buna karşılık kalay, demir ile alaşım oluşturabilmektedir. Bu yüzden ergiyik haldeki kalay-kurşun çözeltisi demiri ıslatabilir. Yüzey temizliği de ıslanmayı doğrudan etkilemektedir. Yüzeyde bulunan oksit tabakası, kirlilik, yağ tabakası ve diğer kontaminantlar dolgu malzemesi ile ana metal arasındaki teması keseceklerinden ıslanma gerçekleşmeyecektir [117].

Zaman

Lehimleme işlemi Şekil 3.31'da gösterildiği gibi ön ısıtma, bekleme ısıtma, lehimleme ve soğutma aşamalarından oluşur.



Şekil 3.31. Sert lehimlemede zaman-sıcaklık çevrimi [115, 118]

Ön ısıtma ve bekleme: Bu safhada parçalar dolgu malzemesinin erime sıcaklığına ulaşmayan bir sıcaklığa kadar ısıtılır. Parçaların tüm bölgelerinin homojen bir sıcaklığa ulaşması için beklenir. Bekleme süresi ısıtma kütlesine bağlı olarak değişir.

Isıtma: Parçalar hızlı, homojen ve ısıl gerilim oluşmayacak şekilde lehimleme sıcaklığına kadar ısıtılır.

Lehimleme: Bu sürede ergiyik dolgu malzemesinin kapiler etki ile birleştirme aralığına yayılması için yeterli zaman aralığıdır. Genel olarak 1dk yeterli olmaktadır. Sert lehimleme işleminde dolgu malzemesi birleştirmesi yapılan ana malzemeye difüzyon olur. Dolgu malzemesi ile ana malzemenin birbiri içinde çözünmesi zamana bağlı olarak değişir. Difüzyon derinliğinin belirlenmesinde tutma zamanı etkilidir. Bu sürenin aşırı uzaması kimyasal değişim, tane büyümesi ve kristal yapının bozulması gibi istenmeyen durumlara neden olabilir.

Soğutma: Dolgu malzemesinin problemsiz olarak katılaşması için koruyucu atmosfer altında kontrollü bir soğutma yapılır [115].

3.5.3. Fırında sert lehimleme

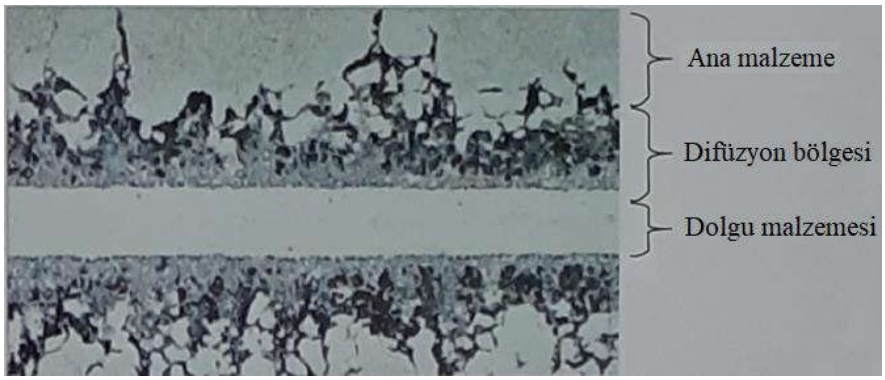
Fırında sert lehimlemenin en yaygın şekillerinden biri vakum fırınında gerçekleştirileni olup Vakum Sert Lehimleme olarak anılır (Resim 3.1). Birleştirilecek olan parçalar temizlenir ve birleştirilecek olan yüzeylere sert lehimleme alaşımı uygulanıp aparatlanarak fırına yüklenir.



Resim 3.1. Sert lehimleme işlemi için atmosfer kontrollü ısıl işlem fırını [119]

Oksitlenmeyi ortadan kaldırmak için birleştirilecek parçalar ve bütün aparat, vakum yapıldıktan sonra lehimleme sıcaklığına getirilir. Vakuma ek olarak koruyucu ya da reaktif atmosfer oluşturmak için azot, argon ve helyum; indirgeyici olarak da hidrojen kullanılır.

Sert lehimleme işleminde, ana parçalar difüzyon ve alaşımlandırma yöntemi ile birleştirildiğinden birleşme bölgelerindeki çekme dayanımı oldukça yüksektir. Resim 3.2'de sert lehimleme ile yapılmış bir birleştirme bölgesinin mikro yapısı görülmektedir.



Resim 3.2. Sert lehimle birleştirme bölgesinde mikro yapı [119]

Vakumlu sert lehimleme işleminde uygulama adımları aşağıda belirtilmiştir.

- Birleştirilecek parçaların birleştirme yüzeylerinin boşluksuz teması için düzlemsel olarak işlenmesi
- Birleştirme yüzeylerinin oksidasyon, yağ ve kirlerden arındırılması için mekanik ve kimyasal temizlik
- Birleştirilecek yüzeylere birleştirilen parçaların malzemesine uygun olan lehim pastasının yayılması
- Birleştirme yüzeylerinin uygun temas aralığı ile konumlandırılması
- Fırın ortamına alma
- Atmosferin vakumlanması
- Koruyucu atmosferin oluşturulması
- Birleştirme malzemesinin ergime sıcaklığına getirme
- Ergime sıcaklığında tutma
- Soğutma

3.5.4. Katmanlı üretim ve sert lehimleme

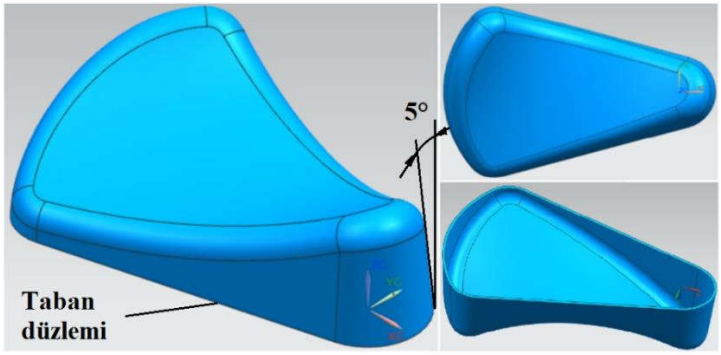
Katmanlı üretim yöntemi istiflenmiş bir dizi levha malzemenin birbirine bağlanarak ya da kenetlenerek ürün oluşturulması temeline dayanır. Sac metal kalıplama, vakum kalıplama, enjeksiyon kalıplama, ekstrüzyon kalıplama transfer kalıplama gibi pek çok üretim yönteminde katmanlı üretim tekniği ile üretim takımları elde edilebilir. Katmanlı üretimde katmanların birleştirilmesi için yapıştırma, difüzyon kaynağı, kenar kaynağı cıvatalı birleştirme gibi yöntemler kullanılmaktadır [120].

Plastik enjeksiyon kalıplamada şekil uyumlu soğutma kanallarının katmalı üretim tekniği ile üretimi mümkündür. Plastik enjeksiyon kalıplamada kalıp ömrü gereksinimleri için sıcak iş takım çelikleri kullanılmaktadır. Sert lehimleme ile birleştirme bölgelerinde kalıp malzemesinin çekme dayanımına yakın bir dayanım elde edilebilmektedir. Katman plakalarının sert lehimleme yöntemi ile birleştirilmesi mukavemet ve sızdırmazlık açısından elverişlidir [117, 121, 122].

4. MATERYAL VE METOT

4.1. Plastik Parça Tasarımı

Deneysel çalışma için, Şekil 4.1'de görülen düz soğutma kanallarının uyumlu bir şekilde takip edemeyeceği eğimli yüzeylerden oluşan geometriye sahip bir plastik parça tasarımı yapılmıştır. Parça boyutları kabaca 149×94×41 mm boyutunda bir dikdörtgen prizma içine sığmaktadır. Cidar kalınlığı tüm bölgelerde eşittir ve kalınlık değeri 3,5 mm'dir. Parçanın kalıptan kolay çıması için yan duvarlar taban düzleminden itibaren 5° açılandırılmıştır.



Şekil 4.1. Tasarlanan plastik parça

Plastik parça malzemesi ABS (Akrilonitril Butadien Stiren) olarak seçilmiştir. Bir termoplastik çeşidi olan ABS; darbeye ve sıcaklığa dayanıklı, iyi yüzey kalitesine sahiptir. Elektronik aletler, otomobil parçaları ve beyaz eşya alanında plastik parçaların imalatında kullanılır. ABS malzemesine ait genel fiziksel özellikleri Çizelge 4.1'de verilmiştir.

Çizelge 4.1. ABS malzemesinin fiziksel özellikleri [123]

Yoğunluk (Ergiyik)	930 kg/m^3
Isıl iletkenlik	0,19 W/m.K
Özgül ısı	2340 J/kg.K
Çekme oranı	%0,4-0,7
Ergiyik akış indeksi (220°C /10kg)	23 g/10min
Kurutma sıcaklığı	80 °C
Kalıplama sıcaklığı	210-240 °C
Kalıp sıcaklığı	40-70 °C
Vicat yumuşama sıcaklığı	94 °C
Kalıptan çıkarma sıcaklığı	90 °C

4.2. Şekil Uyumlu Soğutma Kanallarının Tasarımı

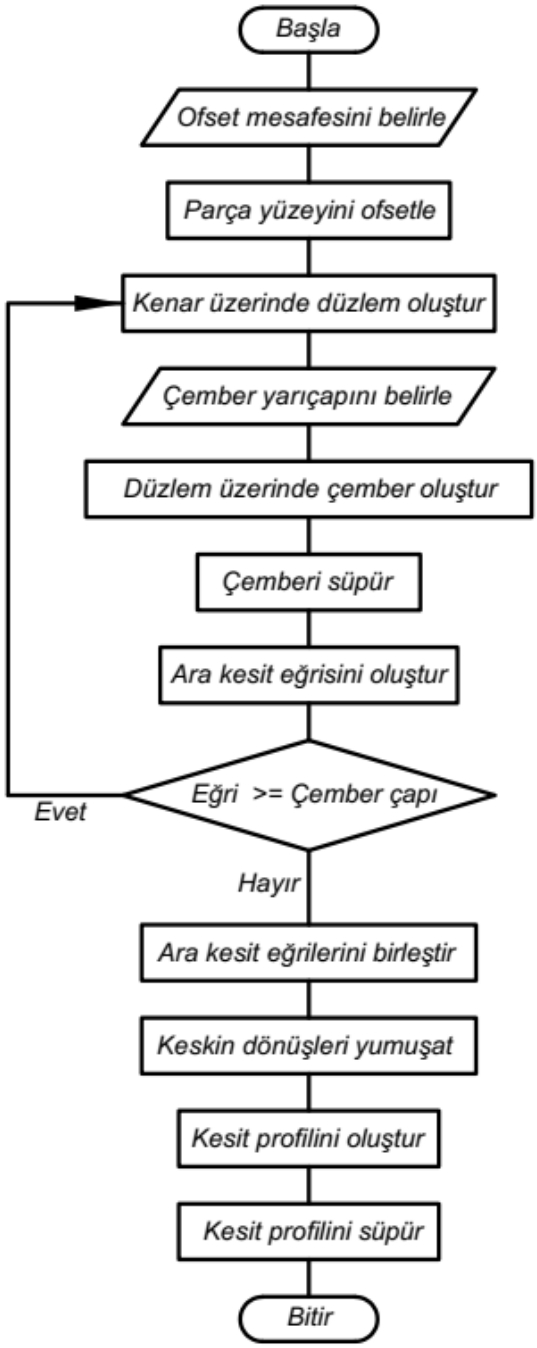
Plastik enjeksiyon kalıplamada kalıbın, eş sıcaklık dağılımı ve etkin bir şekilde soğutulabilmesi için soğutma kanallarının kalıp içerisinde en uygun biçimde konumlandırılması kritik öneme sahiptir. Soğutma kanallarının kalıp boşluğuna uzaklığı, ergiyik plastik malzeme üzerindeki ısının soğutma suyuna transfer hızı üzerinde önemli bir role sahiptir. Plastik parçanın tüm bölgelerinde eşit bir soğutma hızının sağlanabilmesi soğutma kanalı ile kalıp boşluğu arasındaki mesafenin sürekli olarak sabit tutulmasına bağlıdır. Soğutulmak istenen geometrinin şekline uygun bir soğutma sistemi ile yapılan soğutma şekil uyumlu soğutma olarak anılmaktadır. Şekil uyumlu soğutma kanallarında kanal kalıp boşluğu arası mesafenin sabit bir değerde tutulması gibi soğutma kanallarının birbirlerine olan mesafenin de sabit olarak korunması gerekmektedir. Soğutma kanallarının birbirlerine yaklaştığı bölgelerde soğuma hızlanırken kanallar arası mesafenin açılması o bölgedeki soğuma hızını düşürecektir. Bu sayede plastik parçanın tüm bölgelerini eşit sıklıkta saran soğutma kanalları oluşturulabilir.

Şekil uyumlu soğutma kanallarının tasarımı genellikle kalıp tasarımcılarının tecrübelerine dayanan manuel bir yöntem ile yapılmaktadır. Kanal tasarımı yükünün hem tasarımcıların üzerinden alınarak CAD yazılımları ile otomatik olarak yapılabilmesi hem de soğutma kanallarının etkinliğinin arttırılması için sistematik bir tasarım yöntemi geliştirilmiştir. Bu yöntemle eğimli yüzeylerden oluşan, karmaşık formlu plastik ürünler için şekil uyumlu soğutma kanallarının pratik olarak oluşturulması mümkündür.

4.2.1. Tasarım algoritması

Şekil uyumlu soğutma kanalları geliştirilen sistematik bir tasarım metodu kullanılarak tasarlanmıştır [69]. Plastik ürün geometrisine uyumlu soğutma kanallarının tasarımı algoritmik adımlardan oluşmaktadır. Kullanıcıdan alınan; geometri, kanal kalıp arası mesafe, kanallar arası mesafe ve kanal çapı verileri ile ürün geometrisine uyumlu soğutma kanalları elde edilmektedir. Tasarım algoritması şematik olarak Şekil 4.2'de gösterilmektedir. Parça yüzeyi ofsetlendikten sonra bu yüzey üzerinde kanal hatlarının oluşturulmasını sağlayan eğrilerin üretildiği bir döngü bulunmaktadır. Ofset yüzeyinin tamamen taranmasından sonra döngü sona ermekte ve elde edilen eğriler birleştirilmektedir. Sonrasında keskin dönüşler yumuşatılarak elde edilen hat, kesit profili ile kanala

dönüştürülmektedir. Plastik enjeksiyon kalıplamada ile üretim yönteminde plastik ürünlerin kalıplanabilmesi için belirli bir cidar kalınlığına sahip olan kabuk formunda olmalıdır. Tasarım prosedürü plastik parçanın her iki yüzeyi için de uygulanarak her iki kalıp yarımı için soğutma kanalları elde edilmektedir.



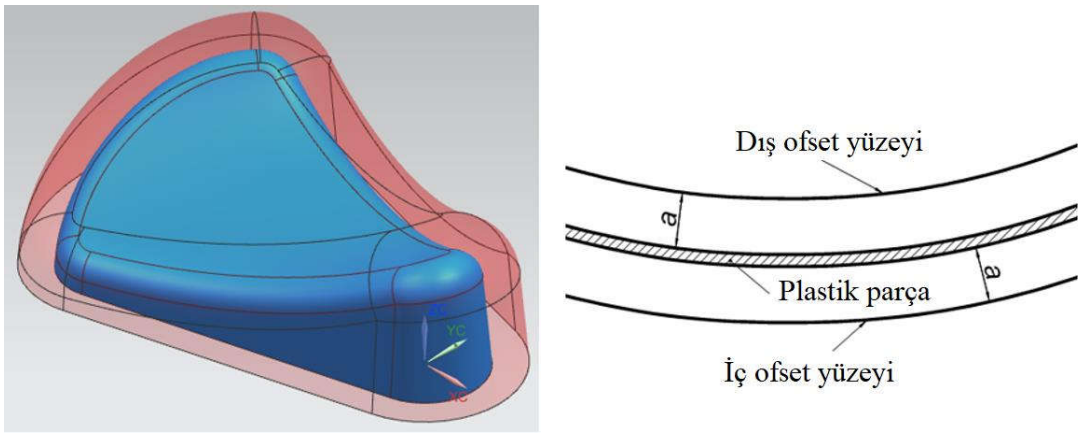
Şekil 4.2. Kanal tasarımı algoritmasının şematik gösterimi

4.2.2. Kanal tasarım prosedürü

Ofset mesafelerinin belirlenerek parça yüzeylerinin ofsetlenmesi

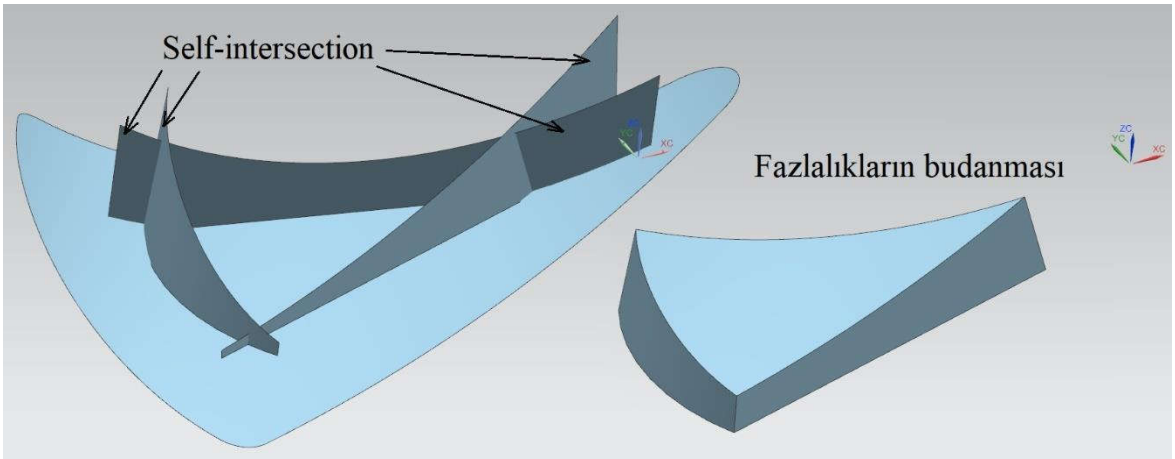
Kalıbın her iki yarımı için şekil uyumlu soğutma kanallarının tasarlanabilmesi için yüzeylerin ofsetlenme işlemi her iki tarafa da uygulanmış, iç ve dış ofset yüzeyleri elde edilmiştir. Yüzeyin ofsetleme mesafesi (a) soğutma kanalının ekseni ile kalıp boşluğu arasındaki mesafeyi belirlemektedir. Kanal boyutları plastik parçanın cidar kalınlığına göre belirlenmiştir [101] (Şekil 3.19). Kanal çapı 10 mm, kanalların birbirlerine uzaklıkları 25 mm ve kanal ile kalıp boşluğu arası mesafe 18 mm'dir.

Soğutma kanallarının kalıp boşluğuna sabit bir uzaklıktaki konumda yer alması için plastik parçanın hem iç hem de dış yüzeyleri belirlenen mesafe kadar ofsetlenmiştir. İki ayrı ofset yüzeyi oluşturulmuştur (Şekil 4.3). Şekil uyumlu soğutma kanalının merkezi bu yüzeyler üzerinde yer almaktadır.



Şekil 4.3. Ofsetlenerek elde edilen referans yüzeyler [69].

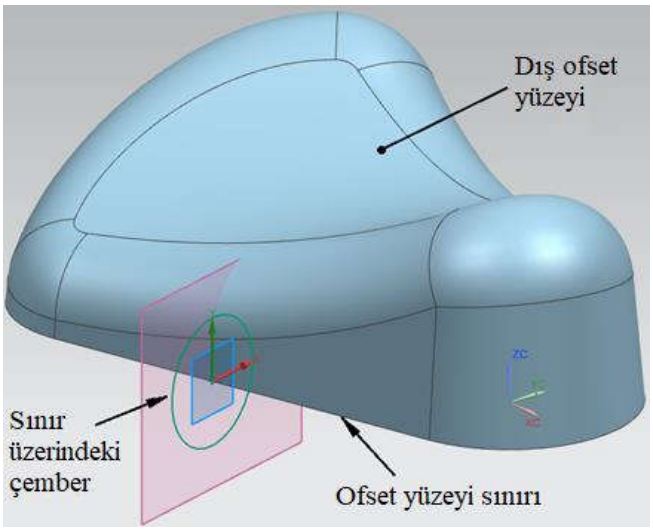
İç bükey yüzeylerin ofsetlenmesi sırasında oluşan parça yüzeylerin birbirini kestiği bölgeler (self-intersection) budanarak atılır [124]. İç içe geçen fazlalık yüzeylerin temizlenmesi ile plastik parçanın iç yüzeyine ofsetleme mesafesi uzaklığında ofset yüzeyi elde edilmiş olur (Şekil 4.4).



Şekil 4.4. İç yüzeyin ofsetlenmesiyle elde edilen referans yüzey

Kenar eğrisi üzerinde düzlem oluşturma ve çember yarıçapını belirleme

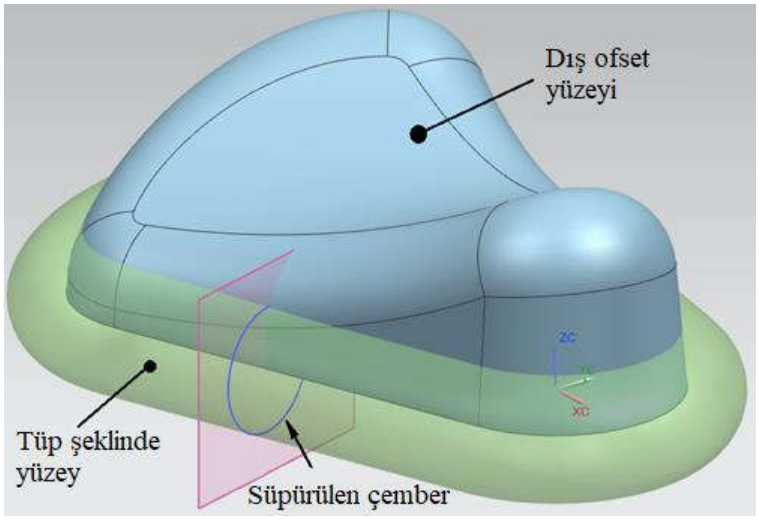
Soğutma kanallarının merkez hatlarının oluşturulması için ofset yüzeyi üzerinde yer alan ve yüzey sınırına sabit uzaklıktaki eğrilerin elde edilmesi gerekmektedir. Bunu için ofset yüzeyi sınırında bulunan ve bu sınıra dik bir çember oluşturulmuştur (Şekil 4.5). Çemberin yarıçapı soğutma kanallarının merkezi arasındaki mesafeyi belirlemek için cidar kalınlığı ve kanal çapına göre seçilmektedir (Şekil 3.19). Bu mesafe ile soğutulmak istene yüzey üzerindeki kanal sıklığı düzenlenmiş olur.



Şekil 4.5. Ofset kenarı üzerinde oluşturulan çember [69]

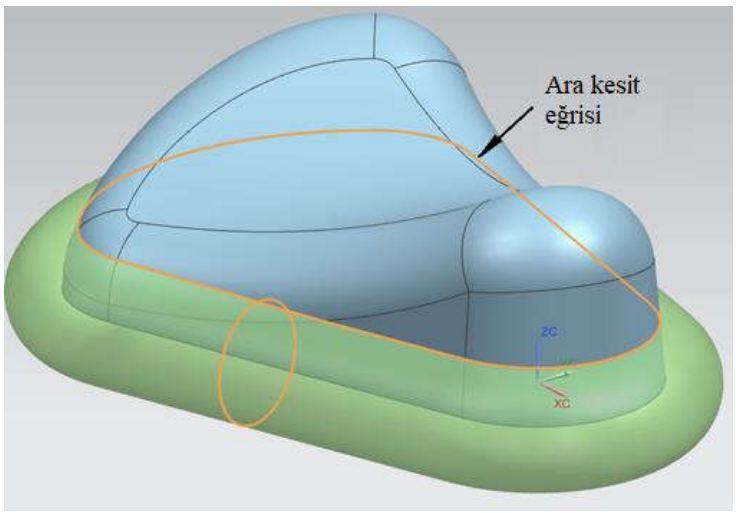
Çemberin süpürülmesi ve arakesit eğrisinin elde edilmesi

Merkezi, elde edilen ofset yüzeyinin dış sınırı üzerinde yer alan bir çember bu sınır boyunca süpürülerek tüp formunda bir yüzey oluşturulmuştur (Şekil 4.6). Elde edilen bu yüzey, ofset yüzeyinin sınır eğrisine sabit uzaklıkta ofset yüzeyi ile kesişmektedir.



Şekil 4.6. Tüp şeklindeki yüzeyin oluşumu [69]

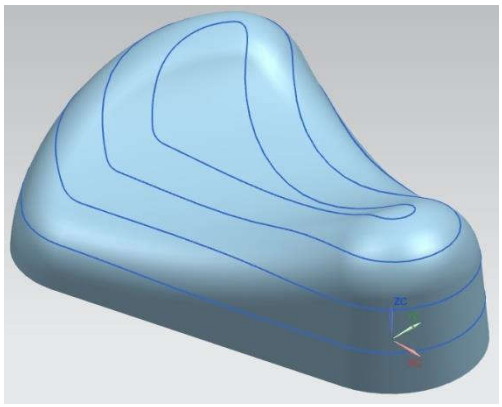
Elde edilen tüp şeklindeki yüzey ile dış ofset yüzeyinin arakesit eğrisi elde edilir (Şekil 4.7). Elde edilen eğriler soğutma hatlarının elde edilmesi için kullanılmaktadır.



Şekil 4.7. Ara kesit eğrisinin elde edilmesi [69]

Arakesit eğrisi oluşturma işleminin tekrarlanması

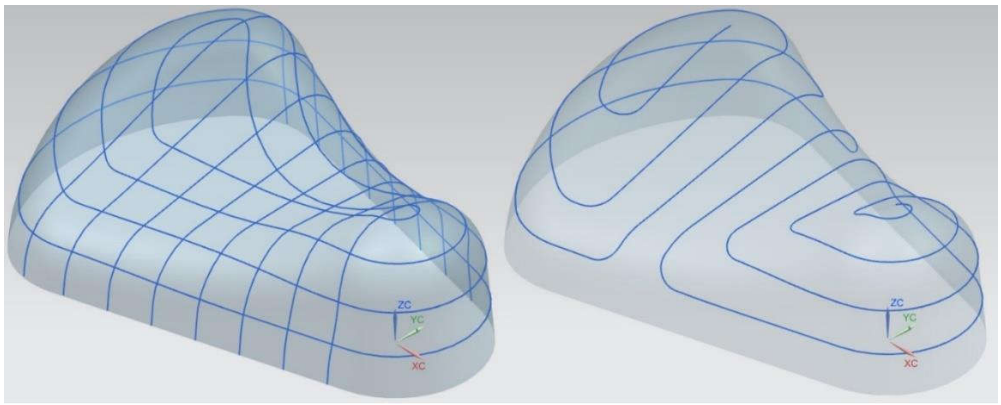
Elde edilen ara kesit eğrisi üzerinde çember oluşturulup süpürülerek yeni ara kesit eğrileri oluşturulur. Bu işlem oluşan arakesit eğrisi boyutlarının çember çapından küçük olması şartının sağlanmasına değin tekrar edilir. Ara kesit eğrisi oluşturma işleminin artarda tekrarlanmasıyla soğutma kanallarının ana hatları elde edilmiş olur edilir (Şekil 4.8).



Şekil 4.8. Ara kesit tekrarı ile eğrilerin elde edilmesi [69]

Arakesit eğrilerinin birleştirilmesi ve yumuşatma işlemi

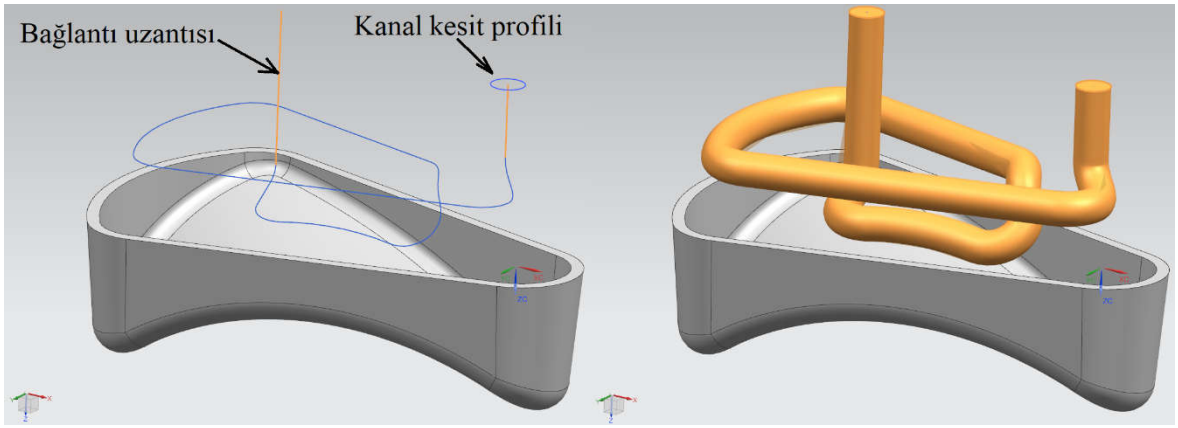
Ara kesit eğrilerinin tek bir devre oluşturacak şekilde birleştirilebilmesi için bağlantı eğrileri oluşturulur. Kullanıcı tarafından soğutma kanalının başlangıç noktası belirlenir. Bağlantı eğrileri arakesit eğrilerini çember yarıçapı aralığında bölen eğrilerdir. Elde edilmek istenen soğutma hattının şekline göre eğriler budanır ve birleşim köşeleri yuvarlatılır (Şekil 4.9).



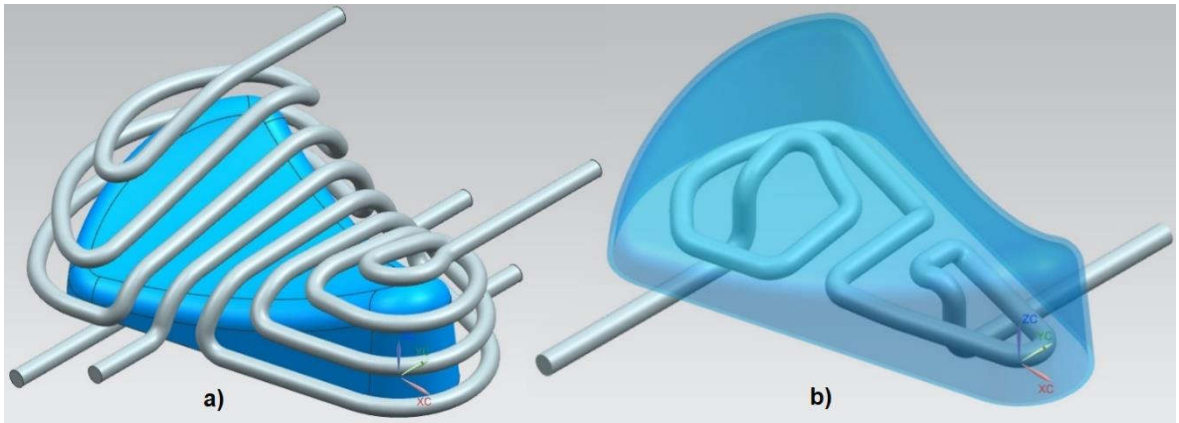
Şekil 4.9. Bağlantı eğrilerinin eklenmesi, kırpma ve yuvarlatma [69]

Kanal kesit profilinin kanal hattı boyunca süpürülmesi

Elde edilen hatlara bağlantı uzantıları eklenerek kanal kesit profili soğutma hattı boyunca süpürülerek soğutma kanalına dönüştürülür (Şekil 4.10 ve Şekil 4.11). Böylece kalıp boşluğunu sabit bir uzaklıkta, uyumlu bir şekilde takip eden soğutma kanalları elde edilmiş olur. Kalıbın her iki yarımı için aynı metot kullanılarak şekil uyumlu soğutma kanalları tasarlanabilir. Soğutma kanalının uzunluğuna göre gerekli yerlerde kanallar bölünerek soğutma suyunun giriş ve çıkış sıcaklıkları arasında oluşabilecek yüksek farklar giderilebilir.

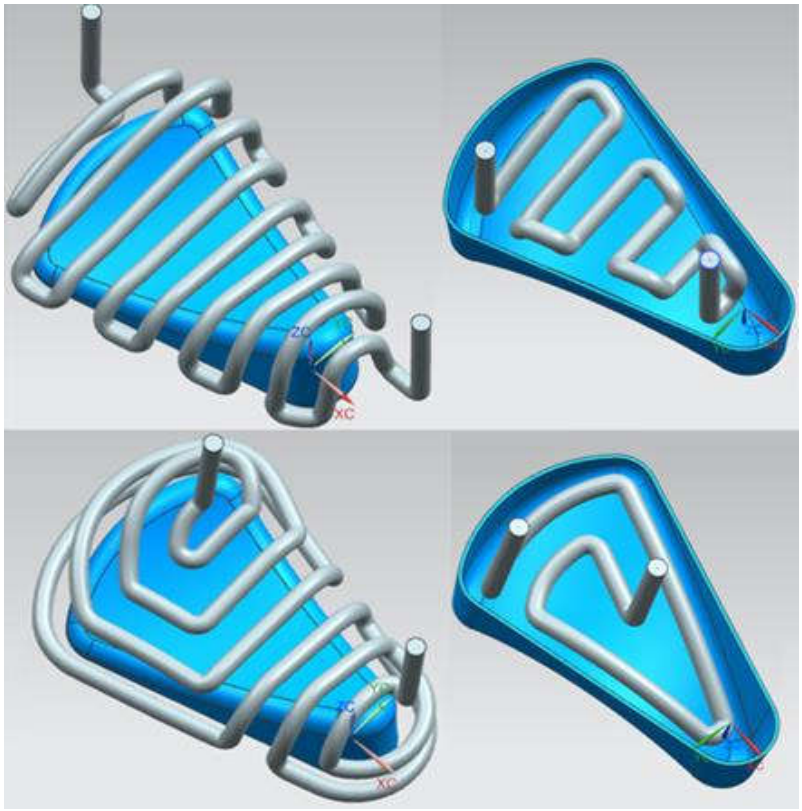


Şekil 4.10. Kanal kesit profilinin kanal hattı boyunca süpürülmesi



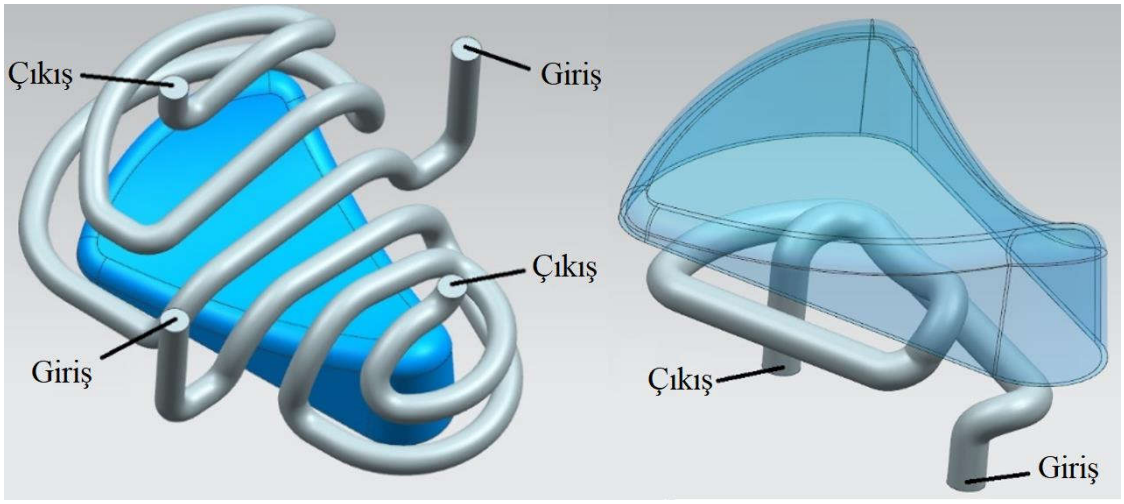
Şekil 4.11. a) Dişi ve b) Erkek kalıp yarımında soğutma kanallarının elde edilmesi [69]

Geliştirilen tasarım yöntemi ile spiral, zikzak ve paralel akış stratejilerine sahip şekil uyumlu soğutma kanallarının tasarlanması mümkündür. Şekil 4.12'da spiral ve zikzak soğutma kanalları görülmektedir.



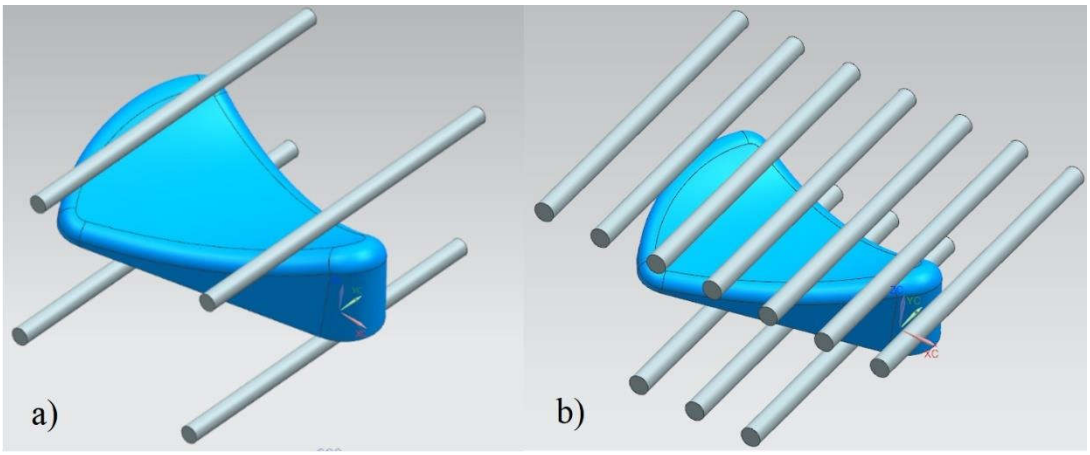
Şekil 4.12. Zikzak ve spiral şekil uyumlu soğutma kanalları

Kalıbın erkek ve dişi yarımı için oluşturulan kanalların giriş ve çıkışları belirlenir (Şekil 4.13). Kanal giriş ve çıkışlarının; iticiler, yolluk ve giriş gibi diğer kalıp elemanları ile çakışmaması için kalıp çekirdekleri üzerinde uygun bir şekilde konumlandırılır.



Şekil 4.13. Soğutma kanallarının su giriş ve çıkışları [84]

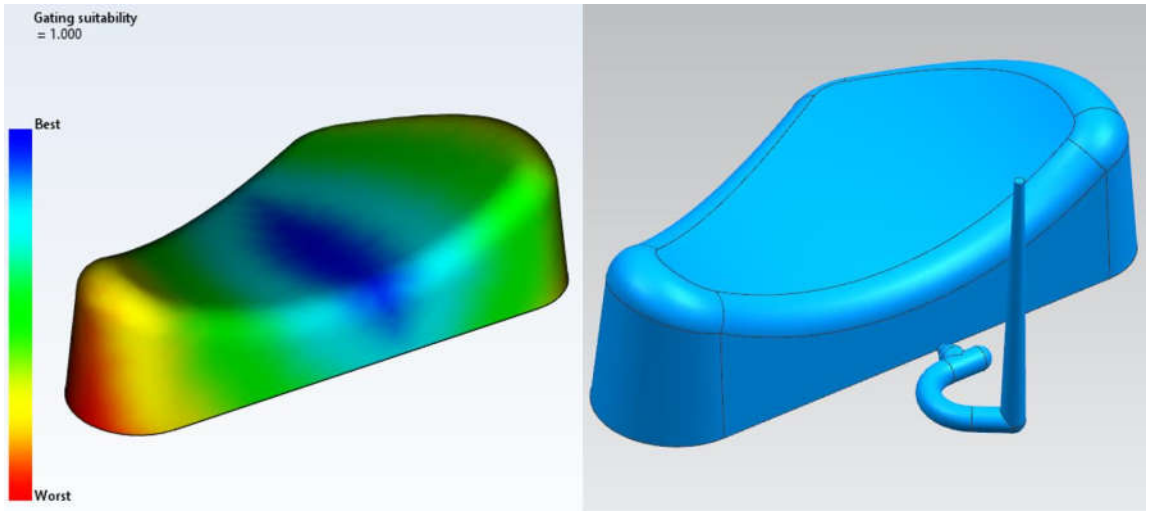
Şekil uyumlu ve doğrusal soğutma kanallarının etkilerinin karşılaştırılabilmesi için ayrıca doğrusal kanallar da tasarlanmıştır (Şekil 4.14). Endüstriyel olan ve daha düşük sayıdaki kanaldan oluşan ve şekil uyumlu kanal tasarımı ile eşit hacme sahip olmak üzere iki farklı doğrusal kanal tasarımı yapılmıştır. Şekil 4.14 a)'da gösterilen tasarım hem sayısal hem de deneysel olarak kullanılırken Şekil 4.14 b)'de gösterilen tasarım yalnızca sayısal analizde karşılaştırma amacıyla kullanılmıştır.



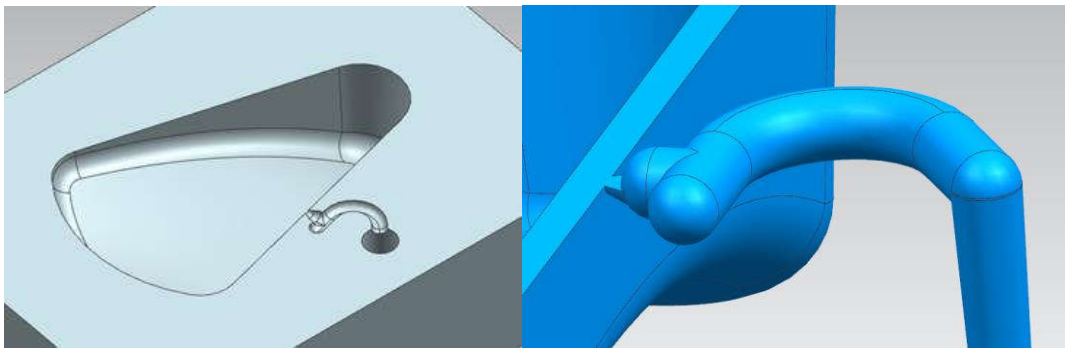
Şekil 4.14. Doğrusal soğutma kanalları, a) Endüstriyel, b) Eş hacimli

4.3. Giriş Yeri Analizi

Kalıp dolumunun hatasız bir şekilde gerçekleşebilmesi için plastik parça üzerindeki uygun giriş konumunu belirlemek amacıyla giriş yeri analizi yapılmıştır (Şekil 4.15). Moldflow ile elde edilen analiz sonucuna göre uygun giriş konumu belirlenerek tek gözlü kalıp için giriş, dağıtıcı ve yolluk tasarlanmıştır. Soğutma kanalları ile çakışmaması için kenar giriş tipi tercih edilmiştir. Dağıtıcı kanal kesiti dairesel olup 6 mm çapındadır. Giriş kesiti ise 1 mm yarıçaplı yarım dairedir (Şekil 4.16).



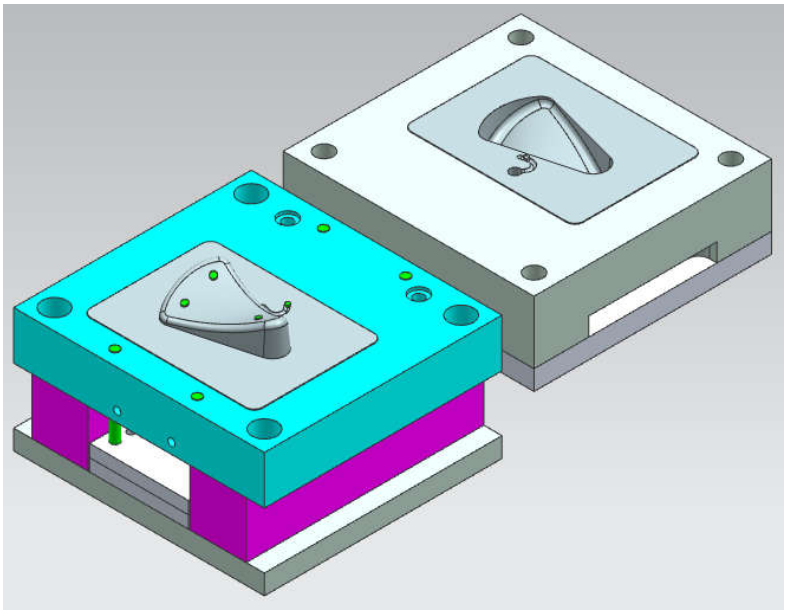
Şekil 4.15. Giriş yeri analizi ve yolluk tasarımı



Şekil 4.16. Giriş ve kanal kesitleri

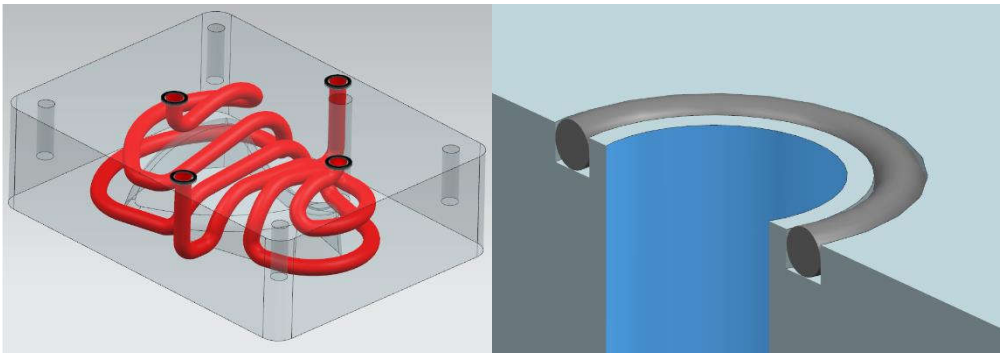
4.4. Kalıp Tasarımı

Plastik parçanın kalıplanması için tek gözlü enjeksiyon kalıbı tasarlanmıştır. Kalıp çekirdekleri değiştirilebilir olup hem şekil uyumlu hem de doğrusal kanalların bulunduğu kalıp çekirdekleri ayrı ayrı sökülüp takılabilmektedir. Plastik parçanın kalıptan çıkarılabilmesi için üç adet itici pim kullanılmıştır (Şekil 4.17).



Şekil 4.17. Tek gözlü plastik enjeksiyon kalıbı tasarımı

Kalıp çekirdeği ile kalıp plakası arasında sızdırmazlığın sağlanabilmesi için soğutma kanalı giriş ve çıkışlarına kanal açılarak conta yerleştirilmiştir (Şekil 4.18).

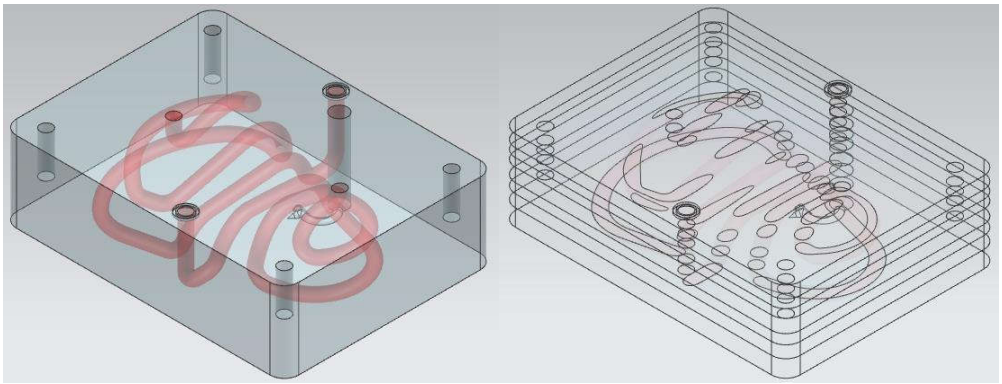


Şekil 4.18. Kanal girişlerine yerleştirilen conta

4.5. Kalıp Çekirdeklerinin Üretimi

Doğrusal soğutma kanalları çekirdek blokları matkap ile delinerek üretilebilmektedir. Şekil uyumlu soğutma kanallarının üretimi matkapla delerek oluşturulamayacağı için katmanlı üretim yöntemi tercih edilmiştir. Katmanlı üretim yönteminde elde edilmek istenen ve tek parça halinde üretimi mümkün olmayan model katmanlara ayrılır. Parçalar bağımsız olarak üretilir ve tekrar birleştirilerek asıl model elde edilir. Şekil uyumlu soğutma kanallarına

sahip kalıp çekirdekleri de katmanlı üretim yöntemi ile üretilmiştir. Bu amaçla kalıp çekirdeklerinin CAD modeli öncelikle katmanlara ayrılmıştır (Şekil 4.19).



Şekil 4.19. Kalıp çekirdeğinin CAD modeli ve katmanlara ayrılması

Kalıp çekirdekleri katmanlara ayrılırken soğutma kanallarının CNC freze tezgâhında işlenebilmesine olanak veren en büyük kalınlık tercih edilmiştir. Soğutma kanalı çapı 10 mm olduğu için plaka kalınlığı bu değerin altında olmalıdır. Plaka üzerindeki boşluklar ters açılar nedeni ile plakanın hem alt hem de üst yüzeyinden işlenmiştir. Plaka kalınlıklarının küçük seçilmesi işlemeyi kolaylaştırmasının yanında plaka sayısının artmasına neden olmaktadır. İş yükünün azaltılması için ara plaka kalınlıkları 8 mm olarak seçilmiştir. Plaka boyutları 236×176 mm'dir. Çizelge 4.2'de kalıp çekirdeklerinin ayrıldığı katman kalınlıkları gösterilmiştir.

Çizelge 4.2. Kalıp çekirdeklerinin ayrıldığı katman kalınlıkları

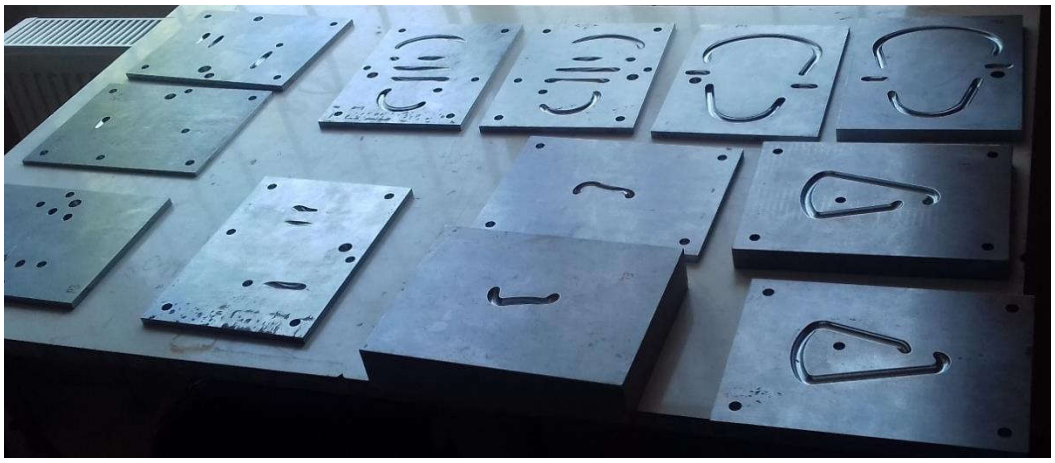
Çekirdek	Plaka Numarası	Katman kalınlığı
Dişi çekirdek	1. Plaka	14 mm
	2. Plaka	8 mm
	3. Plaka	8 mm
	4. Plaka	8 mm
	5. Plaka	8 mm
	6. Plaka	8 mm
	7. Plaka	8 mm
	8. Plaka	5 mm
Erkek çekirdek	1. Plaka	44 mm
	2. Plaka	8 mm
	3. Plaka	8 mm
	4. Plaka	22 mm

Çekirdek plakaları Ç1040 (St37) malzemeden üretilmiştir. Malzeme özellikleri Çizelge 4.3'de gösterilmiştir.

Çizelge 4.3. Çekirdek malzemesinin kimyasal bileşimi

Standard (ISO)	C	Mn	Si	P	S	N	Cr	Ni
1.0037	%0,17	%1,4	%0,3	%0,045	%0,009	-	-	-

Çekirdek plakalarının her iki yüzü de taşlanarak CNC freze tezgâhında işlenmesi için hazır hale getirilmiştir. Plakalar her iki yüzeyi sırasıyla üstte kalacak şekilde bağlanmış ve üzerindeki kanal boşlukları işlenerek oluşturulmuştur (Resim 4.1). Çekirdek plakalarının birbirlerine hassas bir şekilde konumlandırılabilmesi için pim delikleri delinmiş ve raybalanmıştır.



Resim 4.1. İşlenmiş çekirdek plakaları

4.6. Sert Lehimleme

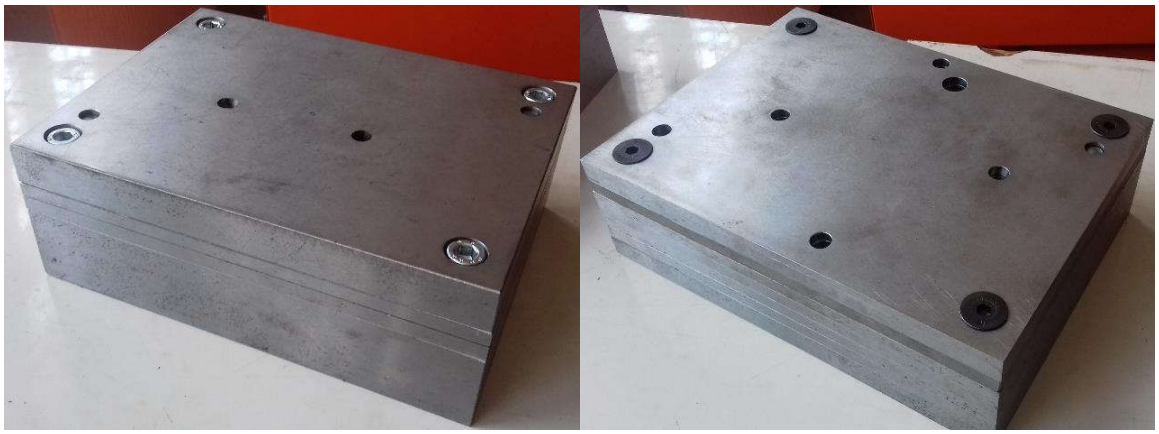
CNC freze ile işlenen plakalar vakumlu sert lehimleme yöntemi ile birleştirilmiştir. Lehimleme öncesinde birleştirilecek parçalar için mekanik ve kimyasal temizleme işlemi yapılmıştır. Mekanik temizleme için birleştirme yüzeyleri taşlanmıştır. Difüzyon kaynağından farklı olarak ergiyik haldeki lehimleme malzemesinin kapiler etki ile birleştirilecek yüzeylerin arasına ve yüzeydeki pürüzlüğe yayılması için yüzeyler taşlanmış olarak bırakılmıştır. Ayrıca bir parlatma işlemi uygulanmamıştır.

Kimyasal temizlemede birleştirilecek yüzeyler etil alkol ile oksit tabakası, yağ ve yüzeysel kirlerden arındırılmıştır. Birleşme yüzeylerine bakır esaslı lehimleme malzemesi sürülmüştür. Lehim malzemesinin özellikleri Çizelge 4.4'de gösterilmiştir.

Çizelge 4.4. Lehim malzemesinin özellikleri

EN 1044	AWS A5.8	DIN 8513	%Cu	%Sn	Ergime Sıcaklığı °C
CU101	Bcu-1a	L-Cu	100	-	1083

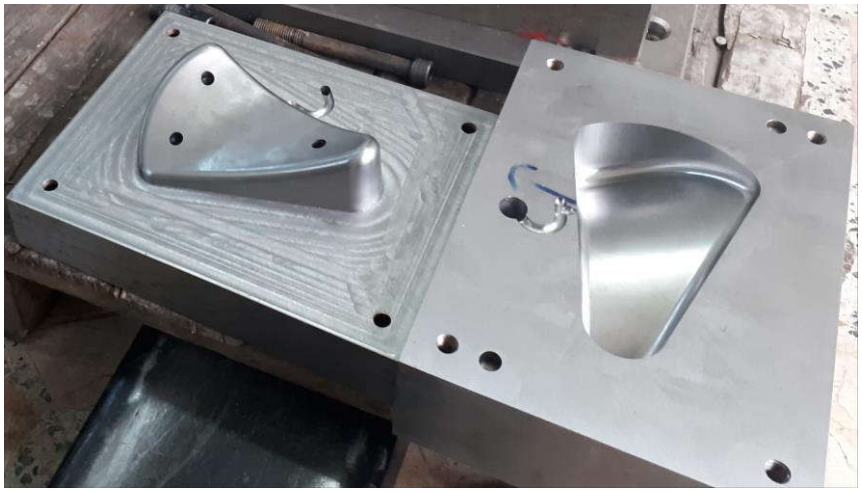
Daha sonra merkezleme pimleri ile birleştirilecek parçalar birbirlerine hizalanmıştır. Lehimleme işlemi atmosfer kontrollü, vakum fırınında, azot/hidrojen (%90/10) gazı atmosferinde, 1100°C'de 5 dakika tutma süresi ile gerçekleştirilmiştir. Sert lehimleme yapılırken kalıp plakalarının birbirinden ayrılmaması ve temasın kesilmemesi için plakalar üzerine koyulan bir ağılık ile sabit baskı uygulanmıştır. Kontrollü soğutmanın ardından kalıp çekirdekleri fırından alınmıştır. Resim 4.2'de çekirdek plakalarının birleştirilmiş hali gösterilmiştir.



Resim 4.2. Fırında sert lehimleme ile birleştirilmiş çekirdek plakaları [84]

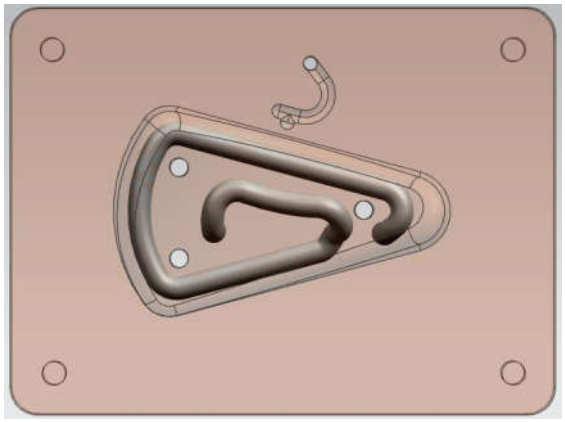
4.7. Kalıp Çekirdeklerinin İşlenmesi ve Montajı

Çekirdek plakalarının fırında sert lehimleme yöntemi ile birleştirilmesinden sonra erkek ve dişi çekirdekler CNC freze tezgâhımda işlenerek kalıp boşluğu oluşturulmuştur. İtici pim delikleri ve bağlantı vidaları açılarak montaja hazır hale getirilmiştir (Resim 4.3).



Resim 4.3. İşlenmiş kalıp çekirdekleri [84]

Parçanın kalıptan çıkarılması için üç adet itici pim deliği delinmiştir. İtici pim delikleri ve şekil uyumlu soğutma kanallarının konumları Şekil 4.20'de görülmektedir.



Şekil 4.20. İtici pim deliklerinin konumu

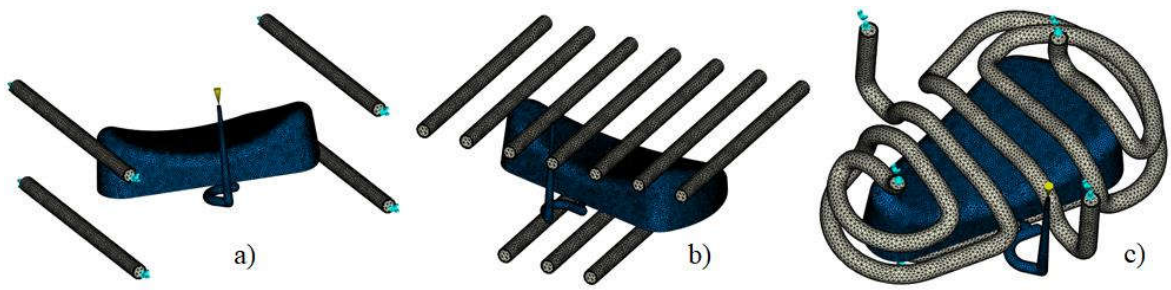
Kalıp çekirdekleri kalıp hamillerine montaj edilerek plastik enjeksiyon kalıbı baskıya hazır hale getirilmiştir. Ayrıca doğrusal soğutma kanallarının bulunduğu kalıp çekirdekleri de hazırlanmıştır (Resim 4.4). Doğrusal soğutma kanalları ile şekil uyumlu soğutma kanallarının karşılaştırılması için kalıp çekirdekleri aynı ölçüde üretilmiştir. Kalıp çekirdekleri değiştirilerek kalıbın kanal tipi de değiştirilebilmektedir.



Resim 4.4. Çekirdeklerin kalıba montaj edilmiş hali

4.8. Sayısal Metot İle Simülasyon Analizi

Soğutma kanalının çapı, plastik parçanın cidar kalınlığı, kalıp malzemesinin ısıl iletkenliği ve soğutma suyu debisi değişkenlerinin; soğutma süresi ve çarpılma miktarı ve üzerindeki ektilerinin incelenmesi için sayısal analizler yapılmıştır. Şekil uyumlu ve endüstriyel doğrusal kanal tasarımlarının soğutma analizleri yapılan deneysel çalışmalarla doğrulanmıştır. Sonrasında aynı analiz parametreleri kullanılarak incelenen değişkenlerin farklı değerlerinin etkileri belirlenmeye çalışılmıştır. Sayısal analizler, kalıp tasarımı sırasında; en uygun giriş yerinin tayini, kanal uzunluklarının belirlenmesi gibi kriterlerin tespitini de sağlamıştır. Kanal hacmi ve yüzey alanının soğutma ve çarpılmaya etkilerini belirlemek için doğrusal, eş hacimli doğrusal ve şekil uyumlu soğutma kanalları için analizler yapılmıştır (Şekil 4.21).



Şekil 4.21. a) Doğrusal, b) Eş hacimli doğrusal ve c) Şekil uyumlu soğutma kanalları

Analiz için Moldflow ticari yazılımı kullanılmıştır. Plastik parça, soğutma kanalı ve kalıp çekirdeklerinin katı modelleri Siemens NX cad yazılımı ile tasarlandıktan sonra parasolid (*.x_t) dosya uzantısı ile Moldflow ortamına "import" edilmiştir. Moldflow yazılımı kullanılarak dolum, ütüleme, soğutma ve çarpılma analizleri yapılmıştır. Şekil uyumlu, şekil uyumlu soğutma kanalı ile eşit hacme sahip doğrusal ve endüstriyel doğrusal olmak üzere üç farklı kanal tipi için analiz çalışmaları gerçekleştirilmiştir.

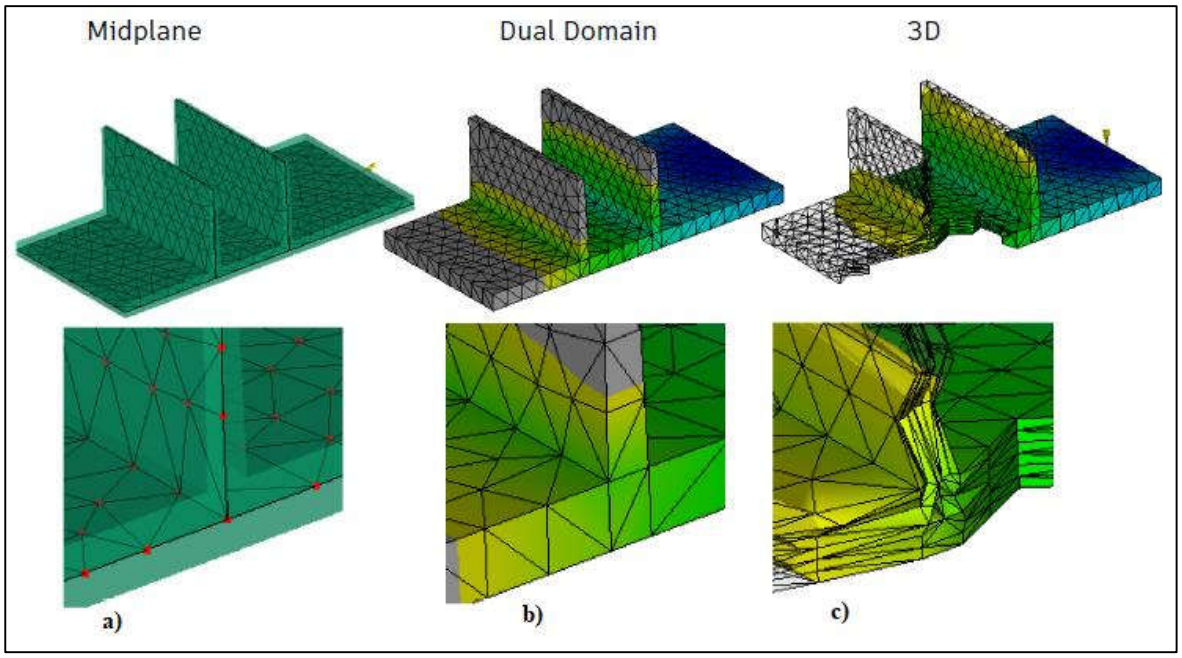
Analizlerde kalıp sıcaklığının çevrim süresince değişken olarak kabul edildiği "Transient with in cycle" hesaplama yöntemi seçilmiştir. Dolum, ütüleme ve soğutma süresi; kalıp boşluğunun %100 oranında dolması ve ortalama plastik parça sıcaklığının çıkarma sıcaklığı olan 90 °C 'ye kadar düşmesi şartlarına bağlı olarak "Automatic" hesaplama yöntemi le belirlenmiştir. Soğutma analizi için soğutma kanallarının 3B katı model olarak tasarlanarak kullanıldığı "Cool(FEM)" yöntemi kullanılmıştır. Zamana bağlı ısı akısının hesaplanması için dolum hızlarının yüksek olduğu durumlar için uygun olan "Conduction solver" kullanılmıştır. Çarpılma analizinde daha hassas sonuç verdiği için "Large deflection" yöntemi kullanılmıştır. Yapılan dolum analizinde kalıp boşluğu içinde hava sıkışması tespit edilmiştir. Havanın sıkıştığı bölgeye hava çıkışının sağlanması için "Ventil" eklenmiş ve hava çıkışının hesaplanması için "Perform ventil analysis" özelliği aktif olarak kullanılmıştır.

Analizlerde üç tip ağ kullanımı mümkündür [125]. Midplane tipindeki çözüm ağı, analiz için temel sağlar. Bu ağ, merkezi veya orta düzlemi boyunca parça şeklinin tek boyutlu bir temsilini oluşturan üç düğümlü, üçgen elemanlardan oluşur (Şekil 4.22 a). Parçanın kalınlığı, ağ elemanlarına uygulanan bir kalınlık niteliği ile temsil edilir. Midplane çözüm ağı, tüm bölgelerde ince cidara sahip parçaların analizi için kullanılır. Orta düzlemin bulunduğu bölgedeki fiziksel değişimlerin incelenmesi için kullanılır.

Dualdomain ağ, parçanın tüm yüzeyleri iki boyutlu, düzlemsel üçgen elemanlardan oluşur. Üçgen elemanlar karşıt yüzler arasında eşleştirilir. Parçanın kalınlığı, karşılıklı yüzler arasındaki mesafeye göre belirlenir. Model, bir yüzey kabuğu ile kaplı içi boş bir gövde olarak görselleştirilebilir (Şekil 4.22 b). Dualdomain çözüm ağı genel olarak, plastik parçanın farklı cidar kalınlıklarından oluşan bölgelere sahip olması durumunda kullanılır. Herhangi bir yerel bölgenin minimum uzunluğu ve genişliği, yerel kalınlığın dört katından fazla olmalıdır. Kalınlığın on katı kadar daha ihtiyatlı bir tahmin ve daha doğru sonuçlar

sağlar. Yapmak istenilen analizde örneğin sıcaklık, akış önü ve kayma hızı gibi parçanın kalınlığı boyunca değişen parametrelerin incelenmesi için kullanışlıdır.

3D çözüm ağı, dört adet köşe noktasına sahip, üçgen şeklindeki dört adet düzlemsel yüzeye sahip, içi dolu dört yüzlü (tetrahedral) elemanlardan oluşur (Şekil 4.22 c). 3D çözüm ağı, farklı kalınlıkta ve karmaşık geometriye sahip plastik parçaların analizi için kullanılır. Parçanın birçok kalın bölümü, köşesi, özelliği veya duvarı vardır. Bir kesitin uzunluğunun ve genişliğinin yerel kalınlığın dört katından az olduğu parçalar için 3D analiz teknolojisi önerilir. Bu ağ tipi, köşeler ve girintili bölgelerin etrafındaki laminer olmayan akışı doğru şekilde modellemek için uygundur.



Şekil 4.22 Sayısal ağda kullanılan hücre tipleri a) Midplane, b) Dual Domain, c) 3D [125]

Tez kapsamında yapılan analizlerde, plastik parça, soğutma sıvısı ve kalıp çekirdekleri için "3D Mesh" tipinde sayısal ağ oluşturulmuştur. Elde edilen sayısal ağda kullanılan eleman sayıları Çizelge 4.5'de gösterilmiştir.

Çizelge 4.5. Sayısal ağda kullanılan eleman sayıları

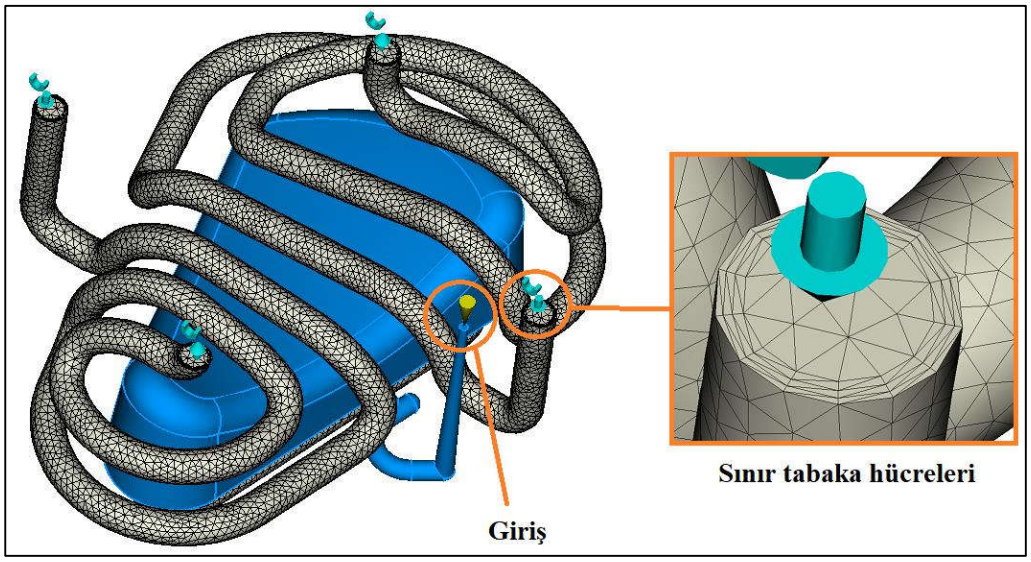
Model	Eleman Sayısı
Plastik parça	749000
Şekil uyumlu soğutma kanalı	352000
Eş hacimli doğrusal soğutma kanalı	393000
Endüstriyel doğrusal soğutma kanalı	130000
Plastik enjeksiyon kalıbı (Şekil uyumlu)	2500000

Şekil uyumlu soğutma kanallarının sayısal analizde kullanılan sayısal çözüm ağına ait istatistiksel bilgiler Çizelge 4.6'da gösterilmiştir. Soğutma ve çarpılma analizleri için boy-en oranının 20:1'den küçük olması istenirken maksimum dihedral (komşu iki tetrahedral yüzeyi arasındaki açı) açısının 178° dereceyi aşmaması analiz sonuçlarının güvenilirliği için yeterli olmaktadır [126, 127].

Çizelge 4.6. Çözüm ağı (mesh) istatistikleri

Çözüm Ağı (mesh) İstatistikleri	
Dörtyüzlü (tetrahedral), adet	3593908
Bağlantı noktası, adet	650021
Elemanların toplam hacmi, cm^3	60.1926
Ortalama boy-en oranı (Aspect ratio)	3.19
Maksimum dihedral açısı, °	177,0

Plastik malzeme olarak ABS (Acrylonitrile Butadien Stiren) seçilmiştir. Kalıp dolumu için tek giriş oluşturulmuştur. Plastik parça üzerindeki en uygun giriş noktasının belirlenmesi için giriş yeri analizi yapılmıştır (Şekil 4.15). Yolluk, dağıtıcı ve giriş kanalları kalıp tasarımı esnasında plastik parça üzerine bir uzantı şeklinde eklenmiştir. Dolum analizinde, yolluk kanalının girişine bir adet giriş (gate) noktası eklenmiştir (Şekil 4.23). Soğutma kanalında sınır tabakadaki akış formunun ve ısı transferinin daha iyi temsili için sınır tabaka hücreleri kullanılmıştır.



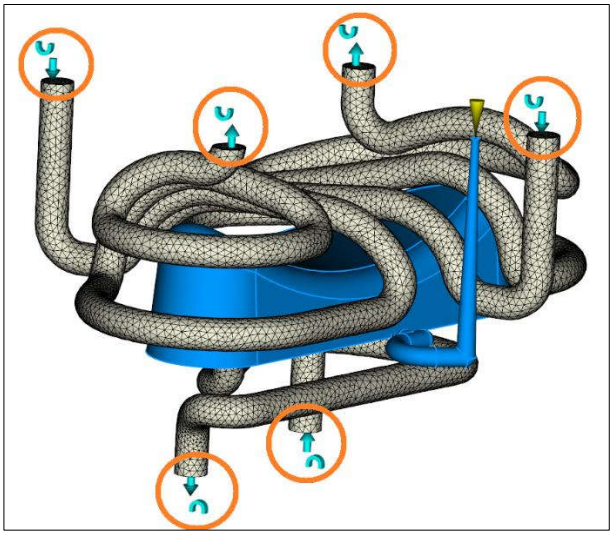
Şekil 4.23. Plastik parça üzerindeki giriş (gate) noktası

İki kalıp yarımı için kalıp malzemesi olarak "Tool steel P-20" takım çeliği seçilmiştir. Kalıp malzemesinin termo-fiziksel özellikleri Çizelge 4.7'de gösterilmiştir.

Çizelge 4.7. Kalıp malzemesinin termal özellikleri

Kalıp malzemesi	Takım çeliği P-20	Bakır alaşımı C17200
Yoğunluk (ρ), kg/m^3	7800	8359
Özgül ısı (c_p), J/kg.°C	460	360
Isıl iletkenlik (k), W/m.°C	29	130

Soğutma sıvısı olarak su seçilmiştir. Kalıbın her iki yarımı için soğutma kanalı uçlarında giriş (inlet) ve çıkış (outlet) noktaları belirlenmiştir (Şekil 4.24). Giriş ve çıkış noktaları kanal girişlerindeki yüzeylerin ortasına yerleştirilmiştir. Analizde kullanılan sınır şartları Çizelge 4.8'de gösterilmiştir.



Şekil 4.24. Soğutma kanalları üzerindeki giriş ve çıkış noktaları

Çizelge 4.8. Analizde kullanılan sınır şartları

Parametreler/Sınır şartları	Değer
Enjeksiyon Sıcaklığı, °C	230
Çıkarma Sıcaklığı, °C	90
Kalıp Sıcaklığı, °C	60
Soğutma Suyu Sıcaklığı, °C	25
Debi, l/dk	6
Kalıbın Açık Kalma Süresi, s	5

Sayısal analiz sonuçlarının deneylerle doğrulanmasından sonra aynı analiz parametreleri kullanılarak cidar kalınlığı, kalıp malzemesi, kanal çapı ve soğutma suyu debisi değişkenlerinin farklı değerleri ile 36 adet analiz gerçekleştirilmiştir (Çizelge 4.9).

Çizelge 4.9. Sayısal analizde kullanılan değişken değerleri

Analiz No	Kanal Çapı, mm	Cidar kalınlığı, mm	Soğutma suyu debisi, l/dk	Kalıp malzemesi	Isı iletim katsayısı (k), W/m ^{o}C
1.	6	1,5	3	P20	29
2.	6	1,5	3	C17200	130
3.	6	1,5	6	P20	29
4.	6	1,5	6	C17200	130
5.	6	3	3	P20	29
6.	6	3	3	C17200	130
7.	6	3	6	P20	29
8.	6	3	6	C17200	130
9.	6	5	3	P20	29
10.	6	5	3	C17200	130
11.	6	5	6	P20	29
12.	6	5	6	C17200	130
13.	8	1,5	3	P20	29
14.	8	1,5	3	C17200	130
15.	8	1,5	6	P20	29
16.	8	1,5	6	C17200	130
17.	8	3	3	P20	29
18.	8	3	3	C17200	130
19.	8	3	6	P20	29
20.	8	3	6	C17200	130
21.	8	5	3	P20	29
22.	8	5	3	C17200	130
23.	8	5	6	P20	29
24.	8	5	6	C17200	130
25.	10	1,5	3	P20	29
26.	10	1,5	3	C17200	130
27.	10	1,5	6	P20	29
28.	10	1,5	6	C17200	130
29.	10	3	3	P20	29
30.	10	3	3	C17200	130
31.	10	3	6	P20	29
32.	10	3	6	C17200	130
33.	10	5	3	P20	29
34.	10	5	3	C17200	130
35.	10	5	6	P20	29
36.	10	5	6	C17200	130

4.9. Enjeksiyon Parametreleri

Şekil uyumlu soğutma kanallarına sahip plastik enjeksiyon kalıbı tasarlanmış ve katmanlara ayrılmıştır. Kalıp çekirdekleri oluşturacak parçalar vakumlu sert lehimleme yöntemi ile birleştirilerek üretilmiştir. Ayrıca karşılaştırma yapabilmek için düz soğutma kanallarına sahip plastik enjeksiyon kalıbı da üretilmiştir. Baskı denemelerinde plastik malzeme olarak ABS (Akrilonitril Butadien Stiren) kullanılmıştır. Baskı öncesinde granül haldeki plastik malzeme 80 °C'de 2 saat süre ile kurutma işlemine tabi tutulmuştur. Plastik malzemenin özellikleri Çizelge 4.1'de gösterilmiştir.

Hazırlanan plastik enjeksiyon kalıpları plastik enjeksiyon tezgahına bağlanarak baskı denemeleri yapılmıştır. Baskı denemeleri için Keba kontrol paneline sahip Forstar marka 70 ton mengene kapama kuvvetine sahip bir plastik enjeksiyon makinesi kullanılmıştır. Kalıp sıcaklığının sabit tutulması için kalıp şartlandırma ünitesi kullanılmıştır. Baskıdan önce kalıbın istenen kalıp sıcaklığına gelerek dengelenmesi sağlanmıştır. Kalıp sıcaklığını sabit tutmak için ısıtma işlemi kalıp şartlandırıcı tarafından yapılmıştır. Kalıbın soğutulması için harici bir chiller ünitesi kalıp şartlandırıcıya entegre edilmiştir. Kalıp şartlandırıcının kontrolü ile kalıp içerisine sıcak ya da soğuk su girişi sağlanarak kalıp sıcaklığının sabit kalması sağlanmıştır. Su debisi kanal içerisinde türbülanslı akış sağlanacak şekilde ayarlanmıştır.

Baskı denemelerinde çıkan parçanın sıcaklığı ölçülmüş ve tavsiye edilen çıkarma sıcaklığına ulaşılınca soğutma süresi sabitlenmiştir. Soğutma süresi, çıkan plastik parçanın yüzey sıcaklığı 90 °C olacak şekilde ayarlanmıştır. Kalıp sıcaklığının dengelenmesi ve uygun soğutma süresinin belirlenmesi için hazırlık baskıları yapılmıştır. Hazırlık işlemlerinden sonra deney baskılarına geçilmiştir. Şekil uyumlu soğutma kanallarının bulunduğu kalıp ile baskı deneyleri yapıldıktan sonra kalıp çekirdekleri değiştirilmiş ve doğrusal kanalların bulunduğu kalıp ile baskı deneyleri yapılmıştır. Her iki soğutma kanalı tipinde de 30 ar adet baskı yapılmıştır. Deney baskılarında kullanılan enjeksiyon parametreleri Çizelge 4.10'da gösterilmiştir.

Çizelge 4.10. Deneyde kullanılan enjeksiyon parametreleri

Parametreler	Değer
Ergiyik Sıcaklığı, °C	240
Çıkarma Sıcaklığı, °C	90
Kalıp Sıcaklığı, °C	60
Soğutma Suyu Sıcaklığı, °C	50
Enjeksiyon basıncı, bar	45
Ütüleme basıncı, bar	30
Debi, l/dk	10
Kalıp Açık Kalma Süresi, s	5

4.10. Sıcaklık Ölçümü

Şekil uyumlu ve doğrusal soğutma kanallarına sahip kalıplarla yapılan baskı denemelerinde kalıp sıcaklığı ve kalıptan çıkan parçanın yüzey sıcaklığı sürekli olarak ölçülmüş ve kaydedilmiştir. Kalıptan çıkan parçanın yüzey sıcaklığı kızılötesi termometre (Standard Infrared Thermometer ST-8858) ile ölçülmüştür. Plastik parçanın yüzey sıcaklığı kızılötesi termometre ile ölçülürken doğru bir ölçme için termometre tripot üzerine sabitlenmiştir. Plastik parçanın yüzey sıcaklık ölçümü, kalıp açıldıktan sonra itici pimlerin plastik parçayı itmesinden hemen sonra yapılmıştır. Kalıp sıcaklığı K tipi termokupl (TT-K-30-03M) ile sürekli olarak kontrol edilmiştir. Resim 4.5'de Kullanılan kızıl ötesi termometre ve termokupl- multimetre görülmektedir.



Resim 4.5. Deneyde kullanılan kızılötesi termometre ve termokupl- multimetre

4.11. Çarpılmaların Ölçülmesi

Plastik enjeksiyon kalıplama işleminde plastik malzeme soğurken çekme olayı gerçekleşmektedir. Çekme oluşurken plastik malzeme üzerindeki sıcaklık dağılımı çekme olayını da etkileyeceğinden düzgün bir sıcaklık dağılımının olmaması sonucunda plastik parça üzerinde çarpılmalar oluşacaktır. Şekil uyumlu soğutma kanalı kullanımı ile plastik parçanın daha düzgün bir sıcaklık dağılımı ile soğuması amaçlanmaktadır. Şekil uyumlu soğutma kanalı ile gerçekleştirilen soğutma işleminin plastik parçalar üzerindeki çarpılma miktarlarına etkisi belirlenmeye çalışılmıştır. Baskı denemeleri sonucu üretilen plastik parçalar üzerindeki çarpılma miktarları incelenmiş ve karşılaştırılmıştır. Plastik parça üzerindeki düzlemsel yüzeydeki çarpılma derinlikleri komperatör saati ile ölçülmüştür. Resim 4.6'da görüldüğü gibi sabitlenen bir komperatörün ile plastik parça üzerindeki derinlik değişimi ölçülmüştür.



Resim 4.6. Plastik parça üzerindeki çarpılmanın ölçülmesi

Üretilen plastik parçalar üzerindeki çapılma miktarlarının ölçümü ve karşılaştırılabilmesi için plastik parçalar 3B optik tarayıcı ile taranarak tersine mühendislik yöntemi ile CAD modeli elde edilmiştir. 3B tarama işlemi "Artec Space Spider" marka 0,05 mm hassasiyete sahip optik tarayıcı ile yapılmıştır (Resim 4.7). Optik tarayıcı ile elde edilen nokta bulutu önce mesh yüzeyine dönüştürülmüştür. Üretilen parçanın orijinal CAD modeli ile karşılaştırılarak yüzeylerdeki sapma miktarları renk skalası grafiği ile görselleştirilmiştir.



Resim 4.7. 3B yüzey taraması için kullanılan optik tarayıcı

4.12. Plastik Parça Ağırlıklarının Ölçülmesi

Plastik enjeksiyon kalıplamada kalıplama şartlarının değişimi ile plastik parça ağırlığı da değişebilmektedir. Şekil uyumlu ve doğrusal soğutma kanallarına sahip kalıplarla üretilen plastik parçaların ağırlıkları ölçülerek karşılaştırılmıştır. Ağırlık ölçümü, yolluğun plastik parçadan ayrılmasından sonra yapılmıştır. Ağırlık ölçümlerinde 0.01 g hassasiyete sahip WF Dijital hassas terazi kullanılmıştır.

5. BULGULAR VE TARTIŞMA

5.1. Şekil Uyumlu Soğutma Kanalı Tasarım Metodu

Şekil uyumlu soğutma kanallarının tasarımında genellikle tasarımcılar kendi tecrübelerine dayalı olarak tasarım yapmaktadırlar. Bu çalışmada sistematik bir yöntem kullanılmıştır. Literatürde de soğutma kanalı tasarımı için değişik sistematik yöntemler bulunmaktadır. Bunlardan birisi parça yüzeyinin ofsetlenmesi ile elde edilen yüzey üzerinde soğutma kanallarının oluşturulması işlemidir.

Literatürde şekil uyumlu soğutma kanallarının kalıp boşluğuna uzaklığını belirlemek için parça yüzeyinin belirli bir mesafe uzağa ofsetlenmesi yöntemini kullanan birçok çalışma bulunmaktadır [29, 61, 76]. Bu tez kapsamında farklı olarak, bu ofset yüzeyi üzerinde soğutma kanallarının birbirlerine olan uzaklıklarının sabit kalmasını sağlayabilmek için kanal hatlarının elde edilen yüzey üzerinde ofsetlenmesi işlemi gerçekleştirilmiştir. Literatürde, parça yüzeyi ofsetlendikten sonra elde edilen yüzey üzerindeki eşyükselti eğrilerinin spiral forma dönüştürüldüğü tasarım metotlarında kanalların birbirleri arasındaki mesafeler sabit olarak korunamamaktadır. Parça yüzeyinin eğimine göre kanallar arası mesafe değişmektedir. Bu çalışmada sunulan yöntemde bir kanalın konumu belirlenirken diğer kanallara olan mesafeler sabit tutulmaktadır.

Tasarım metodunda gerçekleştirilen işlemler geometriden bağımsız olarak uygulanabilir olduğu için karmaşık formlu yüzeye sahip birçok plastik parça için şekil uyumlu soğutma kanallarının tasarımı mümkündür. Geliştirilen yöntemin algoritmik bir yapıda olması; şekil uyumlu soğutma kanallarının, tasarım ve analiz yazılımlarında otomatik olarak oluşturulabilmesini sağlayan modüllerin geliştirilmesine katkı sağlayacaktır.

5.2. Şekil Uyumlu Soğutma Kanallarının Üretimi

Bu çalışma kapsamında şekil uyumlu soğutma kanallarına sahip kalıp çekirdeklerinin üretimi için tabakalı obje imalatı yöntemi kullanılmıştır. Kalıp imalatı için bu yöntemin kullanımı; maliyet, dayanım, ısıl iletkenlik, sızdırmazlık açısından önemli avantajlar sağlamaktadır. Literatürde şekil uyumlu soğutma kanallarına sahip plastik enjeksiyon

kalıplarının imalatı için farklı yöntemler önerilmektedir. Bunlardan bazıları; 3B metal yazdırma yöntemi, kalıp plakasını arka kısmının işlenerek lokma yerleştirilmesi yöntemi, bükülmüş metal boruların kalıp içerisine yerleştirilmesi yöntemi, hassas döküm yöntemidir.

3B metal yazdırma yöntemi:

İnce katmanlar halinde serilen toz metal parçacıklarının lazer ile sinterlenerek birleştirilmesi esasına dayanın bu yöntem ile karmaşık geometriye sahip soğutma kanallarının imalatı mümkündür. Kalıp imalatında geometri konusundaki sınırlamaları kaldırmasına rağmen üretilen kalıpların dayanımının düşük oluşu bir dezavantaj olarak ortaya çıkmaktadır. Plastik enjeksiyon kalıpları seri üretim araçları olduğundan dolayı yüksek hacimli üretimlerin gerçekleştirilebilmesi için plastik enjeksiyonlarından yüksek ömür beklenmektedir. Plastik enjeksiyon kalıplarının imalatı için sıcak iş takım çelikleri sınıfındaki dayanıklı malzemeler kullanılmaktadır. 3B metal yazdırma yöntemleri ile üretilen ürünlerin dayanımları henüz plastik enjeksiyon kalıplarından beklenen dayanımı karşılayacak seviyede değildir. Ayrıca 3B metal yazdırma yöntemleri ile üretilen ürünlerin malzeme yapısında oluşan gözenekli yapı malzemenin ısıl iletkenliğini de olumsuz olarak etkilemektedir [82, 128, 129]. Kalıp yapımında kullanılan malzemelerin iyi bir ısı transfer kabiliyetine sahip olması beklendiğinden bu durum ayrı bir olumsuzluk yaratacaktır.

3B metal yazdırma yöntemlerinin yüksek maliyetli oluşu, kalıp üretimi için de yüksek maliyetleri beraberinde getirmektedir. Çizelge 5.1'de doğrusal kanala sahip kalıp çekirdeklerinin talaşlı imalat yöntemi ile üretimi, şekil uyumlu soğutma kanallarına sahip kalıp çekirdeğinin tabakalı obje ve 3B metal yazdırma yöntemleri ile üretiminde karşılaşılan yaklaşık maliyetler görülmektedir. 3B metal yazdırma yöntemi ile kalıp çekirdeklerinin imalatı tabakalı obje imalatına göre yaklaşık olarak 19 kat daha yüksek maliyete sahiptir. Tabakalı obje yöntemi ile kalıp çekirdeklerinin imalatı, geleneksel talaşlı imalat ile üretim yöntemine göre 2 kat daha yüksek maliyetli olmasına rağmen üretim hızında ve ürün kalitesinde sağladığı avantaj sayesinde daha uygun bir üretim tekniği olarak ön plana çıkmaktadır. Sağladığı avantaj sayesinde maliyet artışı göze alınabilir seviyede bulunmaktadır.

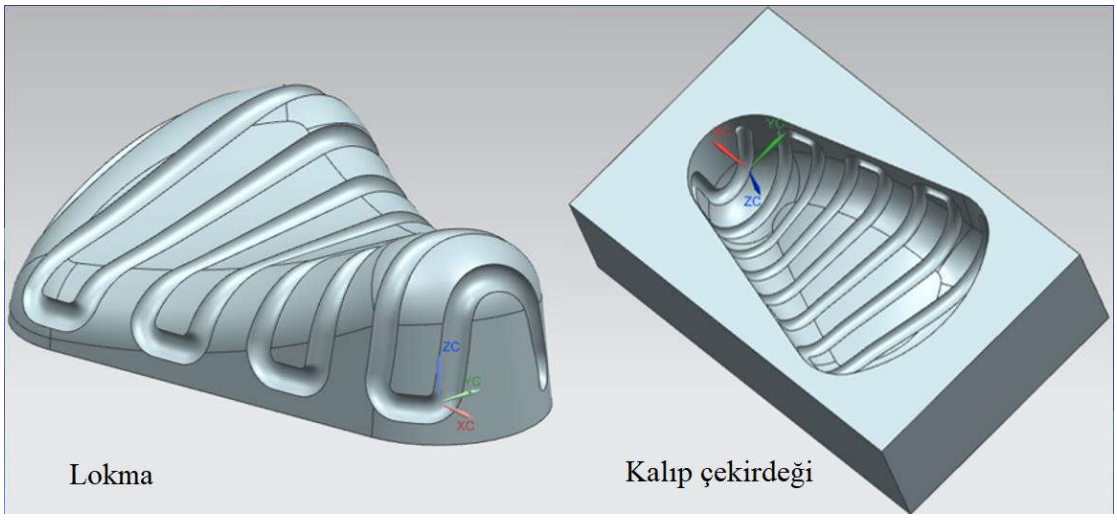
Çizelge 5.1. Kalıp çekirdeklerinin yaklaşık üretim maliyetleri

Üretim Yöntemi	Talaşlı İmalat	Tabakalı Obje İmalatı	3B Metal Yazdırma
Kanalı Tipi	Doğrusal	Şekil Uyumlu	Şekil Uyumlu
Maliyet	4.000,00 TL	8.000,00 TL	74.000,00 TL

Tabakalı obje imalatı yönteminde malzeme sınırlamasının bulunmaması kalıp için uygun dayanımdaki ve ısıl iletkenlikteki malzemenin seçiminde sınırlamaları kaldırmaktadır. Sert lehimleme yönteminde aynı ya da farklı birçok metal parçanın yüksek dayanımlarla üretimi mümkündür.

Kalıp çekirdeklerinin lokmalı olarak üretim yöntemi:

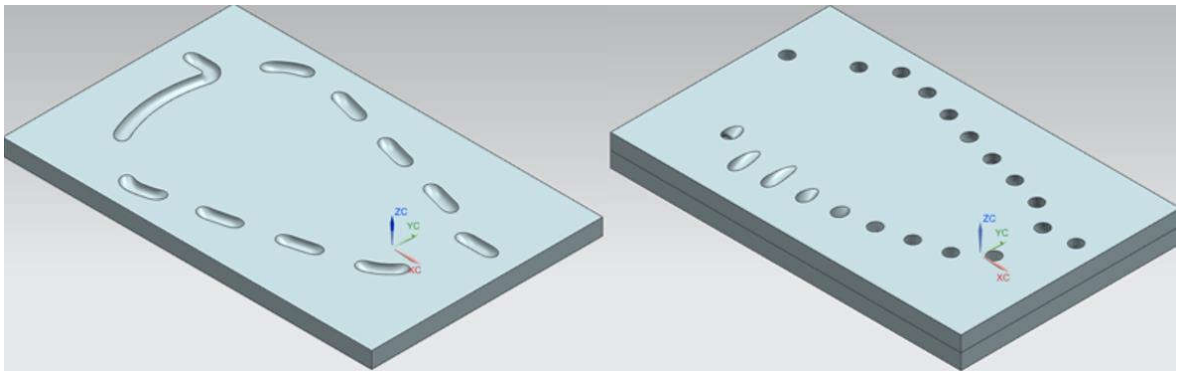
Literatürde, şekil uyumlu soğutma kanallarına sahip kalıp çekirdeklerinin üretimi için tavsiye edilen diğer bir yöntem kalıp çekirdeklerinin arka ya da ön yüzeyinin frezelenerek kanalların oluşturulması ve lokma yerleştirilmesi yöntemidir [57, 58]. Bu yöntemde lokma ve kalıp çekirdeği arasındaki yüzey üzerinde bulunana soğutma kanallarını oluşturmak için hem çekirdek hem de lokma üzerinde boşluklar işlenmektedir (Şekil 5.1). Bu yöntem basit geometrili soğutma kanalları için uygun olsa da karmaşık geometrili soğutma kanallarının elde edilebilmesi için sınırlılıkları olan bir yöntemdir.



Şekil 5.1. Kalıp çekirdeğinin parçalı olarak üretimi

Çekirdek ve lokmanın talaşlı imalat ile işlenebilmesi için 5 eksenli işleme merkezlerinin kullanımı zorunludur. Ayrıca lokmanın kalıp çekirdeği üzerine birleştirilmesinde sızdırmazlığın sağlanması zorlaşmakta ve soğutma suyunun soğutma kanalı dışına sızma riski bulunmaktadır. İşleme zorluğu ve sızdırmazlık gibi nedenlerden dolayı bu yöntemin kullanılabilirliği düşüktür.

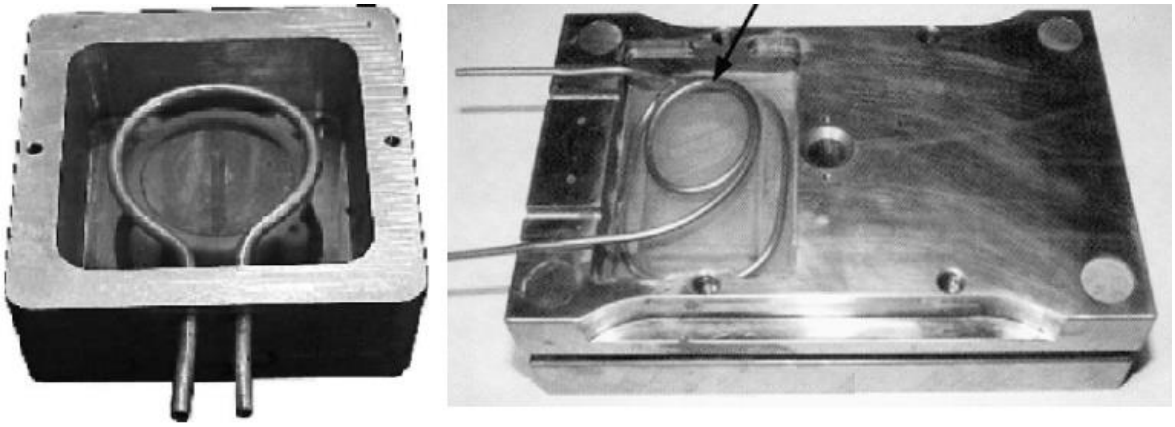
Tabakalı obje yönteminde kalıp çekirdeği düzlemsel taşlanmış plakalardan üretilmektedir (Şekil 5.2). Kanal boşluklarının düzlemsel plakalar üzerine işlenmesi çok daha kolay olmaktadır. Parça plakalar birbirlerine sert lehimleme yöntemi ile birleştirildiğinden soğutma kanalından kalıp plakaları arasına soğutma suyunun sızması mümkün değildir. Bu yönü ile tabakalı obje üretim yöntemi daha avantajlıdır.



Şekil 5.2. Tabakalı obje imalat yönteminde düzlemsen plaka üzerine işlenmiş kanallar

Bükülmüş metal boruların kalıp çekirdeği içine yerleştirilmesi yöntemi:

Metal boruların şekil uyumlu kanal formuna uygun bir şekilde bükülerek kalıp çekirdeği içine yerleştirilmesi şekil uyumlu kanalların üretimi için literatür de önerilen yöntemlerden birisidir (Resim 5.1). Bu yöntemde kalıp çekirdeği içerisine yerleştirilen boru ile kalıp çekirdeği arasındaki boşluk ısıl iletkenliği yüksek malzeme ile doldurulmaktadır. Dolgu malzemesi olarak düşük sıcaklıklarda ergiyen metal ya da metal katkılı reçineler kullanılmaktadır. Dolgu malzemeleri hem borunun konumu sabit tutmakta hem de ısı transferini sağlamaktadır.



Resim 5.1. Metal boruların bükülerek kalıp içine yerleştirilmesi

Bu yöntemde basit formlu soğutma kanallarının bükülerek elde edilmesi mümkün olsa da karmaşık formlu ve keskin dönüşlü soğutma kanallarının üretimi oldukça zordur. Ayrıca dolgu malzemelerinin dayanımlarının düşük olması bu yöntemle üretilen kalıpların dayanımlarını da düşürecektir. Bu nedenle plastik enjeksiyon kalıpları yeterli çalışma ömrü gereksinimini karşılayamayacaktır.

Bu çalışma kapsamında kullanılan tabakalı obje üretim yönteminde karmaşık geometrili şekil uyumlu soğutma kanalları hassas bir şekilde üretilebilmektedir. Ayrıca kalıp malzemesi olarak sıcak iş takım çeliği gibi yüksek dayanımlı malzemelerin kullanımı mümkün olduğu için bu yöntemle üretilecek kalıplar da yüksek dayanıma sahip olmaktadır.

5.3. Soğutma Süresi Hesabı

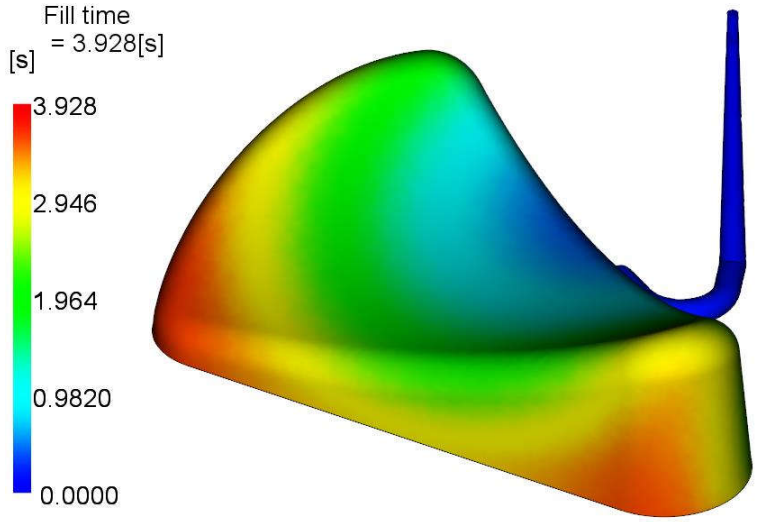
Öncelikle plastik parçanın çıkarma sıcaklığına ulaşabilmesi gerekli minimum soğutma süresi Eşitlik 3.5 ile hesaplanmıştır. Bu hesaplama yönteminde kalıp yüzeyinin sıcaklığı sabit kabul edildiği ideal soğutmayı temsil eder. Eşitlik 3.5 ile hesaplanan soğutma süresi 14,84 s'dir.

3,5 mm cidar kalınlığına sahip plastik parça için Eşitlik 3.6'da ifade edilen formül kullanılarak soğutma süresi pratik olarak hesaplandığında 25,48s değeri elde edilmiştir.

Kalıp sıcaklığının değişken olduğu kabul edilen Eşitlik 3.13 ile soğuma süresi hesaplandığında ise soğutma süresinin 27,84 s olduğu belirlenmiştir.

5.4. Analiz sonuçları

Şekil uyumlu ve doğrusal soğutma kanallarına sahip plastik enjeksiyon kalıplarının soğutma etkinliklerinin karşılaştırılması için Moldflow analizi kullanılarak dolum, ütüleme soğuma ve çarpılma analizleri yapılmıştır. Şekil uyumlu, eş hacimli doğrusal ve endüstriyel doğrusal olmak üzere üç farklı kanal tipi için analizler gerçekleştirilmiştir. Şekil 5.3'de görüldüğü gibi şekil uyumlu kanala sahip kalıbın kalıp boşluğu 3,928 s'de tamamen dolmuştur. Kalıp boşluğunun yolluk girişinden itibaren tüm bölgelerde dolum zamanı renk skalası şeklinde görülmektedir. Eş hacimli doğrusal kanala sahip kalıbın kalıp boşluğu 3,895 s ve endüstriyel doğrusal kanala sahip kalıp boşluğu 3,968 s Her üç kanal tipinde de aynı kalıp sıcaklığı ve enjeksiyon parametreleri kullanıldığı için dolum süreleri birbirine oldukça yakındır.

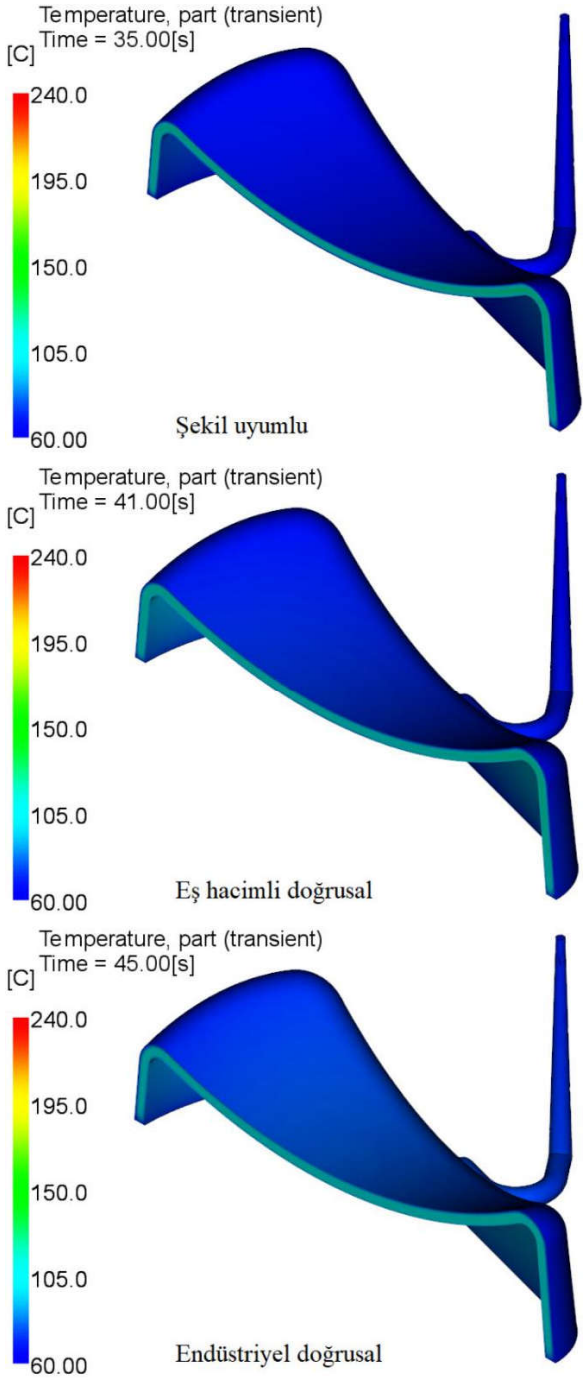


Şekil 5.3. Kalıp boşluğunun dolum süresi

Yapılan soğuma analizleri ile plastik parçaların çıkarma sıcaklığına erişim süreleri hesaplanmıştır. Şekil 5.4'de üç kanal tipi için çıkarma sıcaklığına erişim sürelerindeki sıcaklık dağılımları görülmektedir. Her üç durumda da ortalama parça sıcaklığı plastik parçanın kalıptan çıkarma sıcaklığı olan 90 °C'dir. Şekil uyumlu soğutma kanalının kullanıldığı durumda çıkarma sıcaklığına 35 s'de, eş hacimli doğrusal kanalın kullanıldığı durumda çıkarma sıcaklığına 41 s'de ve endüstriyel doğrusal kanalın kullanıldığı durumda çıkarma sıcaklığına 45 s'de ulaşılmıştır. Kalıbın açık tutulma süresi 5s olarak ayarlandığı için soğuma süreleri sırasıyla 30 s, 36 s ve 40 s olarak hesaplanabilir. Şekil uyumlu ve eş hacimli doğrusal soğutma kanalları karşılaştırıldığında şekil uyumlu kanal kullanımı

soğutma süresinin %16,6 oranın kısalma sağlamıştır. Endüstriyel doğrusal kanala göre şekil uyumlu soğutma kanalının kullanımı ile de %25 oranında kısalma sağlanmıştır. Eş hacimli ve endüstriyel doğrusal kanallar karşılaştırıldığında eş hacimli doğrusal kanalın daha etkin bir soğutma sağladığı görülmektedir. Eş hacimli doğrusal soğutma kanalı ile endüstriyel soğutma kanalına göre daha etkin bir soğutma sağlanabilmesinin sebebi kanal uzunluğunun daha fazla olmasıdır. Şekil uyumlu ve eş hacimli soğutma kanallarının uzunlukları birebirine yakın olmasına rağmen şekil uyumlu soğutma kanallarının kalıp boşluğuna daha yakın mesafede bulunması şekil uyumlu soğutma kanallarının etkinliğini artırmıştır.

Elde edilen bulgular literatürdeki çalışmalarla paralellik göstermektedir. Beklendiği gibi şekil uyumlu soğutma kanallarının kullanımıyla soğutma ve beraberinde çevrim süreleri kısalmıştır [29, 53, 75, 130].



Şekil 5.4. Çıkarama sıcaklığına erişim sürelerindeki sıcaklık dağılımları

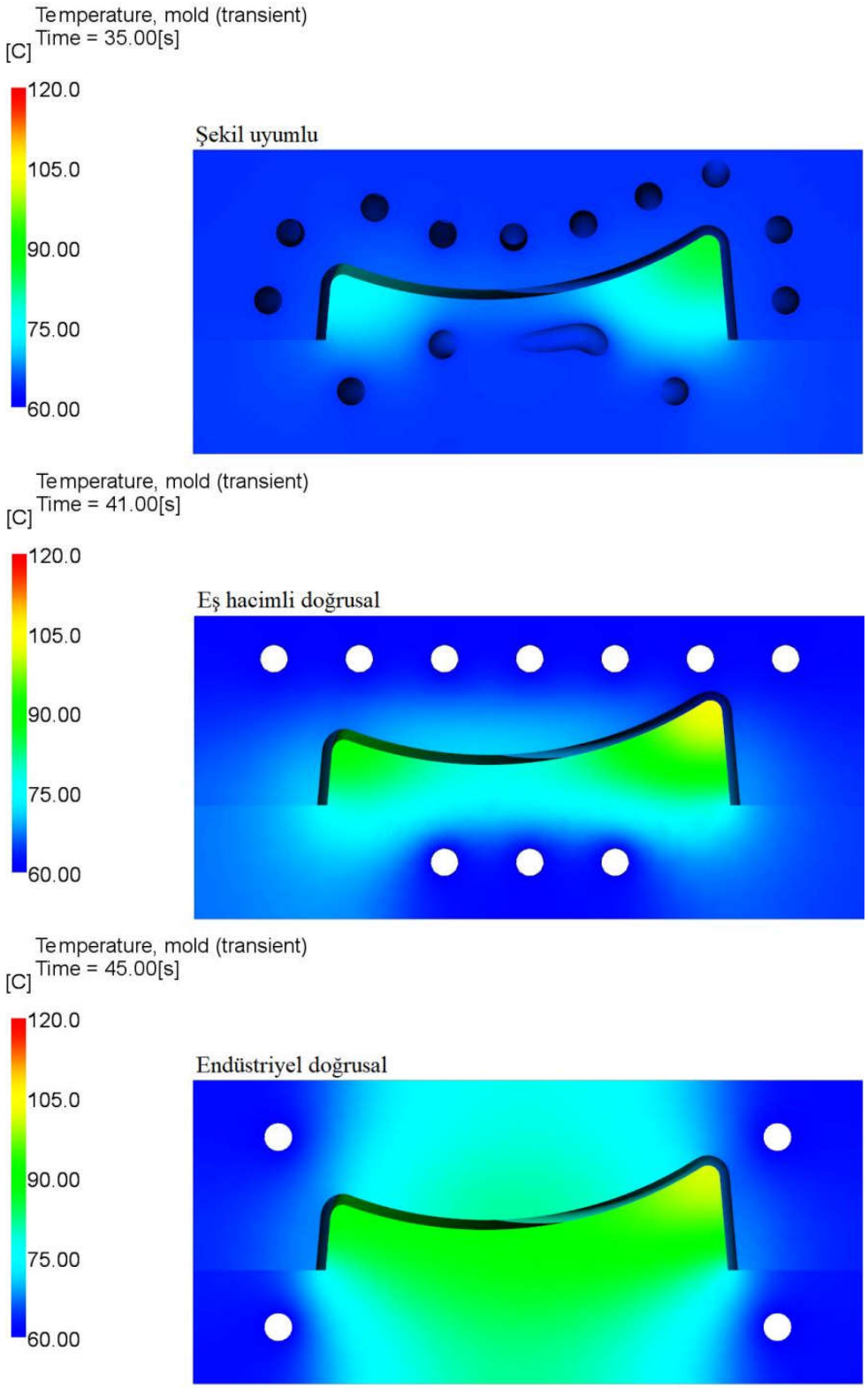
Soğutma analizleri sonucunda plastik parçanın kalıptan çıkarma sıcaklığına erişim zamanlarındaki kalıp üzerindeki sıcaklık dağılımları Şekil 5.5'de gösterilmiştir. Kalıp sıcaklıkları değişken olup kalıp boşluğuna yakın bölgeler daha sıcaktır. Ergiyik plastik malzeme üzerindeki ısı plastik enjeksiyon kalıbına aktarılmıştır. Kalıp üzerindeki ısı soğutma kanallarından geçen soğutma suyu ile kalıptan uzaklaştırılmıştır. Bu nedenle

soğutma kanallarının bulunduğu bölgelerin sıcaklığı kalıp boşluğuna yakın olan bölgelerin sıcaklığından daha düşüktür.

Şekil uyumlu, eş hacimli doğrusal ve endüstriyel doğrusal kanallarıyla yapılan soğuma analizi sonuçları karşılaştırıldığında şekil uyumlu soğutma kanalı bulunan kalıp üzerindeki sıcaklık dağılımının daha homojen olduğu görülmektedir. Şekil uyumlu kanalların kalıp boşluğu çevresinde daha uyumlu konumlanmış olması nedeniyle plastik malzemeden ısı soğurulması performansı daha iyi olmaktadır. Plastik parçanın geometrisinden kaynaklanan iç bükey bölgeler soğutma kanalının yeteri kadar yanaşamaması nedeniyle daha yüksek sıcaklıkta bulunmaktadır.

Eş hacimli doğrusal kanalla yapılan soğutma işlemi sonunda kalıp üzerindeki sıcaklık dağılımı endüstriyel doğrusal kanalla elde edilen sıcaklık dağılımına göre daha düzgündür. Plastik parçanın dış yüzeyine yakın kalıp bölgeleri nispeten daha düşük sıcaklığa sahipken iç yüzeye yakın kalıp bölgelerinde ise sıcaklık çok daha yüksektir. Soğutma kanallarının bu bölgelere yeteri kadar yakın olmaması nedeniyle bu bölgelerdeki soğutma yetersiz kalmıştır. Ayrıca soğutma kanallarının kalıp boşluğuna olan uzaklığı bölgelere göre değişkenlik gösterdiğinden kalıp boşluğu çevresindeki sıcaklıklar da değişmektedir. Şekil uyumlu soğutma kanalları ile aynı soğutma hacmine sahip olmasına rağmen kanal-kalıp yüzeyi arası mesafenin uygun olmaması nedeniyle soğutma etkinliği düşük kalmıştır.

Endüstriyel doğrusal kanalla elde edilen kalıp sıcaklık dağılımı diğer kanallarla elde edilen sıcaklık dağılımına göre daha düzensizdir. Kalıp boşluğu çevresinde yeterli soğutma yapılamadığı için kanallara mesafeli bölgelerdeki sıcaklık çok daha yüksektir. Kanalların soğutulması gereken bölgelere uzakta bulunması kalıp üzerindeki ısının soğurulması işlemini zorlaştırmaktadır. Soğutma kanallarının kalıp boşluğunu yeterince çevreleyememesi hem soğutma süresini artırmakta hem de sıcaklık dağılımını düzensizleştirmektedir.



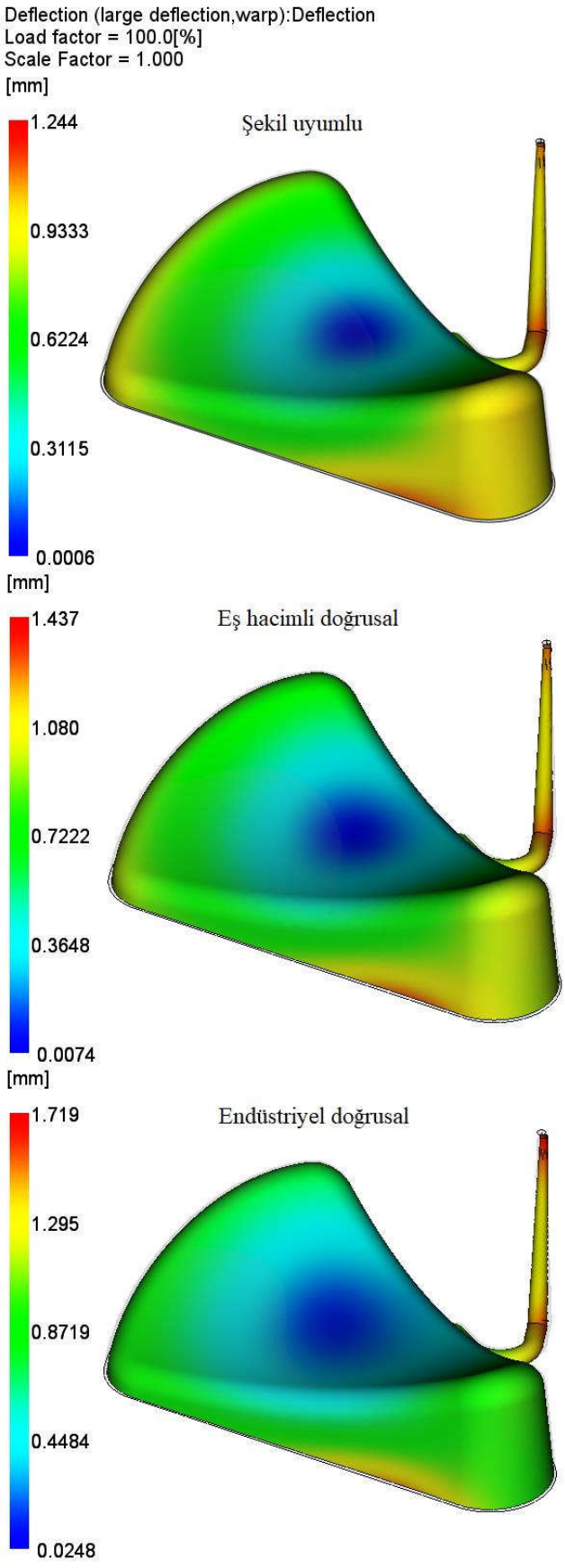
Şekil 5.5. Kalıp üzerindeki sıcaklık dağılımları

Kalıp üzerindeki sıcaklık dağılımı sonuçları literatürde yapılan çalışma sonuçları ile karşılaştırıldığında benzerlik gösterdiği görülmüştür [52, 53, 75]. Şekil uyumlu soğutma

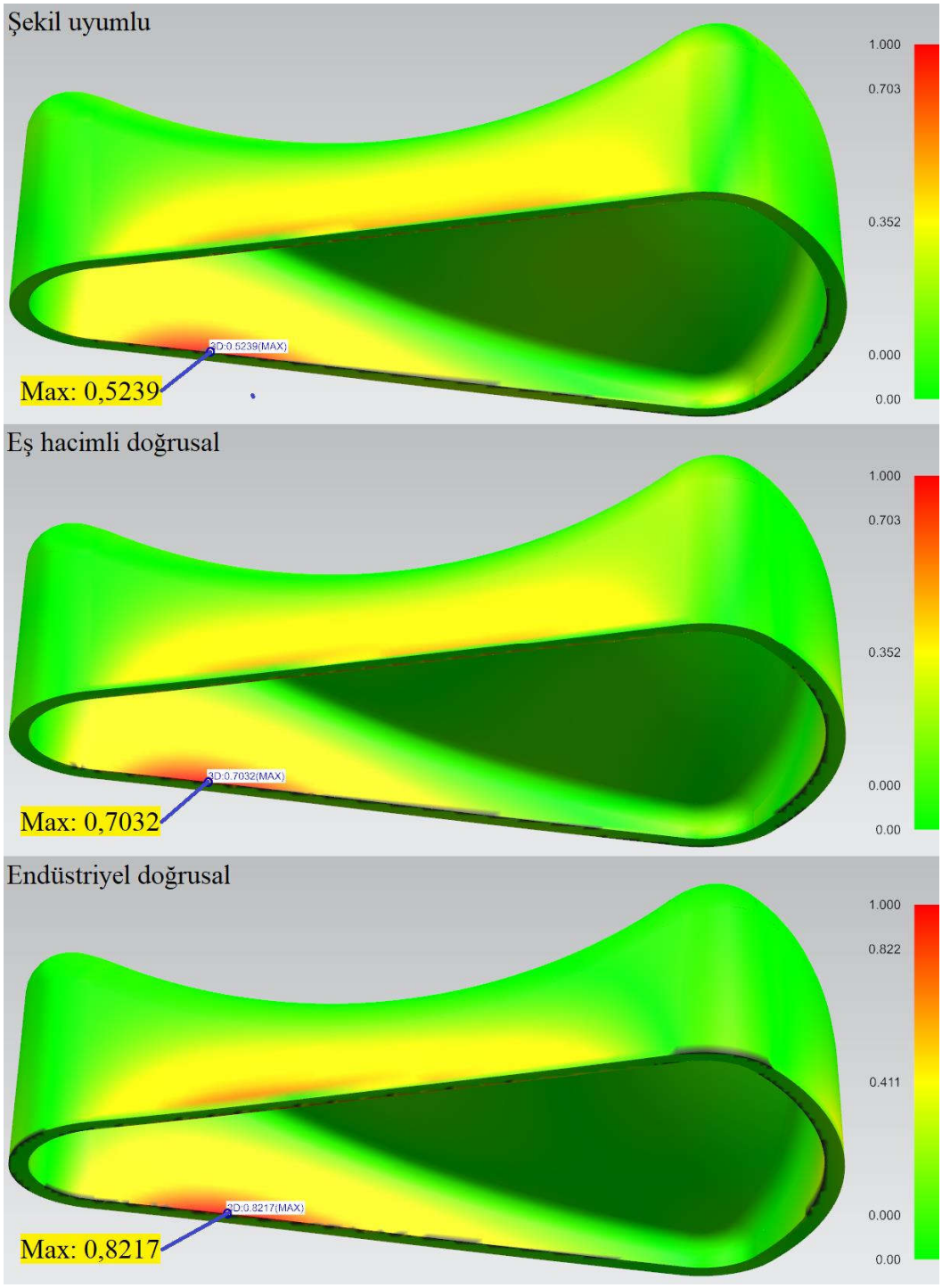
kanallarının kullanımı ile kalıp üzerindeki sıcaklık dağılımlarının çok daha homojen hale gelmesi elde edilen ortak sonuçlardan birisidir. Çalışmalar kullanılan plastik parça geometrisinin karmaşıklığı artması ve özellikler parça üzerindeki girinti ve çıkıntıların bulunması nedeniyle bazı bölgelerdeki sıcaklık dağılımında düzensizliğe neden olabilmektedir.

Şekil 5.6'da plastik parça üzerinde oluşan çarpılma miktarları gösterilmiştir. Plastik parça geometrisinin çarpılmaya uygun olamaması nedeniyle analiz sonucunda belirlenen çarpılma miktarları oldukça düşük seviyededir. Şekil uyumlu, eş hacimli doğrusal ve endüstriyel doğrusal kanalların kullanımı ile ortaya çıkan çarpılma miktarlarının düşük farklarla birbirine yakın olduğu görülmektedir. Şekil uyumlu soğutma kanalı ile yapılan soğutma ile oluşan sapma miktarı 1,244 mm olarak görülmektedir. Eş hacimli doğrusal kanal ile yapılan analiz sonucunda çarpılma miktarının 1,437 mm çıktığı görülmüştür. Endüstriyel doğrusal soğutma kanalı ile yapılan analiz sonucunda plastik parça üzerinde oluşan çarpılma miktarı ise 1,719 mm değerinde meydana gelmiştir. Elde edilen sonuçlara göre en düşük çarpılma miktarı şekil uyumlu soğutma kanalı ile elde edilmiştir. Endüstriyel kanal ile oluşan çarpılma eş hacimli kanal kullanımıyla ortaya çıkan çarpılmadan daha yüksek değerdedir. Şekil uyumlu kanal ile oluşan çapılma miktarına göre; eş hacimli soğutma kanalı ile oluşan çarpılma miktarının bağıl değişim oranı %15,5, endüstriyel doğrusal soğutma kanalı ile oluşan çarpılma miktarının bağıl değişim oranı %38,2 olarak hesaplanmıştır.

Şekil 5.7'de Moldflow ile elde edilen çarpılmış modelin CAD datası ile orijinal CAD datası üst üste konarak bir kıyaslama yapılmıştır. Yüzeylerdeki sapmaların mutlak dağılımı gösterilmiştir. En düşük yüzey sapması 0,5239 mm değeri ile şekil uyumlu soğutma kanalı ile elde edilmiştir. En yüksek sapma miktarı endüstriyel soğutma kanalında elde edilmiş ve sapma erinliği 0,8217 mm olarak belirlenmiştir. Eş hacimli soğutma kanalı ile elde edilen sapma miktarı 0,7032 mm değerindedir. Şekil uyumlu soğutma kanalı kullanımı ile çarpılma miktarı endüstriyel doğrusal kanala göre %36, eş hacimli doğrusal kanala göre %25 oranında azalmıştır. Şekil uyumlu soğutma kanallarının kullanımı ile plastik parçanın boyutsal ölçüleri daha düşük hata miktarı ile üretilebilmektedir. Bu sayede plastik parça kalitesi arttırılmaktadır.

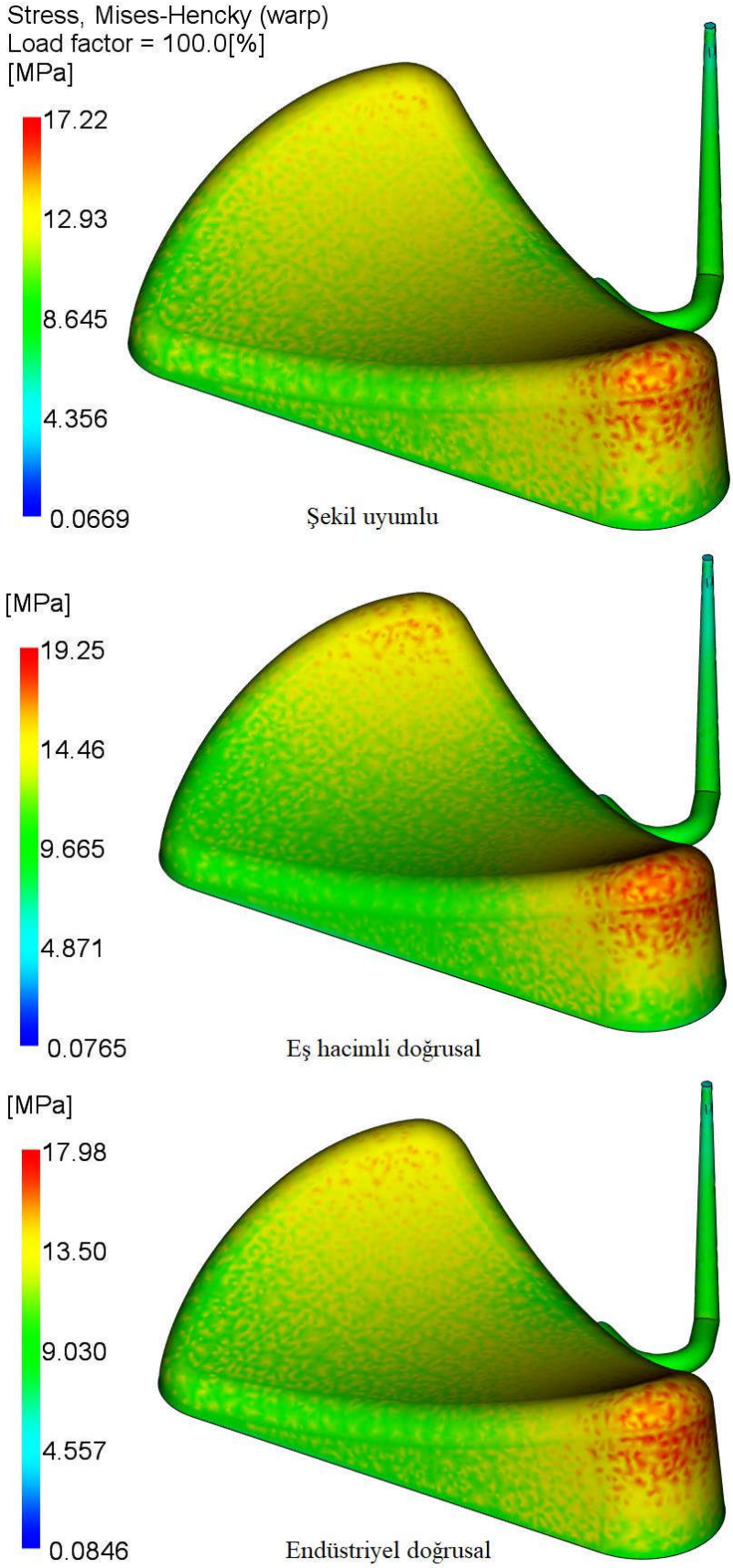


Şekil 5.6. Çarpılma değerlerinin dağılımı



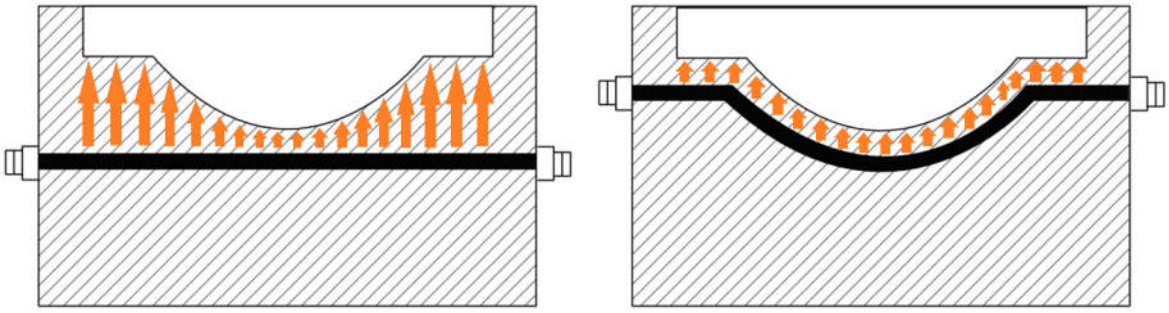
Şekil 5.7. Yüzeylerdeki mutlak sapma değerlerinin dağılımı

Şekil 5.8'de soğuma ile katılaşan plastik parça üzerindeki kalıntı gerilmelerin dağılımı görülmektedir. Her üç kanal tipi ile yapılan analiz sonuçları karşılaştırılmıştır. Plastik malzeme üzerinde düzensiz soğuma nedeni ile oluşan en düşük kalıntı gerilme değeri şekil uyumlu soğutma kanalı ile 8,990 MPa olarak elde edilmiştir. Eş hacimli doğrusal soğutma kanalı ile yapılan analiz sonucunda kalıntı gerilme değeri 9,902 MPa iken endüstriyel doğrusal kanal ile kalıntı gerilme değeri 9,225 MPa olmuştur. Şekil uyumlu soğutma kanalı kullanımıyla plastik parça üzerindeki kalıntı gerilmeler, endüstriyel doğrusal kanala göre %3; eş hacimli doğrusal kanala göre %9 oranında azalmıştır. Ergiyik plastik malzemenin farklı bölgelerde farklı hızlarda katılaşması nedeni ile eş dağılımlı bir sıcaklık dağılımı ile yapılacak soğutma işlemi kalıntı gerilmelerin de oluşumunu engelleyecektir. Şekil uyumlu soğutma kanalı ile daha dengeli bir sıcaklık dağılımının sağlanması oluşan kalıntı gerilme değerinin düşmesini sağlamıştır. Kalıntı gerilmeler plastik parçanın, çalışma esnasında maruz kalacağı kuvvetlerle birlikte plastik parçayı deformasyona zorlamaktadır. Şekil uyumlu soğutma kanallarının kullanımı plastik parçanın dayanımını arttırılmasında katkı sağlamaktadır.



Şekil 5.8. Plastik parça üzerindeki kalıntı gerilmeler

İletim ve taşınım ısı transferlerini etkileyen; ısı iletim/taşınım katsayısı, sıcaklık farkı, iletim mesafesi, yüzey alanı faktörleridir. İletim mesafesi ve yüzey alanı parametreleri üzerinde yapılan iyileştirme ile ısı transferi arttırılmıştır. Şekil uyumlu soğutma kanalları ile eş hacimli doğrusal kanallar yaklaşık olarak eşit yüzey alanına rağmen ortalama iletim mesafesinin daha kısa olması ısı transferinin iyileşmesini sağlamıştır (Şekil 5.9).



Şekil 5.9. Şekil uyumlu kanallarda ortalama iletim mesafesinin kısalması

5.5. Deneysel sonuçlar

Eklemeli imalat yöntemleri ile kıyaslandığında sunulan bu yöntem kalıp üretim maliyetleri açısından oldukça avantajlıdır. Sunulan üretim yöntemi ile şekil uyumlu soğutma kanalları, DMLS (Direct Metal Laser Sintering) sinterleme gibi pahalı yöntemlere ihtiyaç duyulmadan daha düşük maliyet ile üretilebilmiştir. Yüksek ömürlü plastik enjeksiyon kalıplarının imalatı için sıcak iş takım çeliği sınıfındaki çelik malzemeler tercih edilmektedir. Sunulan katmanlı sert lehimleme yöntemi ile birçok metalik malzeme kullanılarak istenilen dayanım ve ısıl iletkenliğe sahip kalıpların üretimi mümkündür. Eklemeli imalat tekniklerinde kullanılan malzemelerin yeterli dayanım ve ısıl iletkenliğin sağlanabilmesi için henüz araştırma aşamasında olduğu göz önüne alınırsa sunulan yöntemin uygulanabilirliği ön plana çıkmaktadır.

Soğutma süresinin uzamaması için kalıp sıcaklığı düşük seçilmek istenir. Ancak bu durum kalıp dolumunu zorlaştıracağı için ergiyik sıcaklığının ve enjeksiyon basıncının arttırılmasını gerektirmektedir. Dolaylı olarak kalıp için gerekli kapama kuvveti de artmaktadır. Şekil uyumlu soğutma kanallarının kullanımı ile daha yüksek kalıp sıcaklıklarında çalışmak mümkün hale geldiği için ergiyik sıcaklığı, enjeksiyon ve tutma basınçları, kapama kuvveti parametreleri değerleri düşecektir. Bu sayede Plastik enjeksiyon

kalıplama işlemi, enjeksiyon makinesi ve kalıp zorlanmadan gerçekleştirileceği için enerji ve ömür tasarrufu sağlanacaktır.

Düşük basınç ve ergiyik sıcaklığı ile çalışılması plastik parça üzerindeki çekme, çarpılma ve kalıntı gerilmeleri azaltmakta ve parçalar için ölçüsel toleransların sağlanabilmesini mümkün hale getirmektedir.

Doğrusal soğutma kanalı bulunan kalıpların üretim maliyetleri şekil uyumlu soğutma kanallarından daha düşük olsa da üretim hızının ve ürün kalitesini artması, kalıplama sürecinin iyileştirmesi açısından bakıldığında toplam maliyetlerin azalmasında avantaj sağlanmıştır.

Yapılan çalışma ile şekil uyumlu kanal ile üretilen parçaların ağırlıklarının daha düşük olduğu görülmüştür. Plastik enjeksiyon kalıplama, yüksek hacimli ve seri bir üretim yöntemi olduğu için büyük ölçekte önemli miktarda malzeme tasarrufu sağlanacaktır.
Şekil uyumlu soğutma kanallarına sahip plastik enjeksiyon kalıbı tasarlanmış ve kalıp çekirdekleri katmanlara ayrılmıştır. Kalıp çekirdeklerini oluşturacak taşlanmış plakalar vakumlu sert lehimleme yöntemi ile birleştirilerek kalıp çekirdekleri üretilmiştir. Ayrıca karşılaştırma yapabilmek için endüstriyel doğrusal soğutma kanallarına sahip kalıp çekirdekleri de üretilmiştir. Baskı denemelerinde plastik malzeme olarak ABS kullanılmıştır. Hazırlanan plastik enjeksiyon kalıpları plastik enjeksiyon tezgahına bağlanarak baskı denemeleri yapılmıştır. Kalıp sıcaklığının dengelenmesi için ön hazırlık baskıları yapılmıştır. Her iki soğutma kanalı tipinde de 30’ar adet baskı yapılarak plastik parça üretimi gerçekleştirilmiştir (Resim 5.2).



Resim 5.2. Üretilen plastik parça numuneleri [84]

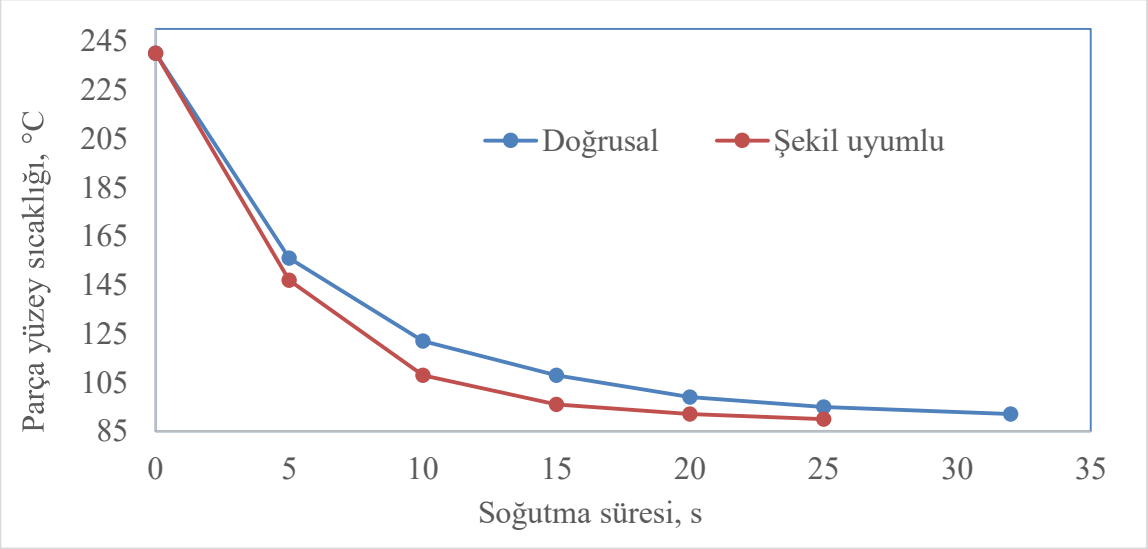
Her iki soğutma kanalı tipinde de aynı enjeksiyon parametreleri kullanılmıştır. Deneme baskıları sırasında soğutma süresi, çevrim süresi, kalıptan çıkan plastik parçanın yüzey sıcaklığı ve kalıp yüzey sıcaklığı ölçülmüştür. Endüstriyel doğrusal ve şekil uyumlu soğutma kanallarının soğutma süresine etkileri gözlemlenmiştir (Çizelge 5.2). Düz soğutma kanalı ile yapılan denemelerde soğutma süresi 32 s olarak belirlenmiştir. Toplam çevrim süresi ise 44s sürmüştür. Şekil uyumlu soğutma kanalları ile yapılan baskı denemelerinde soğutma süresi ise 25 s olarak belirlenmiş ve çevrim süresi ise 37 s sürmüştür. Şekil uyumlu soğutma kanallarının kullanımı ile plastik parçanın kalıptan çıkarılabilmesi için gerekli olan çıkarma sıcaklığına erişim süresi kısalmıştır. Şekil uyumlu kanallar soğutma etkinliğini artırdığı için soğutma süresi ve dolaylı olarak da çevrim süresi kısalmıştır. Soğutma süresi %22 oranında kısalırken çevrim süresindeki kısalma oranı %16 olarak gerçekleşmiştir.

Literatür araştırmalarında deneysel ve sayısal çalışmalarda çevrim süreleri %15-50 oranında kısaldığı görülmüştür [42, 53, 54, 56, 131]. Şekil uyumlu kanal kullanımı ile soğutma süresinin kısalma oranı Plastik parça geometrisi, malzeme, kanal tasarımı gibi birçok parametreden etkilenmektedir. Bu çalışmada sunulan yöntem ile yapılan deneylerde elde edilen sonuçların da literatüre uyumlu olduğu görülmektedir.

Çizelge 5.2. Baskı denemelerinde elde edilen işlem süreleri

Soğutma Kanalı	Soğutma Süresi, s	Çevrim Süresi, s	Hazırlık Süresi, dk
Endüstriyel doğrusal	32	44	75
Şekil uyumlu	25	37	48

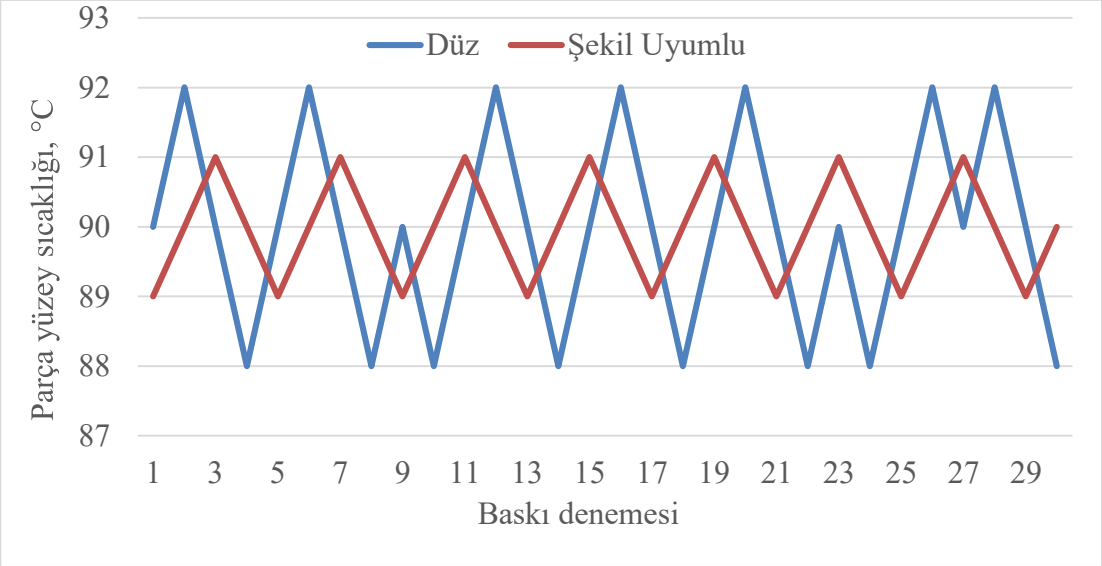
Deney esnasında kalıptan çıkan plastik parçanın, tavsiye edilen çıkarma sıcaklığı olan 90 °C kadar soğutulması için gerekli soğutma süresi ayarlanırken çıkan parçaların yüzey sıcaklıkları ölçülmüştür. Soğutma süreleri 5 s olarak ayarlanmış ve çıkan plastik parçanın yüzey sıcaklığı 90 °C oluncaya dek soğutma süresi 5'er s'lik aralıklarla artırılmıştır. Çıkan plastik parçaların yüzey sıcaklığı 90 °C olduğu andan itibaren soğutma süreleri sabitlenmiştir. Soğutma sürelerine göre plastik parça yüzey sıcaklıkları Şekil 5.10'da grafik olarak gösterilmiştir. Grafikte gösterildiği gibi şekil uyumlu kanal kullanılarak yapılan deneylerde soğutma süresi artırıldıkça çıkan plastik parçanın yüzey sıcaklığı azalmış ve 25 s'lik soğutma süresi ayarlandığında tavsiye edilen çıkarma sıcaklığı olan 90°C'ye erişilmiştir. Doğrusal kanal kullanılarak çıkarma sıcaklığına 32 s'lik soğutma süresi ile erişilebilmiştir.



Şekil 5.10. Plastik parçaların çıkarma sıcaklığına erişim süreleri

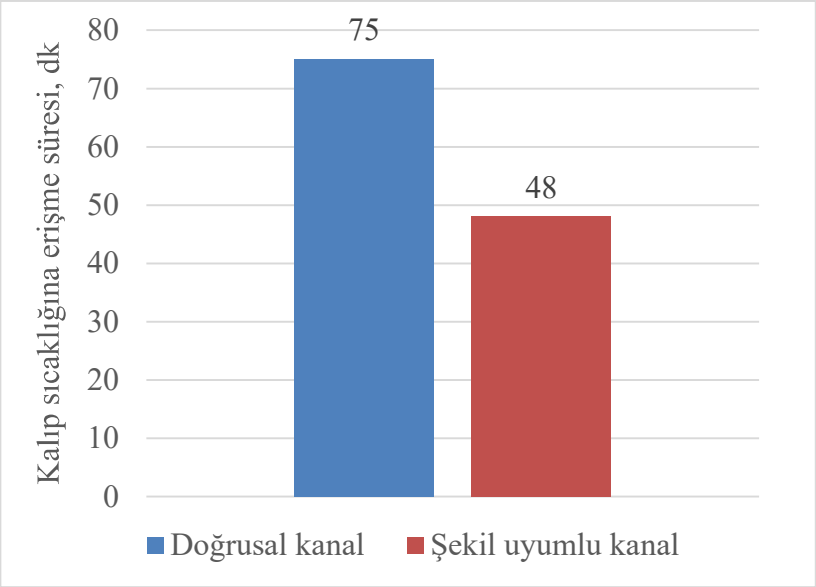
Baskı denemeleri boyunca çıkan parçaların yüzey sıcaklıkları sürekli ölçülmüştür. Şekil uyum kanal ile üretilen parça yüzey sıcaklıkları 2 °C'lik bir aralıkta dengelenirken doğrusal kanal kullanımında plastik parça yüzey sıcaklığında 4 °C'lik bir dalgalanma gözlenmiştir

(Şekil 5.11). Şekil uyumlu soğutma kanalları ile kalıp üzerindeki sıcaklık kontrolü daha iyi bir şekilde kontrol edilebilmektedir. Bu sayede plastik enjeksiyon kalıplama işlemi daha iyi bir ısıl kararlılıkla gerçekleştirilebilmekte ve kalite yönünden daha özdeş parçalar üretilebilmektedir.



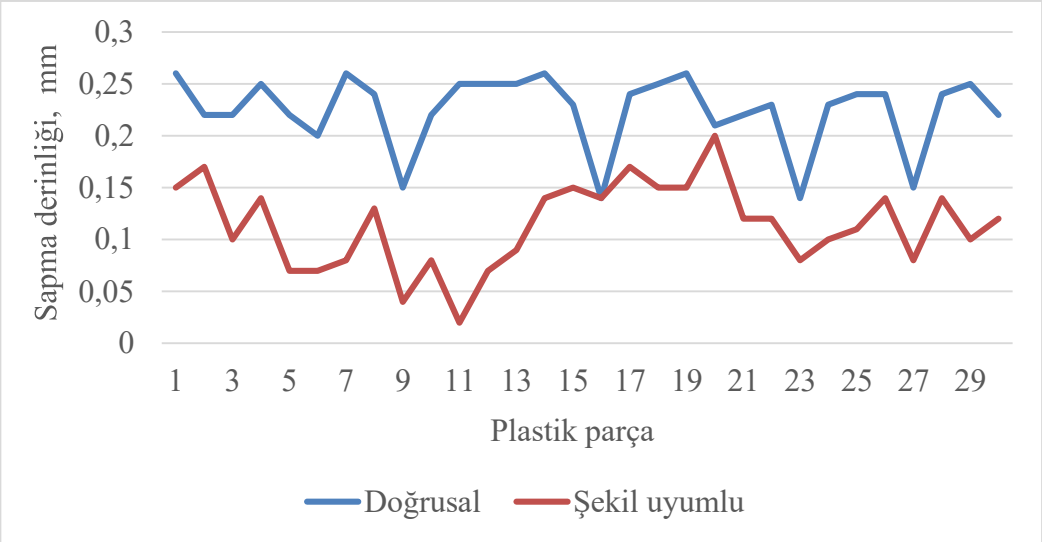
Şekil 5.11. Baskı demelerine göre kalıptan çıkan parçalarının yüzey sıcaklıkları

Plastik enjeksiyon kalıplama işleminde kalıp sıcaklığının dengeye gelinceye kadarki süre içinde üretilmiş hurdaya ayrılan plastik parçalar ve zaman kaybı başlangıç kayıplarına neden olmaktadır. Bu nedenle başlangıç süresinin en aza indirilmesi üretim maliyetlerini düşürecektir. Şekil uyumlu ve doğrusal soğutma kanalları başlangıç kayıpları açısından da karşılaştırılmıştır. Yapılan baskı denemeleri için kalıp şartlandırıcı kullanılmış ve baskı yapılmaksızın kalıbın çalışma sıcaklığına gelmesi beklenmiştir. Kalıp sıcaklığının dengeye gelme süresi düz kanal kullanımında 75 dk şekil uyumlu kanal kullanımında ise 48dk sürmüştür (Şekil 5.12).

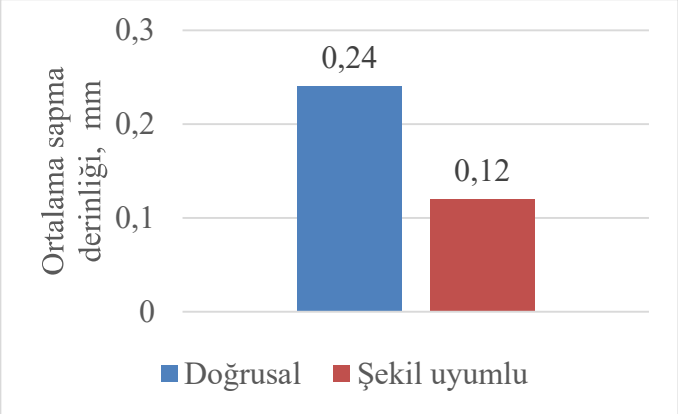


Şekil 5.12. Kalıp sıcaklığının dengeye gelme süreleri

Deneme baskılarında üretilen her bir plastik parçanın düzlemsel yüzeyi üzerindeki çarpılma derinliği komperatör saati ile ölçülmüş ve bu sapma miktarının ortalama değerleri belirlenmiştir. Şekil uyumlu ve endüstriyel doğrusal kanallar ile üretilen plastik parçaların üzerindeki çapılmalar Şekil 5.13'daki grafikte gösterilmektedir. Şekil uyumlu soğutma kanalı ile üretilen plastik parçalar üzerindeki çarpılma değerleri doğrusal kanalla üretilenlere göre daha düşük değerdedir. Elde edilen sonuçlara göre şekil uyumlu kanalların daha düzgün bir sıcaklık dağılımı sağlaması nedeniyle parça üzerindeki çekmenin de daha düzenli gerçekleştiği bununla beraber çarpma miktarının da azaldığı görülmektedir. Yüzeydeki ortalama sapma değerleri karşılaştırıldığında şekil uyumlu kanal kullanımı ile ortalama sapma derinliği 0,24 mm'den 0,12 mm'ye düşerek %50 oranında azaldığı belirlenmiştir Şekil 5.14).



Şekil 5.13. Plastik parça üzerinde düzlemsel yüzeydeki sapma derinlikleri

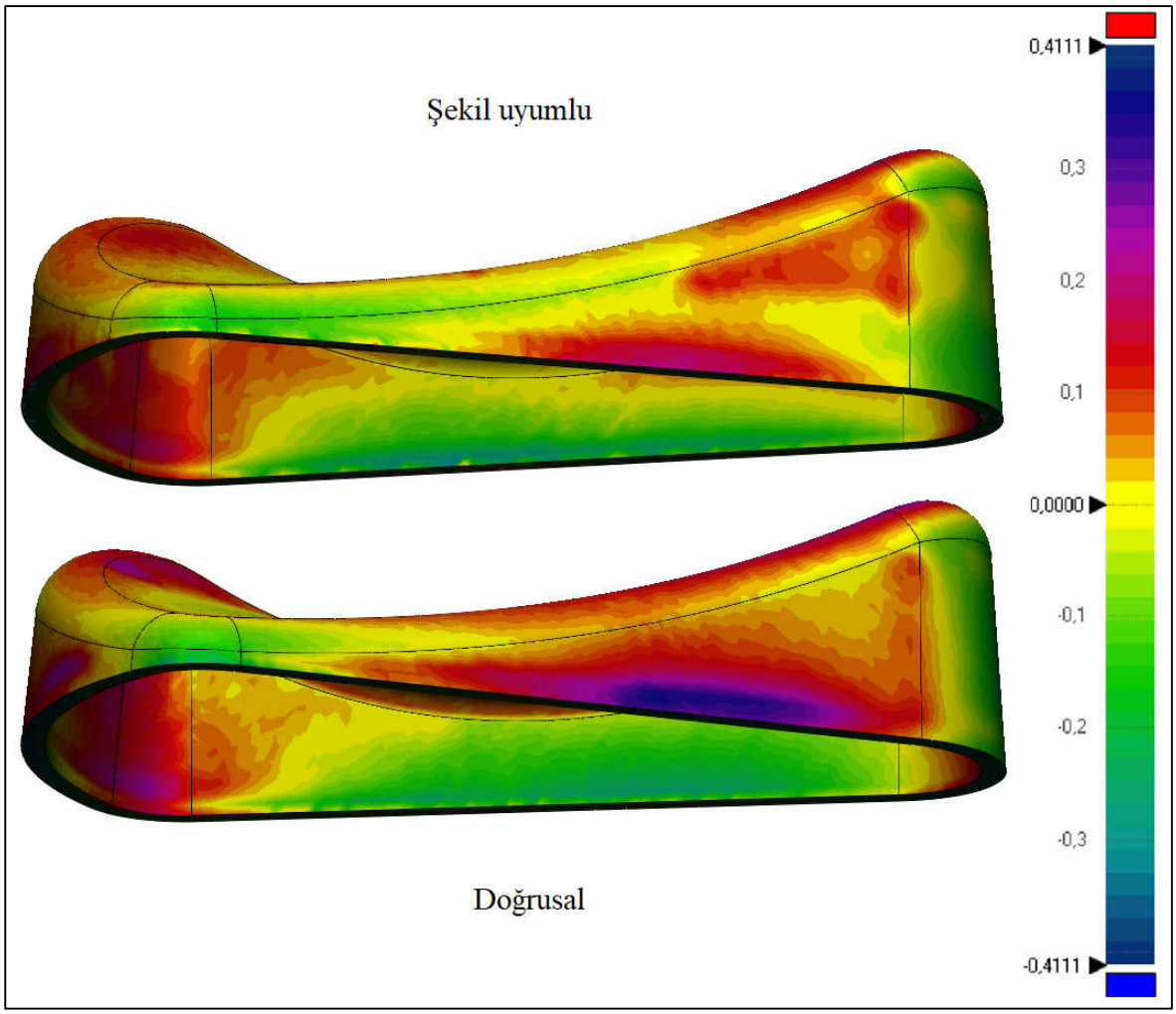


Şekil 5.14. Ortalama sapma derinlikleri

Bu alanda yapılan benzer çalışmalardaki çarpılma değerleri incelendiğinde şekil uyumlu soğutma kanallarının kullanımı ile çarpılma miktarlarında önemli ölçüde iyileşmelerin olduğu araştırmacılar tarafından belirtilmiştir [49, 50, 56, 71]. Çevrim süresinin kısaltılmasının yanında çarpılmanın azaltılarak ürün kalitesinin artırılması plastik enjeksiyon kalıplama için önemli bir avantajdır. Bu çalışma kapsamında elde edilen sonuçların literatür sonuçları ile uyumlu olduğu görülmektedir.

Üretilen parçaların yüzeyleri 3B optik tarayıcı ile taranarak CAD modelleri elde edilmiş ve bu modeller orijinal CAD modelleri ile karşılaştırılmıştır. Şekil 5.15'de Şekil uyumlu ve doğrusal kanallarla üretilen plastik ürünlerin üzerindeki sapma miktarları karşılaştırılmıştır.

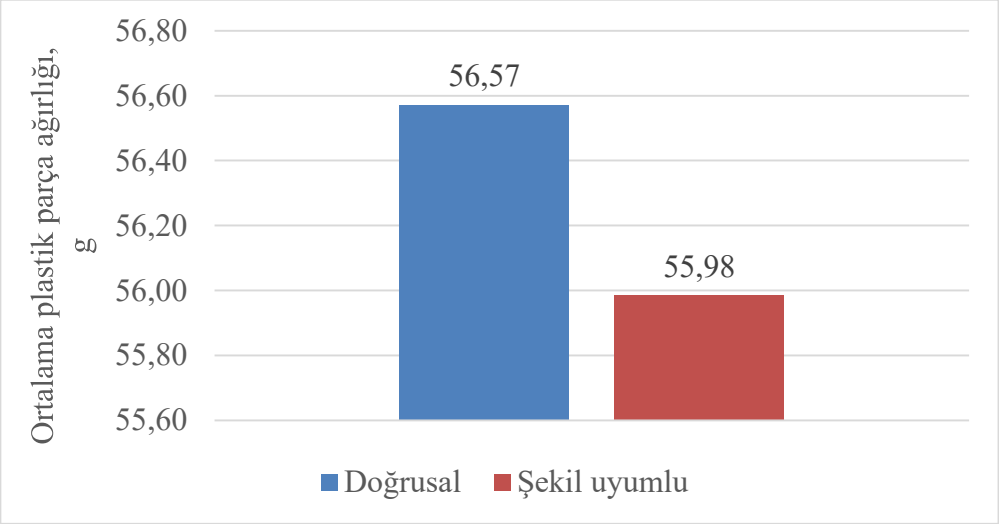
Şekil uyumlu soğutma kanalı ile elde edilen ürün üzerindeki en büyük sapma miktarı 0,3393 mm olarak belirlenirken doğrusal kanalla üretilen plastik parça için bu değer 0,4111 mm olarak tespit edilmiştir. Şekil uyumlu soğutma kanalının kullanımı ile çarpılma miktarı bağıl olarak %17 oranında azaltılarak plastik ürün kalitesi arttırılmıştır.



Şekil 5.15. Deney parçalarının yüzeyindeki çarpılma miktarı dağılımı

Üretilen plastik ürünlerin yüzeylerindeki çarpılmaların karşılaştırılması için plastik ürünler CMM tezgâhı ile ölçülmüştür. Parça yüzeylerinin 45 farklı noktasından ölçümler alınmıştır. Orijinal CAD modeli ile karşılaştırılarak sapma miktarları belirlenmiştir. Şekil uyumlu kanal ile üretilen parça üzerindeki sapmaların ortalama değeri 0,328 mm iken doğrusal kanal ile üretilen parça üzerindeki sapmaların ortalama değeri 0,428 mm olmuştur. Şekil uyumlu kanalların kullanımı ile plastik parça üzerindeki çarpılma derinli ortalama olarak 0,1mm azalmıştır. CMM ölçüm raporu EK-3'te gösterilmiştir.

Deneme baskıları ile üretilen plastik parçaların ağırlıkları ölçülerek karşılaştırılmıştır. Plastik parçaların ortalama ağırlıkları Şekil 5.16'daki grafikte gösterilmiştir. Şekil uyumlu soğutma kanalı ile üretilen plastik parçaların ortalama ağırlığı 55,98 g ve doğrusal soğutma kanalı ile üretilen plast1ik parçaların ortalama ağırlıkları 56,57 g olarak belirlenmiştir. Şekil uyumlu kanal ile üretilen parçalar yaklaşık olarak %1 oranında daha hafiftir. Plastik enjeksiyon kalıplama işleminin çok hacimli bir seri üretim yöntemi olduğu düşünüldüğünde şekil uyumlu soğutma kanallarının kullanımı plastik malzeme tasarrufu sağlayacaktır.



Şekil 5.16. Plastik parçaların ortalama ağırlıkları

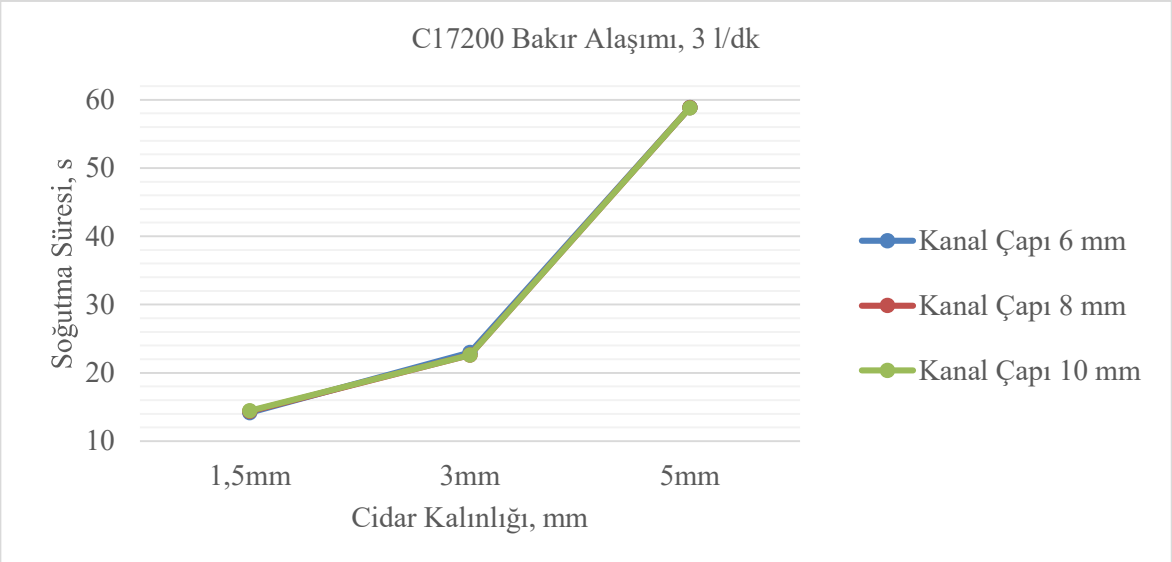
Plastik enjeksiyon kalıplamada kalıp boşluğunun ergiyik plastik malzeme ile dolumundan sonra soğuyan plastik malzemenin hacminin küçülmesi nedeniyle boşluk oluşmaması için ergiyik malzeme kalıp içine basılmaya devam edilir. Bu aşama ütüleme safhası olarak isimlendirilmektedir. Ütüleme basıncı, kalıp içerisindeki plastik malzemeyi sürekli olarak sıkıştırdığı için kalıp boşluğuna dolan malzemenin kütlesi artmaktadır. Şekil uyumlu soğutma kanalı ile yapılan soğutma süresinin kısalması ile beraber ütüleme süresi de kısalmaktadır. Doğrusal kanal ile soğutma esnasında plastik parçanın iç bölgeleri daha geç katılaştığı için uygulanan ütüleme basıncıyla kalıp içine daha fazla malzeme girişi mümkün olmaktadır. Bu nedenle doğrusal kanal ile üretilen plastik parçalar şekil uyumlu kanal ile üretilen parçalara göre daha ağır olmaktadır [132, 133].

5.6. Soğutma Parametrelerinin Soğutma İşlemi Üzerindeki Etkileri

Şekil uyumlu, eş hacimli doğrusal ve endüstriyel doğrusal soğutma kanalları tasarlanarak dolum, soğutma ve çarpılma analizleri yapılmıştır. Analiz sonuçlarının doğrulanması amacıyla şekil uyumlu ve endüstriyel doğrusal soğutma kanalına sahip plastik enjeksiyon kalıpları tabakalı obje yöntemi ile üretilerek deneyler yapılmıştır. Elde edilen analiz ve deney sonuçlarının birbirleri ile uyumlu olduğu görülmüştür. Analizde kullanılan sayısal çözümleme ayarları ile soğutma parametrelerinin soğutma işlemi üzerindeki etkileri sayısal analizlerle belirlenmeye çalışılmıştır. Şekil uyumlu soğutma kanalları ile yapılan bir soğutma işlemi için kanal çapı, cidar kalınlığı, soğutma suyu debisi ve kalıp malzemesinin ısıl iletkenliği parametrelerinin değişken kabul edildiği analizler yapılarak sonuçları incelenmiştir. Çizelge 4.9'da sayısal analizlerde kullanılan değişkenlerin değerleri gösterilmiştir. Kanal çapının, 6-8-10 mm değerleri için; cidar kalınlığının 1,5-3-5 mm değerleri için; soğutma suyu debisinin 3-6 l/dk değerleri için analizler yapılmıştır. Analizlerde ısıl iletkenlikleri sırasıyla 29 W/m.°C ve 130 W/m.°C olan, P-20 takım çeliği ve C17200 Bakır alaşımı olmak üzere iki farklı kalıp malzemesi kullanılmıştır. Bu değişkenlerle yapılan analizler sonucunda soğutma süresi, çarpılma miktarı, kanaldaki basınç kaybı, soğutma suyunun giriş çıkış sıcaklık farkı ve kalıntı gerilme sonuçları incelenmiştir.

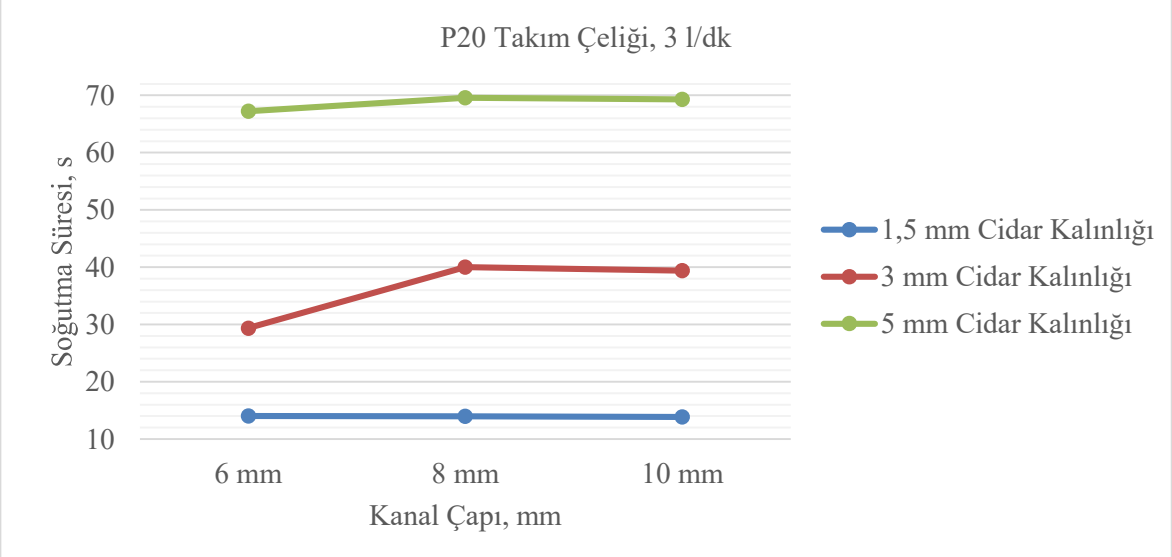
5.6.1. Soğutma süreleri

Yapılan analizlerde elde edilen sonuçlara göre kanal çapı, cidar kalınlığı, kalıp malzemesi ve soğutma suyu debisinin soğutma süresi üzerinde etkili olduğu görülmüştür. Şekil 5.17'de C17200 bakır alaşımı ve 3 l/dk soğutma suyu debisi için yapılan analiz sonucu grafik olarak gösterilmiştir. Cidar kalınlığının 1,5 mm'den 3 mm'ye çıkmasıyla soğutma süresi yaklaşık 14 s'den 22 s civarına çıkmış ve 5 mm 'lik cidar kalınlığı için soğutma süresi değeri yaklaşık olarak 69 s olmuştur. Cidar kalınlığının artmasıyla soğutma süresi önemli ölçüde artmıştır. 6-8-10 mm kanal çapları için yapılan analizlerde soğutma süresi değerleri birbirlerine oldukça yakın çıkmıştır. Cidar kalınlığı, soğutma süresi üzerinde kanal çapından daha etkili olduğu grafikten açıkça görülmektedir.



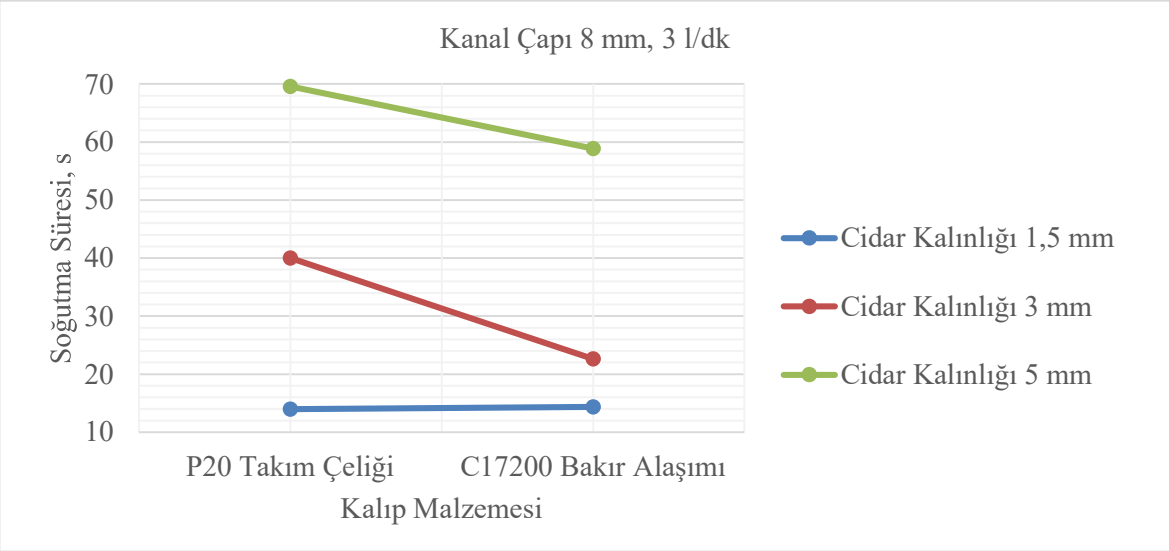
Şekil 5.17. Soğutma süresinin cidar kalınlığına göre değişimi

Soğutma süresinin kanal çapına göre değişiminin daha belirgin olarak gösterildiği Şekil 5.18'daki grafiğe göre kanal çapının değişimi ile soğutma süresinin değişimi daha düşük düzeydedir. Kalıp malzemesi olarak P20 takım çeliği ve soğutma suyu için 3 l/dk'lık debinin kullanıldığı analizlerde, kanal çapının 6 mm'den 8 mm'ye ve sonrasında 10 mm'ye çıkması soğutma sürelerini önemli ölçüde değiştirmemiştir. Cidar kalınlıklarının değişimi soğutma süresi üzerinde daha baskın bir etkiye sahiptir.



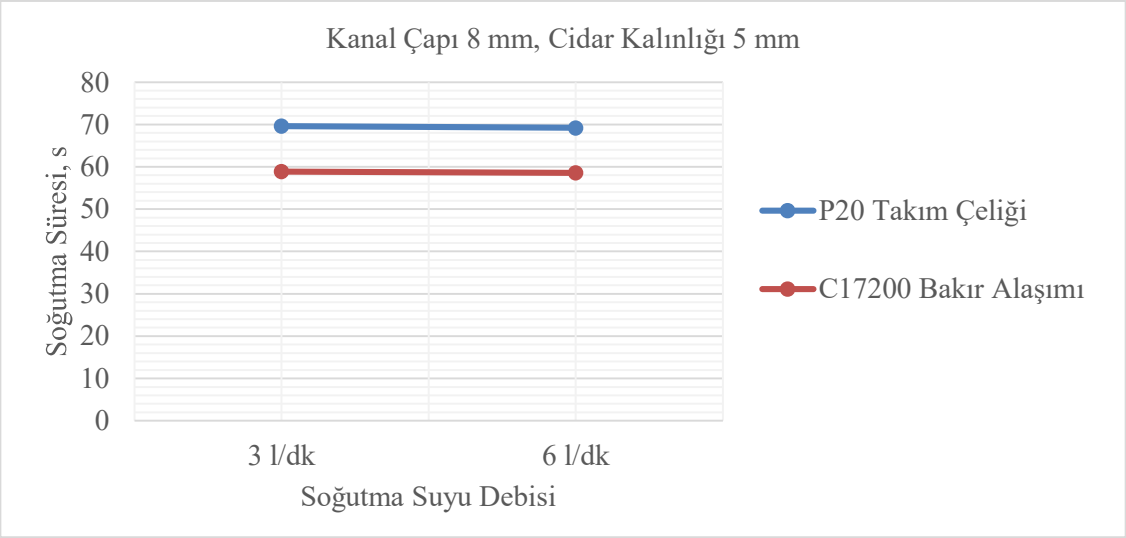
Şekil 5.18. Soğutma süresinin kanal çapına göre değişimi

Kalıp malzemesinin soğutma süresi üzerindeki etkisinin ifadesi için Şekil 5.19'da oluşturulan grafikte kanal çapı 8 mm ve soğutma suyu debisi 3 l/dk'dır. Isıl iletkenliği daha yüksek olan C17200 bakır alaşımının kalıp malzemesi olarak kullanılmasıyla soğutma süresi düşmüş plastik parça çıkarma sıcaklığına daha kısa sürede ulaşmıştır. 1,5 mm cidar kalınlığına sahip plastik parçasının kalıplanmasında, kalıp malzemesinin değişimi soğutma süresi üzerinde belirgin bir etki yaratmazken 3 ve 5 mm cidar kalınlığına sahip parçaların kalıplanmasında soğutma süresi belirgin bir şekilde kısalmıştır. Cidar kalınlığının, soğutma süresi üzerinde kalıp malzemesinin ısıl iletkenliğine göre daha baskın bir etkiye sahip olduğu bu grafikte de görülmektedir. Kalıp malzemesinin ısıl iletkenliği 29'dan 130 W/m.°C'ye çıkarak yaklaşık 450% oranında artmasına rağmen soğutma süresindeki ortalama düşme oranı %35 civarında kalmıştır.



Şekil 5.19. Soğutma süresinin kalıp malzemesine göre değişimi

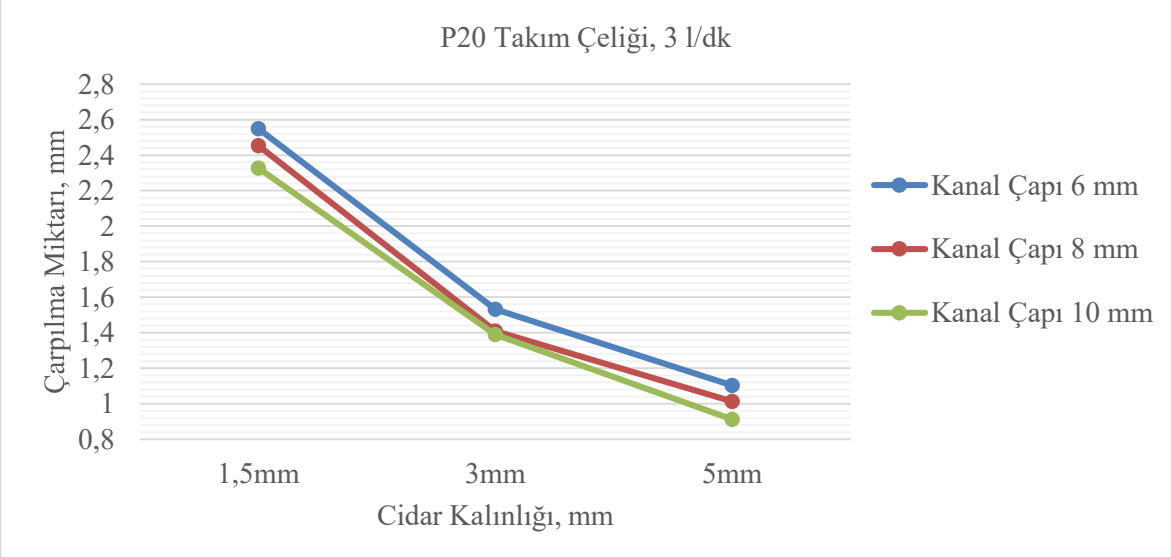
Şekil 5.20'de soğutma süresinin soğutma suyu debisine göre değişimi görülmektedir. 8 mm kanal çapı ve 5 mm cidar kalınlığı seçilen analiz sonucuna göre soğutma suyu debisinin 3 l/dk'dan 6 l/dk'ya çıkması soğutma süresi üzerinde belirgin bir değişiklik yaratmamıştır. P20 takım çeliği yerine kalıp malzemesi olarak C17200 bakır alaşımının kullanılması soğutma süresinde yaklaşık olarak 10 s'lik kısalma sağlamıştır. Soğutma süresinin kısaltılması için ısıl iletkenliği daha yüksek bir malzemenin kullanılmasının soğutma suyu debisini arttırmaya göre daha etkili bir yöntem olduğu görülmektedir.



Şekil 5.20. Soğutma süresinin soğutma suyu debisine göre değişimi

5.6.2. Çarpılma miktarları

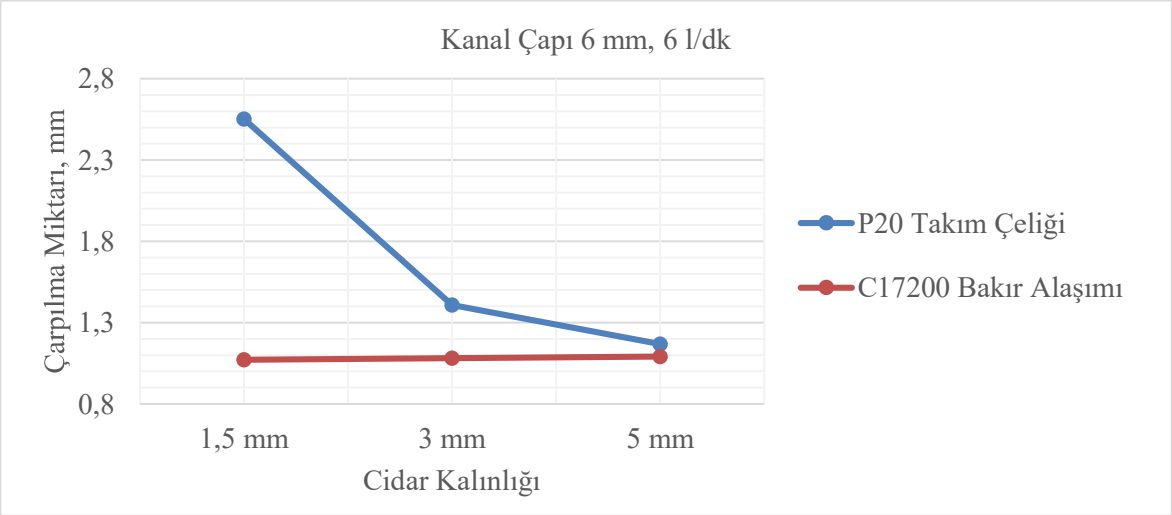
Yapılan analizler sonucunda incelenen değişkenlerden birisi de katılaşan plastik malzeme üzerindeki çekme nedeniyle oluşan çapılma miktarıdır. Çarpılma miktarının cidar kalınlığına göre değişimi Şekil 5.21'de gösterilmektedir. Kalıp malzemesi olarak P20 takım çeliğinin ve soğutma suyu debisinin 3 l/dk sabit olduğu analizler sonucunda oluşan çarpılma miktarları belirlenmiştir.



Şekil 5.21. Çarpılma miktarının cidar kalınlığına göre değişimi

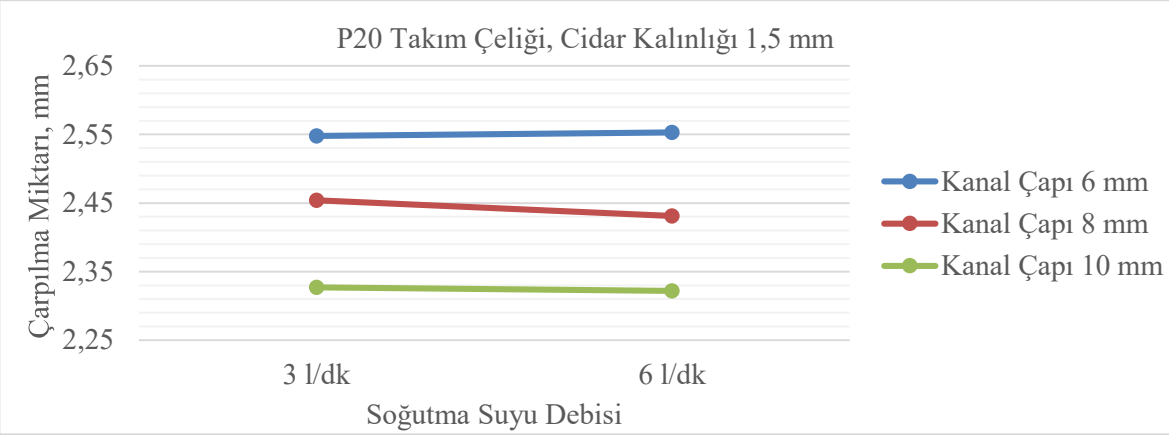
Plastik parçanın cidar kalınlığının artmasıyla çarpılma miktarı azalmıştır. 6-8-10 mm olmak üzere üç farklı kanal çapının çarpılma üzerindeki etki de gösterilmektedir. Buna göre kanal çapının büyümesiyle çapılma miktarın da düşük bir düzeyde azalma olmuştur. Çarpılma miktarının oluşumunda plastik parçanın cidar kalınlığının çok daha etkin bir role sahip olduğu açıkça görülmektedir.

Şekil 5.22'de ise kalıp malzemesi il birlikte cidar kalınlığının çarpılma miktarına etkisi gösterilmektedir. Kanal çapının6 mm ve soğutma suyu debisinin 6 l/dk olduğu analiz sonuçlarında kalıp malzemesinin ısıl iletkenliğini değişimi çarpılma miktarını önemli ölçüde etkilemiştir. Isıl iletkenliği 29 W/m.°C olan P20 takım çeliği kullanılarak yapılan çarpılma analizi sonucunda elde edilen değerler incelendiğinde, cidar kalınlığının çarpılma miktarı üzerindeki etkisi daha yüksek olduğu görülmektedir. Isıl iletkenliği 130 W/m.°C C17200 bakır alaşımının kullanımı ile kalıp çok daha düzgün bir şekilde soğutulabildiği için plastik parçanın tüm bölgelerinde daha yakın hızlarda bir katılaşma sağlandığı için plastik parçanın çarpılması önlenmiştir. Bakır alaşımı kalıp malzemesinin kullanımıyla çapılma değeri genel çekme değerine yaklaşmıştır. Düşük ısıl iletkenlikteki takım çeliğinin kullanıldığı durumda ise ince cidarlı plastik parçalar kalıp içerisindeki düzensiz sıcaklık dağılımına daha duyarlı olduğu için çarpılma miktarı artmıştır. İnce cidarlı parçalar daha kısa süreli bir soğutmayla çıkarma sıcaklığına eriştiği için kalıp içerisindeki düzensiz sıcaklık dağılımının dengelenmesi yeterli süre bulunmamakta ve çekmedeki düzensizlik çarpılmayla sonuçlanmaktadır.



Şekil 5.22. Kalıp malzemesi ve cidar kalınlığının çarpılma miktarına etkisi

Yapılan analizlerde kullanılan bir diğer değişken olan soğutma suyu debisinin çarpılma miktarı üzerindeki değişimi Şekil 5.23'de gösterilmiştir. P20 takım çeliği ve 1,5 mm plastik parçanın cidar kalınlığı yapılan analizlerde sabit tutulmuştur. Soğutma suyu debisinin 3 l/dk'dan 6 l/dk'ya çıkmasına rağmen çapılma miktarında belirgin bir değişme olmamıştır. Aynı şekil üzerin kanal çapının da çarpılma miktarı üzerindeki değişimi gözlenebilmektedir. Buna göre kanal çapının büyümesiyle plastik parça üzerinde oluşan çarpıma miktarı da azalmıştır. Kanal çapının değişimi, çarpılma miktarı üzerindeki etkisi soğutma suyu debisine göre çok yüksektir ancak Şekil 5.22'de de gösterildiği gibi kalıp malzemesinin ısıl iletkenliği çarpılma oluşumun daha baskın bir etkiye sahiptir.

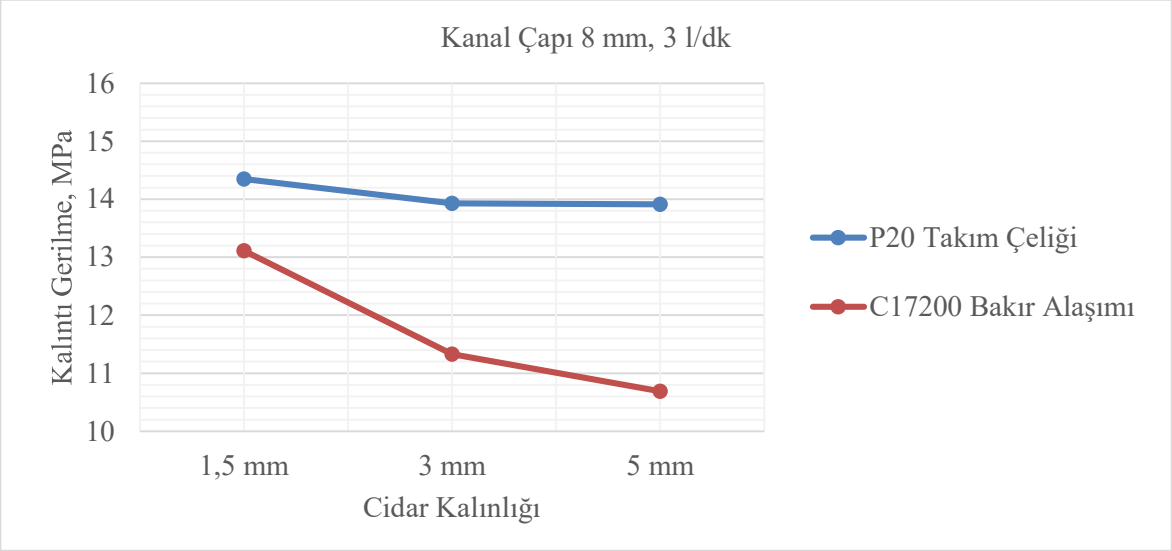


Şekil 5.23. Çarpılma miktarının soğutma suyu debisine göre değişimi

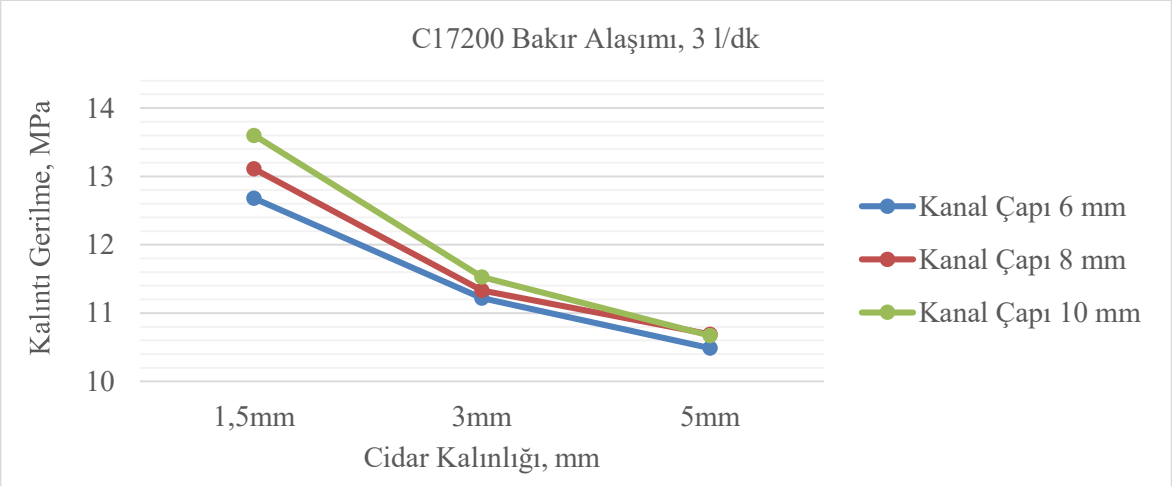
5.6.3. Kalıntı gerilme

Yapılan analizlerin sonucunda incelenen değişkenlerden birisi de plastik parçalar üzerinde oluşan kalıntı gerilmelerdir. Kalıntı gerilmeler plastik parça üzerindeki çarpılmanın bir sonucu olduğu için kalıntı gerilmeler de çarpılma gibi plastik parçanın cidar kalınlığından ve kalıp malzemesinin ısıl iletkenliğinden etkilenmektedir. Kalıntı gerilme değerleri Moldflow'da warp analizi sonuçlarından "Mises-Hencky Stress" değerleri ile ifade edilmektedir. 8 mm kanal çapı ve 3 l/dk debinin sabit olduğu analiz sonuçlarından elde edilen değerler grafik olarak Şekil 5.24'de gösterilmektedir. Cidar kalınlığı ve kalıp malzemesinin ısıl iletkenliğine bağlı olarak değişmiştir. Cidar kalınlığının artmasıyla kalıntı gerilmeler azalmıştır. Isıl iletkenliği, kalıntı gerilmeyi etkileyen diğer bağımsız değişkendir. Kalıntı gerilme ısıl iletkenlikle ters orantılı olarak değişmiştir. Isıl iletkenlik, kalıntı gerilmeler

üzerinde cidar kalınlığına göre daha baskın bir etkiye sahiptir. Isıl iletkenliğin artması cidar kalınlığının etkisinin de artması sağlamıştır. Şekil 5.25'te kalıntı gerilmenin kanal çapıyla değişimi ifade edilmiştir. Kanal çapının artmasıyla düşük de olsa kalıntı gerilmeler de bir miktar azalma olmuştur. Cidar kalınlığının azalmasıyla bu değişim daha da düşük seviyede kalmıştır. Kanal çapı, kalıntı gerilmelerin oluşumunda ısıl iletkenlik ve cidar kalınlığına göre daha düşük bir etkiye sahiptir. Kalıntı gerilme ve çarpılma miktarı; ısıl iletkenlik, cidar kalınlığı ve kanal çapı parametreleriyle paralel bir ilişkiye sahiptir.



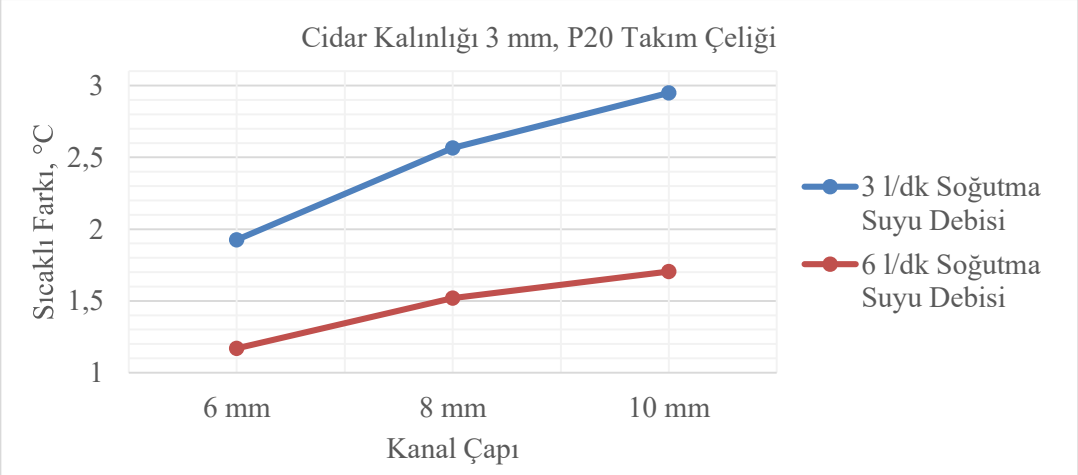
Şekil 5.24. Kalıntı gerilmenin cidar kalınlığına göre değişimi



Şekil 5.25. Cidar kalınlığı ve kanal çapının kalın gerilmeye etkisi

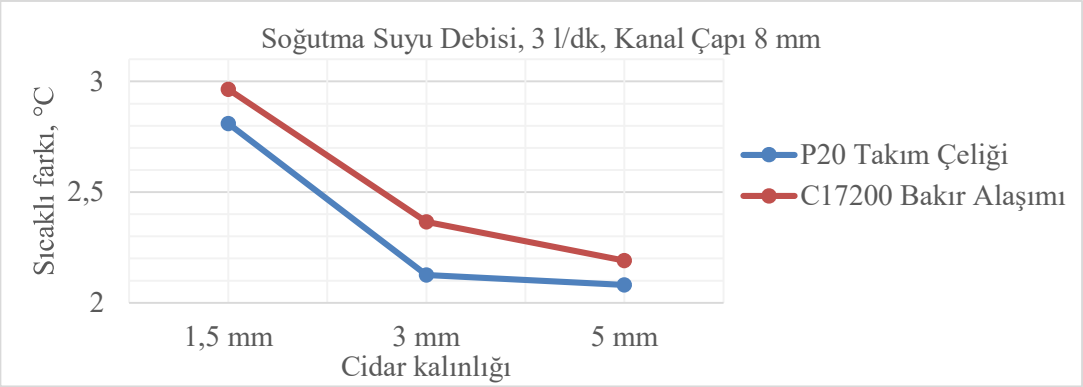
5.6.4. Soğutma suyu sıcaklık değişim ve basınç kaybı

Plastik enjeksiyon kalıplamada kalıp üzerindeki ısının, kalıbın tüm bölgelerinde eşit şekilde soğurulması kalıp üzerinde düzgün sıcaklığının sağlanabilmesi için kritik bir öneme sahiptir. Bunu için soğutma kanalı içerisinden dolaşan soğutma suyunun sıcaklığının mümkün olduğunca sabit kalması istenmektedir. Literatürde kalıba giren ve kalıptan çıkan suyun sıcaklığı arasındaki farkın 2 °C'yi aşmamasının önemi ifade edilmiştir. Yapılan soğutma analizlerinde kalıp içerisinde dolaşan suyun sıcaklığındaki değişim de incelene sonuçlardan bir tanesidir. Şekil 5.26'de 3 mm cidar kalınlığının ve P20 takım çeliğinin kullanıldığı analizlerde kanal çapı ve soğutma suyu debisinin soğutma suyu sıcaklık değişimine etkisi ifade edilmiştir. Kanal çapının 6 mm'den 10 mm'ye çıkmasıyla sıcaklık farkında yaklaşık 1 °C yükselme gerçekleşmiştir. Soğutma suyu debisinin 3 l/dk'den 6 l/dk'ya çıkması sıcaklık farkının azalmasını sağlamıştır.



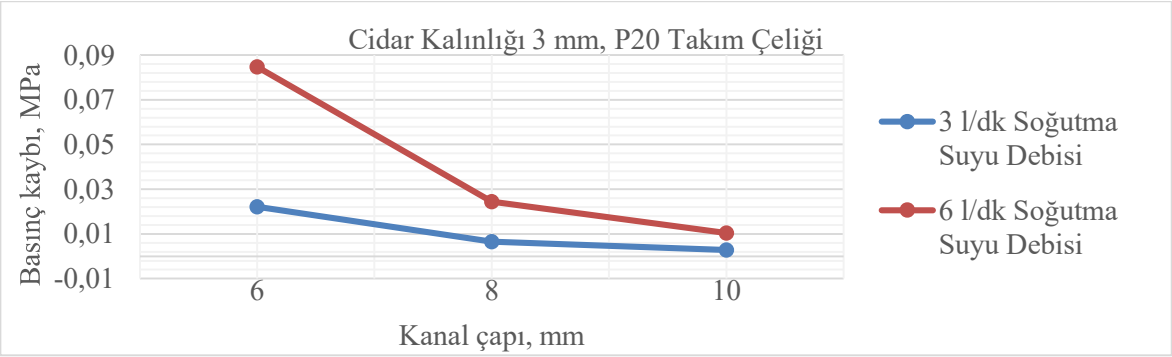
Şekil 5.26. Soğutma suyunun giriş çıkış sıcaklık farkının kanal çapına göre değişimi

Şekil 5.27'de ise cidar kalınlığı ve kalıp malzemesinin soğutma suyu sıcaklığının giriş çıkış sıcaklık farkına etkisi incelenmiştir. Soğutma suyu debisinin 3 l/dk ve kanal çapının 8mm olarak sabit olduğu analizlerin sonucuna göre cidar kalınlığının artmasıyla sıcaklık farkında 1 °C yakın bir düşme gözlenmektedir. Kalıp malzemesinin ısıl iletkenliğinin artması ise sıcaklık farkı üzerinde düşük bir etkiye sahiptir. Bağımsız değişkenler arasında soğutma suyu giriş sıcaklığı üzerindeki en etkili parametrenin soğutma suyu debisi olduğu görülmüştür.



Şekil 5.27. Soğutma suyunun giriş çıkış sıcaklık farkının cidar kalınlığına göre değişimi

Plastik enjeksiyon kalıbının etkili ve düzgün bir sıcaklık dağılımı ile soğutulabilmesi için kanal içerisindeki soğutma suyunun sıcaklık değişiminin 2 °C altında kalacak şekilde akış hızının sabit tutulması gerekmektedir. Plastik enjeksiyon kalıplarının soğutulmasında kalıp kanallarında soğutma suyunun dolaşımı için gerekli pompa ihtiyacının belirlenmesi amacıyla analiz sonuçlarında soğutma kanalındaki basınç kaybı da incelenmiştir. Şekil 5.28'de kanal çapı ve soğutma suyu debisindeki değişimlerin soğutma kanalı içindeki basınç kaybına etkileri belirlenmiştir. 3 mm cidar kalınlığı ve P20 takım çeliği malzemesi ile yapılan sayısal analiz sonuçlarına göre kanal çapının büyümesiyle soğutma kanalı içerisindeki basınç kayıpları azalmıştır. Soğutma kanalındaki basınç kaybını etkileyen diğer parametre de akışkan debisidir. Soğutma suyu debisinin 3 l/dk'dan 6 l/dk'ya çıkmasıyla basınç kaybı yükselmiştir. Kanal çapı ve soğutma suyu debisindeki değişimler soğutma kanalındaki basınç kayıplarını önemli ölçüde etkilemektedir. Soğutma suyu giriş çıkış sıcaklık farkının 2 °C'nin altında tutulabilmesi için basınç düşüşünü telafi edecek uygun pompa seçilmelidir.



Şekil 5.28. Soğutma kanalındaki basınç kaybının kanal çapına göre değişimi

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada plastik enjeksiyon kalıplarında şekil uyumlu soğutma kanallarının soğutma sisteminin verimliliğine etkisi sayısal ve deneysel olarak incelenmiştir. Plastik enjeksiyon kalıplamada, daha kısa sürede istenilen kalitede ürün elde edilmesi amaçlanmıştır. Eğimli yüzeylerden oluşan, karmaşık geometriye sahip bir plastik parça için durum çalışması yapılmıştır. Parça boyutları 149×94×41 mm'dir. Cidar kalınlığı tüm bölgelerde eşit olmak üzere kalınlık değeri 3,5 mm'dir ve yan yüzeyler 5° açıya sahiptir. Parça malzemesi için geniş kullanım alanına sahip ABS (Akrilonitril Butadien Stiren) tercih edilmiştir.

Plastik parçanın eğimli yüzeylerini belirli bir mesafede uyumlu bir şekilde takip edecek soğutma kanallarının tasarlanabilmesi için sistematik bir metot geliştirilmiştir. Geliştirilen tasarım yöntemi ile kalıp boşluğu yüzeyini sabit bir mesafe ile takip eden, kanallar arası mesafenin korunduğu şekil uyumlu soğutma kanalları tasarlanmıştır. Ayrıca karşılaştırma yapmak üzere şekil uyumlu kanal ile eş hacme sahip doğrusal soğutma kanalı ve endüstride kullanılan doğrusal kanal tipinde iki farklık kanal tasarımı daha yapılmıştır.

Plastik enjeksiyon kalıplama süreçlerinin analizi için özelleşmiş bir ticari yazılım olan Moldflow kullanılarak tasarlanan kalıpların sayısal analizleri yapılmıştır. Analiz sonuçlarına göre şekil uyumlu soğutma kanalına sahip kalıplama işlemlerinde soğutma süresinin kısaldığı, homojen bir soğumanın gerçekleştiği ve buna bağlı olarak da üründeki çarpılmaların azaldığı tespit edilmiştir.

Şekil uyumlu soğutma kanalı bulunan plastik enjeksiyon kalıbının üretilebilmesi katmanlı fırında sert lehimleme yöntemi kullanılmıştır. Kalıp çekirdekleri öncelikle taşlanmış çelik plakalardan parçalı olarak üretilmiş ve daha sonra vakumlu sert lehimleme yöntemi ile birleştirilmiştir. Deneysel karşılaştırma için ayrıca doğrusal kanallara sahip kalıp çekirdekleri de üretilmiştir.

Düz ve şekil uyumlu soğutma kanalları bulunan plastik enjeksiyon kalıpları ile baskı denemeleri yapılarak plastik parça üretilmiş ve süreler incelenmiştir. Şekil uyumlu soğutma kanalı kullanımı ile soğutma süresi 32 s 'den 25 s'ye düşmüş ve yaklaşık %22 oranında bir kısalma sağlanmıştır. Toplam çevrim süresi 44 s'den 37 s'ye düşmüş ve %16 oranında

kısalma sağlanmıştır. Ayrıca baskı öncesi hazırlık aşamasında kalıp şartlandırıcı ile kalıbın çalışma sıcaklığına ayarlanabilmesi için gerekli süreler incelenmiştir. Şekil uyumlu soğutma kanallarının kullanımı ile kalıp sıcaklığının dengeye erişim süresi de 75 dk'dan 42 dk'ya düşmüştür. Bu süredeki kısalma oranı %33'tür.

Deneysel olarak üretilen plastik parçaların üzerindeki çarpılma miktarları ölçülerek karşılaştırılmıştır. Doğrusal soğutma kanalı kullanılarak üretilen plastik parçaların düzlemsel yüzeyindeki ortama sapma derinliği 0,24 mm iken şekil uyumlu kanallar ile üretilen parçaların düzlemsel yüzeyindeki ortama sapma derinliği 0,12 mm olarak belirlenmiştir. Sapma miktarının %50 oranında azaldığı ve plastik parça kalitesinin arttırıldığı tespit edilmiştir. Ayrıca üretilen plastik ürünler 3B optik tarayıcı ile taranarak çarpılma miktarları ölçülerek karşılaştırılmıştır. Şekil uyumlu soğutma kanalının kullanımı ile plastik parça üzerindeki çarpılma miktarının %17 oranında azaldığı belirlenmiştir.

Yapılan deneyler ile sayısal analizlerin doğrulanmasından sonra aynı analiz şartları kullanılarak kanal çapı, plastik parçanın cidar kalınlığı, soğutma suyu debisi ve kalıp malzemesinin ısıl iletkenliği parametrelerinin; soğutma süresi, çarpılma miktarı, kalıntı gerilmeler, soğutma suyu giriş çıkış sıcaklıkları ve kanaldaki basınç kayıpları üzerindeki etkilerini belirlemek için bir grup analiz yapılmış ve sonuçları incelenmiştir.

Yapılan çalışma ile elde edilen kazanımlar ve sunulan yöntemin avantajları aşağıda maddeler halinde belirtilmiştir.

- Karmaşık geometriye sahip plastik parçalar için şekil uyumlu soğutma kanallarının tasarlanabilmesini sağlayan bir tasarım algoritması geliştirilmiştir. Bu sayede eğimli kalıp boşluğu yüzeylerini uyumlu bir şekilde takip edebilen soğutma kanalları tasarlanabilmektedir. Genel olarak soğutma kanalı tasarımı kalıp tasarımcılarının tecrübesi ile yapılmaktadır. Geliştirilen sistematik tasarım algoritması ile kalıp tasarım sürecini tasarımcının tecrübesine bağımlılığı azaltılmıştır.

- Soğutma süresi ve dolaylı olarak çevrim süresinin kısalıştır. Plastik enjeksiyon kalıplamada üretim hızını belirleyen en önemli parametrenin soğutma süresi olduğu için üretim hızını artmıştır.

- Plastik enjeksiyon kalıplama sürecinde iletim ve taşınım yolu ile ısı transferi gerçekleşmektedir. Isı iletim ve taşınım katsayıları, sıcaklık farkı, iletim mesafesi, yüzey alanı faktörleri bu ısı transferi üzerinde etkili olmaktadır. Şekil uyumlu kanalların kullanımıyla iletim mesafesi ve yüzey alanı parametreleri üzerinde yapılan iyileştirme ile ısı transferi arttırılmış ve soğutma işleminin etkinliği yükseltilmiştir.

- Üretim hızı arttırılırken plastik parça kalitesi hem olumsuz etkilenmemiş hem de kalıplama esnasında plastik parça üzerinde oluşan çarpılma ve kalıntı gerilmeler azaltılarak parça kalitesi artmıştır.

- Şekil uyumlu soğutma kanalların kullanımı ile baskı öncesi hazırlık aşamasında kalıp sıcaklığının dengelenmesi ve ayarlama baskı sayısının azaltılması ile hem zaman hem de hurdaya ayrılan plastik malzeme miktarı azaltılarak başlangıç kayıpları azalmıştır.

- Şekil uyumlu soğutma kanalları ile kalıp üzerindeki sıcaklık daha iyi kontrol edilebildiği için kalıplama sürecinde daha iyi bir ısıl kararlılık sağlanabilmektedir. Bu durum parça üzerindeki sıcaklık değişimleriyle oluşabilecek değişiklikleri düzenleyeceğinden birbiri ile özdeş parçaların üretimi sağlanacaktır.

- Katmanlı sert lehimleme ile üretimin, şekil uyumlu soğutma kanallarına sahip plastik enjeksiyon kalıplarının üretilebilmesi için alternatif yöntem olduğu gösterilmiştir. Karmaşık geometriye sahip birçok plastik parça için endüstriyel düzeyde uygulanabilir bir metot sunulmuştur.

- Yapılan bu çalışma ile plastik enjeksiyon kalıplama sektöründe sürekli devam eden teknik gelişmelerin yanında, zaman ve enerji tasarrufu ile üretim hedeflerinin yakalanarak rekabet yeteneğinin arttırılabilmesi için bir yöntem sunulmuştur.

- Bu çalışma sonunda elde edilen sonuçlar, plastik enjeksiyon kalıplarında soğutma veriminin arttırılması alanındaki çalışmalar ile uyumlu ve tutarlıdır. Tavsiye edilen metot ile literatüre katkı sağlanmıştır.

- İlerleyen aşamalarda şekil uyumlu kanal kullanımının kalıp dayanımına etkileri araştırılabilir.

KAYNAKLAR

1. Qiao, H. (2006). A systematic computer-aided approach to cooling system optimal design in plastic injection molding. *International Journal of Mechanical Sciences*, 48(4), 430-439.

2. Uluer, O. (2009). *Enjeksiyonla Kalıplamada Üç Boyutlu Polimer Ergiyik Akışların Sayısal Analizi ve Deneysel İncelenmesi,* Doktora Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.

3. Dimla, D., Camilotto, M., and Miani, F. (2005). Design and optimisation of conformal cooling channels in injection moulding tools. *Journal of Materials Processing Technology*, 164, 1294-1300.

4. Yadegari, M., Masoumi, H., and Gheisari, M. (2016). Optimization of Cooling Channels in Plastic Injection Molding. *International Journal of Applied Engineering Research*, 11(8), 5777-5780.

5. Liang, J. and Ness, J. (1996). The calculation of cooling time in injection moulding. *Journal of materials processing technology*, 57(1-2), 62-64.

6. Lin, J. (2002). Optimum cooling system design of a free-form injection mold using an abductive network. *Journal of Materials Processing Technology*, 120(1-3), 226-236.

7. Zarkadas, D. and Xanthos, M. (2003). Prediction of cooling time in injection molding by means of a simplified semianalytical equation. *Advances in Polymer Technology: Journal of the Polymer Processing Institute*, 22(3), 188-208.

8. Smith, A., Wrobel, L., McCalla, B., Allan, P., and Hornsby, P. (2008). A computational model for the cooling phase of injection moulding. *Journal of materials processing technology*, 195(1-3), 305-313.

9. Zhou, H., Zhang, Y., Wen, J., and Li, D. (2009). An acceleration method for the BEM-based cooling simulation of injection molding. *Engineering analysis with boundary elements*, 33(8-9), 1022-1030.

10. Tang, L.Q., Chassapis, C., and Manoochehri, S. (1997). Optimal cooling system design for multi-cavity injection molding. *Finite Elements in Analysis and Design*, 26(3), 229-251.

11. Park, S. and Kwon, T. (1998). Optimal cooling system design for the injection molding process. *Polymer Engineering & Science*, 38(9), 1450-1462.

12. Qiao, H. (2005). Transient mold cooling analysis using BEM with the time-dependent fundamental solution. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 32(3-4), 315-322.

13. Hassan, H., Regnier, N., Pujos, C., Arquis, E., and Defaye, G. (2010). Modeling the effect of cooling system on the shrinkage and temperature of the polymer by injection molding. *Applied Thermal Engineering*, 30(13), 1547-1557.

14. Kovacs, J.G. and Siklo, B. (2011). Investigation of cooling effect at corners in injection molding. *International communications in heat and mass transfer*, 38(10), 1330-1334.

15. Fu, J. and Ma, Y. (2016). Mold modification methods to fix warpage problems for plastic molding products. *Computer-Aided Design and Applications*, 13(1), 138-151.

16. Han, S.-Y., Kwag, J.-K., Kim, C.-J., Park, T.-W., and Jeong, Y.-D. (2004). A new process of gas-assisted injection molding for faster cooling. *Journal of materials processing technology*, 155, 1201-1206.

17. Zhou, H. and Li, D. (2005). Mold cooling simulation of the pressing process in TV panel production. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 13(3), 273-285.

18. Furumoto, T., Ueda, T., Amino, T., and Hosokawa, A. (2011). A study of internal face finishing of the cooling channel in injection mold with free abrasive grains. *Journal of Materials Processing Technology*, 211(11), 1742-1748.

19. Sánchez, R., Aisa, J., Martinez, A., and Mercado, D. (2012). On the relationship between cooling setup and warpage in injection molding. *Measurement*, 45(5), 1051-1056.

20. Li, C. (2001). A feature-based approach to injection mould cooling system design. *Computer-Aided Design*, 33(14), 1073-1090.

21. Li, C.L., Li, C.G., and Mok, A.C.K. (2005). Automatic layout design of plastic injection mould cooling system. *Computer-Aided Design*, 37(7), 645-662.

22. Li, C. and Li, C. (2008). Plastic injection mould cooling system design by the configuration space method. *Computer-Aided Design*, 40(3), 334-349.

23. Li, C.G., Li, C.L., Liu, Y., and Huang, Y. (2012). A new C-space method to automate the layout design of injection mould cooling system. *Computer-Aided Design*, 44(9), 811-823.

24. Hassan, H., Regnier, N., and Defaye, G. (2009). A 3D study on the effect of gate location on the cooling of polymer by injection molding. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 30(6), 1218-1229.

25. Hassan, H., Regnier, N., Lebot, C., Pujos, C., and Defaye, G. (2009). Effect of cooling system on the polymer temperature and solidification during injection molding. *Applied Thermal Engineering*, 29(8-9), 1786-1791.

26. Hassan, H., Regnier, N., Le Bot, C., and Defaye, G. (2010). 3D study of cooling system effect on the heat transfer during polymer injection molding. *International Journal of Thermal Sciences*, 49(1), 161-169.

27. Jauregui-Becker, J.M., Tragter, H., and van Houten, F.J.M. (2009). Toward a bottom-up approach to automate the design of cooling systems for injection molding. *Computer-Aided Design and Applications*, 6(4), 447-459.

28. Jauregui-Becker, J.M., Tosello, G., Van Houten, F.J.A.M., and Hansen, H.N. (2013). Performance evaluation of a software engineering tool for automated design of cooling systems in injection moulding. *Procedia CIRP*, 7, 270-275.

29. Wang, Y., Yu, K.M., and Wang, C.C.L. (2015). Spiral and conformal cooling in plastic injection molding. *Computer-Aided Design*, 63, 1-11.

30. Brooks, H. and Brigden, K. (2016). Design of conformal cooling layers with self-supporting lattices for additively manufactured tooling. *Additive Manufacturing*, 11, 16-22.

31. Vojnová, E. (2016). The benefits of a conforming cooling systems the molds in injection moulding process. *Procedia Engineering*, 149, 535-543.

32. Xu, X., Sachs, E., and Allen, S. (2001). The design of conformal cooling channels in injection molding tooling. *Polymer Engineering & Science*, 41(7), 1265-1279.

33. Mohamed, O.A., Masood, S.H., and Saifullah, A. (2013). A simulation study of conformal cooling channels in plastic injection molding. *International Journal of Engineering Research*, 2(5), 344-348.

34. Hsu, F.H., Wang, K., Huang, C.T., and Chang, R. (2013). Investigation on conformal cooling system design in injection molding. *Advances in Production Engineering & Management*, 8(2), 107-115.

35. Khan, M., Afaq, S.K., Khan, N.U., and Ahmad, S. (2014). Cycle time reduction in injection molding process by selection of robust cooling channel design. *International Scholarly Research Notices*, 2014,

36. Jahan, S.A. and El-Mounayri, H. (2016). Optimal conformal cooling channels in 3D printed dies for plastic injection molding. *Procedia Manufacturing*, 5, 888-900.

37. Jahan, S.A. and El-Mounayri, H. (2018). A thermomechanical analysis of conformal cooling channels in 3D printed plastic injection molds. *Applied Sciences*, 8(12), 2567.

38. Shaileshbhai, P.P. and Sudheendra, S. (2017). A Simulation Study of Conformal Cooling Channels in Plastic Injection Molding. *International Journal of Engineering Development and Research*, 5(1), 99-111.

39. Shinde, M.S. and Ashtankar, K.M. (2018). Effect of different shapes of conformal cooling channel on the parameters of injection molding. *Computers Materials & Continua*, 55(1), 287-306.

40. Liu, C., Cai, Z., Dai, Y., Huang, N., Xu, F., and Lao, C. (2018). Experimental comparison of the flow rate and cooling performance of internal cooling channels fabricated via selective laser melting and conventional drilling process. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 96(5-8), 2757-2767.

41. Wahab, M.S., Raus, A.A., Amir, I., Ahmed, A., and Kamarudin, K. (2018). The Thermal Effect of Variate Cross-Sectional Profile on Conformal Cooling Channels in Plastic Injection Moulding. *International Journal of Integrated Engineering*, 10(5),

42. Lu, C.T., Chen, C.H., and Tseng, S.C. (2019). *Application of conformal cooling to reduce cooling time and warpage of a U-shaped plate.* AIP Conference Proceedings, 2065(1), 030007.

43. Zhihong, Y., Yingping, Q., Wei, H., Xizhi, Z., and Xuedan, G. (2018). Research on heat transfer enhancement of variable cross sectional conformal cooling of injection mold based on fluent. *Journal of Mechanical Engineering Research*, 10(2), 7-20.

44. Deepika, S.S., Patil, B.T., and Shaikh, V.A. (2020). Plastic injection molded door handle cooling time reduction investigation using conformal cooling channels. *Materials Today: Proceedings*,

45. Shen, S., Kanbur, B.B., Zhou, Y., and Duan, F. (2020). Thermal and mechanical analysis for conformal cooling channel in plastic injection molding. *Materials Today: Proceedings*, 28, 396-401.

46. Meckley, J. and Edwards, R. (2009). A study on the design and effectiveness of conformal cooling channels in rapid tooling inserts. *The Technology Interface Journal*, 10(1), 1-28.

47. Saifullah, A., Masood, S., and Sbarski, I. *New cooling channel design for injection moulding*. in Proceedings of the World Congress on Engineering. 2009.

48. Ahari, H., Khajepour, A., and Bedi, S. (2013). Laminated injection mould with conformal cooling channels: optimization, fabrication and testing. *Journal of Machinery anufacturing and Automation*, 2(2), 16-24.

49. Shayfull Zamree, A.R., Safian, S., Azlan, M.Z., Mohd Nasir, M.S., and Rozaimi, M.S. (2015). Improving the quality and productivity of molded parts with a new design of conformal cooling channels for the injection molding process. *Advances in Polymer Technology*, 35(1),

50. Kitayama, S., Miyakawa, H., Takano, M., and Aiba, S. (2017). Multi-objective optimization of injection molding process parameters for short cycle time and warpage reduction using conformal cooling channel. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 88(5-8), 1735-1744.

51. Kitayama, S., Yamazaki, Y., Takano, M., and Aiba, S. (2018). Numerical and experimental investigation of process parameters optimization in plastic injection molding using multi-criteria decision making. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 85, 95-105.

52. Hatos, I., Kocsis, B., and Hargitai, H. (2018). *Conformal cooling with heat-conducting inserts by direct metal laser sintering.* IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 448(1),

53. Park, H.S., Dang, X.P., Nguyen, D.S., and Kumar, S. (2020). Design of advanced injection mold to increase cooling efficiency. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, 7(2), 319-328.

54. Berger, G.R., Zorn, D., Friesenbichler, W., Bevc, F., and Bodor, C.J. (2019). Efficient cooling of hot spots in injection molding. A biomimetic cooling channel versus a heat-conductive mold material and a heat conductive plastics. *Polymer Engineering & Science*, 59(s2), E180-E188.

55. Güldaş, A. and Göktaş, M. (2019). *Experimental Comparison Of The Effects Of Conformal And Straight Cooling Channels.* 2nd International Turkish World Engineering and Science Congress, November 7-10, 2019, Turkey, 572-578.

56. Evens, T., Six, W., De Keyzer, J., Desplentere, F., and Van Bael, A. *Experimental analysis of conformal cooling in SLM produced injection moulds: Effects on process and product quality*. in AIP Conference Proceedings. 2019. AIP Publishing LLC.

57. Sun, Y.F., Lee, K.S., and Nee, A.Y.C. (2004). Design and FEM analysis of the milled groove insert method for cooling of plastic injection moulds. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 24(9-10), 715-726.

58. Dang, X.P. and Park, H.S. (2011). Design of U-shape milled groove conformal cooling channels for plastic injection mold. *International Journal of precision engineering and manufacturing*, 12(1), 73-84.

59. Park, H.-S. and Pham, N.H. (2009). Design of conformal cooling channels for an automotive part. *International Journal of Automotive Technology*, 10(1), 87-93.

60. Park, H.-S. and Dang, X.-P. (2010). Optimization of conformal cooling channels with array of baffles for plastic injection mold. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 11(6), 879-890.

61. Wang, Y., Yu, K.M., Wang, C.C., and Zhang, Y. (2011). Automatic design of conformal cooling circuits for rapid tooling. *Computer-Aided Design*, 43(8), 1001-1010.

62. Altaf, K., Raghavan, V.R., and Rani, A.M.A. (2011). Comparative thermal analysis of circular and profiled cooling channels for injection mold tools. *Journal of Applied Sciences*, 11(11), 2068-2071.

63. Au, K.M. and Yu, K.M. (2011). Modeling of multi-connected porous passageway for mould cooling. *Computer-Aided Design*, 43(8), 989-1000.

64. Au, K.M., Yu, K.M., and Chiu, W.K. (2011). Visibility-based conformal cooling channel generation for rapid tooling. *Computer-Aided Design*, 43(4), 356-373.

65. Agazzi, A., Sobotka, V., LeGoff, R., and Jarny, Y. (2013). Optimal cooling design in injection moulding process–A new approach based on morphological surfaces. *Applied Thermal Engineering*, 52(1), 170-178.

66. Agazzi, A., Sobotka, V., Le Goff, R., and Jarny, Y. *Uniform cooling and part warpage reduction in injection molding thanks to the design of an effective cooling system*. in Key Engineering Materials. 2013. Trans Tech Publ.

67. Au, K.M. and Yu, K.M. (2014). Variable distance adjustment for conformal cooling channel design in rapid tool. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 136(4),

68. Jahan, S.A., Wu, T., Zhang, Y., El-Mounayri, H., Tovar, A., Zhang, J., Acheson, D., Nalim, R., Guo, X., and Lee, W.H. (2016). Implementation of conformal cooling & topology optimization in 3D printed stainless steel porous structure injection molds. *Procedia Manufacturing*, 5, 901-915.

69. Goktas, M., Guldas, A., and Bayraktar, O. (2016). *Cooling of Plastic Injection Moulds Using Conformal Cooling Canals.* International Conference on Engineering and Natural Science (ICENS 2016), Sarajevo, 1(1), 1987-1993.

70. Jahan, S.A., Wu, T., Zhang, Y., Zhang, J., Tovar, A., and El-Mounayri, H. (2017). Thermo-mechanical design optimization of conformal cooling channels using design of experiments approach. *Procedia Manufacturing*, 10(898-911),

71. Hazwan, M.H.M., Shayfull, Z., Sharif, S., Nasir, S.M., and Rashidi, M.M. *Warpage optimisation on the moulded part with conformal cooling channels using response surface methodology (RSM) and glowworm swarm optimisation (GSO)*. in MATEC Web of Conferences. 2017. EDP Sciences.

72. Mercado-Colmenero, J.M., Rubio-Paramio, M.A., de Juanes Marquez-Sevillano, J., and Martin-Doñate, C. (2018). A new method for the automated design of cooling systems in injection molds. *Computer-Aided Design*, 104, 60-86.

73. Wu, T. and Tovar, A. (2018). *Design for additive manufacturing of conformal cooling channels using thermal-fluid topology optimization and application in injection molds.* International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference (IDETC/CIE 2018), Quebec City, Canada, 51760(85511), V02BT03A007-12.

74. Clemente, M.R. and Panão, M.R.O. (2018). Introducing flow architecture in the design and optimization of mold inserts cooling systems. *International Journal of Thermal Sciences*, 127, 288-293.

75. Marin, F., de Miranda, J.R., and de Souza, A.F. (2018). Study of the design of cooling channels for polymers injection molds. *Polymer Engineering & Science*, 58(4), 552-559.

76. Li, Z., Wang, X., Gu, J., Ruan, S., Shen, C., Lyu, Y., and Zhao, Y. (2018). Topology optimization for the design of conformal cooling system in thin-wall injection molding based on BEM. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 94(1-4), 1041-1059.

77. Güldaş, A. and Göktaş, M. (2019). *Comparison of Straight, Spiral Conformal and Zig-zag Conformal Cooling Channels in Plastic Injection Molds.* International Symposium on Innovative Approaches in Scientific Studies (ISAS 2019), Turkey, 4(1), 395-399.

78. Mercado-Colmenero, J.M., Martin-Doñate, C., Rodriguez-Santiago, M., Moral-Pulido, F., and Rubio-Paramio, M.A. (2019). A new conformal cooling lattice design procedure for injection molding applications based on expert algorithms. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 102(5-8), 1719-1746.

79. Ferreira, J. and Mateus, A. (2003). Studies of rapid soft tooling with conformal cooling channels for plastic injection moulding. *Journal of Materials Processing Technology*, 142(2), 508-516.

80. Ahn, D.-G., Park, S.-H., and Kim, H.-S. (2010). Manufacture of an injection mould with rapid and uniform cooling characteristics for the fan parts using a DMT process. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 11(6), 915-924.

81. Eiamsa-Ard, K. and Wannissorn, K. (2015). Conformal bubbler cooling for molds by metal deposition process. *Computer-Aided Design*, 69, 126-133.

82. Wu, T., Jahan, S.A., Kumaar, P., Tovar, A., El-Mounayri, H., Zhang, Y., Zhang, J., Acheson, D., Brand, K., and Nalim, R. (2015). A framework for optimizing the design of injection molds with conformal cooling for additive manufacturing. *Procedia Manufacturing*, 1, 404-415.

83. Altaf, K., Rani, A.M.A., Ahmad, F., Baharom, M., and Raghavan, V.R. (2016). Determining the effects of thermal conductivity on epoxy molds using profiled cooling channels with metal inserts. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 30(11), 4901-4907.

84. Göktaş, M. and Güldaş, A. (2020). Production of Plastic Injection Molds with Conformal Cooling Channels by Laminated Brazing Method. *Gazi University Journal of Science*, 33(3), 780-789.

85. Akyüz, Ö.F., (1998). *Plastikler ve Plastik Enjeksiyon Teknolojisine Giriş*. 1.: Pagev Yayınları.

86. Savaşçı, Ö.T., Uyanık, N., Akovalı, G., (2008). *Ana Hatları ile Plastikler ve Plastik Teknolojisi*. 3.: Pagev Yayınları.

87. Malloy, R.A., (2010). *Plastic Part Design for Injection Molding*. 2, Munich: Hanser.

88. Vashchuk, A., Fainleib, A.M., Starostenko, O., and Grande, D. (2018). Application of ionic liquids in thermosetting polymers: Epoxy and cyanate ester resins. *Express Polymer Letters*, 12(10), 898-917.

89. Kaya, F., (2005). *Ana Hatlarıyla Plastikler ve Katı Maddeleri*. (İkinci Baskı), İstanbul: Birsen Yayınevi.

90. Güldaş, A. (2004). *Plastik Enjeksiyon Kalıplarında Ergimiş Plastik Akışının Matematiksel Modellenmesi ve Deneysel Olarak İncelenmesi,* Doktora Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.

91. Kazmer, D.O., (2007). *Injection Mold Design Engineering*, Munich: Hanser

92. Dupret, F. and Verleye, V., (1999). *Modelling the Flow of Fiber Suspensions in Narrow Gaps, in advances in the Flow and Rheology of Non-Newtonian Fluids, DA Siginer, D. De Kee and RP Chhabra (Eds.), Rheology Series, 8*: Elsevier, Amsterdam.

93. Ekersular, M. (2007). *Plastik Enjeksiyon Kalıpçılığında Soğutma Kanallarının En Uygun Konumunun Belirlenmesi,* Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Gebze.

94. Güneş, A.T., (2005). *Plastik Enjeksiyon Kalıpları*, Ankara: Makine Mühendisleri Odası.

95. Erdemir, O. (2007). *Plastik Enjeksiyon Kalıplarının Bilgisayar Destekli Tasarlanması, Örnek Modeller Üzerinde Optimum Yolluk Ve Soğutma Sistemlerinin Uygulama Esasları,* Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kayseri.

96. Şeker, C. (1999). *Termoplastiklerin Şekillendirilmesinde Kullanılan Enjeksiyon Kalıplarının İncelenmesi,* Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

97. Banerjee, A.G. and Gupta, S.K. *A step towards automated design of side actions in injection molding of complex parts*. in International Conference on Geometric Modeling and Processing. 2006. Springer.

98. Menges, G., Michaeli, W., and Mohren, P., (2013). *How to make injection molds*: Carl Hanser Verlag GmbH Co KG.

99. Koyun, Ç. (2005). *Bilgisayar Destekli Plastik Enjeksiyon Kalıp Tasarımı ve Analizi,* Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

100. Demirci, U., Altan, M., Ternane, F., Benachour, M., Sebaa, F., Benachour, N., Yaman, S., Çakır, O., Dzhemalyadinov, R., and Skakun, V. (2020). Warpage Analysis of Injection Molded Thin-Walled Chassis Part by RSM and FEM. *Journal Of Advances in Manufacturing Engineering*, 1(2), 63-70.

101. Mayer, S. (2005). Optimised mould temperature control procedure using DMLS. *EOS Whitepaper, EOS GmbH Ltd*, 1-10.

102. Boci¹ga, E., Jaruga, T., Lubczynska, K., and Gnatowski, A. (2010). Warpage of injection moulded parts as the result of mould temperature difference. *Archives of Materials Science and Engineering*,

103. Meekers, I., Refalo, P., and Rochman, A. (2018). Analysis of Process Parameters affecting Energy Consumption in Plastic Injection Moulding. *Procedia CIRP*, 69, 342-347.

104. Amran, M., Salmah, S., Marjom, Z., Al-Amani, U., Izamshah, R., Hadzley, M., Abdullah, Z., and Sanusi, M. *Warpage analysis verification between simulation and experimental of dumbbell plastic part in the injection moulding process*. in International Symposium on Research in Innovation and Sustainability 2014 (ISoRIS '14). 2014. Malacca, Malaysia.

105. *Moldex3D Provides Mold Preheat Analysis to Enhance Mold Temperature Management*. 2015; Available from: https://www.moldex3d.com/en/blog/tips-and-tricks/moldex3d-provides-mold-preheat-analysis-to-enhance-mold-temperature-management/.

106. Turaçlı, H., (2000). *Enjeksiyon Kalıpları İmalatı*, İstanbul: Pagev Yayınları.

107. Kitayama, S., Tamada, K., Takano, M., and Aiba, S. (2018). Numerical optimization of process parameters in plastic injection molding for minimizing weldlines and clamping force using conformal cooling channel. *Journal of Manufacturing Processes*, 32, 782-790.

108. Yu, C.J. and Sunderland, J. (1992). Determination of ejection temperature and cooling time in injection molding. *Polymer Engineering & Science*, 32(3), 191-197.

109. *Engineering Polymers, Part and Mold Design, Thermoplatics, A Design Guide, Bayer Corporation*. 2000; Available from: https://www.bayer.com/polymers-usa:.

110. Rao, N.S. and Schumacher, G., (2004). *Design formulas for plastics engineers*, Munich: Hanser

111. Messler, R. (2004). Brazing: A Subclassification of Welding. *Joining of Materials and Structures*,

112. Alakuzu, C. (2019). *Bakır Boruların Sert Lehimleme ile Birleştirilmesinde İşlem Parametrelerinin Geometrik Mamul Özelliklerine Olan Etkisinin İncelenmesi,* Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

113. Olson, D.L., (1993). *ASM handbook: welding, brazing, and soldering*: Asm Intl.

114. Balaban, C. (2010). Brazing (Sert Lehim) Prosesi ve Bant Konveyörlü Atmosfer Kontrollü Brazing Fırınları. *Metalürji Dergisi*, (158), 20-25.

115. Jadidi, A. (2013). *Karbonlu Çelik Malzemelerin Lehim Pastası Kullanarak Fırında Sert Lehimlemesine Etki Eden Parametrelerin Deneysel Olarak Optimizasyonu,* Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.

116. Uzun, H., (2002). *Sert Lehimleme Prensipleri*, İstanbul: Değişim Yayınları.

117. AWS C3 Committee on Brazing and Soldering, (2007). *Brazing Handbook*. 5, Miami: American Welding Society.

118. Cai, Y.S., Liu, R.C., Zhu, Z.W., Cui, Y.Y., and Yang, R. (2017). Effect of brazing temperature and brazing time on the microstructure and tensile strength of TiAl-based alloy joints with Ti-Zr-Cu-Ni amorphous alloy as filler metal. *Intermetallics*, 91, 35-44.

119. https://www.bodycote.com/tr/. *Fırında Sert Lehimleme*. 2019; Available from: https://www.bodycote.com/tr/hizmetler/metal-birlestirme/firinda-sert-lehimleme/.

120. Walczyk, D.F. and Dolar, N.Y. *Bonding methods for laminated tooling*. in 1997 International Solid Freeform Fabrication Symposium. 1997.

121. Bryden, B. and Pashby, I. (2001). Hot platen brazing to produce laminated steel tooling. *Journal of Materials Processing Technology*, 110(2), 206-210.

122. Himmer, T., Techel, A., Nowotny, S., and Beyer, E. *Metal laminated tooling-A quick and flexible tooling concept*. in International Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics. 2004. Laser Institute of America.

123. *ABS HI121H*. 2010; Available from: http://www.lgchem.com.tr/products/30112012-224346-astm-abs-hi121h_eng_00.pdf.

124. Göktaş, M., Dilipak, H., and Güldaş, A. (2010). İki Boyutlu Profillerin İşlenmesinde Takım Yolu ve Ofsetleme için Yeni Bir Algoritma Geliştirilmesi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 25(1),

125. *About Mesh Types Used by Moldflow*. [cited 2021; Available from: https://knowledge.autodesk.com/support/moldflow-insight/learn-explore/caas/CloudHelp/cloudhelp/2017/ENU/3PP-MDF-INSFUND-ASCENT/files/GUID-8007F781-B1BE-4252-8CA0-3B367D3DEAE9-htm.html.

126. *Mesh Optimization*. [cited 2021; Available from: https://knowledge.autodesk.com/support/moldflow-insight/learn-explore/caas/CloudHelp/cloudhelp/2017/ENU/MoldflowInsight/files/GUID-95F30027-E4B5-45A7-B02B-F332B640A6E7-htm.html.

127. *Mesh Statistics*. [cited 2021; Available from: https://knowledge.autodesk.com/support/moldflow-insight/learn-explore/caas/CloudHelp/cloudhelp/2019/ENU/MoldflowInsight-Modelprep/files/GUID-41F38EA2-A28F-4A0F-8069-3480E24B3F11-htm.html.

128. Simmons, J.C., Chen, X., Azizi, A., Daeumer, M.A., Zavalij, P.Y., Zhou, G., and Schiffres, S.N. (2020). Influence of processing and microstructure on the local and bulk thermal conductivity of selective laser melted 316L stainless steel. *Additive Manufacturing*, 32, 100996.

129. Furumoto, T., Koizumi, A., Alkahari, M.R., Anayama, R., Hosokawa, A., Tanaka, R., and Ueda, T. (2015). Permeability and strength of a porous metal structure fabricated by additive manufacturing. *Journal of Materials Processing Technology*, 219, 10-16.

130. Chung, C.Y. (2019). Integrated Optimum Layout of Conformal Cooling Channels and Optimal Injection Molding Process Parameters for Optical Lenses. *Applied Sciences*, 9(20), 4341.

131. Shinde, M.S., Ashtankar, K.M., Kuthe, A.M., Dahake, S.W., and Mawale, M.B. (2018). Direct rapid manufacturing of molds with conformal cooling channels. *Rapid Prototyping Journal*,

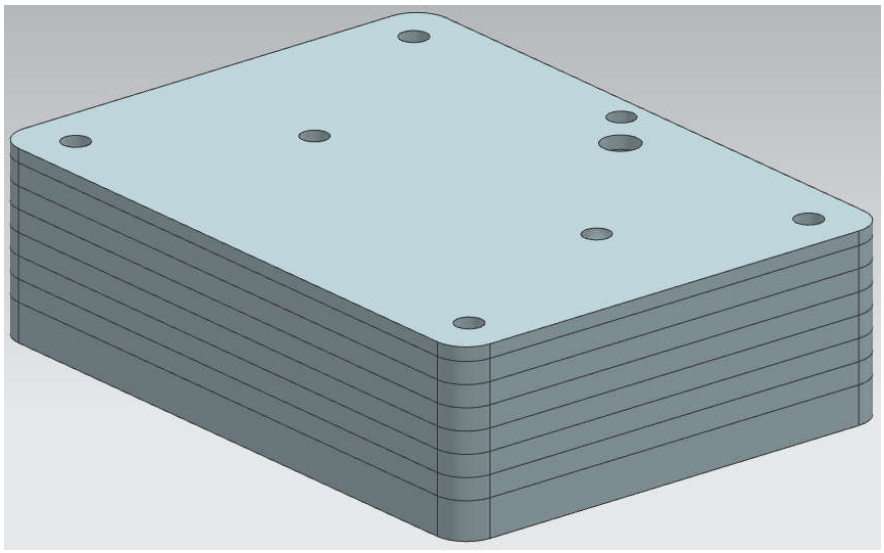
132. Hassan, H. (2013). An experimental work on the effect of injection molding parameters on the cavity pressure and product weight. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 67(1-4), 675-686.

133. Wang, Q., Wang, J., Yang, C., Du, K., Zhu, W., and Zhang, X. (2019). Effect of Process Parameters on Repeatability Precision of Weight for Microinjection Molding Products. *Advances in Polymer Technology*, 2019,

EKLER

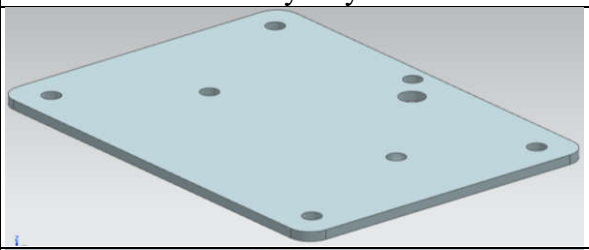
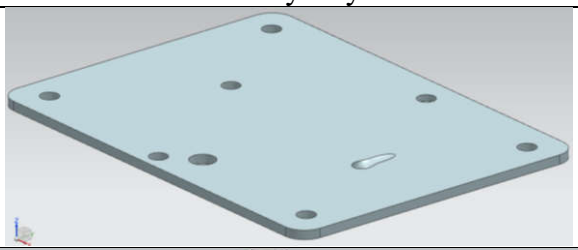
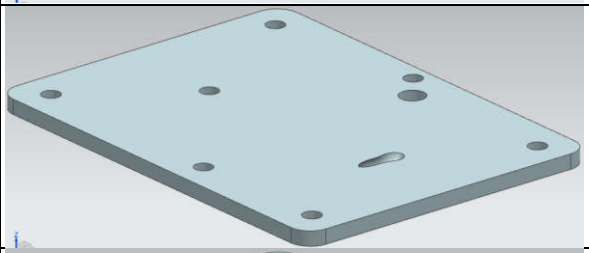
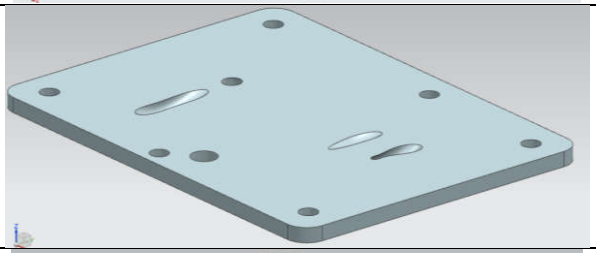
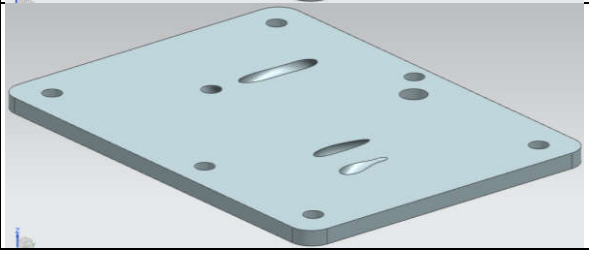
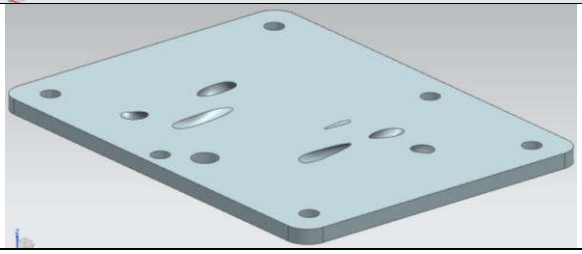
EKLER

EK-1. Kalıp çekirdeklerinin ayrıldığı katmaların CAD modelleri

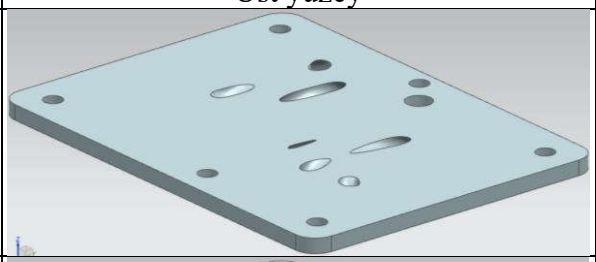
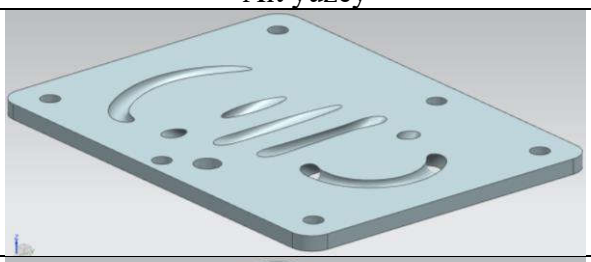
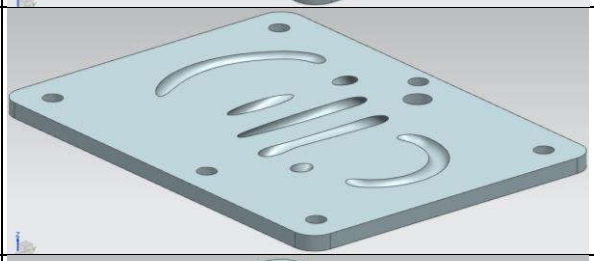
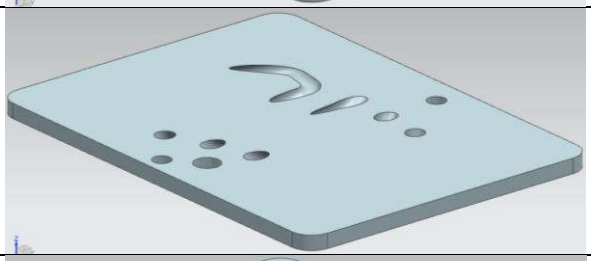
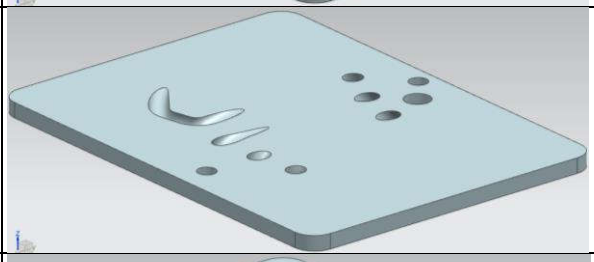
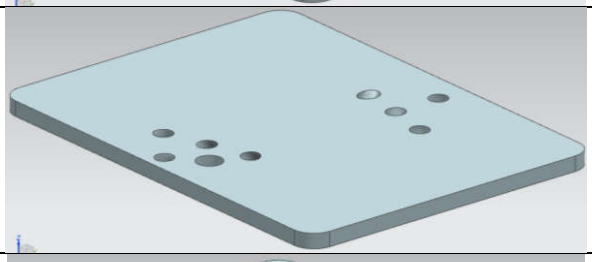
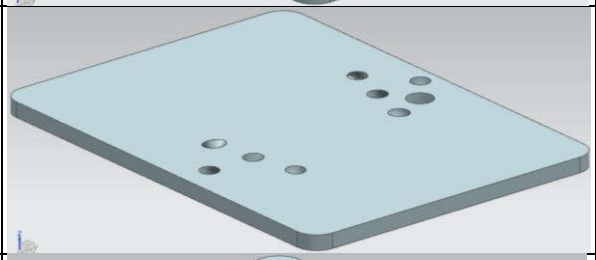
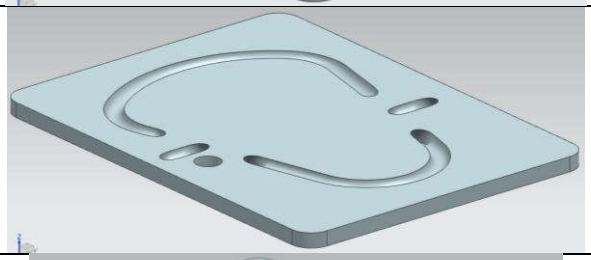
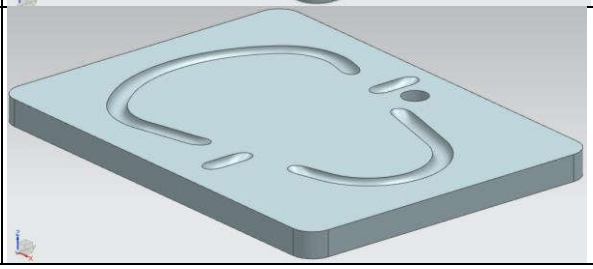
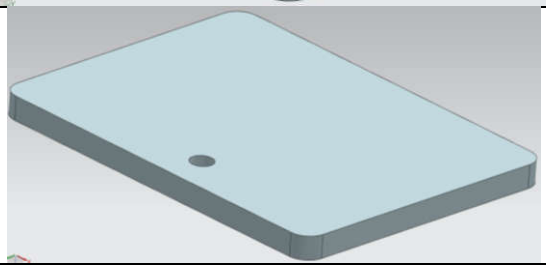


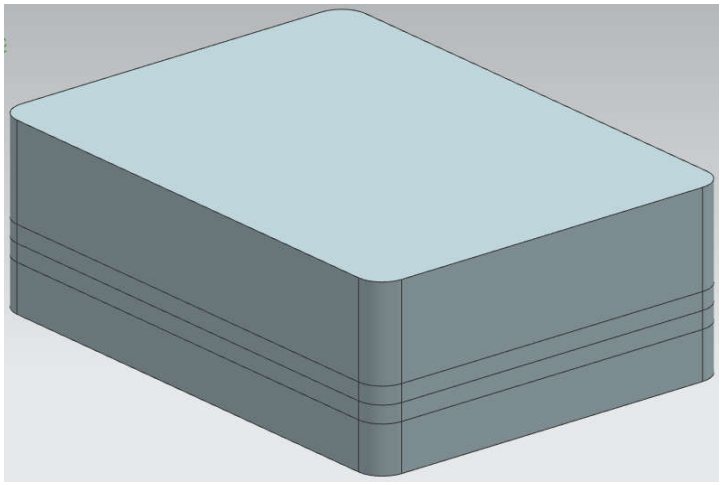
Şekil 1.1. Dişi kalıp çekirdeğinin CAD modelinin bölünmüş hali

Çizelge 1. Dişi kalıp çekirdeğinin ayrıldığı katmanların CAD modelleri

	Üst yüzey	Alt yüzey
1. Plaka		
2. Plaka		
3. Plaka		

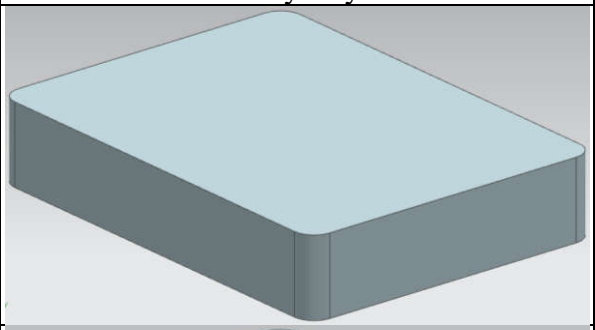
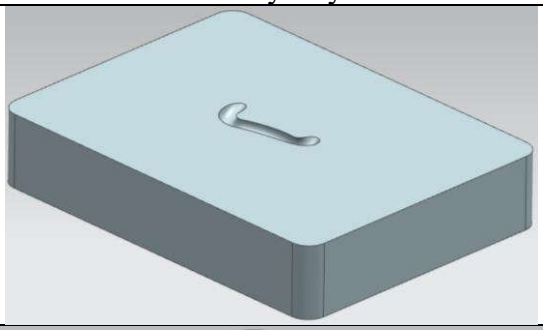
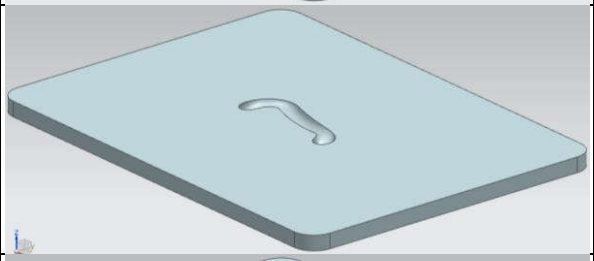
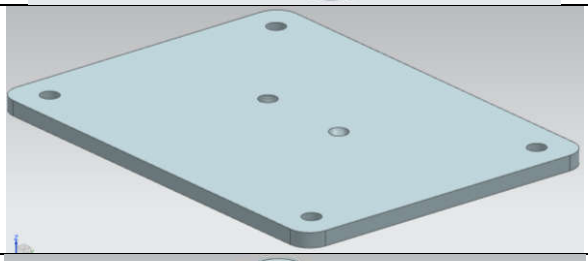
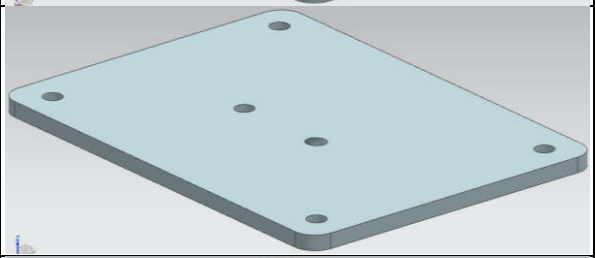
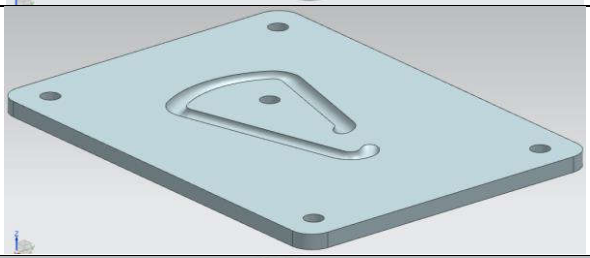
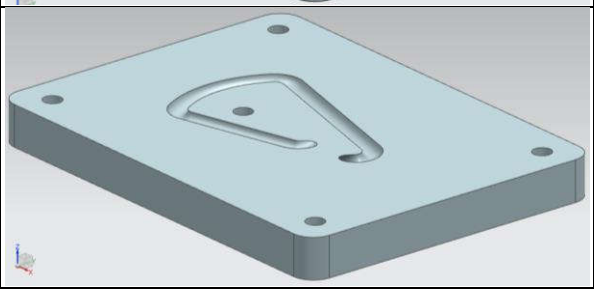
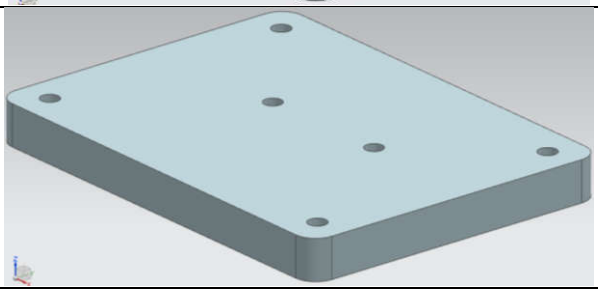
Çizelge 1. Dişi kalıp çekirdeğinin ayrıldığı katmanların CAD modelleri (Devam)

	Üst yüzey	Alt yüzey
4. Plaka		
5. Plaka		
6. Plaka		
7. Plaka		
8. Plaka		

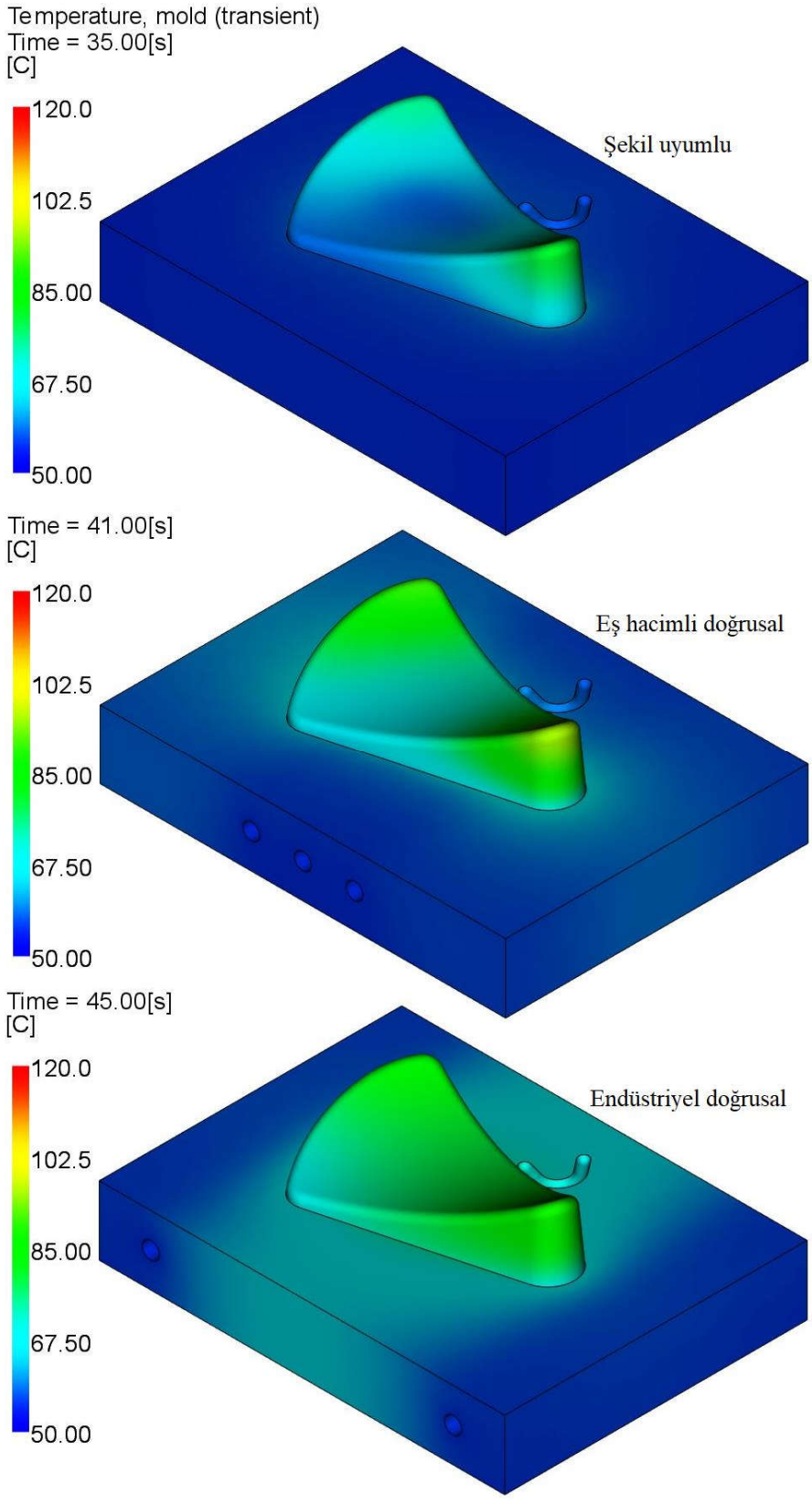


Şekil 1.2. Erkek kalıp çekirdeğinin CAD modelinin bölünmüş hali

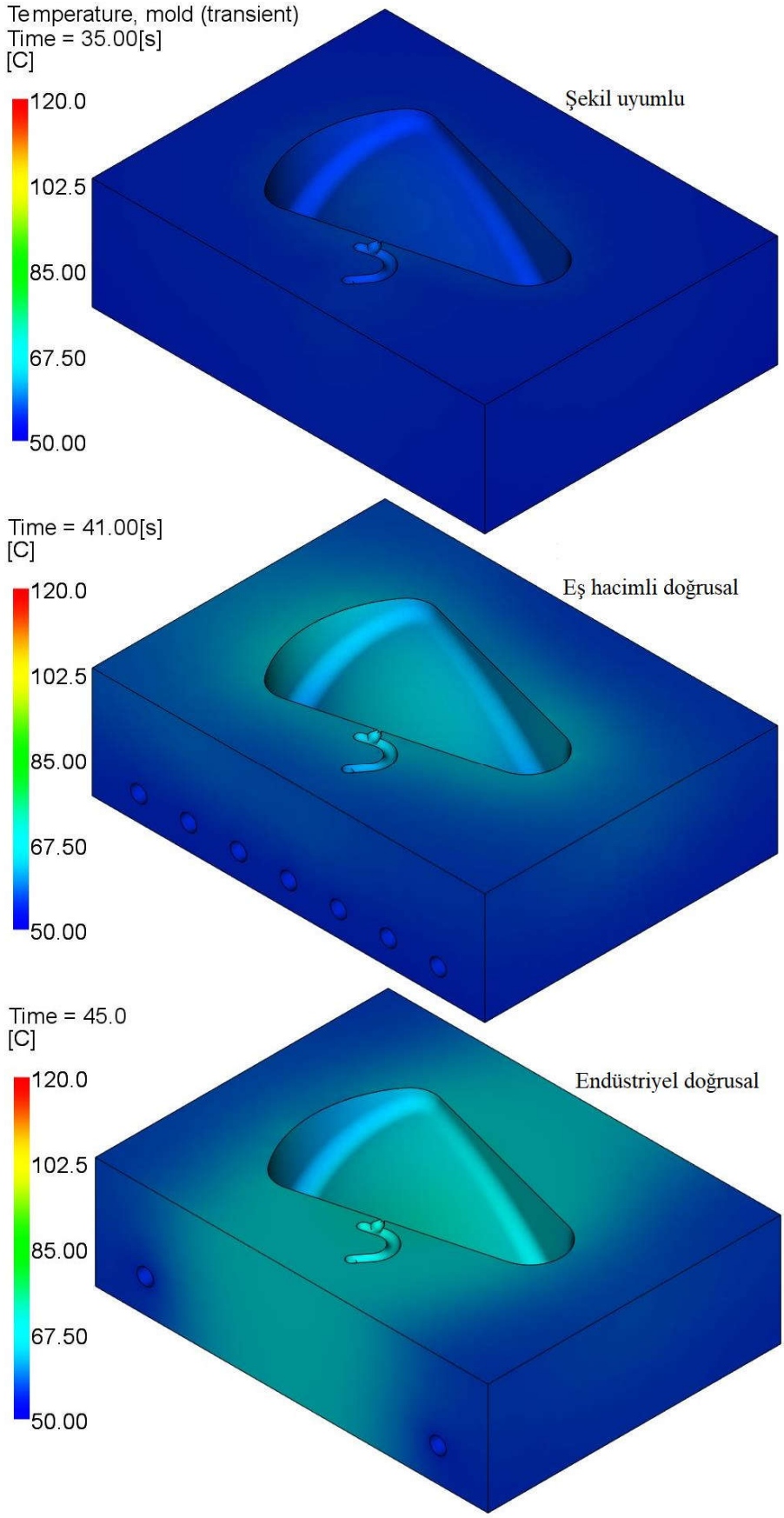
Çizelge 2. Erkek kalıp çekirdeğinin ayrıldığı katmanların CAD modelleri

	Üst yüzey	Alt yüzey
1. Plaka		
2. Plaka		
3. Plaka		
4. Plaka		

EK-2. Kalıp çekirdekleri üzerindeki sıcaklık dağılımları



Şekil 2.1. Erkek kalıp çekirdeği üzerindeki sıcaklık dağılımları



Şekil 2.2. Dişi kalıp çekirdeği üzerindeki sıcaklık dağılımları

EK-3. Şekil uyumlu kanal ile üretilen parçanın CMM tezgahında ölçüm raporu

```
--------------------------------------------------------------------------------
23-May-2021 16:57        SEKIL UYUMLU 3D CMM RAPORU              Page  1
--------------------------------------------------------------------------------
*-----------------------------Camio Version 8.3-----------------------------*
| PARCA NO..... PARCA            | IS EMRI NO..... --            |
| PARCA ADI..... PARCA           | PARCA SIRA NO... S7           |
| REVIZYON NO..... --            |                               |
*--------------------------------*-------------------------------*
--------------------------------------------------------------------------------
(mm)        ACTUAL   NOMINAL    LO-TOL    HI-TOL DEVIATION GRAPHIC      ERROR
--------------------------------------------------------------------------------
Temperature Compensation:  OFF
Point:PNT001
Point-Profile  0.080          -0.050    +0.050    0.080 ---+-->      0.030
--------------------------------------------------------------------------------
Point:PNT002
Point-Profile  0.096          -0.050    +0.050    0.096 ---+-->      0.046
--------------------------------------------------------------------------------
Point:PNT003
Point-Profile  0.016          -0.050    +0.050    0.016 ---+*--
--------------------------------------------------------------------------------
Point:PNT004
Point-Profile -0.168          -0.050    +0.050   -0.168 <--+---     -0.118
--------------------------------------------------------------------------------
Point:PNT005
Point-Profile  0.123          -0.050    +0.050    0.123 ---+-->      0.073
--------------------------------------------------------------------------------
Point:PNT006
Point-Profile  0.190          -0.050    +0.050    0.190 ---+-->      0.140
--------------------------------------------------------------------------------
Point:PNT007
Point-Profile  0.246          -0.050    +0.050    0.246 ---+-->      0.196
--------------------------------------------------------------------------------
Point:PNT008
Point-Profile  0.081          -0.050    +0.050    0.081 ---+-->      0.031
--------------------------------------------------------------------------------
Point:PNT009
Point-Profile  0.076          -0.050    +0.050    0.076 ---+-->      0.026
--------------------------------------------------------------------------------
Point:PNT010
Point-Profile -0.151          -0.050    +0.050   -0.151 <--+---     -0.101
--------------------------------------------------------------------------------
Point:PNT011
Point-Profile  0.229          -0.050    +0.050    0.229 ---+-->      0.179
--------------------------------------------------------------------------------
Point:PNT012
Point-Profile  0.316          -0.050    +0.050    0.316 ---+-->      0.266
--------------------------------------------------------------------------------
```

Point:PNT013
Point-Profile 0.332 -0.050 +0.050 0.332 ---+--> 0.282

Point:PNT014
Point-Profile 0.324 -0.050 +0.050 0.324 ---+--> 0.274

Point:PNT015
Point-Profile 0.334 -0.050 +0.050 0.334 ---+--> 0.284

Point:PNT016
Point-Profile 0.456 -0.050 +0.050 0.456 ---+--> 0.406

Point:PNT017
Point-Profile 0.538 -0.050 +0.050 0.538 ---+--> 0.488

Point:PNT018
Point-Profile 0.578 -0.050 +0.050 0.578 ---+--> 0.528

Point:PNT019
Point-Profile 0.541 -0.050 +0.050 0.541 ---+--> 0.491

Point:PNT020
Point-Profile 0.521 -0.050 +0.050 0.521 ---+--> 0.471

Point:PNT021
Point-Profile 0.470 -0.050 +0.050 0.470 ---+--> 0.420

Point:PNT022
Point-Profile 0.301 -0.050 +0.050 0.301 ---+--> 0.251

Point:PNT023
Point-Profile 0.527 -0.050 +0.050 0.527 ---+--> 0.477

Point:PNT024
Point-Profile 0.529 -0.050 +0.050 0.529 ---+--> 0.479

Point:PNT025
Point-Profile 0.515 -0.050 +0.050 0.515 ---+--> 0.465

Point:PNT026
Point-Profile 0.413 -0.050 +0.050 0.413 ---+--> 0.363

Point:PNT027
Point-Profile -0.140 -0.050 +0.050 -0.140 <--+--- -0.090

Point:PNT028
Point-Profile -0.120 -0.050 +0.050 -0.120 <--+--- -0.070

Point:PNT029
Point-Profile -0.425 -0.050 +0.050 -0.425 <--+--- -0.375

```
-------------------------------------------------------------------------------
Point:PNT030
Point-Profile -0.345          -0.050   +0.050   -0.345 <--+---     -0.295
-------------------------------------------------------------------------------
Point:PNT031
Point-Profile -0.250          -0.050   +0.050   -0.250 <--+---     -0.200
-------------------------------------------------------------------------------
Point:PNT032
Point-Profile -0.044          -0.050   +0.050   -0.044 *--+---
-------------------------------------------------------------------------------
Point:PNT033
Point-Profile -0.392          -0.050   +0.050   -0.392 <--+---     -0.342
-------------------------------------------------------------------------------
Point:PNT034
Point-Profile -0.505          -0.050   +0.050   -0.505 <--+---     -0.455
-------------------------------------------------------------------------------
Point:PNT035
Point-Profile -0.312          -0.050   +0.050   -0.312 <--+---     -0.262
-------------------------------------------------------------------------------
Point:PNT036
Point-Profile -0.412          -0.050   +0.050   -0.412 <--+---     -0.362
-------------------------------------------------------------------------------
Point:PNT037
Point-Profile -0.233          -0.050   +0.050   -0.233 <--+---     -0.183
-------------------------------------------------------------------------------
Point:PNT038
Point-Profile  0.058          -0.050   +0.050    0.058 ---+-->      0.008
-------------------------------------------------------------------------------
Point:PNT039
Point-Profile -0.173          -0.050   +0.050   -0.173 <--+---     -0.123
-------------------------------------------------------------------------------
Point:PNT040
Point-Profile -0.481          -0.050   +0.050   -0.481 <--+---     -0.431
-------------------------------------------------------------------------------
Point:PNT041
Point-Profile -0.658          -0.050   +0.050   -0.658 <--+---     -0.608
-------------------------------------------------------------------------------
Point:PNT042
Point-Profile -0.563          -0.050   +0.050   -0.563 <--+---     -0.513
-------------------------------------------------------------------------------
Point:PNT043
Point-Profile -0.552          -0.050   +0.050   -0.552 <--+---     -0.502
-------------------------------------------------------------------------------
Point:PNT044
Point-Profile -0.518          -0.050   +0.050   -0.518 <--+---     -0.468
-------------------------------------------------------------------------------
Point:PNT045
Point-Profile -0.414          -0.050   +0.050   -0.414 <--+---     -0.364
-------------------------------------------------------------------------------
**** BILGI AMACLI ****
```

Point:PNT001
X-axis 32.586 32.533 -0.100 +0.100 0.053 ---+-*-
Y-axis -40.426 -40.429 -0.100 +0.100 0.003 ---*---
Z-axis 7.271 7.210 -0.100 +0.100 0.061 ---+-*-

Point:PNT002
X-axis 16.957 16.936 -0.100 +0.100 0.021 ---+*--
Y-axis -47.426 -47.428 -0.100 +0.100 0.002 ---*---
Z-axis 12.486 12.392 -0.100 +0.100 0.094 ---+--*

Point:PNT003
X-axis -4.913 -4.912 -0.100 +0.100 -0.001 ---*---
Y-axis -44.539 -44.547 -0.100 +0.100 0.008 ---*---
Z-axis 19.978 19.961 -0.100 +0.100 0.017 ---+*--

Point:PNT004
X-axis -30.599 -30.518 -0.100 +0.100 -0.081 -*-+---
Y-axis -33.807 -33.767 -0.100 +0.100 -0.040 --*+---
Z-axis 29.258 29.399 -0.100 +0.100 -0.141 <--+--- -0.041

Point:PNT005
X-axis -20.355 -20.378 -0.100 +0.100 0.023 ---+*--
Y-axis -10.812 -10.828 -0.100 +0.100 0.016 ---*---
Z-axis 21.206 21.086 -0.100 +0.100 0.120 ---+--> 0.020

Point:PNT006
X-axis -5.776 -5.812 -0.100 +0.100 0.036 ---+*--
Y-axis -16.999 -17.008 -0.100 +0.100 0.009 ---*---
Z-axis 18.418 18.232 -0.100 +0.100 0.186 ---+--> 0.086

Point:PNT007
X-axis 13.306 13.277 -0.100 +0.100 0.029 ---+*--
Y-axis -14.996 -14.972 -0.100 +0.100 -0.024 --*+---
Z-axis 15.237 14.994 -0.100 +0.100 0.243 ---+--> 0.143

Point:PNT008
X-axis 31.900 31.847 -0.100 +0.100 0.053 ---+-*-
Y-axis 0.115 0.121 -0.100 +0.100 -0.006 ---*---
Z-axis 14.064 14.001 -0.100 +0.100 0.063 ---+-*-

Point:PNT009
X-axis 29.211 29.181 -0.100 +0.100 0.030 ---+*--
Y-axis 41.576 41.600 -0.100 +0.100 -0.024 --*+---
Z-axis 29.328 29.261 -0.100 +0.100 0.067 ---+-*-

Point:PNT010
X-axis 19.441 19.441 -0.100 +0.100 0.000 ---*---
Y-axis 67.852 67.885 -0.100 +0.100 -0.033 --*+---
Z-axis 40.011 40.158 -0.100 +0.100 -0.147 <--+--- -0.047

Point:PNT011
X-axis 10.672 10.725 -0.100 +0.100 -0.053 -*-+---
Y-axis 51.607 51.695 -0.100 +0.100 -0.088 *--+---
Z-axis 31.842 31.637 -0.100 +0.100 0.205 ---+--> 0.105

Point:PNT012
X-axis -3.830 -3.809 -0.100 +0.100 -0.021 --*+---
Y-axis 25.158 25.213 -0.100 +0.100 -0.055 -*-+---
Z-axis 21.559 21.249 -0.100 +0.100 0.310 ---+--> 0.210

Point:PNT013
X-axis 6.816 6.811 -0.100 +0.100 0.005 ---*---
Y-axis 7.849 7.903 -0.100 +0.100 -0.054 -*-+---
Z-axis 18.889 18.562 -0.100 +0.100 0.327 ---+--> 0.227

Point:PNT014
X-axis 16.013 16.062 -0.100 +0.100 -0.049 --*+---
Y-axis 33.632 33.740 -0.100 +0.100 -0.108 <--+--- -0.008
Z-axis 26.157 25.855 -0.100 +0.100 0.302 ---+--> 0.202

Point:PNT015
X-axis 31.084 30.848 -0.100 +0.100 0.236 ---+--> 0.136
Y-axis -57.533 -57.370 -0.100 +0.100 -0.163 <--+--- -0.063
Z-axis 5.625 5.453 -0.100 +0.100 0.172 ---+--> 0.072

Point:PNT016
X-axis 15.169 15.021 -0.100 +0.100 0.148 ---+--> 0.048
Y-axis -64.732 -64.388 -0.100 +0.100 -0.344 <--+--- -0.244
Z-axis 10.597 10.336 -0.100 +0.100 0.261 ---+--> 0.161

Point:PNT017
X-axis -0.976 -0.961 -0.100 +0.100 -0.015 ---*---
Y-axis -68.000 -67.464 -0.100 +0.100 -0.536 <--+--- -0.436
Z-axis 7.436 7.389 -0.100 +0.100 0.047 ---+*--

Point:PNT018
X-axis -21.462 -21.281 -0.100 +0.100 -0.181 <--+--- -0.081
Y-axis -63.734 -63.187 -0.100 +0.100 -0.547 <--+--- -0.447
Z-axis 16.541 16.490 -0.100 +0.100 0.051 ---+-*-

Point:PNT019
X-axis -27.121 -26.911 -0.100 +0.100 -0.210 <--+--- -0.110
Y-axis -62.362 -61.866 -0.100 +0.100 -0.496 <--+--- -0.396
Z-axis 7.485 7.437 -0.100 +0.100 0.048 ---+*--

Point:PNT020
X-axis -40.887 -40.583 -0.100 +0.100 -0.304 <--+--- -0.204
Y-axis -54.447 -54.026 -0.100 +0.100 -0.421 <--+--- -0.321
Z-axis 6.284 6.238 -0.100 +0.100 0.046 ---+*--

Point:PNT021
X-axis -50.279 -49.945 -0.100 +0.100 -0.334 <--+--- -0.234
Y-axis -45.955 -45.627 -0.100 +0.100 -0.328 <--+--- -0.228
Z-axis 5.399 5.357 -0.100 +0.100 0.042 ---+*--

Point:PNT022
X-axis -50.396 -50.178 -0.100 +0.100 -0.218 <--+--- -0.118
Y-axis -42.889 -42.683 -0.100 +0.100 -0.206 <--+--- -0.106
Z-axis 25.644 25.617 -0.100 +0.100 0.027 ---+*--

Point:PNT023
X-axis -39.830 -39.528 -0.100 +0.100 -0.302 <--+--- -0.202
Y-axis -53.481 -53.052 -0.100 +0.100 -0.429 <--+--- -0.329
Z-axis 22.425 22.379 -0.100 +0.100 0.046 ---+*--

Point:PNT024
X-axis -42.314 -41.994 -0.100 +0.100 -0.320 <--+--- -0.220
Y-axis -52.481 -52.063 -0.100 +0.100 -0.418 <--+--- -0.318
Z-axis 14.088 14.041 -0.100 +0.100 0.047 ---+*--

Point:PNT025
X-axis -16.363 -16.372 -0.100 +0.100 0.009 ---*---
Y-axis -62.850 -62.445 -0.100 +0.100 -0.405 <--+--- -0.305
Z-axis 24.049 23.732 -0.100 +0.100 0.317 ---+--> 0.217

Point:PNT026
X-axis -40.762 -40.634 -0.100 +0.100 -0.128 <--+--- -0.028
Y-axis -48.414 -48.168 -0.100 +0.100 -0.246 <--+--- -0.146
Z-axis 34.243 33.937 -0.100 +0.100 0.306 ---+--> 0.206

Point:PNT027
X-axis -48.755 -48.811 -0.100 +0.100 0.056 ---+-*-
Y-axis -32.178 -32.149 -0.100 +0.100 -0.029 --*+---
Z-axis 36.220 36.345 -0.100 +0.100 -0.125 <--+--- -0.025

Point:PNT028
X-axis -55.198 -55.317 -0.100 +0.100 0.119 ---+--> 0.019
Y-axis -31.799 -31.783 -0.100 +0.100 -0.016 ---*---
Z-axis 14.483 14.491 -0.100 +0.100 -0.008 ---*---

Point:PNT029
X-axis -49.224 -49.596 -0.100 +0.100 0.372 ---+--> 0.272
Y-axis -18.039 -17.838 -0.100 +0.100 -0.201 <--+--- -0.101
Z-axis 6.470 6.505 -0.100 +0.100 -0.035 --*+---

Point:PNT030
X-axis -47.614 -47.916 -0.100 +0.100 0.302 ---+--> 0.202
Y-axis -16.571 -16.407 -0.100 +0.100 -0.164 <--+--- -0.064
Z-axis 14.924 14.952 -0.100 +0.100 -0.028 --*+---

Point:PNT031
X-axis -41.022 -41.094 -0.100 +0.100 0.072 ---+-*-
Y-axis -13.673 -13.547 -0.100 +0.100 -0.126 <--+--- -0.026
Z-axis 25.866 26.070 -0.100 +0.100 -0.204 <--+--- -0.104

Point:PNT032
X-axis -26.809 -26.839 -0.100 +0.100 0.030 ---+*--
Y-axis 12.689 12.701 -0.100 +0.100 -0.012 ---*---
Z-axis 19.167 19.200 -0.100 +0.100 -0.033 --*+---

Point:PNT033
X-axis -33.894 -34.238 -0.100 +0.100 0.344 ---+--> 0.244
Y-axis 8.064 8.251 -0.100 +0.100 -0.187 <--+--- -0.087
Z-axis 9.319 9.351 -0.100 +0.100 -0.032 --*+---

Point:PNT034
X-axis -21.791 -22.231 -0.100 +0.100 0.440 ---+--> 0.340
Y-axis 29.760 30.003 -0.100 +0.100 -0.243 <--+--- -0.143
Z-axis 3.790 3.832 -0.100 +0.100 -0.042 --*+---

Point:PNT035
X-axis -12.730 -13.005 -0.100 +0.100 0.275 ---+--> 0.175
Y-axis 44.420 44.566 -0.100 +0.100 -0.146 <--+--- -0.046
Z-axis 11.861 11.886 -0.100 +0.100 -0.025 --*+---

Point:PNT036
X-axis -4.777 -5.137 -0.100 +0.100 0.360 ---+--> 0.260
Y-axis 59.365 59.562 -0.100 +0.100 -0.197 <--+--- -0.097
Z-axis 3.985 4.018 -0.100 +0.100 -0.033 --*+---

Point:PNT037
X-axis -3.247 -3.454 -0.100 +0.100 0.207 ---+--> 0.107
Y-axis 60.376 60.483 -0.100 +0.100 -0.107 <--+--- -0.007
Z-axis 15.395 15.413 -0.100 +0.100 -0.018 --*+---

Point:PNT038
X-axis -5.995 -5.969 -0.100 +0.100 -0.026 --*+---
Y-axis 49.131 49.130 -0.100 +0.100 0.001 ---*---
Z-axis 25.156 25.102 -0.100 +0.100 0.054 ---+-*-

Point:PNT039
X-axis 7.843 7.730 -0.100 +0.100 0.113 ---+--> 0.013
Y-axis 69.885 69.962 -0.100 +0.100 -0.077 -*-+---
Z-axis 35.092 35.199 -0.100 +0.100 -0.107 <--+--- -0.007

Point:PNT040
X-axis 7.736 7.499 -0.100 +0.100 0.237 ---+--> 0.137
Y-axis 73.484 73.900 -0.100 +0.100 -0.416 <--+--- -0.316
Z-axis 16.716 16.757 -0.100 +0.100 -0.041 --*+---

Point:PNT041
X-axis 11.118 10.937 -0.100 +0.100 0.181 ---+--> 0.081
Y-axis 75.615 76.245 -0.100 +0.100 -0.630 <--+--- -0.530
Z-axis 6.065 6.122 -0.100 +0.100 -0.057 -*-+---

Point:PNT042
X-axis 20.528 20.679 -0.100 +0.100 -0.151 <--+--- -0.051
Y-axis 75.655 76.195 -0.100 +0.100 -0.540 <--+--- -0.440
Z-axis 5.869 5.918 -0.100 +0.100 -0.049 --*+---

Point:PNT043
X-axis 19.821 19.962 -0.100 +0.100 -0.141 <--+--- -0.041
Y-axis 74.041 74.573 -0.100 +0.100 -0.532 <--+--- -0.432
Z-axis 25.924 25.972 -0.100 +0.100 -0.048 --*+---

Point:PNT044
X-axis 25.961 26.303 -0.100 +0.100 -0.342 <--+--- -0.242
Y-axis 70.660 71.047 -0.100 +0.100 -0.387 <--+--- -0.287
Z-axis 28.194 28.238 -0.100 +0.100 -0.044 --*+---

Point:PNT045
X-axis 28.430 28.737 -0.100 +0.100 -0.307 <--+--- -0.207
Y-axis 70.956 71.232 -0.100 +0.100 -0.276 <--+--- -0.176
Z-axis 7.683 7.718 -0.100 +0.100 -0.035 --*+---

EK-4. Doğrusal kanal ile üretilen parçanın CMM tezgahında ölçüm raporu

```
--------------------------------------------------------------------------------
23-May-2021 17:13        DOGRUSAL 3D CMM RAPORU              Page  1
--------------------------------------------------------------------------------
*-----------------------------Camio Version 8.3-----------------------------*
| PARCA NO..... PARCA             | IS EMRI NO..... --             |
| PARCA ADI..... PARCA            | PARCA SIRA NO... D14           |
| REVIZYON NO..... --             |                                |
*---------------------------------*--------------------------------*
--------------------------------------------------------------------------------
(mm)        ACTUAL   NOMINAL    LO-TOL    HI-TOL DEVIATION GRAPHIC      ERROR
--------------------------------------------------------------------------------
Temperature Compensation:  OFF
Point:PNT001
Point-Profile  0.078          -0.050    +0.050    0.078 ---+-->      0.028
--------------------------------------------------------------------------------
Point:PNT002
Point-Profile  0.164          -0.050    +0.050    0.164 ---+-->      0.114
--------------------------------------------------------------------------------
Point:PNT003
Point-Profile  0.026          -0.050    +0.050    0.026 ---+-*-
--------------------------------------------------------------------------------
Point:PNT004
Point-Profile -0.289          -0.050    +0.050   -0.289 <--+---     -0.239
--------------------------------------------------------------------------------
Point:PNT005
Point-Profile  0.124          -0.050    +0.050    0.124 ---+-->      0.074
--------------------------------------------------------------------------------
Point:PNT006
Point-Profile  0.250          -0.050    +0.050    0.250 ---+-->      0.200
--------------------------------------------------------------------------------
Point:PNT007
Point-Profile  0.368          -0.050    +0.050    0.368 ---+-->      0.318
--------------------------------------------------------------------------------
Point:PNT008
Point-Profile  0.072          -0.050    +0.050    0.072 ---+-->      0.022
--------------------------------------------------------------------------------
Point:PNT009
Point-Profile  0.170          -0.050    +0.050    0.170 ---+-->      0.120
--------------------------------------------------------------------------------
Point:PNT010
Point-Profile -0.139          -0.050    +0.050   -0.139 <--+---     -0.089
--------------------------------------------------------------------------------
Point:PNT011
Point-Profile  0.366          -0.050    +0.050    0.366 ---+-->      0.316
--------------------------------------------------------------------------------
Point:PNT012
Point-Profile  0.423          -0.050    +0.050    0.423 ---+-->      0.373
--------------------------------------------------------------------------------
```

Point:PNT013
Point-Profile 0.465 -0.050 +0.050 0.465 ---+--> 0.415

Point:PNT014
Point-Profile 0.458 -0.050 +0.050 0.458 ---+--> 0.408

Point:PNT015
Point-Profile 0.402 -0.050 +0.050 0.402 ---+--> 0.352

Point:PNT016
Point-Profile 0.612 -0.050 +0.050 0.612 ---+--> 0.562

Point:PNT017
Point-Profile 0.699 -0.050 +0.050 0.699 ---+--> 0.649

Point:PNT018
Point-Profile 0.736 -0.050 +0.050 0.736 ---+--> 0.686

Point:PNT019
Point-Profile 0.692 -0.050 +0.050 0.692 ---+--> 0.642

Point:PNT020
Point-Profile 0.675 -0.050 +0.050 0.675 ---+--> 0.625

Point:PNT021
Point-Profile 0.631 -0.050 +0.050 0.631 ---+--> 0.581

Point:PNT022
Point-Profile 0.613 -0.050 +0.050 0.613 ---+--> 0.563

Point:PNT023
Point-Profile 0.721 -0.050 +0.050 0.721 ---+--> 0.671

Point:PNT024
Point-Profile 0.703 -0.050 +0.050 0.703 ---+--> 0.653

Point:PNT025
Point-Profile 0.668 -0.050 +0.050 0.668 ---+--> 0.618

Point:PNT026
Point-Profile 0.585 -0.050 +0.050 0.585 ---+--> 0.535

Point:PNT027
Point-Profile -0.148 -0.050 +0.050 -0.148 <--+--- -0.098

Point:PNT028
Point-Profile 0.004 -0.050 +0.050 0.004 ---*---

Point:PNT029
Point-Profile -0.374 -0.050 +0.050 -0.374 <--+--- -0.324

Point:PNT030
Point-Profile -0.328 -0.050 +0.050 -0.328 <--+--- -0.278

Point:PNT031
Point-Profile -0.326 -0.050 +0.050 -0.326 <--+--- -0.276

Point:PNT032
Point-Profile -0.063 -0.050 +0.050 -0.063 <--+--- -0.013

Point:PNT033
Point-Profile -0.431 -0.050 +0.050 -0.431 <--+--- -0.381

Point:PNT034
Point-Profile -0.625 -0.050 +0.050 -0.625 <--+--- -0.575

Point:PNT035
Point-Profile -0.454 -0.050 +0.050 -0.454 <--+--- -0.404

Point:PNT036
Point-Profile -0.527 -0.050 +0.050 -0.527 <--+--- -0.477

Point:PNT037
Point-Profile -0.340 -0.050 +0.050 -0.340 <--+--- -0.290

Point:PNT038
Point-Profile 0.132 -0.050 +0.050 0.132 ---+--> 0.082

Point:PNT039
Point-Profile -0.183 -0.050 +0.050 -0.183 <--+--- -0.133

Point:PNT040
Point-Profile -0.610 -0.050 +0.050 -0.610 <--+--- -0.560

Point:PNT041
Point-Profile -0.812 -0.050 +0.050 -0.812 <--+--- -0.762

Point:PNT042
Point-Profile -0.718 -0.050 +0.050 -0.718 <--+--- -0.668

Point:PNT043
Point-Profile -0.739 -0.050 +0.050 -0.739 <--+--- -0.689

Point:PNT044
Point-Profile -0.673 -0.050 +0.050 -0.673 <--+--- -0.623

Point:PNT045
Point-Profile -0.580 -0.050 +0.050 -0.580 <--+--- -0.530

**** BILGI AMACLI ****

Point:PNT001
X-axis 32.583 32.533 -0.100 +0.100 0.050 ---+*--
Y-axis -40.437 -40.429 -0.100 +0.100 -0.008 ---*---
Z-axis 7.271 7.210 -0.100 +0.100 0.061 ---+-*-

Point:PNT002
X-axis 16.978 16.936 -0.100 +0.100 0.042 ---+*--
Y-axis -47.425 -47.428 -0.100 +0.100 0.003 ---*---
Z-axis 12.551 12.392 -0.100 +0.100 0.159 ---+--> 0.059

Point:PNT003
X-axis -4.909 -4.912 -0.100 +0.100 0.003 ---*---
Y-axis -44.538 -44.547 -0.100 +0.100 0.009 ---*---
Z-axis 19.986 19.961 -0.100 +0.100 0.025 ---+*--

Point:PNT004
X-axis -30.653 -30.518 -0.100 +0.100 -0.135 <--+--- -0.035
Y-axis -33.838 -33.767 -0.100 +0.100 -0.071 -*-+---
Z-axis 29.154 29.399 -0.100 +0.100 -0.245 <--+--- -0.145

Point:PNT005
X-axis -20.354 -20.378 -0.100 +0.100 0.024 ---+*--
Y-axis -10.811 -10.828 -0.100 +0.100 0.017 ---*---
Z-axis 21.206 21.086 -0.100 +0.100 0.120 ---+--> 0.020

Point:PNT006
X-axis -5.764 -5.812 -0.100 +0.100 0.048 ---+*--
Y-axis -16.998 -17.008 -0.100 +0.100 0.010 ---*---
Z-axis 18.477 18.232 -0.100 +0.100 0.245 ---+--> 0.145

Point:PNT007
X-axis 13.322 13.277 -0.100 +0.100 0.045 ---+*--
Y-axis -15.008 -14.972 -0.100 +0.100 -0.036 --*+---
Z-axis 15.358 14.994 -0.100 +0.100 0.364 ---+--> 0.264

Point:PNT008
X-axis 31.894 31.847 -0.100 +0.100 0.047 ---+*--
Y-axis 0.117 0.121 -0.100 +0.100 -0.004 ---*---
Z-axis 14.057 14.001 -0.100 +0.100 0.056 ---+-*-

Point:PNT009
X-axis 29.263 29.181 -0.100 +0.100 0.082 ---+-*-
Y-axis 41.548 41.600 -0.100 +0.100 -0.052 -*-+---
Z-axis 29.401 29.261 -0.100 +0.100 0.140 ---+--> 0.040

Point:PNT010
X-axis 19.442 19.441 -0.100 +0.100 0.001 ---*---
Y-axis 67.852 67.885 -0.100 +0.100 -0.033 --*+---
Z-axis 40.023 40.158 -0.100 +0.100 -0.135 <--+--- -0.035

Point:PNT011
X-axis 10.634 10.725 -0.100 +0.100 -0.091 *--+---
Y-axis 51.555 51.695 -0.100 +0.100 -0.140 <--+--- -0.040
Z-axis 31.963 31.637 -0.100 +0.100 0.326 ---+--> 0.226

Point:PNT012
X-axis -3.838 -3.809 -0.100 +0.100 -0.029 --*+---
Y-axis 25.140 25.213 -0.100 +0.100 -0.073 -*-+---
Z-axis 21.665 21.249 -0.100 +0.100 0.416 ---+--> 0.316

Point:PNT013
X-axis 6.818 6.811 -0.100 +0.100 0.007 ---*---
Y-axis 7.829 7.903 -0.100 +0.100 -0.074 -*-+---
Z-axis 19.021 18.562 -0.100 +0.100 0.459 ---+--> 0.359

Point:PNT014
X-axis 15.992 16.062 -0.100 +0.100 -0.070 -*-+---
Y-axis 33.590 33.740 -0.100 +0.100 -0.150 <--+--- -0.050
Z-axis 26.282 25.855 -0.100 +0.100 0.427 ---+--> 0.327

Point:PNT015
X-axis 31.134 30.848 -0.100 +0.100 0.286 ---+--> 0.186
Y-axis -57.564 -57.370 -0.100 +0.100 -0.194 <--+--- -0.094
Z-axis 5.658 5.453 -0.100 +0.100 0.205 ---+--> 0.105

Point:PNT016
X-axis 15.224 15.021 -0.100 +0.100 0.203 ---+--> 0.103
Y-axis -64.848 -64.388 -0.100 +0.100 -0.460 <--+--- -0.360
Z-axis 10.685 10.336 -0.100 +0.100 0.349 ---+--> 0.249

Point:PNT017
X-axis -0.981 -0.961 -0.100 +0.100 -0.020 --*+---
Y-axis -68.160 -67.464 -0.100 +0.100 -0.696 <--+--- -0.596
Z-axis 7.450 7.389 -0.100 +0.100 0.061 ---+-*-

Point:PNT018
X-axis -21.514 -21.281 -0.100 +0.100 -0.233 <--+--- -0.133
Y-axis -63.882 -63.187 -0.100 +0.100 -0.695 <--+--- -0.595
Z-axis 16.553 16.490 -0.100 +0.100 0.063 ---+-*-

Point:PNT019
X-axis -27.183 -26.911 -0.100 +0.100 -0.272 <--+--- -0.172
Y-axis -62.499 -61.866 -0.100 +0.100 -0.633 <--+--- -0.533
Z-axis 7.498 7.437 -0.100 +0.100 0.061 ---+-*-

Point:PNT020
X-axis -40.980 -40.583 -0.100 +0.100 -0.397 <--+--- -0.297
Y-axis -54.569 -54.026 -0.100 +0.100 -0.543 <--+--- -0.443
Z-axis 6.297 6.238 -0.100 +0.100 0.059 ---+-*-

Point:PNT021
X-axis -50.401 -49.945 -0.100 +0.100 -0.456 <--+--- -0.356
Y-axis -46.059 -45.627 -0.100 +0.100 -0.432 <--+--- -0.332
Z-axis 5.413 5.357 -0.100 +0.100 0.056 ---+-*-

Point:PNT022
X-axis -50.634 -50.178 -0.100 +0.100 -0.456 <--+--- -0.356
Y-axis -43.088 -42.683 -0.100 +0.100 -0.405 <--+--- -0.305
Z-axis 25.671 25.617 -0.100 +0.100 0.054 ---+-*-

Point:PNT023
X-axis -39.949 -39.528 -0.100 +0.100 -0.421 <--+--- -0.321
Y-axis -53.634 -53.052 -0.100 +0.100 -0.582 <--+--- -0.482
Z-axis 22.442 22.379 -0.100 +0.100 0.063 ---+-*-

Point:PNT024
X-axis -42.426 -41.994 -0.100 +0.100 -0.432 <--+--- -0.332
Y-axis -52.615 -52.063 -0.100 +0.100 -0.552 <--+--- -0.452
Z-axis 14.103 14.041 -0.100 +0.100 0.062 ---+-*-

Point:PNT025
X-axis -16.363 -16.372 -0.100 +0.100 0.009 ---*---
Y-axis -62.971 -62.445 -0.100 +0.100 -0.526 <--+--- -0.426
Z-axis 24.143 23.732 -0.100 +0.100 0.411 ---+--> 0.311

Point:PNT026
X-axis -40.818 -40.634 -0.100 +0.100 -0.184 <--+--- -0.084
Y-axis -48.515 -48.168 -0.100 +0.100 -0.347 <--+--- -0.247
Z-axis 34.370 33.937 -0.100 +0.100 0.433 ---+--> 0.333

Point:PNT027
X-axis -48.752 -48.811 -0.100 +0.100 0.059 ---+-*-
Y-axis -32.183 -32.149 -0.100 +0.100 -0.034 --*+---
Z-axis 36.214 36.345 -0.100 +0.100 -0.131 <--+--- -0.031

Point:PNT028
X-axis -55.321 -55.317 -0.100 +0.100 -0.004 ---*---
Y-axis -31.787 -31.783 -0.100 +0.100 -0.004 ---*---
Z-axis 14.494 14.491 -0.100 +0.100 0.003 ---*---

Point:PNT029
X-axis -49.270 -49.596 -0.100 +0.100 0.326 ---+--> 0.226
Y-axis -18.019 -17.838 -0.100 +0.100 -0.181 <--+--- -0.081
Z-axis 6.475 6.505 -0.100 +0.100 -0.030 --*+---

Point:PNT030
X-axis -47.629 -47.916 -0.100 +0.100 0.287 ---+--> 0.187
Y-axis -16.564 -16.407 -0.100 +0.100 -0.157 <--+--- -0.057
Z-axis 14.926 14.952 -0.100 +0.100 -0.026 --*+---

Point:PNT031
X-axis -41.002 -41.094 -0.100 +0.100 0.092 ---+--*
Y-axis -13.712 -13.547 -0.100 +0.100 -0.165 <--+--- -0.065
Z-axis 25.804 26.070 -0.100 +0.100 -0.266 <--+--- -0.166

Point:PNT032
X-axis -26.800 -26.839 -0.100 +0.100 0.039 ---+*--
Y-axis 12.683 12.701 -0.100 +0.100 -0.018 --*+---
Z-axis 19.151 19.200 -0.100 +0.100 -0.049 --*+---

Point:PNT033
X-axis -33.862 -34.238 -0.100 +0.100 0.376 ---+--> 0.276
Y-axis 8.043 8.251 -0.100 +0.100 -0.208 <--+--- -0.108
Z-axis 9.315 9.351 -0.100 +0.100 -0.036 --*+---

Point:PNT034
X-axis -21.688 -22.231 -0.100 +0.100 0.543 ---+--> 0.443
Y-axis 29.698 30.003 -0.100 +0.100 -0.305 <--+--- -0.205
Z-axis 3.780 3.832 -0.100 +0.100 -0.052 -*-+---

Point:PNT035
X-axis -12.613 -13.005 -0.100 +0.100 0.392 ---+--> 0.292
Y-axis 44.340 44.566 -0.100 +0.100 -0.226 <--+--- -0.126
Z-axis 11.848 11.886 -0.100 +0.100 -0.038 --*+---

Point:PNT036
X-axis -4.680 -5.137 -0.100 +0.100 0.457 ---+--> 0.357
Y-axis 59.304 59.562 -0.100 +0.100 -0.258 <--+--- -0.158
Z-axis 3.975 4.018 -0.100 +0.100 -0.043 --*+---

Point:PNT037
X-axis -3.158 -3.454 -0.100 +0.100 0.296 ---+--> 0.196
Y-axis 60.318 60.483 -0.100 +0.100 -0.165 <--+--- -0.065
Z-axis 15.386 15.413 -0.100 +0.100 -0.027 --*+---

Point:PNT038
X-axis -6.041 -5.969 -0.100 +0.100 -0.072 -*-+---
Y-axis 49.134 49.130 -0.100 +0.100 0.004 ---*---
Z-axis 25.214 25.102 -0.100 +0.100 0.112 ---+--> 0.012

Point:PNT039
X-axis 7.848 7.730 -0.100 +0.100 0.118 ---+--> 0.018
Y-axis 69.878 69.962 -0.100 +0.100 -0.084 *--+---
Z-axis 35.087 35.199 -0.100 +0.100 -0.112 <--+--- -0.012

Point:PNT040
X-axis 7.798 7.499 -0.100 +0.100 0.299 ---+--> 0.199
Y-axis 73.371 73.900 -0.100 +0.100 -0.529 <--+--- -0.429
Z-axis 16.705 16.757 -0.100 +0.100 -0.052 -*-+---

Point:PNT041
X-axis 11.161 10.937 -0.100 +0.100 0.224 ---+--> 0.124
Y-axis 75.467 76.245 -0.100 +0.100 -0.778 <--+--- -0.678
Z-axis 6.052 6.122 -0.100 +0.100 -0.070 -*-+---

Point:PNT042
X-axis 20.486 20.679 -0.100 +0.100 -0.193 <--+--- -0.093
Y-axis 75.506 76.195 -0.100 +0.100 -0.689 <--+--- -0.589
Z-axis 5.856 5.918 -0.100 +0.100 -0.062 -*-+---

Point:PNT043
X-axis 19.773 19.962 -0.100 +0.100 -0.189 <--+--- -0.089
Y-axis 73.861 74.573 -0.100 +0.100 -0.712 <--+--- -0.612
Z-axis 25.908 25.972 -0.100 +0.100 -0.064 -*-+---

Point:PNT044
X-axis 25.863 26.303 -0.100 +0.100 -0.440 <--+--- -0.340
Y-axis 70.541 71.047 -0.100 +0.100 -0.506 <--+--- -0.406
Z-axis 28.181 28.238 -0.100 +0.100 -0.057 -*-+---

Point:PNT045
X-axis 28.316 28.737 -0.100 +0.100 -0.421 <--+--- -0.321
Y-axis 70.836 71.232 -0.100 +0.100 -0.396 <--+--- -0.296
Z-axis 7.669 7.718 -0.100 +0.100 -0.049 --*+---



GAZİ GELECEKTİR...