

**T.C.**  
**YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**KÖPÜK AJANI İÇEREN POLİPROPİLENİN PLASTİK ENJEKSİYON  
KALIPLANMASINDA ÇARPILMANIN VE ÇEVİRİM ZAMANININ  
OPTİMİZASYONU**

**Uğur DEMİRCİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Makine Mühendisliği Anabilim Dalı**

**İmal Usulleri Programı**

**Danışman**

**Prof. Dr. Mirigül ALTAN**

**Temmuz, 2019**

**T.C.**  
**YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**KÖPÜK AJANI İÇEREN POLİPROPİLENİN PLASTİK ENJEKSİYON  
KALIPLANMASINDA ÇARPILMANIN VE ÇEVİRİM ZAMANININ  
OPTİMİZASYONU**

Uğur DEMİRCİ tarafından hazırlanan tez çalışması 18/07/2019 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, İmal Usulleri Programı **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Mirigül ALTAN

Yıldız Teknik Üniversitesi

Danışman

**Jüri Üyeleri**

Prof. Dr. Mirigül ALTAN, Danışman

Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Mustafa BAKKAL

İstanbul Teknik Üniversitesi

Dr. Öğretim Üyesi Murat KIYAK

Yıldız Teknik Üniversitesi

Danışmanım Prof. Dr. Mirigöl ALTAN sorumluluğunda tarafımca hazırlanan Köpük Ajanı İçeren Polipropilen Plastik Enjeksiyon Kalıplanmasında Çarpılmanın Ve Çevrim Zamanının Optimizasyonu başlıklı çalışmada veri toplama ve veri kullanımında gerekli yasal izinleri aldığımı, diğer kaynaklardan aldığım bilgileri ana metin ve referanslarda eksiksiz gösterdiğimi, araştırma verilerine ve sonuçlarına ilişkin çarpıtma ve/veya sahtecilik yapmadığımı, çalışmam süresince bilimsel araştırma ve etik ilkelerine uygun davrandığımı beyan ederim. Beyanımın aksinin ispatı halinde her türlü yasal sonucu kabul ederim.

Uğur DEMİRCİ

İmza

*Aileme*

*ve*

*eşime*



## TEŞEKKÜR

---

Öncelikle tüm tez çalışmam süresince destek ve yönlendirmeleri için tez danışmanım Prof.Dr. Mirigül Altan'a teşekkürlerimi sunarım.

Tez yazımı süresince sürekli yanımda olan aileme ve eşime minnetlerimi sunarım.

Uğur DEMİRCİ



## İÇİNDEKİLER

---

|                                                              |      |
|--------------------------------------------------------------|------|
| SİMGE LİSTESİ .....                                          | VIII |
| KISALTMA LİSTESİ .....                                       | IX   |
| ŞEKİL LİSTESİ .....                                          | X    |
| TABLO LİSTESİ .....                                          | XII  |
| ÖZET.....                                                    | XIII |
| ABSTRACT .....                                               | XV   |
| 1 Giriş .....                                                | 1    |
| 1.1 Literatür Özeti .....                                    | 1    |
| 1.2 Tezin Amacı .....                                        | 7    |
| 1.3 Hipotez .....                                            | 7    |
| 2 Plastik Enjeksiyon Kalıplama Yöntemi .....                 | 8    |
| 2.1 Plastik Enjeksiyonda Kullanılan Polimerler .....         | 8    |
| 2.2 Plastik Enjeksiyon Kalıpları .....                       | 12   |
| 2.3 Plastik Enjeksiyon Yöntemi ile İmalat .....              | 14   |
| 2.3.1 Plastik Enjeksiyon Makinesi.....                       | 14   |
| 2.3.2 Plastik Enjeksiyon Yöntemi ile Diğer Uygulamalar ..... | 16   |
| 3 Plastik Enjeksiyon Yönteminde Çevrim.....                  | 18   |
| 3.1 Enjeksiyon Çevrim Aşamaları .....                        | 18   |
| 3.2 Enjeksiyon Parametreleri .....                           | 19   |
| 3.2.1 Sıcaklık Parametreleri.....                            | 21   |
| 3.2.2 Basınç Parametreleri .....                             | 22   |
| 3.2.3 Zaman Parametreleri.....                               | 23   |

|                                                                                          |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 3.2.4 Hız Parametreleri .....                                                            | 24 |
| 4 Deneysel Çalışmalar .....                                                              | 25 |
| 4.1 Malzeme .....                                                                        | 25 |
| 4.2 Parça ve Kalıp Tasarımı .....                                                        | 27 |
| 4.3 Sonlu Elemanlar Akış Analizi .....                                                   | 29 |
| 4.4 Deneysel Tasarım Analizleri.....                                                     | 32 |
| 4.4.1 Taguchi Analizi .....                                                              | 33 |
| 4.4.2 Cevap Yüzey Analizi .....                                                          | 34 |
| 4.5 Çarpılmanın Ölçülmesi .....                                                          | 35 |
| 5 Bulgular ve Tartışma.....                                                              | 38 |
| 5.1 Deneysel Tasarım – Taguchi Analizi .....                                             | 38 |
| 5.2 Sonlu Elemanlar Akış Analizi Sonuçları .....                                         | 40 |
| 5.3 Deneysel Tasarım – Cevap Yüzey Analizi .....                                         | 42 |
| 5.4 Numunelerin Eldesi ve Kalite Kontrol .....                                           | 48 |
| 6 Sonuçlar ve Öneriler .....                                                             | 51 |
| A Malzeme Testleri .....                                                                 | 54 |
| A.1 Diferansiyel Taramalı Kalorimetre (DSC) Analizi Isıtma ve Soğutma<br>Diyagramı ..... | 55 |
| A.2 Termogravimetrik (TGA) Analiz Diyagramı .....                                        | 55 |
| A.3 Kapiler Reometri Analizi Sonuçları .....                                             | 56 |
| A.4 Cevap Yüzey Deneysel Tasarım Matrisine Göre Moldflow Analizi<br>Sonuçları .....      | 60 |
| Kaynakça.....                                                                            | 68 |
| Tezden Üretilmiş Yayınlar .....                                                          | 71 |

## SİMGE LİSTESİ

---

- X1 Soğutma Süresi
- X2 Sabit Kalıp Soğutma Sıcaklığı
- X3 Hareketli Kalıp Soğutma Sıcaklığı
- X4 Soğutucu Akışkan Debisi





## KISALTMA LİSTESİ

---

|        |                                             |
|--------|---------------------------------------------|
| PLA    | Poliaktik Asit                              |
| IMD:   | Kalıp İçi Dekorasyon                        |
| PP     | Polipropilen                                |
| PE     | Polietilen                                  |
| ABS    | Akrilonitril Bütadien Stiren                |
| PC     | Polikarbonat                                |
| PC/ABS | Polikarbonat - Akrilonitril Bütadien Stiren |
| TPE    | Termoplastik Elastomer                      |
| TGA    | Termogravimetrik Analiz                     |
| DSC    | Diferansiyel Taramalı Kalorimetre Analizi   |
| MFI    | Erime Akış İndeksi                          |
| sn     | Saniye                                      |
| lt/dk  | Litre/dakika                                |
| CYM    | Cevap Yüzey metodu                          |

## ŞEKİL LİSTESİ

|            |                                                                                   |    |
|------------|-----------------------------------------------------------------------------------|----|
| Şekil 2.1  | Plastiklerin sınıflandırılması .....                                              | 9  |
| Şekil 2.2  | Plastik enjeksiyon kalıp elemanları.....                                          | 13 |
| Şekil 2.3  | Termoplastik enjeksiyon makinesi şematik gösterimi .....                          | 15 |
| Sekil 3.1  | Enjeksiyon çevrimi .....                                                          | 19 |
| Şekil 3.2  | Plastik akışı ve ısı transferi.....                                               | 20 |
| Şekil 3.3  | Enjeksiyon proses diyagramı .....                                                 | 20 |
| Şekil 3.4  | Vida kovan sistemi .....                                                          | 21 |
| Şekil 4.1  | Klima şasi parçası ve çarpılma bölgeleri (a) – Arka yüzü, (b) - Ön yüzü .....     | 27 |
| Şekil 4.2  | Şasi parçasının montajı sonrası oluşan çarpılmanın fotoğrafı .....                | 28 |
| Şekil 4.3  | Şasi parçası mevcut kalıbında soğutma kanalları katı model görüntüsü.....         | 28 |
| Şekil 4.4  | Mesh işlemi (ağlara bölme) tamamlanmış şasi parçası .....                         | 29 |
| Şekil 4.5  | Soğutma kanallarının akış analizi için devamlı çizgiler ile gösterimi .....       | 30 |
| Şekil 4.6  | Parçanın mevcut proses değerlerinin akış diyagramı .....                          | 31 |
| Şekil 4.7  | Montaj sonrası çarpılma ölçümü .....                                              | 36 |
| Şekil 4.8  | Şasi parçasının 2 boyutlu teknik resmi .....                                      | 36 |
| Şekil 5.1  | Sinyal Gürültü oranları .....                                                     | 40 |
| Şekil 5.2  | Moldflow analizi sonucu elde edilen en düşük çarpılma .....                       | 42 |
| Şekil 5.3  | Çarpılmanın faktörlere bağlı değişimi (sınır grafiği) .....                       | 47 |
| Şekil 5.4  | Bant üzeri çarpılma ölçümü .....                                                  | 50 |
| Şekil A.1  | Malzemenin DSC eğrisi .....                                                       | 54 |
| Şekil A.2  | TGA Sıcaklık-Ağırlık grafiği a) PP TGA eğrisi b) Köpük ajanlı PP TGA eğrisi ..... | 55 |
| Şekil A.3  | Kayma gerilmesi, kayma hızı ve viskozite diyagramı – 190°C .....                  | 56 |
| Şekil A.4  | Kayma gerilmesi, kayma hızı ve viskozite diyagramı – 200°C .....                  | 57 |
| Şekil A.5  | Kayma gerilmesi, kayma hızı ve viskozite diyagramı – 205°C .....                  | 58 |
| Şekil A.6  | Kayma gerilmesi, kayma hızı ve viskozite diyagramı – 215°C .....                  | 59 |
| Şekil A.7  | Moldflow analizi çarpılma sonucu deney no- 1 .....                                | 60 |
| Şekil A.8  | Moldflow analizi çarpılma sonucu deney no- 2 .....                                | 60 |
| Şekil A.9  | Moldflow analizi çarpılma sonucu deney no- 3 .....                                | 61 |
| Şekil A.10 | Moldflow analizi çarpılma sonucu deney no- 4 .....                                | 61 |
| Şekil A.11 | Moldflow analizi çarpılma sonucu deney no- 5 .....                                | 62 |

|                                                                       |    |
|-----------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Şekil A.12</b> Moldflow analizi çarpılma sonucu deney no- 6 .....  | 62 |
| <b>Şekil A.13</b> Moldflow analizi çarpılma sonucu deney no- 7 .....  | 63 |
| <b>Şekil A.14</b> Moldflow analizi çarpılma sonucu deney no- 8 .....  | 63 |
| <b>Şekil A.15</b> Moldflow analizi çarpılma sonucu deney no- 9 .....  | 64 |
| <b>Şekil A.16</b> Moldflow analizi çarpılma sonucu deney no- 10 ..... | 64 |
| <b>Şekil A.17</b> Moldflow analizi çarpılma sonucu deney no- 11 ..... | 65 |
| <b>Şekil A.18</b> Moldflow analizi çarpılma sonucu deney no- 12 ..... | 65 |
| <b>Şekil A.19</b> Moldflow analizi çarpılma sonucu deney no- 13 ..... | 66 |
| <b>Şekil A.20</b> Moldflow analizi çarpılma sonucu deney no- 14 ..... | 66 |
| <b>Şekil A.21</b> Moldflow analizi çarpılma sonucu deney no- 15 ..... | 67 |



## TABLO LİSTESİ

---

|                   |                                                                          |    |
|-------------------|--------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Tablo 4.1</b>  | Hammadde özellikleri .....                                               | 26 |
| <b>Tablo 4.2</b>  | Akış analizinde kullanılan deney planı .....                             | 32 |
| <b>Tablo 4.3</b>  | L9 matrisi .....                                                         | 33 |
| <b>Tablo 4.4</b>  | L9 matrisindeki faktörlerin seviyeleri .....                             | 34 |
| <b>Tablo 4.5</b>  | Cevap yüzey matrisi .....                                                | 35 |
| <b>Tablo 5.1</b>  | L9 deneysel tasarımına göre Moldflow analizi çarpılma değerleri .....    | 39 |
| <b>Tablo 5.2</b>  | Ortalama cevap tablosu .....                                             | 39 |
| <b>Tablo 5.3</b>  | Sinyal Gürültü oranları (S/N) .....                                      | 39 |
| <b>Tablo 5.4</b>  | Moldflow çarpılma sonuçları .....                                        | 41 |
| <b>Tablo 5.5</b>  | CYM deneysel tasarımına göre MF analizi çarpılma değerleri .....         | 43 |
| <b>Tablo 5.6</b>  | Varyans analizi (Anova) .....                                            | 44 |
| <b>Tablo 5.7</b>  | Model özeti .....                                                        | 45 |
| <b>Tablo 5.8</b>  | Faktörler ve faktörler arası etkileşim katsayıları .....                 | 45 |
| <b>Tablo 5.9</b>  | Enjeksiyon proses denemelerinde uygulanan doğrulama testi şartları ..... | 48 |
| <b>Tablo 5.10</b> | Kalite kontrol ölçümleri.....                                            | 49 |
| <b>Tablo 5.11</b> | İyileşme hedeflenen parametrelerin ilk ve son değerleri .....            | 50 |
| <b>Tablo A.1</b>  | Kapiler reometre sonuçları – 190°C.....                                  | 56 |
| <b>Tablo A.2</b>  | Kapiler reometre sonuçları – 200°C.....                                  | 57 |
| <b>Tablo A.3</b>  | Kapiler reometre sonuçları – 205°C .....                                 | 58 |
| <b>Tablo A.4</b>  | Kapiler reometre sonuçları – 215°C .....                                 | 59 |

# Köpük Ajanı İçeren Polipropilenin Plastik Enjeksiyon Kalıplanmasında Çarpılmanın Ve Çevrim Zamanının Optimizasyonu

Uğur DEMİRCİ

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Prof. Dr. Mirigül ALTAN

Plastik enjeksiyon, günlük hayatta kullandığımız plastiklerin birçoğunun üretim yöntemidir. Düşük maliyetle karmaşık geometrilili şekilli parçaların düşük maliyetle tekrarlı şekilde üretimi için plastik enjeksiyon oldukça uygundur. Plastik enjeksiyonda her bir parça için ayrı prosesin kurulması gerekmektedir. Ürün kalitesini etkileyebilecek birçok problem doğru proses parametreleri ile çözülebilmektedir.

Plastik enjeksiyon ile üretim için sonlu elemanlar akış analizi ve deneysel tasarım yöntemleri son yıllarda oldukça kullanılmaktadır. Sonlu elemanlar akış analizi plastiklerin enjeksiyon işlemi sırasındaki parametrelere bağlı davranışlarını simule etmek ve olası kalite problemlerini önceden görebilmek için kullanılmaktadır. Deneysel tasarım yöntemleri ise üretim optimizasyonlarında tercih edilmektedir. Parametrelerin etki derecelerinin belirlenmesi ve optimum

proses parametrelerinin bulunması deneysel tasarım yöntemlerinin tercih nedenlerindendir.

Bu çalışmada bir vaka analizi olarak plastik enjeksiyon yöntemi ile üretilen, hammaddesi cam elyaf ve köpürtücü ajan katkılı polipropilen olan karmaşık geometriye sahip klima şasi parçasının sonlu elemanlar akış analizi ve deneysel tasarım metotları ile yapılan optimizasyon çalışmaları ile çarpılma ve çevrim süresinin azaltılması gerçekleştirilmiştir.

Çalışmalar sırasında soğutma süresi, kalıp sıcaklıkları ve soğutucu akışkan debisinin farklı seviyeleri ve kombinasyonları ile optimum imalat şartları elde edilmiştir. Yapılan analizler ve denemeler sonrası çarpılma değeri 5,5 mm'den 2,4 – 2,8 mm aralığına, çevrim süresi 47 saniyeden 43 saniyeye düşürülmüştür.

**Anahtar Kelimeler:** Plastik enjeksiyon kalıplama, kimyasal köpürtme, köpük ajan, cam elyaf, çarpılma.

# **Optimization of Warpage and Cycle Time in Plastic Injection Molding of Polypropylene with Blowing Agent**

Uğur DEMİRCİ

Department of Mechanical Engineering

Master Science Thesis

Advisor: Prof. Dr. Mirigül ALTAN

Plastic injection is the production method of many of the plastics we use in daily life. Plastic injection is highly suitable for the repetitive production of complex geometry shaped parts at low cost. In plastic injection, special process is required for each part. Many problems that can affect product quality can be solved with the correct process parameters. Finite element flow analysis and experimental design methods for plastic injection production are used in recent years. Finite element flow analysis is used to simulate the behavior of plastics during the injection process and to predict possible quality problems. Experimental design methods are preferred in production optimizations. Determining the effect of the parameters and finding the optimum process parameters are among the preferred reasons for experimental design methods.

In this study, as a case analysis, the finite element flow analysis of the complex geometry with the raw material glass fiber and foamed polypropylene produced by plastic injection method, and after the optimization studies with the experimental design methods, the analysis of the warpage and cycle time of the plastic injection process experiments was performed.

During the studies, the optimum production conditions has been studied with different levels and combinations of cooling time, mold temperatures and flow rate of coolant. After the analyzes and trials, the warpage value was reduced from 5.5 mm to 2.4 - 2.8 mm, the cycle time was reduced from 47 seconds to 43 seconds.

**Key Words:** Plastic injection molding, chemical foaming, foam agent, glass fiber, warpage.





### 1.1 Literatür Özeti

Günlük yaşamda kullanılan hemen hemen her ürün plastik kullanımını içerir ve bu ürünlerin çoğu plastik enjeksiyon yöntemiyle üretilmektedir. Plastik enjeksiyon yöntemi, düşük maliyetle çeşitli şekillerde ve karmaşık geometrilerde tekrarlanabilir şekilde üretim yapabilmek için en uygun üretim yöntemi olarak bilinmektedir. Plastik enjeksiyon prosesi malzemesinin özelliklerine uyarlanarak benzeri diğer yöntemlere göre daha hızlı üretim imkânı sağlamaktadır. Bununla birlikte plastik enjeksiyonda ürünü etkileyen birçok parametre olması nedeniyle kalitesel anlamda zorluklar da yaşanabilmektedir. Söz konusu; kalite problemleri hammadde, kalıp, proses ve bu parametrelerin arasındaki ilişkilerden kaynaklanabilir. Genellikle uygulaması ve kurulması daha zor olan kısım ise enjeksiyon prosesinin kurulmasıdır.

Plastik enjeksiyonda her bir parça için prosesin kurulması ve parça özelinde optimum parametrelerin ayarlanması gerekmektedir. Kaliteyi ölçüsel, görsel ve mekanik açıdan etkileyebilecek birçok problemin prosesle çözülebilmesi muhtemeldir. Sıcaklık, basınç, zaman ve hız parametreleri olarak 4 ana grupta toplayabileceğimiz enjeksiyon parametreleri birçok alt parametreye ayrılmaktadır. Bu parametrelerin hepsinin aynı anda kontrol edebilmek ise elbette mümkün olmamaktadır.

Plastik enjeksiyon prosesi için günümüzde sonlu elemanlar analizi ve deneysel tasarım yöntemlerinden oldukça faydalanılmaya başlanmıştır. Sonlu elemanlar analizi ile hammaddenin enjeksiyon işlemi sırasındaki davranışları, sıcaklık, basınç, hız ve zaman gibi parametrelerin değişiminin parça üzerindeki etkileri ve olası kalite problemleri büyük oranda gözlemlenebilmektedir.

Deneyisel tasarım yöntemleri olan Taguchi, Anova ve Cevap Yüzey metotları (CYM) proses optimizasyonlarında sıkça başvurulan yöntemlerden olmuştur. Bu yöntemler, en etkili parametrelerin belirlenmesi ve optimum proses parametrelerinin kullanılması için tercih edilmiştir.

Araştırmacılar plastik enjeksiyonda prosesin doğru kurulabilmesi ve parça kalitesine yönelik birçok çalışma yapmışlardır. Son yıllarda yapılan çalışmalarda, tecrübeden ziyade sonlu elemanlar analizi ve deneyisel tasarım yöntemleri gibi bilimsel çalışmalara yönelen çalışmalar yapılmaktadır. Kalite problemlerinden biri olan çarpılma konusunda ise seçilen parametreler üzerinden sanal ve pratik çalışmalar yaparak proses iyileştirmesine yönünde olmuştur.

Özçelik ve Erzurumlu (2006), deneyisel tasarım yöntemleri ve yapay sinir ağları metodunu kullanarak ince cidarlı polimer bir malzemenin çarpılmasının iyileştirilmesine çalışmışlardır. Kalıp sıcaklığı, eriyik sıcaklığı, ütüleme basıncı, ütüleme süresi, yolluk tipi, yolluk yeri ve soğutma süresi parametrelerinin çarpılma üzerindeki en etkili enjeksiyon parametreleri olduğu öngörüsü ile yaptıkları sonlu elemanlar ve varyans analizleri sonucunda test ettikleri parça için en etkili enjeksiyon parametrelerinin sırasıyla; ütüleme basıncı, kalıp sıcaklığı, eriyik sıcaklığı, ütüleme zamanı, soğutma zamanı, yolluk tipi ve yolluk yeri olduğunu tespit etmişlerdir. Bu tespitlerinin sonucunda, optimum proses şartlarını bulmak için yapay sinir ağları modeli oluşturulmuştur. Yapılan testler sonucunda çarpılma %51 oranında iyileştirilerek, optimizasyon yöntemlerinin karmaşık geometrili plastik parçaları iyileştirmek için etkili olduğu gösterilmiştir [1]. Öktem ve ark. (2007) Taguchi optimizasyon yöntemini kullanarak ince cidarlı bir plastik enjeksiyon parçası için en uygun proses şartlarının geliştirilmesi üzerine çalışmışlardır. L27 ve L9 ortogonal dizilerini kullanarak elde edilen test sonuçlarını Moldflow analizleri ile doğrulamışlar ve Taguchi yöntemi ile enjeksiyon parametreleri optimizasyonunun çarpılma üzerinde olumlu etki gösterdiğini ispatlamışlardır [2]. Tang ve ark. (2007) yaptıkları çalışma ile 1 mm kalınlığında düz plaka şeklindeki bir plastik parça üzerinde uyguladıkları deneyisel tasarım metotları ile çarpılma için en etkili proses koşullarını belirlemeyi hedeflemişlerdir. Kalıp tasarımı, kalıp imalatı gibi unsurlarının önemi

vurgulanarak seçtikleri parça için yaptıkları 9 deneme sonucunda, ergime sıcaklığının 240°C, dolum süresinin 0.5 saniye, ütüleme basıncının %90 ve ütüleme süresinin 0.6 saniye olduğunu göstermişlerdir. Çalışmaları sonucunda, seçtikleri parçanın çarpılması ve parametreler için en önemli parametrenin ergime sıcaklığı, en etkisiz parametrenin ise dolum süresi olduğunu ortaya çıkarmışlardır [3]. Özçelik ve Sonat (2009) yaptıkları çalışmada, PC/ABS malzemeden üretilmiş telefon kılıfının farklı kalınlık değerlerinin çarpılma üzerindeki etkilerini Taguchi yöntemi kullanarak incelemiştir. Çarpılma değerlerini tespit ederken bir sonlu elemanlar analizi olan Moldflow yazılımı da kullanılmıştır. Ergime sıcaklığı, kalıp sıcaklığı, ütüleme basıncı ve ütüleme süresi incelenen parametrelerdir. Sonuç olarak; PC/ABS malzemenin çarpılmasında en etkili faktörün ütüleme basıncı olduğunu tespit etmişlerdir [4]. Kovacs ve Siklo (2011) çalışmalarında yolluk tipi ve konumu, malzemenin cam elyaf içeriği, kalıp sıcaklığı ve tutma basıncının plastik parçanın çarpılması üzerindeki etkisini deneysel yöntemlerle araştırmışlardır. Elde ettikleri sonuçlara göre, çarpılma, kalıp sıcaklıklarına ve elyaf içeriğine kuvvetle bağlı fakat cam elyaflı polipropilen malzeme için tutma basıncından neredeyse bağımsızdır [5]. Kitayama ve Natsume (2014) hammaddesi ABS olan bir kapak parçası üzerinde yaptıkları çalışmada çarpılma ve kapama kuvvetinin aynı anda optimizasyonuna çalışmışlardır. Pratikte bu iki çıktıyı aynı proses ile iyileştirmenin zor olduğunu söyleyerek sonlu elemanlar analizi ve deneysel tasarım yöntemlerini birleştirerek sıralı tahmini optimizasyon adını verdikleri bir yöntem geliştirmişlerdir. Moldex3d ve cevap yüzey metotlarının sonuçları ile uygulayacakları deney sayısını azaltarak elde ettikleri bulguları parametrik ve tekrar uygulanabilir hale getirmişlerdir. Yüksek enjeksiyon ve ütüleme basıncı ile çarpılma ve kapama tonajı konusunda kapak parçasının prosesini optimize etmişlerdir [6]. Oliaei ve ark. (2016) geri dönüşümlü plastik bir kaşığın çarpılma ve çekme optimizasyonunu Taguchi, Anova ve Yapay Sinir Ağları metotlarını kullanarak incelemiştir. Çalışmaları sırasında, PLA, PLA-TPU ve PLA-TPS olmak üzere 3 farklı hammadde kullanmışlardır. Soğutma sıvısının sıcaklığı, ütüleme basıncı, ütüleme süresi, kalıp sıcaklığı ve ergime sıcaklığının çarpılma ve çekme üzerindeki etkilerini göstermeye odaklandıkları çalışmalarında deneysel tasarım metotları kullanarak her bir faktörün ayrı ayrı ve grup halinde

etkisini göstermişlerdir. Elde ettikleri sonuçlara göre; kullandıkları malzemeler, geometri ve malzemeler için, ergime sıcaklığı, ütüleme süresi ve soğutma suyu sıcaklığı, çarpılma ve çekme üzerindeki en etkili faktörlerdir. PLA, PLA-TPU ve PLA-TPS çarpılması miktarını sırasıyla 1.359, 0.4647 ve 0.5984 mm olarak optimize etmişlerdir [7]. Masato ve ark. (2017) ince cidarlı ve cam elyaf katkılı polimerin boyutsal hassasiyeti için proses koşulları üzerinde çalışmalar yapmıştır. Deneysel verilere uyguladıkları varyans analizi ile eriyik sıcaklığının %9, ütüleme basıncının %8 oranında çekmeyi etkilediğini görmüşler ve ergime sıcaklığı ve ütüleme basıncının ince cidarlı malzemenin çekmesini en çok etkileyen parametre olduğunu söylemişlerdir. Bu parametreler yükseldikçe kalıp ile parça arasındaki boyutsal farklar azalmıştır [8]. Othman ve ark. (2017) elyafli polipropilenin kalitesel özelliklerini iyileştirmek adına enjeksiyon parametrelerini optimize etmek üzerine çalışmışlardır. Çekme ve çarpılma değerlerini kontrol edebilmek adına, ütüleme basıncı, dolum zamanı, vida hızı ve vida sıcaklığının optimizasyonu üzerinde Taguchi ortogonal dizilerini kullanarak testler yapmışlardır. Elyaf içeriği ağırlıkça %1'den %3'e arttırıldığında çarpılma değeri 0.025 mm'den 0.009 mm'ye düşürülmüştür. En uygun parametreleri, 2 saniye dolum süresi, %40 ütüleme basıncı, %35 vida hızı ve 175oC vida sıcaklığı olarak açıklamışlardır [9]. Çavdar (2017) bulaşık makinesinde bulunan çerçeve şeklindeki parçada rastlanan çarpılma ve mekanik deformasyon problemini çözebilmek için Moldflow analizleri kullanmış ve parçada birleşme izi olduğunu tespit etmiştir. Problemi gidermek için yapılan çalışmalarda; kalıptaki soğutma kanallarının ve sıcak yolluklarının yeri değiştirilmiş ve bu revizyonlar Moldflow ile doğrulanmıştır. Yapılan revizyonlar sonucunda %75 oranında iyileşme sağlanmıştır [10].

Çarpılma üzerine yapılan çalışmalar olduğu gibi diğer kalite problemleri veya parça özelliklerini iyileştirmek gibi amaçlarla da sonlu elemanlar analizi ve deneysel tasarım yöntemlerinin uygulandığı çalışmalar yapılmıştır.

Song ve ark. (2007) çalışmalarında, Taguchi ve sayısal analizler kullanarak seçtikleri belirli enjeksiyon parametrelerinin dolum üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Çalışmalarının sonucunda ultra-ince cidarlı plastik parçalar için; parça et kalınlığının dolum kabiliyeti için en etkili faktör olduğunu, enjeksiyon hızı

ve parça ebatlarının da doluma büyük etkisi olduğunu, ergime sıcaklığı ve enjeksiyon basıncının ise ikincil etken faktörler olduklarını tespit etmişlerdir [11]. Kamber (2008) yaptığı çalışmada; basınç, sıcaklık ve enjeksiyon zamanı parametrelerinin parça kalitesine etkisi Taguchi Yöntemi ile kullanılarak kontrol etmiştir. Üretim hatalarını en aza indirmek için boyutlar, distorsiyon ve dairesellik hataları belirlenmiştir. Taguchi optimizasyonuna göre ayarlanan enjeksiyon proses parametrelerine göre üretilen plastik parçada minimum çökme oranı  $Y=0,11$  mm olarak sağlanmıştır. Yapılan optimizasyonlardan elde edilen proses parametreleri ile çökme  $0,03$  mm olarak elde edilmiştir. Taguchi optimizasyonundan elde edilen değerler kullanılarak ayarlanan proses şartlarına uygun üretilen parçada dairesellik  $D=0,01$  mm yine minimum seviyededir [12]. Ünal ve Yetgin (2011) proses şartlarının polipropilen köpük malzemenin mekanik özelliklerine ve hücre morfolojisine etkisini incelemiştir. Enjeksiyon hızı, ergime sıcaklığı ve enjeksiyon basıncı parametrelerinin ortalama köpük yoğunluğu, hücre boyutu, hücre yoğunluğu ve darbe dayanımı üzerindeki etkisi üzerinde çalışılmıştır. Köpük yoğunluğu, ergime sıcaklığındaki artış ile azaldığı, ergime sıcaklığı arttıkça ise darbe dayanımının önemli ölçüde azaldığı bulunmuştur [13]. Özçelik ve ark. (2012) polipropilen malzemede kalıp üzerinde birleşme çizgileri oluşturularak eriyik sıcaklığı ve ütüleme basıncı parametrelerinin mekanik özellikleri üzerindeki etkilerini incelemiştir. Sonlu elemanlar analizi ile desteklenen çalışmada, birleşme çizgilerine sahip malzemelerin gerilme ve darbe dayanımı beklenildiği gibi daha düşük çıkmıştır. Birleşme çizgisi olmayan numune için darbe dayanımı, ütüleme basıncı  $14$ 'ten  $20$  MPa'ya yükseldikçe artma eğiliminde olduğu fakat bu durumun birleşme çizgisi olan numune için geçerli olmadığı görülmüştür. Ergime sıcaklığı ve ütüleme basıncı arttığında ise birleşme hattı olan numune ve birleşme hattı olmayan numuneler arasında çekme mukavemetinin önemli değişiklik göstermediği tespit edilmiştir [14]. Wang ve ark. (2014) yaptıkları çalışmada, fren hidroliği valf gövdesinin sıkıştırma kuvveti özelliğini iyileştirmek için enjeksiyon prosesini iyileştirmeyi hedeflemişlerdir. Eriyik sıcaklığı, yolluk sayısı, yolluk kesiti, kalıplama sıcaklığı, soğutma süresi gibi enjeksiyon parametrelerinin optimum değerlerini tespit edebilmek amacıyla deneysel tasarım yöntemleri olan Taguchi, Anova ve Sinyal-Gürültü oranı

kullanmış, Moldflow analizleri yapmışlardır. 18 adet tasarım deneyi sonrası elde ettikleri proses verileri sıkıştırma kuvvetini %12 oranında iyileştirmişlerdir [15]. Zhang ve ark. (2015) plastik enjeksiyon yöntemi ile üretilen parçaların kalite süreçlerini kontrol edebilmek bir model geliştirebilmek üzerine bir çalışma yapmışlardır. Enjeksiyon parametrelerini parça kalitesi ile ilişkilendirerek çarpılma özelinde soğutucu akışkan debi hızı ve soğutma sıcaklığı verilerini istatistiksel olarak derleyerek bir algoritma geliştirmişlerdir. Çalıştıkları parça özelinde bu parametreleri ve kalite ölçüm sonuçlarını istatistiksel olarak incelemiş ve oluşturdukları formülleri eğrilere aktarmışlardır. Yaptıkları çalışma geliştirilebilir ve genişletilebilirdir [16]. Lopez ve ark. (2016) bir vaka analizi yaparak enjeksiyon parametrelerinin parça ağırlığı üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Hammaddesi ABS/PC olan ve IMD teknolojisi ile üretilen ve menteşe benzeri bir yapıyla birbirine bağlanan iki farklı geometriden oluşan bir parça için uyguladıkları deneysel tasarım yöntemleri ile bu tip bir parçanın ağırlığı üzerinde en etkili olabilecek parametreleri Taguchi yöntemi ile bulmaya çalışmışlardır. Ütuleme zamanı, ütuleme basıncı ve enjeksiyon sıcaklığı parametreleri ile yaptıkları denemeler sonunda aradaki menteşe benzeri yapının bu parçanın bir yarısı için basit bir parça gibi, diğer yarısı içinse karmaşık bir parça gibi davranmaya ittiğini tespit etmişlerdir. Bunun nedenini ise, ütuleme basıncının artması ile ilk dolan taraftaki parça ağırlığının artma eğilimine girmesi fakat aradaki yapı nedeniyle diğer yarının normalden farklı davranması olarak açıklamışlardır [17].

Yapılan çalışmalarda, plastik enjeksiyon yönteminde parçanın kalitesini ve çeşitli özelliklerini iyileştirmek için seçilen parametreler üzerinden optimizasyon çalışmaları yapıldığı görülmektedir. Çarpılma problemi genellikle eriyik sıcaklığı, kalıp sıcaklığı, enjeksiyon süresi, vida hızı, ütuleme basıncı, ütuleme süresi vb. parametreler üzerinden çözülmeye çalışılmıştır.

Bu tez çalışmasında ise geleneksel enjeksiyon kalıplama yönteminde kullanılan malzemelerden farklı olarak, kimyasal köpürtme ajanı ilaveli ve cam elyaf katkılı polipropilen kullanılmıştır. Bu malzemenin farklı enjeksiyon şartlarındaki kalıplanması ile çarpılmanın optimize edilmesi ve çevrim süresinin azaltılması amaçlanmıştır.

## **1.2 Tezin Amacı**

Tezin amacı; köpürtücü ajan ve cam elyaf katkılı özel bir hammadde ile üretilen klima parçasında yaşanan ve plastik enjeksiyonda çok sık rastlanan problemlerden biri olan çarpılmanın iyileştirilmesidir. Söz konusu proses çalışmalarında, enjeksiyondaki temel proseslerden olan ve çarpılma üzerindeki etkisi bilinen sıcaklık parametreleri üzerinde durulması planlanmıştır.

Bu çalışmanın bir diğer hedefi, çarpılma problemini iyileştiren bir proses kurmanın yanı sıra aynı zamanda çevrim süresinin azaltılmasıdır. Seri üretimde kullanılan bir parça için mevcut kalite değerlerini bozmadan çevrim süresinin azaltılması, enjeksiyon makinesi kullanım süresinin kısılması ve buna paralel olarak üretim bandının hızlanmasını sağlayacağından büyük bir avantaj getireceği öngörülmüştür.

## **1.3 Hipotez**

Kimyasal köpük ajanı ile plastik enjeksiyon kalıplama son yıllarda kullanımı artan bir yöntem olmuştur. Bu yöntemin avantajları, daha küçük kapama kuvvetleri, daha düşük ütüleme basınçlarının kullanılması ve daha düşük ağırlıklarda parça imalatına imkân vermesidir.

Tüm bu iyileştirmeler sağlanırken bu çalışmada olduğu gibi cam elyaf gibi farklı katkılarla birleştirildiğinde enjeksiyon prosesinin kurulması ve kalite hatalarının önlenmesi için sadece tecrübe ve klasik yöntemler yeterli olmamaktadır. Özellikle köpük ajanı takviyeli bu tip malzemelerin özel olarak geliştirilmesi nedeniyle hammadde özelliklerinin yeterince bilinmemesi de çeşitli problemlere neden olmaktadır.

Bu amaçla, bu tez çalışmasında hammadde ile analizler yapılarak teknik özellikleri çıkarıldıktan sonra çeşitli sayısal test ve doğrulama yöntemleri kullanılarak, plastik enjeksiyon yöntemi ile imal edilen köpük ajanı ve cam elyaf takviyeli polipropilen esaslı bir klima şasi parçasının, çarpılma miktarının ve çevrim zamanının azaltılması sağlanmıştır.

## Plastik Enjeksiyon Kalıplama Yöntemi

---

### 2.1 Plastik Enjeksiyonunda Kullanılan Polimerler

Plastik enjeksiyon kalıplamada yaygın olarak termoplastik malzemeler kullanılmaktadır. Bu sebeple bu bölümde ağırlıklı olarak termoplastiklere yer verilmiştir.

Plastik malzemelerin, tasarım kolaylığı, esnek kullanım alanı, hafifliği, dayanımı, korozyon direnci, gibi çok yönlü mekanik ve kimyasal özelliklerini karşılamasından ve uygun maliyetinden dolayı geçmişte ve günümüzde pek çok gündelik alanda ve mühendislik çalışmalarında kullanılmış, gelecekte de ileri teknoloji alanlarında sıkça kullanılacağı bilinmektedir. Mühendislik parçalarında plastik malzemeye geçiş ürün maliyetini düşürmekte ve rekabet avantajı sağlanmaktadır.

Plastik malzemelerin parça üretimini arttıran en önemli özelliği farklı bir işlem yapılmadan kompleks geometrili parçaları kalıplama yöntemi ile tek seferde çıkarılabilir olmasıdır.

Bazı plastikler yüzey işlemleri, kaplama, boyama, kaynaklama gibi uygulamalar için uygun olması sebebi ile de tercih edilmektedir [10].

Plastikler, metallere ve diğer malzemelere göre bazı avantajlı özellikler göstermektedir;

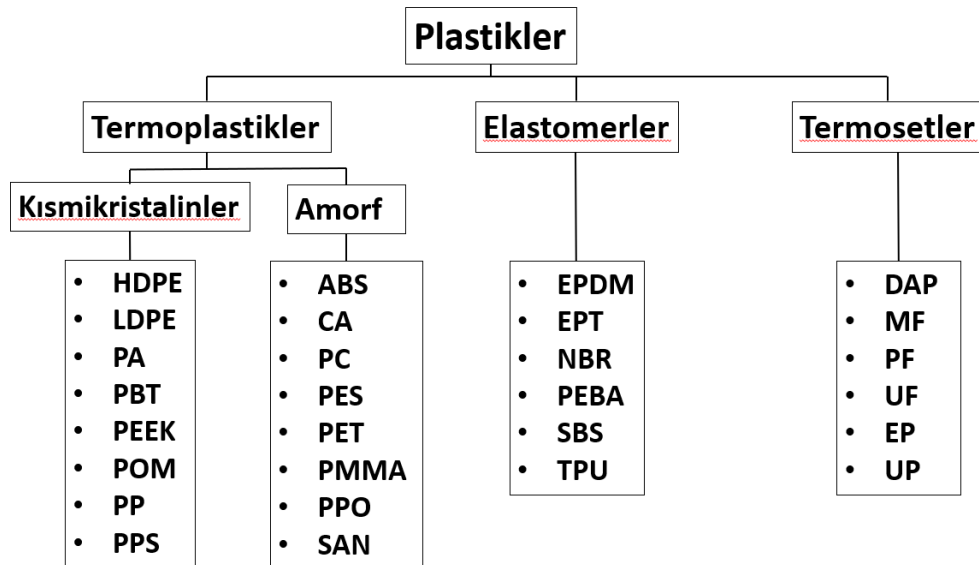
- Yoğunluğunun az olması nedeni ile hafiftir.
- Hammadde içerisine eklenecek katkı malzemeleri ile özellikleri değiştirilebilmektedir.
- Yalıtkan olması sebebi ile özellikle elektrik alanında izolasyon malzemesi olarak kullanılmaktadır.
- Korozyon direnci yüksek olduğundan korozyon tehdidi olan ortamlarda kullanılmaktadır.
- Ergime sıcaklığı nispeten düşüktür.



- Isı yalıtımı yüksektir, çelik ile kıyaslandığında 3 katıdır.
- Görsel parça üretimi açısından iyidir. Katkı maddeleri ile renklendirilebilmektedir.
- Bazı türleri şeffaf olabilme özelliğine sahiptir.
- Kolay şekillendirilebilir, işlenebilirliği yüksektir.
- Enjeksiyon, ekstrüzyon, talaşlı işleme, şişirme, kaynak gibi çok geniş üretim yöntemleri ile şekillendirilebilmektedir.
- Geri dönüştürülebilir plastikler vardır.
- Nispeten maliyeti düşüktür.
- Kendi içinde plastikler çok çeşitli mekanik ve kimyasal özelliklere sahiptirler [18].

### ***Polimerlerin Sınıflandırılması***

Polimerler, zincir yapılarına göre sınıflandırılmaktadırlar. Termoplastikler lineer zincir yapısına ve ergime, geri dönüştürme gibi kimyasal özelliklere sahiptir. Termosetler kuvvetli çapraz bağlı zincir yapısına ve elastomerler zayıf çapraz bağlı zincir yapısına sahiptirler. Termosetlerin ve elastomerlerin şekillendirildikten sonra ergime özelliği yoktur, geri dönüştürülememektedirler [18]. Polimerlerin sınıflandırılması Şekil 2.1’de gösterilmiştir.



**Şekil 2.1** Plastiklerin sınıflandırılması [10]

- **Termoplastikler**

Termoplastik malzemeler camsı geçiş sıcaklığına sahiptir, ısıtıldıklarında yumuşama eylemi gösterirken, soğutulduğunda sertleşme eylemi gösterirler, tekrar tekrar ısıtılıp soğutulabilme özellikleri sayesinde tekrar üretilebilir, geri dönüştürülebilmektedirler [19].

Termoplastikler lineer dizilme yapılarına göre iki tip molekül yapısından oluşmaktadır. Amorf yapı ve yarı kristal yapıdadırlar [19].

*Amorf yapı;* düzenli, kendini tekrar eden zincir yapılarının bulunmadığı rastgele dizilmiş moleküllerdir. Malzeme özelliği olarak soğutulduklarında sert ve kırılgan yapıda, ısıtıldıklarında ise camsı geçiş sıcaklığında yumuşamaktadır [19].

*Yarı kristal yapı;* amorf ve kristal yapılar bir arada bulunmaktadır, camsı geçiş sıcaklığının üzerinde amorf yapıları daha belirginken, camsı sıcaklığının altında yani soğutuldukça daha düzenli olan kristal yapıya geçerler, düzenli yapıya geçen plastik çekme özelliği göstermektedir. Amorf malzemeye göre daha tok ve esnek yapıdadır [19].

Plastik enjeksiyon kalıplamada en sık kullanılan termoplastikler;

*Polipropilen (PP);* Ticari olarak en yaygın kullanılan polimer olan polipropilen otomotivden beyaz eşyaya, paketlemeden tekstile birçok alanda kullanılmaktadır. Düşük yoğunluğu ve yüksek dayanımı ile endüstrinin en önemli termoplastiği konumundadır [19].

Genel özellikleri;

- Düşük yoğunluk yüksek mukavemeti sayesinde hafif ve sağlamdır.
- +0°C, +100°C arasında yapısında bozulma olmaz.
- Tokluğu yüksektir.
- Yorulma direnci yüksektir.
- Yalıtım özelliğinin çok iyidir.
- Darbe dayanımının yüksektir.
- Korozyon direncinin yüksektir.
- Anti bakteriyel yapıdadır.
- Yüzeyleri düzgün yapıdadır.

- Maliyeti düşüktür.
- Kimyasal maddelere karşı dayanıklıdır.
- Takviye elemanları ile özellikleri güçlendirilebilmektedir.
- Enjeksiyon ve ekstrüzyon yöntemleri ile şekillendirilebilmektedir.

Dezavantaj olarak UV ışını dayanımı azlığı gösterilmektedir [19].

*Polietilen (PE)*; Polietilenler ilk bulunan polimerlerden olup alçak yoğunluklu orta yoğunluklu ve yüksek yoğunluklu çeşitleri bulunmaktadır. Polietilen gündelik hayatımızda birçok alanda kullanılmaktadır. Oyuncaklar, bidonlar ve kapakları, süs eşyaları gibi birçok sektörde karşımıza çıkmaktadır. Mukavemet, yalıtkanlık kolay şekil verilebilirlik gibi birçok avantajı ile oldukça yaygın şekilde kullanılmaktadır [19].

*Akrilonitril Bütadien Stiren (ABS)*; Özellikle alev geciktirici ve parlak yüzey görünümü özellikleri ile ABS malzemeler öne çıkmaktadır. Yüksek sıcaklıklara dayanıklıdır. Boyanabilirlik özelliği yüksek, anti bakteriyel ve kolay işlenebilir özelliklere sahiptir. Cam elyaf takviyeli olarak kullanılabilir. Enjeksiyon, ekstrüzyon yöntemleri ile şekillendirilebilmektedir [20].

*Polikarbonat (PC)*; Özellikle gıda tüzüğüne uygunluk nedeni ile birçok gıda sektörü alanında kullanılmaktadır. Yüksek darbe dayanımı, ısıya karşı yüksek direnç, yüzey görünümünün iyi olması gibi birçok nedenden dolayı tercih edilmektedirler. Alev geciktirme amaçlı üretilebilmektedir. Cam elyaf katkısı ile mekanik özellikleri güçlendirilebilmektedir. Enjeksiyon, ekstrüzyon yöntemleri ile şekillendirilebilir [20].

*Polikarbonat - Akrilonitril Bütadien Stiren (PC/ABS)*; PC-ABS malzemesi ABS'den daha yüksek mukavemet, yüksek mekanik ve termal özelliğe sahiptir. Parlak bir görünüme sağlayabilen bu malzeme, cam elyaf takviyeli, katkı malzemeleri ile renklendirilebilir ve yanmazlık özelliği kazandırılabilir [20].

- **Termosetler**

Termosetler enjeksiyon kalıplama yöntemine uygun polimerler olmasalar da bazı ticari marka enjeksiyon makinelerinin termosetler için geliştirilmiş, kovan ve vida boyu daha kısa olan özel plastik enjeksiyon makineleri vardır. Termosetler,

ısıtıldıklarında k rle erek katıla an plastiklerdir. Kimyasal yapıları bozulduğu için tekrar ergitilemezler ve eski hallerine d nd r lemezler. Çapraz bağlı zincirlerle bağlandıklarından dayanımları yüksektir. Bu nedenle dayanımın gerektiren alanlarda kullanılmaktadır. Kompozit uygulamalarında da sıklıkla kullanılmaktadırlar [20].

Termoset plastiklerin enjeksiyon metodu ile üretimi sıcaklık kontrolü, mümkün olabilmektedir. Termoset granülleri makina haznesinde çapraz bağlamanın dolunun hemen öncesinde olacak şekilde yüksek sıcaklıklara ısıtılmaktadır [20].

- **Elastomerler**

Elastomerler de termosetler gibi enjeksiyon kalıplamaya uygun değillerdir fakat termoplastik elastomer (TPE) olarak geliştirilmiş olan, bünyesinde hem termoplastik hem de elastomer bulunan tokluğu yüksek ve enjeksiyon kalıplamaya uygun polimer türüdür.

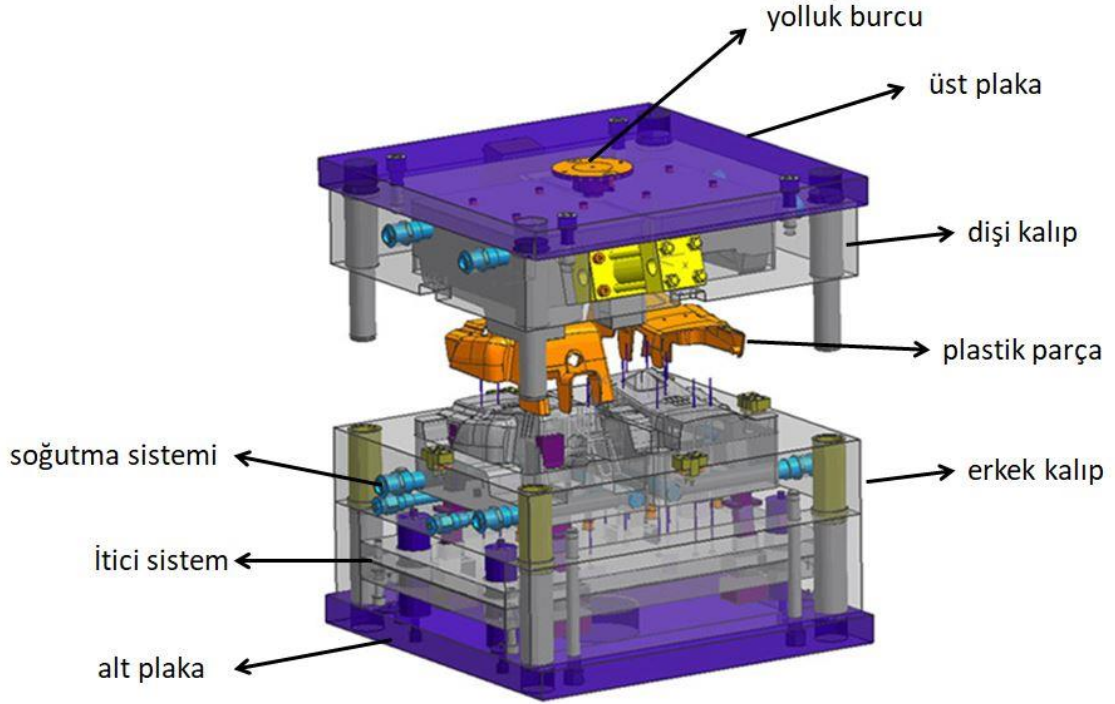
Elastomerler zayıf çapraz bağlı plastikler olarak bilinmektedir. En yaygın olarak bilineni doğal kauçuğa kükürt eklenerek elde edilmektedirler. Kauçuğun kükürt ile k rle mesi sonucu elastikliği yüksek elastomerler kendi boyutunun on katına kadar uzayabilme özelliğine sahip olmaktadır [20].

## **2.2 Plastik Enjeksiyon Kalıpları**

Plastik parçanın üretimini gerçekleştirmek için kullanılan enjeksiyon kalıpları hareketli ve sabit kalıp olmak üzere iki genel bölümden oluşmaktadır. Kalıbın hareketli kalıbı sabit kalıbı ile birleştiği zaman sabit kalıptan eriyik plastik enjekte edilerek kalıp boşluğuna homojen bir şekilde doldurulmaktadır. Dolan plastik malzeme homojen bir şekilde soğutulmalıdır, aksi takdirde plastik parçada şekilsel kusurlar meydana gelmektedir. Soğuyan malzeme hareketli kalıp ayrıldıktan sonra homojen bir şekilde itilerek kalıptan çıkarılması gerekmektedir [10].

Kalıp boşluğuna plastik akışı olabilmesi için sıcak yolluk sistemi dengeli bir şekilde plastiğin akışını sağlamaktadır. Parçada ters açıları yani kalıplanabilirliğe uygun olmayan geometrileri çıkarmak için maça sistemleri kullanılmaktadır. Ma alar kendi içinde mekanik, eğik, pnömatik, hidrolik gibi gruplara ayrılmaktadırlar [10].

Örnek bir plastik enjeksiyon kalıp tasarımının elemanları Şekil 2.2’de gösterilmiştir.



**Şekil 2.2** Plastik enjeksiyon kalıp elemanları [22]

*Kalıp boşluğu;* hareketli kalıp ve sabit kalıp birleştikten sonra arasında kalan ve ergiyik malzemenin dolduğu boşluk olarak tanımlanmaktadır. Bu boşluklar birden fazla ise çok gözlü kalıp olarak isimlendirilmektedir. İstenen parça ölçülerinin doğru çıkması için çekme değeri hesaplanarak çelikler işlenmesi gerekmektedir [10].

*Erkek (Hareketli) kalıp;* kalıpta görsel olmayan yüzeyi ve montaj bağlantılarını çıkaran taraftır. Aynı zamanda parçayı kalıptan çıkarmak için itici sistemi de genellikle erkek kalıba yerleştirilmektedir. Ters geometrileri çıkarmak için kullanılan maça sistemleri de burada konumlandırılmaktadır [10].

*Dişi (Sabit) kalıp; parçanın görsel yüzeyini oluşturan ve genelde yolluk sistemi de barındıran taraftır [10].*

*Soğutma sistemi; enjeksiyon işlemi sırasında kalıba akan plastik ile beraber çelikler ısınarak parçanın çarpılmasına, çevrim süresinin artmasına, kalıbın çalışma performansının düşmesine sebep olmaktadır. Parçanın çevrim süresini azaltmak ve kalıptan kaliteli bir parça çıkarmak için alt çelik ve üst çeliğe gerekirse maça sistemlerine soğutma kanalları açılarak kalıbın homojen soğuması sağlanması gerekmektedir [10].*

*İtici sistemi; soğutma sonrası eriyik malzeme itilebilir sıcaklığa geldiğinde hareketli kalıp açılarak mekanik veya hidrolik tahrikli itme sistemi parçayı çıkarmaktadır [10].*

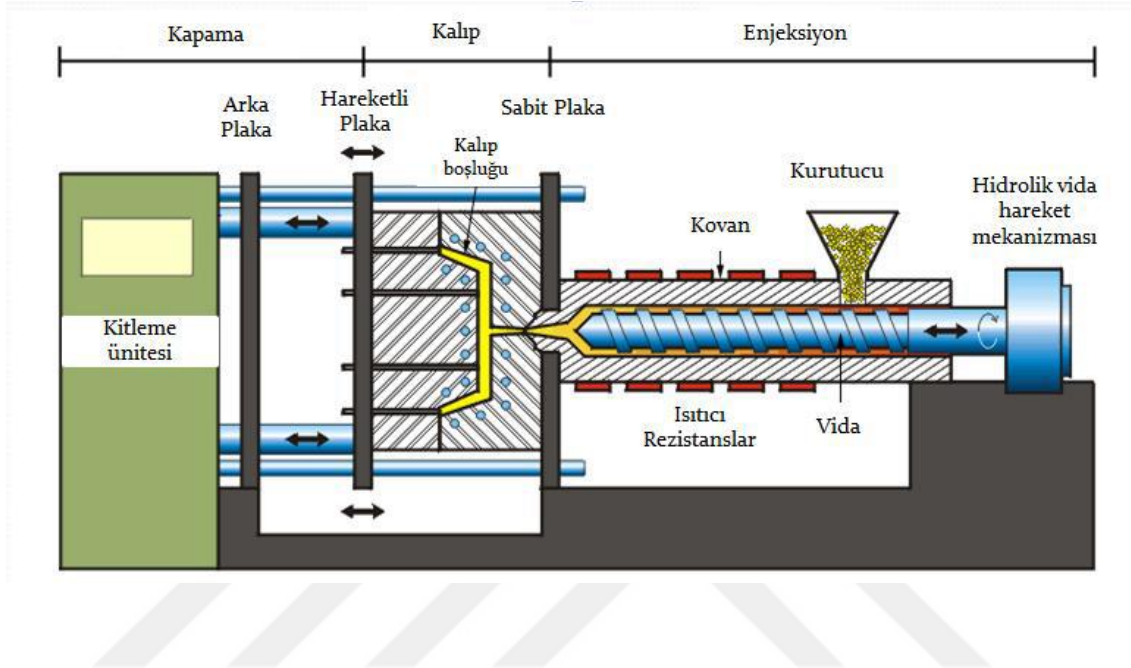
*Yolluk sistemi; eriyik hammaddenin enjeksiyon makinesinin memesinden kalıbın boşluğuna dağılımını sağlayan sisteme yolluk sistemi denmektedir. Yolluk sistemleri soğuk yolluk ve sıcak yolluk olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Soğuk yolluk kalıp boşluğuna girişi sağlayan hammadde giriş kısmında yer alan, parça ile beraber kalıptan çıkan ve hurdaya ayrılan kısımdır. Genellikle giriş yolluğunun kesiti ile adlandırılırlar. Tünel, muz, kenar, disk ve fan yolluk gibi çeşitleri bulunmaktadır. Sıcak yolluk sistemi, enjeksiyon makinesinin memesinden soğuk yolluğa veya direk kalıp boşluğuna kadar basınç kaybını en aza indirerek hammaddenin sıcaklığının düşmesini engellemek için kullanılmaktadır. Sıcak yolluk; ısıtıcı, manifold, meme olmak üzere üç bölümden oluşmaktadır. Tip olarak direk akış sağlayan açık ve kontrollü akış sağlayan valf uçlu olmak üzere iki tipi bulunmaktadır [10].*

## **2.3 Plastik Enjeksiyon Yöntemi ile İmalat**

### **2.3.1 Plastik Enjeksiyon Makinesi**

Yüksek basınç ve sıcaklıklar altında hammaddeyi eriyik hale getirerek kalıp içine göndermek için kullanılan makinelere plastik enjeksiyon makinesi adı verilmektedir. Enjeksiyon tipleri çeşitlendikçe makineler de istenilen özel proses ihtiyaçlarına göre seçmek gerekmektedir. Enjeksiyon makinelerinin yatay, dikey

enjeksiyon, rotasyonel, çok malzemeli gibi tipleri mevcut olmakla beraber fiziksel, kimyasal köpürme veya coreback gibi teknolojiler için geliştirilmiş ek modülleri de bulunmaktadır. Şekil 2.3'te geleneksel bir plastik enjeksiyon makinesinin gösterimi yer almaktadır [18].



**Şekil 2.3:** Termoplastik enjeksiyon makinesi şematik gösterimi.

Enjeksiyon ünitesinin istenilen plastik parçanın hammadde miktarına; kovan, vida ve hammaddeye uygun şekilde seçilmesi gerekmektedir.

Kapama ünitesi, kalıptan çıkacak olan plastik parçanın projeksiyon alanı ve tahmini iç basıncı hesaplanarak belirlenmektedir. Hidrolik, mekanik, hidromekanik tahrikli olabilmektedir [18].

Enjeksiyon kontrol ünitesi, proses ayarı, kilitleme, kalıp ayarları gibi kontrol sağlanması gereken parametreler için kullanılmaktadır [18].

### 2.3.2 Plastik Enjeksiyon Yöntemi ile Diğer Uygulamalar

*Gaz destekli enjeksiyon kalıplama;* enjeksiyon sırasında basınçlı azot gazı kalıbın içine gönderilmesi ile gerçekleştirilmektedir. Çekmeyi, et kalınlığı yüksek bölgelerde oluşacak çökmeyi engellemesi, hammadde kullanımını azaltması en önemli avantajları olarak gösterilmektedir [23].

Su destekli enjeksiyon kalıplama; proses olarak gaz enjeksiyon yöntemine benzemektedir. Gaz ve su beraber kullanılarak gazın açtığı boşluğa su girişi sağlanarak kalın parçaların kısa sürede soğutulması sağlanmaktadır [24].

*Mikro hücreli enjeksiyon kalıplama;*

*Fiziksel Köpürtme;* mikrohücreli enjeksiyon yapılarak, azot veya karbondioksit gazının kritik fazda kalıp boşluğuna enjekte edilerek kalıbın içinde çekirdeklenme oluşturulması ile gerçekleştirilmektedir. Enjeksiyon makinesine ek bir işlem gerektirmektedir. Görsel olmayan parçalarda hafifletme amaçlı kullanılmaktadır [25].

*Kimyasal Köpürtme;* termoplastik hammaddenin içine küçük oranlarda köpürtme ajanı katılarak uygulanan bir sistemdir. Enjeksiyon makinesine özel bir modül olan coreback modülü eklenerek uygulanabilmektedir. Köpürtme ajanı kalıp boşluğunda çekirdeklenme gerçekleştirerek termoplastik malzemeyi köpürtmektedir. Kimyasal köpürtme sayesinde %20 ye kadar plastik hafifletilebilir, parça yüzey görünümü etkilenmez, hammadde maliyeti düşürülmektedir. Daha düşük kapama kuvvetlerine imkân tanımaktadır.

*Ko- Enjeksiyon;* Birden çok bileşenli parça üretmek amacı ile kullanılır. Birden çok renk veya hammaddenin tek bir kalıpta şekillendirilmesi yöntemidir. Parça hafifletmek, ses ve ısı yalıtımı sağlamak, sızdırmazlık sağlamak, maliyet düşürmek, estetiği arttırmak gibi birçok avantajı nedeni ile sıklıkla kullanılmaktadır. Enjeksiyon makinesinde üretim yapabilmek için döner tablaya veya coreback sistem modülüne ihtiyaç vardır [26].

*Overmolding;* iki veya daha fazla malzeme kombinasyonu ile tek parça üretilen bir prosestir. Alt tabaka metal, plastik, kauçuk veya kompozit gibi değişkenler



olabilmekte ve üzerine enjekte edilen plastik malzeme ile dayanım, maliyet, esneklik gibi avantajlar sağlayan yeni tek bir parça oluşturulmaktadır.



### 3.1 Enjeksiyon Çevrimi ve Aşamaları

Plastik enjeksiyon kalıplama, erimiş plastik hammaddenin kalıp boşluğuna yüksek basınçlarda doldurulması ve kalıp boşluğunun şeklinde katılaşarak, plastik parçayı oluşturmaktır. İki plastik parçanın kalıptan çıkması arasında geçen süreye çevrim süresi adı verilmektedir.

Enjeksiyon çevriminin yedi adımı aşağıda belirtilmiştir.

*Plastikleştirme:* Plastik hammaddenin enjeksiyon makinesinde eritilerek hazır hale getirilmesi sürecidir. Vidanın dönmesi ile hunideki hammadde ocağa alınmaktadır. Hammadde ısıtıcılar ve vidadaki sürtünme ile eritilmektedir. Eriyen plastik vida boşluğuna ulaşmaktadır [27].

*Kalıbın Kapatılması:* Enjeksiyon makinesinin mengene ünitesi kalıbın erkek kalıbını hareket ettirmektedir. Dişi çelik ile erkek çelik birleştirildikten sonra yüksek kapama kuvveti uygulanmaktadır [20].

*Kalıbın Doldurulması:* Hidrolik pistonun vidaya uyguladığı basınç sonucu eriyik plastik sıcak yolluk yardımıyla kalıp boşluğuna doldurulmaktadır. Kalıp boşluğuna plastik malzeme dolarken sıcaklık artmasına karşı viskozite ve basınçta azalmalar gerçekleşmektedir. Eriyik plastik kalıp boşluğunu tamamen doldurduğunda dolum aşaması tamamlanmaktadır [20].

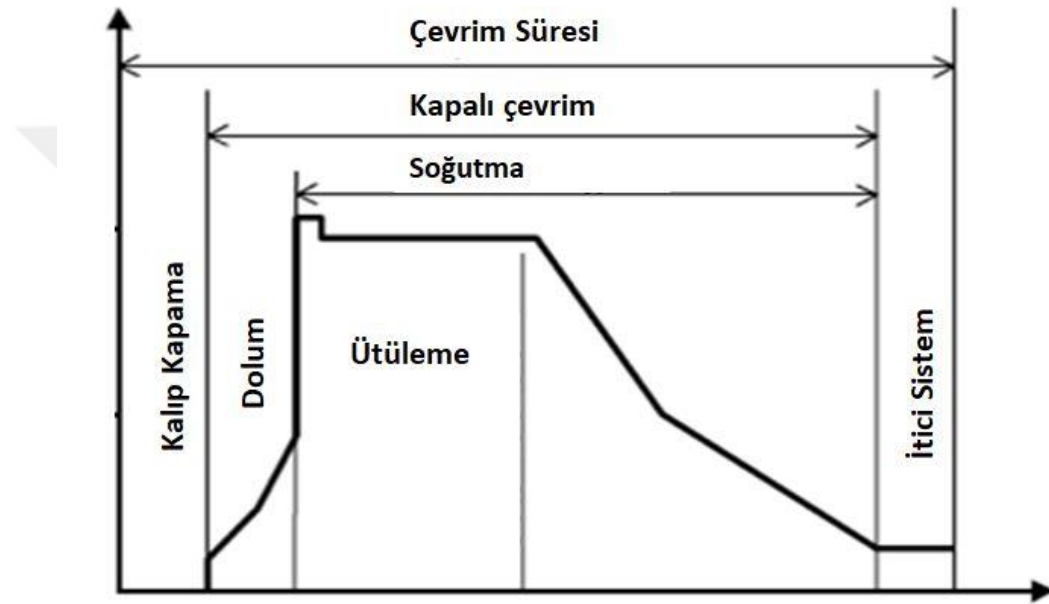
*Ütüleme:* Dolum aşamasının bitmesiyle kalıp boşluğunun tamamen dolmaktadır ardından ütüleme basıncı ile yüksek basınç verilerek kalıptaki ince et kalınlıkları, feder, tırnak gibi geometrilerin istenen şekle gelmesi sağlanmaktadır [20].

*Tutma:* Plastik hammaddedeki soğumadan dolayı plastik çekmektedir. Çeken plastiği tamamlamak için yüksek basınçta bir süre tutmak gerekmektedir. Bu duruma tutma, basınca tutma basıncı denmektedir. Tutma yolluk girişinin donması ile son bulmaktadır [19].

*Soğutma:* Yolluk donduktan sonra plastik parça kalıp içerisinde, soğutma kanallarından geçen su sayesinde soğumaktadır. Kalıptan çıkma sıcaklığına kadar bu soğutma devam etmektedir. Soğutma çevrim süresinin yaklaşık %70'lik kısmını oluşturmaktadır [19].

*Kalıptan Çıkarma:* Kalıptan çıkma sıcaklığına gelen plastik parça, kalıbın açılması ve ardından itici sistemler çalıştırılarak kalıptan çıkarılmaktadır.

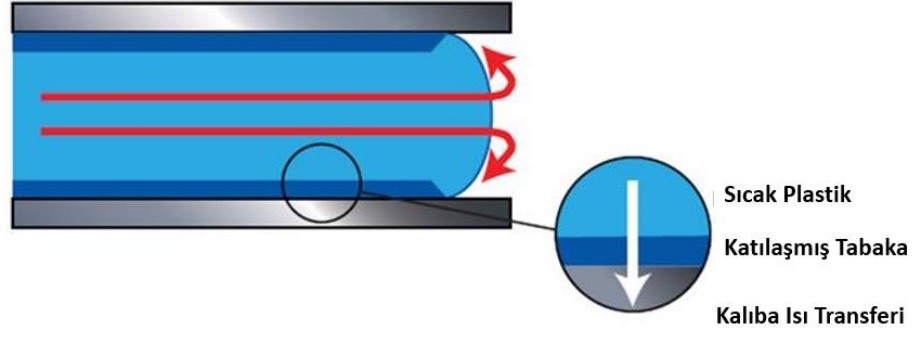
Şekil 3.1'de bir enjeksiyon çevrimin döngüsü gösterilmiştir.



**Şekil 3.1** Enjeksiyon çevrimi [27]

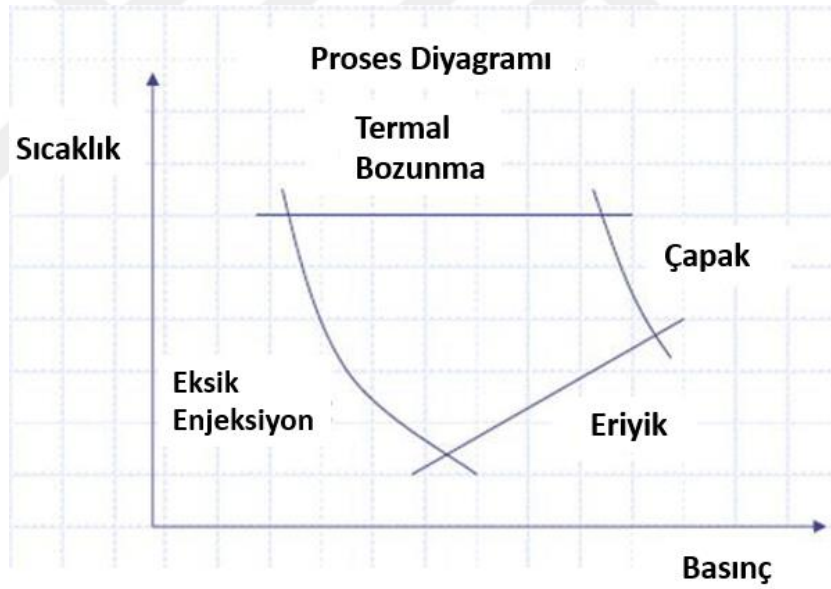
### 3.2 Enjeksiyon Parametreleri

Enjeksiyon prosesini etkileyen en önemli parametreler; sıcaklık, basınç, zaman ve hızdır. Kalıp boşluğuna dolan eriyik kalıbın soğuk yüzeyine temas ederek ince bir tabaka oluşturmaktadır. İç kısımlar eriyik halini sürdürürken kalıbın içinde basınç ile ilerlemeye devam eder. Bu olay Şekil 3.2 de gösterilmiştir.



**Şekil 3.2** Plastik akışı ve ısı transferi [10]

Sıcaklık ve basınç değişimlerinin plastik parça üzerindeki etkisi genel itibariyle Şekil 3.3'te enjeksiyon proses diyagramı olarak verilmiştir.



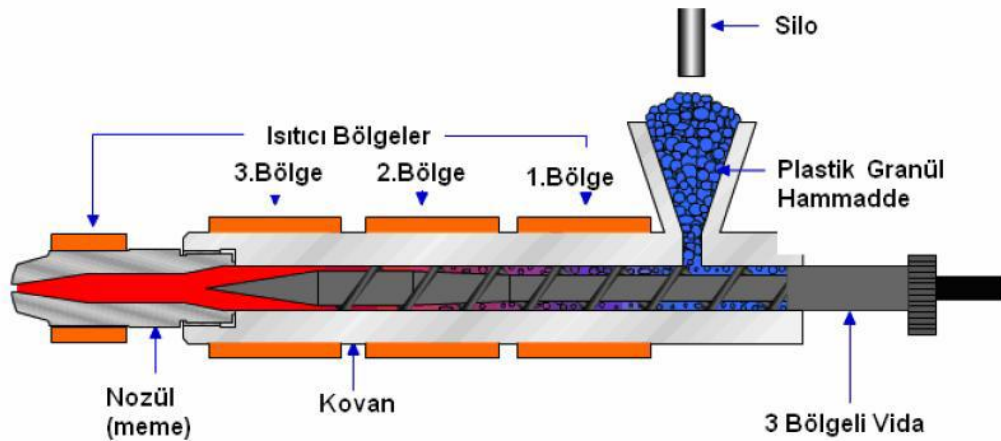
**Şekil 3.3** Enjeksiyon proses diyagramı [10]

### 3.2.1. Sıcaklık Parametreleri

Enjeksiyon prosesinde en önemli parametre sıcaklıktır. Plastik parça kalitesi ile doğrudan etkilidir. Sıcaklığı etkileyen parametreler ise kovan sıcaklığı, eriyik sıcaklığı, kalıp sıcaklığıdır [20].

*Eriyik Sıcaklığı*; eriyik sıcaklığının malzeme tipine uygun olarak seçilmesi gerekmektedir. Aksi takdirde plastik malzeme yanabilmekte veya ergime sıcaklığına ulaşamamaktadır. Meme ucundaki sıcaklığın kesinlikle bilinmesi gerekmektedir. Sıcaklığı öğrenmek için çeşitli ölçüm yöntemleri kullanılmaktadır [20].

Vida yardımı ile alınan plastik hammaddeyi homojen olarak eritebilmek için kovan sistemi etrafında ısıtıcı rezistanslar bulunmaktadır. Rezistansların sayısı genellikle dört ile altı arasında değişmektedir. Homojen olarak eriyen plastik hammadde kalıba iletilir. Hammaddenin beslenme hunisinden kalıba gireceği çıkış memesine kadar geçen yola akış yolu denmektedir. Enjeksiyon vida kovan sistemi Şekil 3.4 'te gösterilmektedir [20].



**Şekil 3.4** Vida kovan sistemi [20]

*Kalıp Sıcaklığı*; ergimiş plastiğin sıcak yolluktan geçerek kalıp boşluğuna dolması ile çelik yüzeyine temas eden plastik malzeme katılaşmaya başlamaktadır. Malzeme cinsine ve parça geometrisine göre kalıba soğutma kanalı tasarlanmaktadır. Soğutma kanalından geçirilen suyun ısısı yine hammaddenin

cinsine göre ayarlanması gerekmektedir. Soğutma kanalının yeterliliği, soğutma suyunun sıcaklığı, parça kalitesini direk etkilemektedir. Plastik parçada çarpılma, çökme gibi parametreleri etkilerken aynı zamanda çevrim süresini belirlemede etkili parametre kalıp içindeki soğutma süresidir. Kalıp sıcaklığının homojen olması çok önemlidir. Aksi takdirde plastik parçada bölgesel kalitesizlikler, çalışan mekanizmalarda genleşme farkından doğan sıkıntılar veya kalıp kalitesini olumsuz etkileyecek sarmalar meydana gelebilmektedir [20].

### **3.2.2. Basınç Parametreleri**

Basınç parametresi sıcaklıktan sonra gelen en önemli parametredir. Basınç, enjeksiyon sırasındaki basınçlar ve enjeksiyon makinesinin mengene basıncı olarak ayrılmaktadır. Mengene basıncı her zaman iç basınçtan büyük olmalıdır. İç basıncın mengene basıncından büyük olduğu durumda kalıp açılarak, plastik malzemenin çapak oluşturmaya veya plastik kaçmasına neden olabilmektedir.

Basıncı etkileyen bazı değişkenler; malzemenin viskozitesi, sıcaklık, plastik parçanın geometrisi (projeksiyon alanı), plastik parçanın et kalınlığı ve ağırlığı, yolluk tipi, sıcak yolluk nozul sayısı, kalıptaki gaz kanalı miktarı, mengene kapama kuvvetidir [20].

Enjeksiyon sırasında uygulanan basınçlar ile mengene basıncı birbirlerine kuvvet uygulayan basınçlardır. Enjeksiyon sırasında uygulanan basınçlar, enjeksiyon basıncı, tutma basıncı ve geri basınçtan oluşur [20].

Enjeksiyon basıncı, enjeksiyon makinesi vida boşluğundaki ergimiş plastiğin kalıp boşluğuna dolduran basıncına denmektedir. Enjeksiyon basıncı mümkün olduğunca yüksek seçilmelidir, bunun sebebi düşük basınçlarda ergimiş plastiğin soğuması artar ve akışkanlığı azalır, böylelikle kalıp boşluğu doldurulamaz. Plastik malzeme soğumadan, akışkanlığı yüksek basınçta plastiğin sevk edilmesi gerekmektedir. Ayrıca enjeksiyon basıncının yüksek olması parçanın hızlı dolmasını sağlayacağından çevrim süresini azaltacaktır [20].

Tutma basıncı, kalıp boşluğuna dolan eriyik soğudukça çekmeye başlar, ayrıca parçanın bütün ayrıntıları enjeksiyon basıncı sırasında oluşmamış olabilir. Tutma

basıncı ile çeken plastiğin tamamlanması ve oluşmayan bölgelerin dolması için bir süre eriyik itmesi devam eder bu duruma tutma basıncı denir. Tutma basıncı plastik parçanın boyutu, geometrisi, malzeme akışkanlığına göre değişmektedir.

Geri basınç, tutma basıncından sonra enjeksiyon vidasının geri çekilmesi ile oluşan basınçtır. Bir sonraki baskı için ergimiş plastik alınmasında ve gaz oluşumunun azalmasında görevlidir [20].

Mengene ünitesi kilitleme basıncı, bu basınç enjeksiyon makinesinin bünyesinde var olan bir basınçtır. Enjeksiyon makineleri çoğu zaman bu basınçlara göre seçilirler. Plastik parça projeksiyon alanı hesabı yapılmalıdır ve mengene kilitleme basıncı bu projeksiyon alanını karşılayacak şekilde ayarlanmalıdır. Aksi takdirde kalıp açarak parça çapak yapmaktadır. Hareketli kalıbın sabit kalıp ile birleşmesi sonrası basınç uygulanarak kalıp kilitlenmelidir [20].

İç basınç, eriyiğin kalıba girmesi ile kalıpta oluşan basınçtır, her zaman enjeksiyon basıncından düşüktür. İç basıncı kalıp sıcaklığının düşmesi arttırmakta ve parça kalitesini olumsuz etkilemektedir [20].

### **3.2.3. Zaman Parametreleri**

Plastik enjeksiyon kalıpcılığında üretim sayısını arttırarak, maliyeti düşürmek için en çok ihtiyaç duyulan parametre zaman parametresidir. Zaman parametresini etkileyen etkenler; enjeksiyon zamanı, ütüleme zamanı, soğutma zamanı ve toplam çevrim zamanıdır [20].

Enjeksiyon zamanı, kalıba enjekte edilen eriyiğin kalıp boşluğunu doldurduğu zamana kadar geçen süredir. Enjeksiyon zamanını etkileyen en önemli parametre vida hızıdır. Vida hızı malzeme cinsine göre seçilmelidir [20].

Ütüleme zamanı, tutma basıncının süresidir. Parça geometrisine göre seçilmelidir. Soğutma zamanı, çevrim süresinin önemli çoğunluğu bu sürede geçmektedir. Soğutma süresini etkileyen parametreler, parça ağırlığı, et kalınlığı, soğutma kanalının tasarımı, soğutma kanalı çapı, soğutma suyunun sıcaklığı ve debisidir. Soğutma süresi parça kalitesini çok fazla etkilemekte, parçada çökme, çarpılma gibi

kalitesizlikler oluşturabilirken aynı zamanda kalıptan parçanın çıkabilmesi için uygun sıcaklığa düşmesi gerekmektedir. Soğutma optimizasyonu yapmak için sonlu elemanlar analizinden yararlanılmaktadır [20].

Toplam çevrim zamanı, açma ve kapama süresinin de dahil olduğu tüm sürelerin toplamını içermektedir. Maça çalışma sistemi ve itici sisteminin çalışma süresi de süreye eklenmektedir. Toplam çevrim süresinin fazla olması plastik eriyiği yakabilirken çevrim süresinin gerektiğinden az olması parçada kalitesizliklere ve kalıpta mekanik hatalara sebep olabilmektedir [20].

#### **3.2.4. Hız Parametreleri**

Enjeksiyon prosesinde hız parametresi önemli bir role sahiptir. Parça kalitesi, kalıp ve makine güvenliği ve çevrim süresi ile doğrudan ilgilidir. Hız parametresini etkileyen etmenler vida dönüş hızı ve enjeksiyon hızıdır. Vidanın eksenel yöndeki hızı çok önemlidir, eriyiğin kalıp boşluğuna dolarken hızının fazla olması parçada çapak ve kalıp çeliğine zarar verme gibi sonuçlar doğurabilmektedir. Hızın az olması ise eriyiğin çabuk katılaşarak parçanın dolmamasına neden olabilmektedir [20].



#### 4.1 Malzeme

Bu çalışmada hammadde olarak, cam elyaf ve köpürtücü ajan katkılı ticari polipropilen kullanılmıştır. Malzemenin özellikleri Tablo 4.1’de verilmiştir. Bunun yansıra, malzemenin plastik enjeksiyondaki akış analizinin simülasyonunda kullanılacak fiziksel, kimyasal, termal özelliklerinin belirlenmesi ve analiz programına tanımlanması gerekmektedir. Bu amaçla aşağıda sırasıyla adı verilen testler yapılmıştır.

- *Kül Testi*

Malzemenin belirli bir sıcaklıkta yakılarak plastiğin ortamdaki ayrıştırılması ile katkı miktarının ortaya çıkarılması için yapılmıştır. 700°C ‘ye kadar ısıtılan 50 gr hammadde örneği plastiğin ayrışmasından sonra hızlı bir şekilde desikatöre alınarak ortam sıcaklığına soğutulmuş. Tartımlar yapılarak hammadde içeriğindeki cam elyaf katkı oranı bulunmuştur.

- *Diferansiyel Taramalı Kalorimetre (DSC) Analizi*

Malzeme 40-300°C aralığında, 10°C/dk ısıtma ve soğutma hızında TA Instruments Q200 marka cihazda analize tabi tutulmuş, bu çalışma için önem arz eden ergime sıcaklığı tespit edilmiştir. Endotermik bir reaksiyon olduğu için ergime noktalarında enerji açığa çıktığı görülmüştür. Elde edilen analiz eğrileri Ek-1’de verilmiştir. Ergime noktalarında eğrilerin pik noktaları yaparak endotermik bir reaksiyon ile sistemin enerji aldığı görülmüştür.

- *Termogravimetrik (TGA) Analiz*

TA Instruments Q500 marka cihazda malzeme 10°C/dk ısıtma hızında 950°C’ye kadar ısıtılmış ve malzemenin kütlesinin sıcaklığa ve zamana bağlı

değişimi ölçülmüştür. Hammaddenin bozunduğu sıcaklıklar ve kütle kayıpları dikkate alınarak hammadde içeriği belirlenmiştir. Elde edilen analiz eğrileri Ek-2’de verilmiştir. 400°C’den yaşanan sonra görülen kütle kaybı ile hammadde içeriğindeki cam elyaf katkısının yaklaşık %20,5 oranında olduğu tespit edilmiştir.

- *Kapiler Reometri Testi*

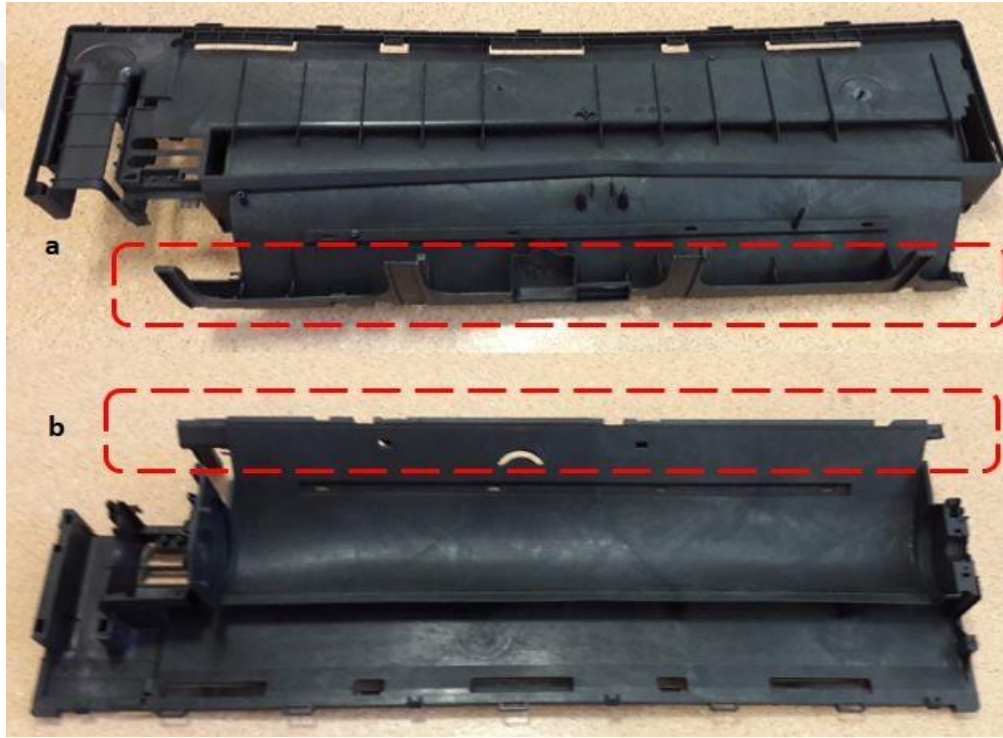
Bu analiz ile malzemenin farklı sıcaklıklardaki akış özellikleri tespit edilmiştir. Kovan çapı 15 mm olan Ceast marka cihaz ile 190°C, 200°C, 205°C ve 215°C sıcaklıklarda testler yapılmıştır. Elde edilen analiz sonuçları Ek-3’te verilmiştir. Bu analizler sonucunda elde edilen kayma hızı değerleri tablo halinde akış analizi yazılımına girilerek viskozite eğrileri oluşturması sağlanmıştır.

**Tablo 4.1** Hammadde özellikleri

| Özellik                | Birim              | Değer  |
|------------------------|--------------------|--------|
| MFI                    | g/10 dk            | 8.5    |
| Cam Elyaf Katkısı      | %                  | 20.5   |
| Köpürtücü Ajan Katkısı | %                  | 4.1    |
| Yoğunluk               | g/ cm <sup>3</sup> | 1.045  |
| Çekme Dayanımı         | kgf/m <sup>2</sup> | 751    |
| Uzama                  | %                  | 9.2    |
| Elastiklik Modülü      | kgf/m <sup>2</sup> | 36,125 |
| Darbe Dayanımı         | kgfcm/cm           | 6,1    |
| Isıl Değişim Sıcaklığı | °C                 | 138,5  |
| Yanabilirlik           | Sınıf              | HB     |
| Sertlik                | -                  | 108    |

## 4.2 Parça ve Kalıp Tasarımı

arpılmanın ve çevrim suresinin optimize edilmesinde ekil 4.1'de fotoğrafları verilen klimanın iç kısmında yer alan ve diğerk klima parçalarının üzerine montajlandığı, 800x280x2,3 mm boyutlarındaki şasi parçası seçilmiştir. İ kısmın iskeletini oluşturan şasi parçası incelendiğinde; hammaddenin standart polipropilen olmaması, parça geometrisinin girintili-çıkıntılı olması ve diğerk parçaların üzerine montajlanması nedeniyle farklı çarpılmaların oluştğı gözlemlenmiştir. Şekil 4-1'de kırmızı çizgiler ile çarpılma bölgesi gösterilmiştir.



**Şekil 4.1** Klima şasi parçası ve çarpılma bölgeleri (a) – Arka yüzü, (b) - Ön yüzü

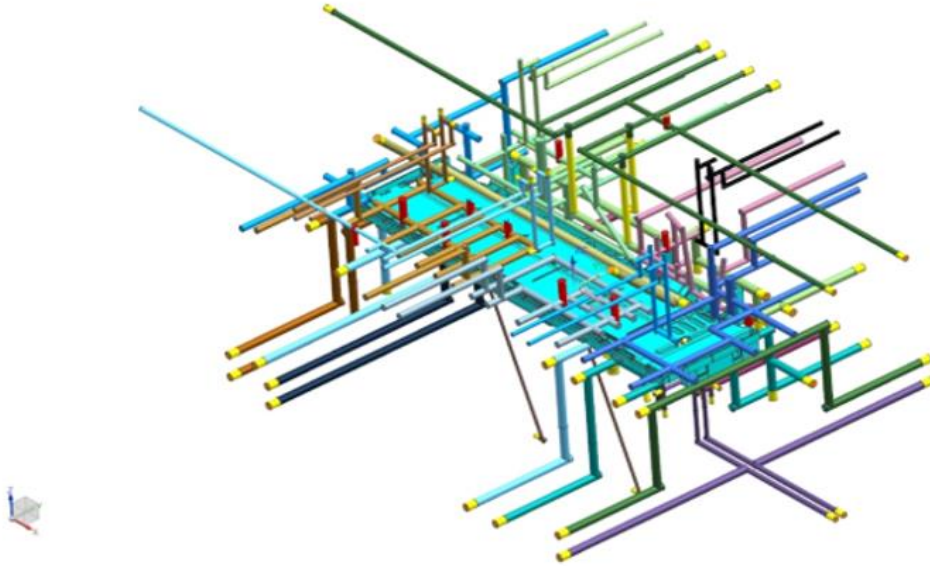
Söz konusu deformasyonların en kritiğı ise, ürünün görünüşünü ve montajını bozan çarpılma problemi olarak tespit edilmiştir.

ekilde 4-1'deki şasi parçası, ekil 4-2'deki görsel parçaya monte edildikten sonra, ürüne karşıdan bakıldığında içerideki şasi parçasının çarpılması nedeniyle klimanın dış kısmındaki parçayı esnetmeye çalışmakta ve bu durum görsel bir kusur olarak değerkendirilmektedir.



**Şekil 4.2** Şasi parçasının montajı sonrası oluşan çarpılmanın fotoğrafı

Deneyisel çalışmada kullanılan plastik enjeksiyon kalıbı sıcak yolluk sistemine sahip olup nozullar sıralı dolum sistemi ile çalışmaktadır. Kalıp ile ilgili diğer bir detay ise soğutma kanallarıdır. Şekil 4.3'te de ürünle birlikte soğutma kanallarını verilen katı model görüntüsünde, kalıptaki soğutma kanallarının ürün geometrisine yaklaşık olarak 18-24 mm aralığındaki mesafelerden geçtiği bilinmektedir. Soğutma kanallarının çapı 12 mm'dir. Parça geometrisi gereği, soğutmanın nispeten uzak kaldığı yerlerde ise termal iletkenlik katsayıları klasik plastik enjeksiyon kalıp çeliklerine göre birkaç kat fazla olan berilyum-bakır lokmalar kullanılmıştır.



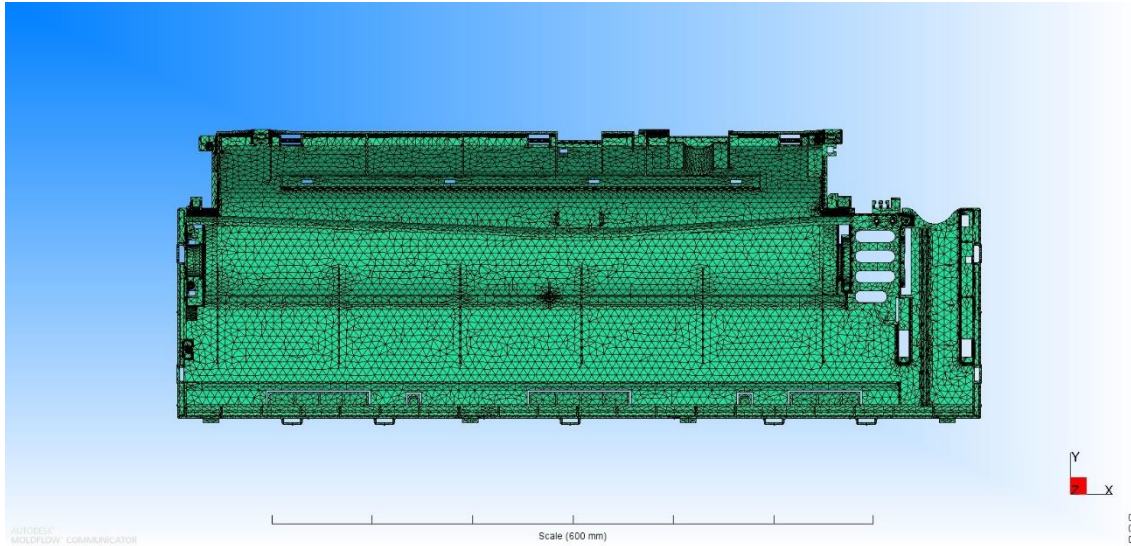
**Şekil 4.3** Şasi parçasının mevcut kalıbındaki soğutma kanallarının katı model görüntüsü

### 4.3 Sonlu Elemanlar ile Akış Analizi

Bu çalışmada kimyasal köpük ajanı ile plastik enjeksiyon kalıplamayı simule edebilmek için Moldflow Insight Ultimate yazılımı kullanılmıştır.

Ekte verilen kapiler reometri, TGA ve DSC analizlerinden elde edilen sonuçların yazılıma tanımlanmasıyla, %20,5 cam elyaf ve %4,1 köpürtücü ajan katkısı olan malzeme kütüphanesindeki en yakın hammadde düzenlenerek yeni bir hammadde kaydı oluşturulmuş ve analizlerde bu hammadde kullanılmıştır.

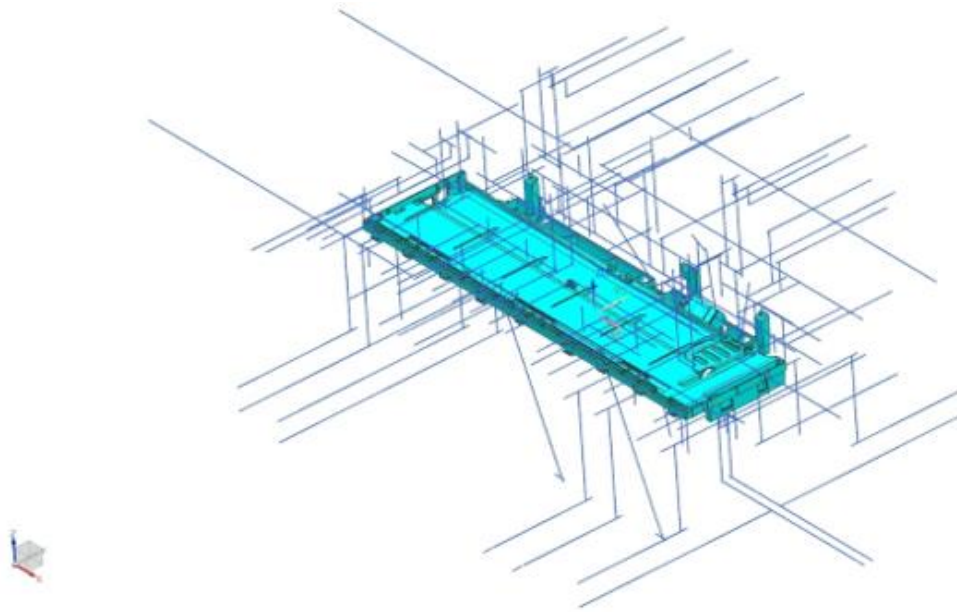
Analiz öncesi ürün datası sisteme yüklenerek mesh işlemi (ağlara bölme) yapılmıştır. Mesh tipi olarak “Dual Domain” seçilmiştir. Şekil 4.4’te gösterildiği gibi şasi parçasının mesh işlemi tamamlandıktan sonra yapılacak analiz sonucunun doğru sonuç vermesi açısından, örülmüş üçgenlerin yazılımda “aspect ratio” olarak belirtilen değerinin mümkün olduğunca düşük değerlerde tutulması analiz sonuçlarını gerçeğe yaklaştıran bir etmen olduğu bilinmektedir. Bu nedenle bu tip karmaşık geometriler için tavsiye edilen aspect ratio değeri 6 olmasına rağmen bu çalışma için bu değer 4 seçilerek daha kaliteli bir mesh (ağ örgüsü) oluşturulmuştur.



**Şekil 4.4** Mesh işlemi (ağlara bölme) tamamlanmış şasi parçası

Mesh çalışması tamamlandıktan sonra yapılacak analizlerin gerçeğe yakın sonuç vermesi kalıpta kullanılan çelik tipleri ve soğutma kanalları sonlu elemanlar akış analizine tanıtılmıştır. Hareketli kalıbın çeliği olarak 1.2714, sabit kalıbın çeliği olarak 1.2344 ve berilyum-bakır lokmalar kullanılmıştır.

Kalıpta açılan soğutma kanallarının çapı ortalama 12 mm ve ürün geometrisinden ortalama uzaklığı 18-24 mm'dir. Kalıp datasındaki kanalların içine Şekil 4-5'te görüldüğü gibi Siemens NX adlı cad yazılımı ile devamlı çizgiler modellenerek soğutma tasarımı Moldflow'a aktarılmıştır.



**Şekil 4.5** Soğutma kanallarının akış analizi için devamlı çizgiler ile gösterimi

Kalıp ve hammadde ile fiziksel girdiler tamamlandıktan sonra proses ile ilgili verilerin girişine geçilmiştir. Parçanın mevcut proses değerleri Şekil 4-6'da set olarak verilmiştir.

Bu çalışmada, mevcut proses değerlerinden çarpılmaya en çok etkili olan soğutma süresi, hareketli-sabit kalıp soğutma sıcaklığı ve soğutucu akışkan debisi deneysel çalışma kapsamında optimize edilmesi amacıyla farklı aralık değerlerde Tablo 4.2'de verildiği gibi seçilirken, çarpılma üzerine daha az etkin olduğu bilinen diğer



enjeksiyon parametreleri Şekil 4.6'daki gibi sabit tutulmuştur. Tablo 4.2'de verilen deney planı, ileriki bölümlerde bahsedilecek olan cevap yüzey metodu matrislerine göre tasarlanmıştır.

|                    |                           |          |  |
|--------------------|---------------------------|----------|--|
| PARÇA ADI : .....  | MALZEME ADI : .....       | PP GF 20 |  |
| PARÇA KODU : ..... | MASTERBATCH ADI : .....   |          |  |
| KALIP NO : .....   | MASTERBATCH ORANI : ..... |          |  |

|                                |                                                                                                                              |        |  |
|--------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------|--|
| KALIP KODU : .....             | KALIP TONAJI : .....                                                                                                         | 650    |  |
| KALIP ÖLÇÜLERİ (aXbXc) : ..... | KALIP AÇILMA STROĞU : .....                                                                                                  |        |  |
| GÖZ SAYISI : .....             | OPERASYON TİPİ : <input type="checkbox"/> elle <input type="checkbox"/> otomatik <input checked="" type="checkbox"/> robotlu |        |  |
| VOLLUK TİPİ : .....            | PARÇA AĞIRLIĞI : .....                                                                                                       | 929 gr |  |
| OPERATÖR SAYISI : .....        | VOLLUK AĞIRLIĞI : .....                                                                                                      | 2 gr   |  |

| Kırma Oranı |  |
|-------------|--|
| X           |  |

| Kurutma  |        |
|----------|--------|
| Zaman    | 2 saat |
| Sıcaklık | 80     |

| Kalıp Sıcaklığı |      |
|-----------------|------|
| Sabit 15 C      | 13 C |
| Hareketli 15 C  | 13 C |
| Maça 1 15 C     | 13 C |
| Maça 2 15 C     | 13 C |
| Maça 3 15 C     | 13 C |

| Sıcak Yolluk Sıcaklık Bilgisi |     |     |     |     |     |     |     |
|-------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 1                             | 2   | 3   | 4   | 5   | 6   | 7   | 8   |
| 215                           | 215 | 215 | 215 | 215 | 215 | 215 | 215 |
| 18                            | 18  | 18  | 18  | 18  | 18  | 18  | 18  |
| 215                           | 215 | 215 |     |     |     |     |     |
| 128                           | 18  | 18  | 20  | 21  | 23  | 23  | 24  |

| ENJEKSİYON          |     |     |     |  |  |  |  |  |  |  |
|---------------------|-----|-----|-----|--|--|--|--|--|--|--|
| ENJ. BASINCI (bar)  | 130 | 120 | 115 |  |  |  |  |  |  |  |
| ENJ. HIZI (mm/sn)   | 50  | 75  | 65  |  |  |  |  |  |  |  |
| ENJ. POZİSYONU (mm) | 150 | 75  | 32  |  |  |  |  |  |  |  |
| TUTMA BASINCI (bar) | 45  |     |     |  |  |  |  |  |  |  |
| TUTMA ZAMANI (sn)   | 1,7 |     |     |  |  |  |  |  |  |  |

| KALIP PROGRAMI |                                |                               |                                |                               |                                |                               |                                |                               |                                |                               |
|----------------|--------------------------------|-------------------------------|--------------------------------|-------------------------------|--------------------------------|-------------------------------|--------------------------------|-------------------------------|--------------------------------|-------------------------------|
| 1              |                                |                               |                                |                               |                                |                               |                                |                               |                                |                               |
| Kalip Açma     | <input type="checkbox"/> İleri | <input type="checkbox"/> Geri | <input type="checkbox"/> İleri | <input type="checkbox"/> Geri | <input type="checkbox"/> İleri | <input type="checkbox"/> Geri | <input type="checkbox"/> İleri | <input type="checkbox"/> Geri | <input type="checkbox"/> İleri | <input type="checkbox"/> Geri |
| Kalip Kapama   | <input type="checkbox"/> İleri | <input type="checkbox"/> Geri | <input type="checkbox"/> İleri | <input type="checkbox"/> Geri | <input type="checkbox"/> İleri | <input type="checkbox"/> Geri | <input type="checkbox"/> İleri | <input type="checkbox"/> Geri | <input type="checkbox"/> İleri | <input type="checkbox"/> Geri |
| İleri Hız      | 30%                            |                               |                                |                               |                                |                               |                                |                               |                                |                               |
| İleri Basıncı  | 175                            | bar                           |                                | bar                           |                                | bar                           |                                | bar                           |                                | bar                           |
| Geri Hız       | 735                            |                               |                                |                               |                                |                               |                                |                               |                                |                               |
| Geri Basıncı   | 175 BAR %                      |                               |                                |                               |                                |                               |                                |                               |                                |                               |

| YÜKLEME            |                |
|--------------------|----------------|
| Geri Basıncı       | 5 bar          |
| Yükleme Basıncı    | 5 bar          |
| Yükleme Hızı       | 95 95 99       |
| Yükleme Stroğu     | 100 190 190 mm |
| Geri Emiş Stroğu   | mm             |
| Geri Emiş Basıncı  | mm/s           |
| Geri Emiş Mesafesi | 5 mm           |

| TUTMA FAZI |       |
|------------|-------|
| STROK      | 32 mm |
| ZAMAN      | sn    |
| BASINÇ     | bar   |

| KALIP AÇMA/KAPAMA |         |
|-------------------|---------|
| Kapama Kuvveti    | 650 kN  |
| Koruma Mesafesi   | 10 mm   |
| Koruma Basıncı    | 165 bar |
| Kalip Açma Stroğu | 744 mm  |

| ÇEVİRİM SÜRESİ |       |
|----------------|-------|
| Enj.           | Tutma |
| 2 27 s         | 1,7 s |
|                | 28 s  |
|                | 4 s   |
|                | 6 s   |
|                | 47 s  |

| İTİCİ PROGRAMI                        |                                   |
|---------------------------------------|-----------------------------------|
| <input type="checkbox"/> Yan Otomatik | <input type="checkbox"/> Otomatik |
| İtici İleri Hızı                      | 35 45 50 mm/sn                    |
| İtici İleri Basıncı                   | 50 50 55 bar                      |
| İtici İleri Pozisyonu                 | 192 mm                            |
| İtici Geri Hızı                       | 50 65 35 mm/sn                    |
| İtici Geri Basıncı                    | 50 50 50 bar                      |
| İtici Geri Pozisyonu                  | 50 mm                             |

Şekil 4.6 Parçanın mevcut proses değerlerinin akış diyagramı

Seçilen parametrelerin seviyeleri seçilirken bu çalışma öncesinde yapılan proses denemeleri, enjeksiyon makinesi limitleri ve deneyimler dikkate alınmıştır.

**Tablo 4.2** Akış analizinde kullanılan deney planı

| Deney no | Soğutma süresi (sn) | Sabit kalıp soğutma sıcaklığı (°C) | Hareketli kalıp soğutma sıcaklığı (°C) | Soğutucu akışkan debisi (lt/dk) |
|----------|---------------------|------------------------------------|----------------------------------------|---------------------------------|
| 1        | 24                  | 45                                 | 30                                     | 39                              |
| 2        | 24                  | 30                                 | 20                                     | 39                              |
| 3        | 24                  | 15                                 | 15                                     | 39                              |
| 4        | 24                  | 15                                 | 15                                     | 38,4                            |
| 5        | 21                  | 45                                 | 30                                     | 39                              |
| 6        | 21                  | 30                                 | 20                                     | 39                              |
| 7        | 21                  | 30                                 | 20                                     | 38,4                            |
| 8        | 21                  | 15                                 | 15                                     | 39                              |
| 9        | 21                  | 15                                 | 15                                     | 38,4                            |
| 10       | 18                  | 45                                 | 30                                     | 39                              |
| 11       | 18                  | 30                                 | 20                                     | 39                              |
| 12       | 18                  | 30                                 | 20                                     | 38,4                            |
| 13       | 18                  | 15                                 | 15                                     | 39                              |
| 14       | 18                  | 15                                 | 15                                     | 38,4                            |
| 15       | 18                  | 15                                 | 15                                     | 37,8                            |

#### 4.4 Deneyel Tasarım Analizleri

Deneyel çalışmalarda, istenen çalışmaların elde edilebilmesi için deney tasarımı ve parametrelerin doğru belirlenmesi gerekmektedir. Tüm şartlar sağlandığında dahi doğru sonuca ulaşmak tekrarlı deneylere ihtiyaç duyulabilmektedir. Zaman ve maliyet açısından bu şartları sağlamak çoğu zaman mümkün olmamaktadır.

Deneyel tasarım yöntemlerinin amacı, deney sayısını azaltarak optimum deney şartları ile istenen sonuca ulaşabilmektedir. Optimizasyon için uygulanan birçok



farklı metot bulunmaktadır. Bu çalışmada istenen sonuçlara ulaşabilmek adına Taguchi ve Cevap-Yüzey metotları uygulanmıştır.

#### 4.4.1 Taguchi Analizi

Taguchi, parametre ve sistem tasarımı için kullanılan bir deneysel tasarım ve optimizasyon metodudur. İstatiksel analizlerle çeşitli parametre ve seviyeler arasından optimum kombinasyonu sağlamak adına kullanılmaktadır. Parametrelerin en iyi seviyeleri seçilerek hedef değerden sapmaların azaltılması hedeflenmektedir. Deneye uygun ortogonal seri seçilerek en etkin parametrelerin ortaya çıkarılması sağlanmıştır. Ortogonal diziler deneme sayılarını önemli ölçüde azaltarak avantaj sağlamaktadır. Bu çalışmada süreç iyileştirmenin cevap-yüzey metodu ile yapılması hedeflenmiştir ancak ilk olarak bir ön çalışma olarak Taguchi metodu ile en etkin parametrelerin belirlenmesi gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla Tablo 4.3'te verilen 4 faktörlü 3 seviyeli L9 ortogonal matrisi kullanılmıştır. Faktörlerin seviyeleri ise Tablo 4.4'te verilmiştir.

**Tablo 4.3** L9 matrisi

| Deney no | Faktör 1 | Faktör 2 | Faktör 3 | Faktör 4 |
|----------|----------|----------|----------|----------|
| 1        | -1       | -1       | -1       | -1       |
| 2        | -1       | 0        | 0        | 0        |
| 3        | -1       | 1        | 1        | 1        |
| 4        | 0        | -1       | 0        | 1        |
| 5        | 0        | 0        | 1        | -1       |
| 6        | 0        | 1        | -1       | 0        |
| 7        | 1        | -1       | 1        | 0        |
| 8        | 1        | 0        | -1       | 1        |
| 9        | 1        | 1        | 0        | -1       |

**Tablo 4.4** L9 matrisindeki faktörlerin seviyeleri

| Faktör No | Faktör                                 | Seviye-1 | Seviye-2 | Seviye-3 |
|-----------|----------------------------------------|----------|----------|----------|
| 1         | Soğutma süresi (sn)                    | 24       | 21       | 18       |
| 2         | Sabit kalıp soğutma sıcaklığı (°C)     | 45       | 30       | 15       |
| 3         | Hareketli kalıp soğutma sıcaklığı (°C) | 15       | 20       | 30       |
| 4         | Soğutucu akışkan debisi (lt/dk)        | 39       | 38,4     | 37,8     |

#### 4.4.2 Cevap Yüzey Analizi

Cevap Yüzey metodu (CYM) çıktı parametrelerinin ortalamasının girdi parametrelerinin bir fonksiyonu olarak belirlenmesinde, süreç optimizasyonu için kullanılmaktadır. Seçilen deney parametrelerinin (faktörlerin) ortogonal dizide yer alan seviyeleri veya dizi dışından optimum deney şartlarının belirlenmesi için tercih edilmektedir. Bu çalışmada Tablo 4.5'te de verilen Box Behnken 3 faktörlü matrisi seçilmiştir. Faktörlerin seviyeleri ise Tablo 4.6'da verilmiştir. Seviyelerin kodlanmasında +1 en yüksek seviye, -1 en düşük seviye, 0 ise ortalama seviye olmaktadır. Minitab18 yazılımı ile gerçekleştirilen analizde, F-anlamlılık testi kapsamında istenen güvenilirlik limiti %90 olarak alınmıştır.

Cevap yüzey matrisindeki faktörlerin seviyeleri için Tablo 4.4'te de yer alan soğutma süresi, sabit kalıp soğutma sıcaklığı ve soğutucu akışkan debisinin seviyeleri kullanılmıştır. Taguchi analizi sonucunda elde edilen verilere bağlı olarak cevap yüzey matrisinde hareketli kalıp soğutma sıcaklığı 15°C olarak sabit alınmıştır.

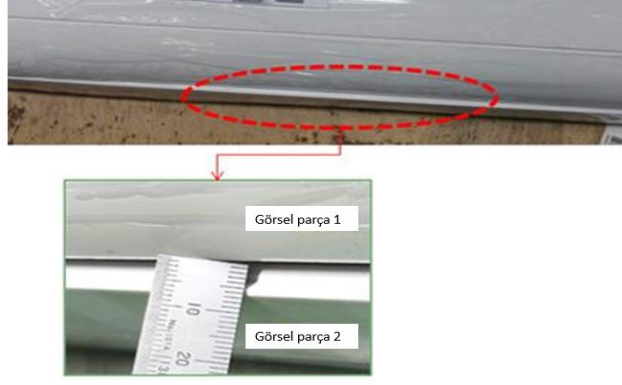
**Tablo 4.5** Cevap Yüzey matrisi

| Deney no | Faktör 1            | Faktör 2                           | Faktör 3                        |
|----------|---------------------|------------------------------------|---------------------------------|
|          | Soğutma süresi (sn) | Sabit kalıp soğutma sıcaklığı (°C) | Soğutucu akışkan debisi (lt/dk) |
| 1        | 1                   | 1                                  | 1                               |
| 2        | 1                   | 0                                  | 1                               |
| 3        | 1                   | -1                                 | 1                               |
| 4        | 1                   | -1                                 | 0                               |
| 5        | 0                   | 1                                  | 1                               |
| 6        | 0                   | 0                                  | 1                               |
| 7        | 0                   | 0                                  | 0                               |
| 8        | 0                   | -1                                 | 1                               |
| 9        | 0                   | -1                                 | 0                               |
| 10       | -1                  | 1                                  | 1                               |
| 11       | -1                  | 0                                  | 1                               |
| 12       | -1                  | 0                                  | 0                               |
| 13       | -1                  | -1                                 | 1                               |
| 14       | -1                  | -1                                 | 0                               |
| 15       | -1                  | -1                                 | -1                              |

#### 4.5 Çarpılmanın Ölçülmesi

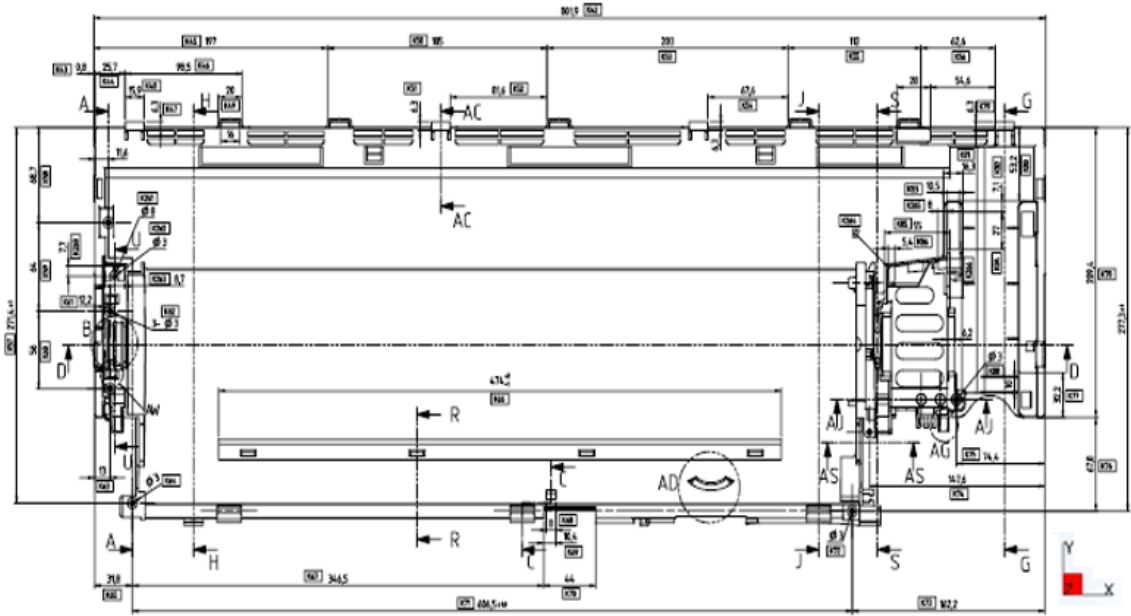
Enjeksiyon kalıplama ile elde edilen parçalarda çarpılma ölçümü Şekil 4.7’de gösterildiği gibi montaj sonrası görünüş parçalarının dışarı yönlü çarpılması ölçülerek gerçekleştirilmiştir. Parça üzerindeki kalite kontrolleri birkaç aşamadan oluşmaktadır.

- *Çarpılma kontrolü:* Şasi parçasının üzerine takılan kanat ve dekor parçalarının arasındaki mesafenin kalite şartlarına göre maksimum değeri 3,5 mm olması beklenmektedir. Güncel durumda bu değer 5,5 mm tespit edilmektedir. Bu çalışmada hedeflenen kalite iyileşmesi burada yaşanan çarpılma problemi üzerinde durulacaktır.



**Şekil 4.7** Montaj sonrası çarpılma ölçümü

- *Ölçüm kontrolü:* Bu klima parçasının seri imalat sürecinde, teknik resimde belirtilen ölçülerin enjeksiyon numuneleri üzerinden kontrolleri yapılmaktadır. Şekil 4-8'de verilen teknik resim üzerindeki ölçüm noktalarının her birinden çoklu adette boyutsal kalite kontrol ölçümleri yapılmıştır. Numunelerin uygun sayılabilmesi için bütün ölçüm noktalarının belirlenen toleranslar içerisinde çıkması gerekmektedir.



**Şekil 4.8** Şasi parçasının 2 boyutlu teknik resmi

- *Ağırlık kontrolü:* Parçanın optimum ağırlığı 930 gramdır. Alt ve üst toleransı 30 gramdır. Enjeksiyon denemelerinde yapılacak proses ayarlamalarında alt sınır 900 gr, üst sınır 960 gr olarak belirlenmiştir. Yapılan denemeler sonrası tüm numuneler için ağırlık kontrolü gerçekleştirilmiştir.
- *Montaj kontrolü:* Şasi parçasının üzerine farklı parçalar monte edilmektedir. Kalite kontrollerinin uygun sayılabilmesi için yapılan montaj kontrollerinde herhangi bir uygunsuzluk görülmemesi gerekmektedir. Çarpılma problemini düzeltirken farklı bölgelerde bir montaj probleminin oluşma ihtimali yapılan denemeler sonrası elde edilen numunelerin tamamının montaj kontrolüne sokulması ile kontrol edilmiştir.

Bu tez çalışması kapsamında ise kalite tarafında parçadaki çarpılmanın üzerinde odaklanılmıştır.

### 5.1 Deneysel Tasarım – Taguchi Analizi

Taguchi yöntemi ile soğutma süresinin, hareketli kalıp sıcaklığının, sabit kalıp sıcaklığının ve soğutucu akışkan debisinin çarpılma üzerine etkisi incelenmiş ve bu bağlamda “en küçük değer en iyi” prensibi esas alınarak uygulanmıştır. Analiz öncesi seçilen bu 4 faktörün farklı seviyelerinin etki derecesini ölçebilmek adına optimize edilmek istenen çarpılma değerleri Moldflow Insight Ultimate yazılımı ile 9 adet analiz gerçekleştirilmiştir. Tablo 5-1’de elde edilen çarpılma sonuçları, Tablo 5.2’de ortalamaların cevap tablosu, Tablo 5.3 Sinyal Gürültü oranları ve Şekil 5.1’de ise sinyal gürültü diyagramları verilmiştir. Sinyal/ Gürültü (S/N) oranı hesaplanırken, en küçük değer en iyi Eşitliği (5.1) kullanılmıştır.

$$S/N = -10 \cdot \log\left[\left(\frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n Y_i^2\right)\right] \quad (5.1)$$

Bu eşitlikte  $Y_i$  çarpılma miktarı (mm) ve  $n$  deney sayısıdır. Tablo 5.2’ de verilen sonuçlara göre 0,102 etki oranı ile hareketli kalıp sıcaklığının en düşük etkiye sahip olduğu görülmüştür. Bu nedenle çalışmanın ilerleyen bölümlerinde hareketli kalıp sıcaklığı ihmal edilmiş ve 15°C olarak sabit tutulmuştur.

**Tablo 5.1** L9 deneysel tasarımına göre Moldflow analizi çarpılma değerleri

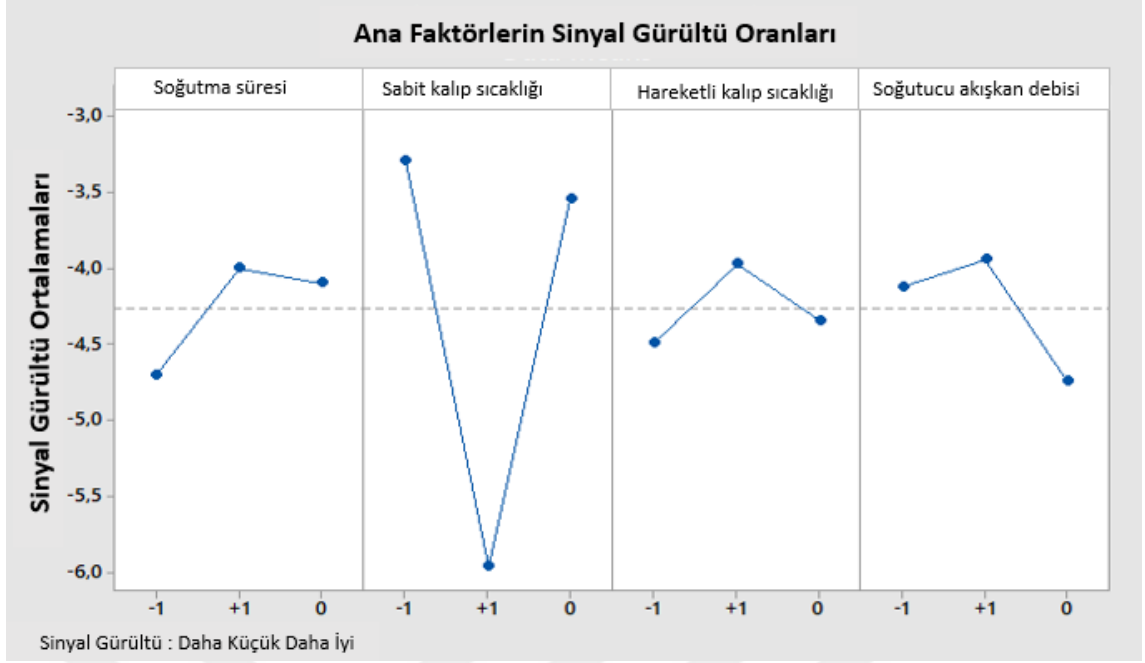
| Deney no | X1<br>(soğutma süresi)<br>(sn) | X2<br>(sabit kalıp sıcaklığı)<br>(°C) | X3<br>(hareketli kalıp sıcaklığı)<br>(°C) | X4<br>(soğutucu akışkan debisi)<br>(lt/dk) | Çarpılma<br>(Moldflow)<br>(mm) |
|----------|--------------------------------|---------------------------------------|-------------------------------------------|--------------------------------------------|--------------------------------|
| 1        | 18 (-1)                        | 15 (-1)                               | 15 (-1)                                   | 37,8 (-1)                                  | 1,549                          |
| 2        | 18 (-1)                        | 30 (0)                                | 20 (0)                                    | 38,4 (0)                                   | 1,685                          |
| 3        | 18 (-1)                        | 45 (+1)                               | 30 (+1)                                   | 39 (+1)                                    | 1,944                          |
| 4        | 21 (0)                         | 15 (-1)                               | 20 (0)                                    | 39 (+1)                                    | 1,393                          |
| 5        | 21 (0)                         | 30 (0)                                | 30 (+1)                                   | 37,8 (-1)                                  | 1,403                          |
| 6        | 21 (0)                         | 45 (+1)                               | 15 (-1)                                   | 38,4 (0)                                   | 2,109                          |
| 7        | 24 (+1)                        | 15 (-1)                               | 30 (+1)                                   | 38,4 (0)                                   | 1,446                          |
| 8        | 24 (+1)                        | 30 (0)                                | 15 (-1)                                   | 39 (+1)                                    | 1,442                          |
| 9        | 24 (+1)                        | 45 (+1)                               | 20 (0)                                    | 37,8 (-1)                                  | 1,91                           |

**Tablo 5.2** Ortalama cevap tablosu

| Seviye | Soğutma Süresi | Sabit Kalıp Sıcaklığı | Hareketli Kalıp Sıcaklığı | Soğutucu Akışkan Debisi |
|--------|----------------|-----------------------|---------------------------|-------------------------|
| 1      | 1,726          | 1,463                 | 1,700                     | 1,621                   |
| 2      | 1,599          | 1,988                 | 1,598                     | 1,593                   |
| 3      | 1,635          | 1,510                 | 1,663                     | 1,747                   |
| Fark   | 0,127          | 0,525                 | 0,102                     | 0,154                   |
| Sıra   | 3              | 1                     | 4                         | 3                       |

**Tablo 5.3** Sinyal Gürültü oranları (S/N)

| Seviye | Soğutma Süresi | Sabit Kalıp Sıcaklığı | Hareketli Kalıp Sıcaklığı | Soğutucu Akışkan Debisi |
|--------|----------------|-----------------------|---------------------------|-------------------------|
| 1      | -4,702         | -3,294                | -4,487                    | -4,121                  |
| 2      | -4,001         | -5,959                | -3,973                    | -3,944                  |
| 3      | -4,101         | -3,551                | -4,344                    | -4,739                  |
| Fark   | 0,701          | 2,664                 | 0,514                     | 0,795                   |
| Sıra   | 3              | 1                     | 4                         | 2                       |



**Şekil 5.1** Sinyal Gürültü oranları

Hareketli kalıp sıcaklığının, seçilen klima şasi parçasının Şekil 4.8’de gösterilen koordinat eksenine bağlı y-yönündeki çarpılma miktarı üzerine etkisinin düşük olmasının nedeni, hareketli kalıp yüzeyinin sabit kalıp yüzeyine göre plastik-metal temas alanının daha küçük olmasına bağlı soğutulacak plastik miktarının daha az olmasıdır. Ayrıca, hareketli kalıpta kullanılan berilyum-bakır lokmaların ısıl iletkenlik katsayısının kalıp çeliğine kıyasla yüksek olması nedeniyle daha efektif bir soğutma sağlanmış ve çarpılma üzerine etkisinin daha düşük olduğu görülmüştür.

## 5.2 Sonlu Elemanlar Akış Analizi Sonuçları

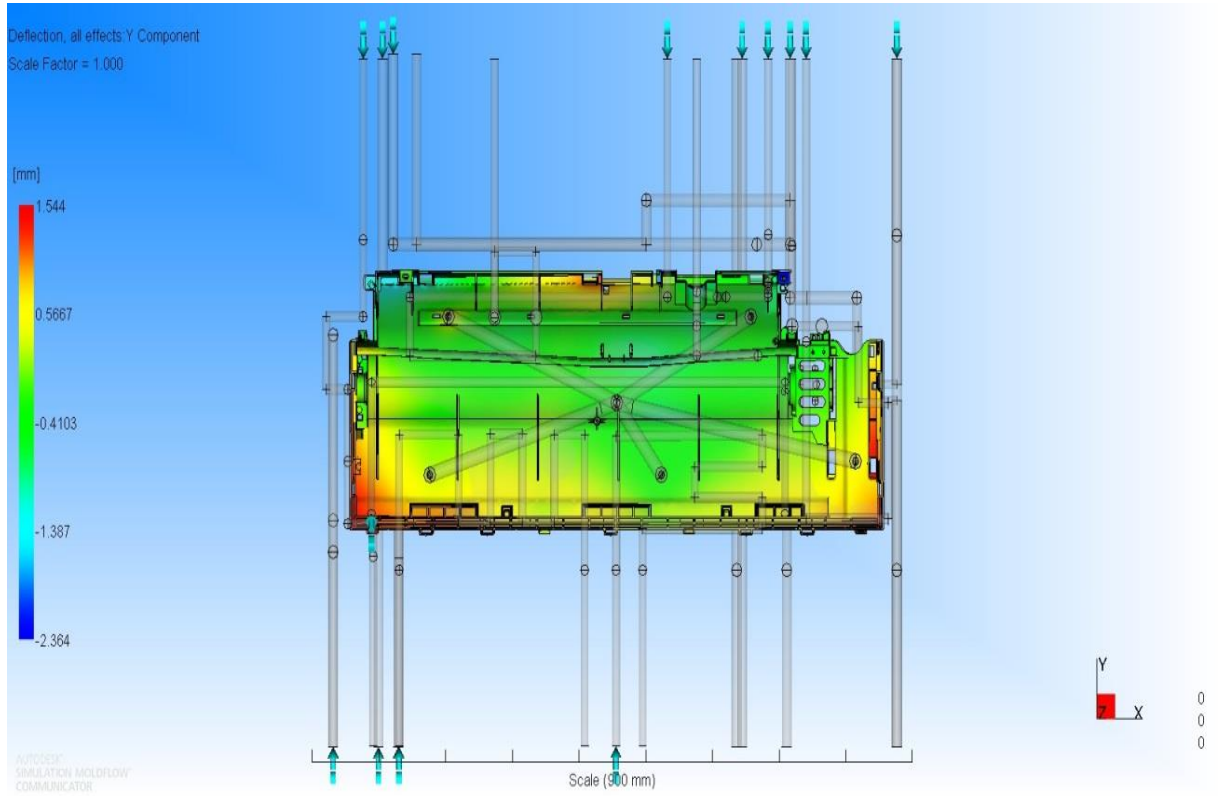
Cevap yüzey metodu deney planına göre gerçekleştirilen Moldflow analizi ile elde edilen çarpılma sonuçları Tablo 5.4’ te verilmiştir. Proses şartları, parametreler, çelik tipleri, soğutma kanalı tasarımı gibi faktörler dikkate alınarak gerçek durumu simule edecek şekilde yapılan analiz sonucunda 1,544 mm ile 1,976 mm aralığında çarpılma değerleri elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre kalıp sıcaklığının yüksek olduğu değerlerde çarpılmanın yüksek olduğu gözlemlenmiştir. Sabit kalıp



sıcaklığı ve soğutucu akışkan debisinin sabit olduğu durumlarda ise soğutma süresi arttıkça çarpılma azalmıştır. Elde edilen akış analizi sonuçlarının en düşük çarpılmayı veren deneyinin görseli Şekil 5.4'te, diğer analizlerin görselleri Ek-4'te verilmiştir. Şekil 5.2'de kırmızı ile renklendirilen bölgeler çarpılmanın daha yüksek olduğu bölgeler olarak görülmektedir. Bu bölgelerde nispeten plastik parçanın kalınlığı nedeniyle ısı birikmesi ve son dolum noktaları olması çarpılma miktarını artırıcı etmenler olmuştur.

**Tablo 5.4** Moldflow çarpılma sonuçları

| Deney no | X1<br>(Soğutma süresi) (sn) | X2<br>(Sabit kalıp sıcaklığı) (°C) | X3<br>(Soğutucu akışkan debisi) (lt/dk) | Sonlu elemanlar akış analizi çarpılma sonuçları (mm) |
|----------|-----------------------------|------------------------------------|-----------------------------------------|------------------------------------------------------|
| 1        | 24 (+1)                     | 45 (+1)                            | 39 (+1)                                 | 1,976                                                |
| 2        | 24 (+1)                     | 30 (0)                             | 39 (+1)                                 | 1,727                                                |
| 3        | 24 (+1)                     | 15 (-1)                            | 39 (+1)                                 | 1,544                                                |
| 4        | 24 (+1)                     | 15 (-1)                            | 38,4 (0)                                | 1,544                                                |
| 5        | 21 (0)                      | 45 (+1)                            | 39 (+1)                                 | 1,961                                                |
| 6        | 21 (0)                      | 30 (0)                             | 39 (+1)                                 | 1,708                                                |
| 7        | 21 (0)                      | 30 (0)                             | 38,4 (0)                                | 1,707                                                |
| 8        | 21 (0)                      | 15 (-1)                            | 39 (+1)                                 | 1,545                                                |
| 9        | 21 (0)                      | 15 (-1)                            | 38,4 (0)                                | 1,545                                                |
| 10       | 18 (-1)                     | 45 (+1)                            | 39 (+1)                                 | 1,815                                                |
| 11       | 18 (-1)                     | 30 (0)                             | 39 (+1)                                 | 1,683                                                |
| 12       | 18 (-1)                     | 30 (0)                             | 38,4 (0)                                | 1,675                                                |
| 13       | 18 (-1)                     | 15 (-1)                            | 39 (+1)                                 | 1,548                                                |
| 14       | 18 (-1)                     | 15 (-1)                            | 38,4 (0)                                | 1,549                                                |
| 15       | 18 (-1)                     | 15 (-1)                            | 37,8 (-1)                               | 1,556                                                |



**Şekil 5.2** Moldflow analizi sonucu elde edilen en düşük çarpılma

### 5.3 Deneysel Tasarım – Cevap Yüzey Analizi

Cevap Yüzey metodu ile klima şasi parçasının çarpılmasını, Moldflow analizinde dikkate alınan parametreler esas alınarak optimize edilmeye çalışılmıştır. 3 faktörlü bir Box Behnken deney tasarımı matrisi kullanılmış ve deneysel çalışma sonuçları Tablo 5.5'te raporlandırılmıştır.

**Tablo 5.5** Cevap yüzey matrisi deneysel tasarımına göre Moldflow analizi çarpılma değerleri

| Deney no | Faktör 1            | Faktör 2                           | Faktör 3                        | Çarpılma (Moldflow) (mm) |
|----------|---------------------|------------------------------------|---------------------------------|--------------------------|
|          | Soğutma süresi (sn) | Sabit kalıp soğutma sıcaklığı (°C) | Soğutucu akışkan debisi (lt/dk) |                          |
| 1        | 1                   | 1                                  | 1                               | 1,976                    |
| 2        | 1                   | 0                                  | 1                               | 1,727                    |
| 3        | 1                   | -1                                 | 1                               | 1,544                    |
| 4        | 1                   | -1                                 | 0                               | 1,544                    |
| 5        | 0                   | 1                                  | 1                               | 1,961                    |
| 6        | 0                   | 0                                  | 1                               | 1,708                    |
| 7        | 0                   | 0                                  | 0                               | 1,707                    |
| 8        | 0                   | -1                                 | 1                               | 1,545                    |
| 9        | 0                   | -1                                 | 0                               | 1,545                    |
| 10       | -1                  | 1                                  | 1                               | 1,815                    |
| 11       | -1                  | 0                                  | 1                               | 1,683                    |
| 12       | -1                  | 0                                  | 0                               | 1,675                    |
| 13       | -1                  | -1                                 | 1                               | 1,548                    |
| 14       | -1                  | -1                                 | 0                               | 1,549                    |
| 15       | -1                  | -1                                 | -1                              | 1,556                    |

Tablo 5.6'da cevap yüzey metoduna ait varyans analizi sonuçları, Tablo 5.7'de model özeti ve Tablo 5.8'de faktörlerin ve faktörler arası etkileşimlerin katsayıları verilmiştir.

**Tablo 5.6** Varyans analizi (Anova)

| Kaynak                          | Serbestlik Derecesi | Adj SS    | Adj MS    | F değeri | P değeri |
|---------------------------------|---------------------|-----------|-----------|----------|----------|
| Model                           | 9                   | 0,313430  | 0,034826  | 64,43    | 0,000    |
| Lineer                          | 3                   | 0,300559  | 0,100186  | 185,36   | 0,000    |
| Soğutma süresi                  | 1                   | 0,007938  | 0,007938  | 14,69    | 0,012    |
| Sabit kalıp sıcaklığı           | 1                   | 0,0292613 | 0,0292613 | 541,37   | 0,000    |
| Soğutucu akışkan debisi         | 1                   | 0,000008  | 0,000008  | 0,01     | 0,908    |
| Kareler                         | 3                   | 0,005967  | 0,001989  | 3,68     | 0,097    |
| Soğ. süresi*Soğ. süresi         | 1                   | 0,001196  | 0,001196  | 2,21     | 0,197    |
| Sab. kalıp sıc.*Sab. kalıp sıc. | 1                   | 0,003781  | 0,003781  | 7,00     | 0,046    |
| Soğ. Akış. debisi*Soğ. Akış.    | 1                   | 0,000724  | 0,000724  | 1,34     | 0,299    |
| İkili etkileşimler              | 3                   | 0,006905  | 0,002302  | 4,26     | 0,076    |
| Soğ. süresi*Sab. kalıp sıc.     | 1                   | 0,006889  | 0,006889  | 12,75    | 0,016    |
| Soğ. süresi*Soğ. akışkan debisi | 1                   | 0,000016  | 0,000016  | 0,03     | 0,870    |
| Sab. kalıp sıc.*Soğ. akışkan    | 1                   | 0,000000  | 0,000000  | 0,00     | 1,000    |
| Hata                            | 5                   | 0,002703  | 0,000541  |          |          |
| Toplam                          | 14                  | 0,316133  |           |          |          |

Tablo 5.7’de görülen  $R^2$  katsayısının %99,15 olması, analizin çalışmanın doğruluğunu ve güvenilirliğini göstermiştir. Cevap yüzey yöntemini çözümlerken seçilen güvenilirlik limiti ise %90’dır. Cevap yüzey yöntemi ile elde edilmesi amaçlanan tahmin modeli Eşitlik (5.2)’ de verilmiştir. Bu çalışmada, Tablo 5.8’deki regresyon katsayıları ile elde edilen tahmin modeli ise Eşitlik (3)’ te verilmiştir. Tahmin modeli, P değerleri dikkate alındığında, etkileşimler ihmal edilerek daha sade bir hale dönüştürülebilirdi ancak bu çalışma kapsamında tercih edilmemiş, denklem en genel hali ile bırakmıştır.

**Tablo 5.7** Model özeti

| S         | R-sq    | R-sq (adj) | R-sq (pred) |
|-----------|---------|------------|-------------|
| 0,0232487 | 99,15 % | 97,61 %    | 86,32 %     |

**Tablo 5.8** Faktörler ve faktörler arası etkileşim katsayıları

| Koşul                                 | Coef    | SE Coef | T-Değeri | P-Değeri | VIF  |
|---------------------------------------|---------|---------|----------|----------|------|
| Sabit                                 | 1,7070  | 0,0134  | 127,17   | 0,000    |      |
| Soğutma süresi                        | 0,03150 | 0,00822 | 3,83     | 0,112    | 1,00 |
| Sabit kalıp sıcaklığı                 | 0,19125 | 0,00822 | 23,27    | 0,000    | 1,00 |
| Soğutucu akışkan debisi               | 0,001   | 0,00822 | 0,12     | 0,908    | 1,00 |
| Soğ. süresi * Soğ. süresi             | -0,018  | 0,0121  | -1,49    | 0,197    | 1,01 |
| Sab. kalıp sıc. * Sab. kalıp sıc.     | 0,0320  | 0,0121  | 2,64     | 0,046    | 1,01 |
| Soğ. Akış. debisi * Soğ. Akış. debisi | 0,0140  | 0,0121  | 1,16     | 0,299    | 1,01 |
| Soğ. süresi * Sab. kalıp sıc.         | 0,0415  | 0,0116  | 3,57     | 0,016    | 1,00 |
| Soğ. süresi * Soğ. Akış. debisi       | -0,0020 | 0,0116  | -0,17    | 0,870    | 1,00 |
| Soğ. akış. debisi * Sab. kalıp sıc.   | 0,0000  | 0,0116  | 0,00     | 1,000    | 1,00 |

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i X_i + \sum_{i=1}^{k-1} \sum_{j=i+1}^k \beta_{ij} X_i X_j + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} X_i^2 \quad (5.2)$$

Eşitlik 2' de ikinci dereceden modelde n tane değişkenin lineer etkilerini, karesel etkilerini ve aralarındaki etkileşimlerini dikkate almaktadır. Bu modelde Y tahmini yanıt,  $\beta_0$ , sabit katsayı,  $\beta_i$ , lineer katsayı,  $\beta_{ij}$ , i ve j değişkenleri arasındaki etkileşim etkisini ve k faktör sayısını göstermektedir.

CYM ile yapılan analizler sonunda elde edilen cevap yüzey tahmin model denklemi Eşitlik 5.3'te verilmiştir.

X1 = Soğutma süresi

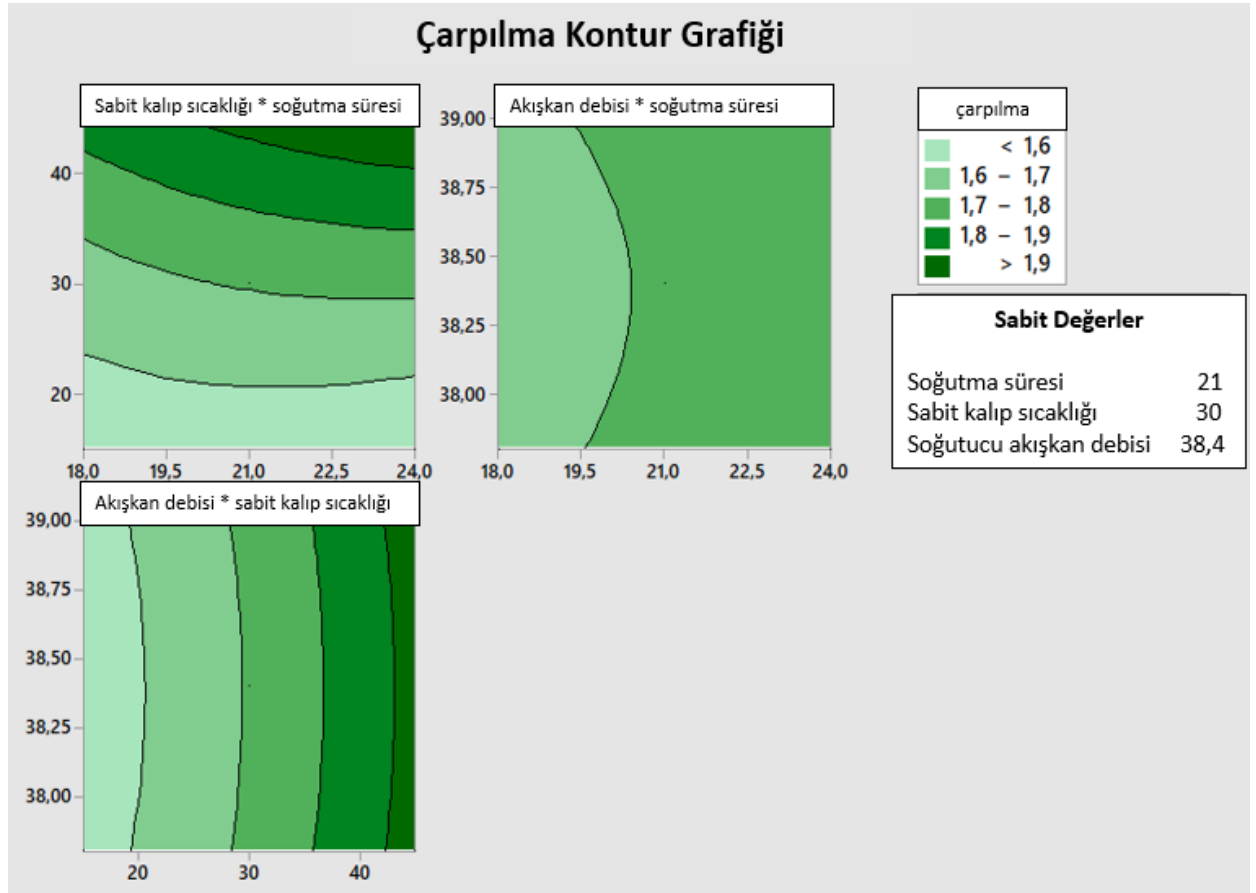
X2 = Sabit kalıp sıcaklığı

X3 = Soğutucu akışkan debisi olmak üzere

$$\text{Çarpılma} = 57,3 + 0,109 * X1 - 0,0151 * X2 - 2,96 * X3 - 0,002 * X1 * X1 + 0,000142 * X2 * X2 + 0,0389 * X3 * X3 + 0,000922 * X1 * X2 + 0,00111 * X1 * X3 \quad (5.3)$$

İncelenen proses parametrelerine ait cevap yüzey kontur diyagramları Şekil 5.3'te verilmiştir. Bu grafikler 24 saniye soğutma süresi, 15°C sabit kalıp sıcaklığı ve 38,4 lt/dk soğutucu akışkan debisi ile çarpılma değerinin 1.6 mm'den küçük değerlere inilebileceğini göstermektedir. Elde edilen sonuç grafiklerine göre, soğutma süresinin artması ve sabit kalıp soğutma sıcaklığının azalması çarpılmayı azaltıcı etki göstermiştir. Soğutucu akışkan debisi ise çarpılma üzerinde belirgin bir fark yaratmamıştır. Sabit kalıp sıcaklığının ve soğutma süresinin çarpılma üzerine etkisinin yüksek olması, Özçelik ve ark. [1] ile Oliaei ve ark. [7] da çalışmalarında belirttiği gibi, deneysel tasarım analizleri öncesinde de beklenen bir durumdur.

Çarpılma, parçanın kendini düzensiz çekmesi kusurudur. Parçanın soğuması sırasında, kalıp soğutma sıcaklıkları aracılığı ile ısı transferi optimum şekilde sağlanamazsa çarpılma problemi ile karşılaşılması daha olasıdır. Benzer şekilde soğutma süresi azaldıkça, parçanın soğumasını istenen seviyede yapamaması da çarpılma miktarını önemli ölçüde etkilemektedir. Soğutucu akışkan debisinin değeri arttıkça kullanılan sıvı, kanallar içerisinde daha hızlı dolaştığı için daha az ısınır ve daha verimli bir soğutma sağlaması beklenir. Cevap yüzey analizi sonrası, soğutucu akışkan debisinin etkisinin az görünmesinin iki nedeni; debiler arasında makinedeki debi ayarlama limitlerinden ötürü büyük farklar olmaması ve soğutma kanallarının tasarımının bazı bölgelerde tek eksenli olması nedeniyle sıvının çok fazla çelik yüzeyine temas edecek şekilde tasarlanmamasıdır.



**Şekil 5.3** Çarpılmanın faktörlere bağlı değişimi (sınır grafiği)

Cevap yüzey analizine göre soğutma süresinin 24 saniye, sabit kalıp sıcaklığının 15°C ve soğutucu akışkan debisinin 38,41 lt/dk olduğu proses parametreleri 1,53 mm'lik çarpılma değeri ile en iyi sonucu vermektedir.

Elde edilen optimum proses parametreleri tek tek incelendiğinde; soğutma süresinin 28 saniyeden 24 saniyeye düşürüldüğü görülmüştür. Soğutma süresinin diğer seviyeleri olan 21 saniye ve 18 saniyenin optimum çıkmamasının nedeni plastik parçaların enjeksiyon prosesinde soğutma süresi azaldıkça çarpılmanın artmasıdır [28]. Şasi parçasının eski prosesinde hareketli kalıp sıcaklığı 15°C, sabit kalıp sıcaklığı 30°C'dir. Yeni proste optimum sabit kalıp sıcaklığı değerinin 15°C olmasının nedeni, iki kalıp tarafı arasındaki sıcaklık farkını ortadan kaldırarak şasi parçası üzerindeki sıcaklıkların dengelenmiş olmasıdır. Şasi parçası gibi karmaşık geometrili parçalarda kalıp sıcaklıklarının homojen dağılması çarpılma açısından

kritik olmaktadır. Soğutucu akışkan debisinin değerleri enjeksiyon makinesinin ayarlarının kısıtı nedeniyle birbirine yakın seçilmiştir. Eski prosesteki debi değeri 37,8 lt/dk iken yeni proseste bu değer 38,4 lt/dk olarak belirlenmiştir. Arada küçük farklar olsa da soğutma suyunun kalıp içinde daha hızlı dolaştırılması suyun daha az ısınmasını sağladığı için daha efektif bir soğutma gerçekleşmektedir. Dolayısıyla soğutucu akışkan debisinin arttırılması çarpılma üzerinde olumlu etki göstermektedir.

#### 5.4 Numunelerin Eldesi ve Kalite Kontrol

Deneyssel tasarım yöntemi ile yapılan optimizasyonlar ve sonlu elemanlar akış analizleri sonucunda elde edilen verileri doğrulamak için 4 farklı deneme prosesi belirlenmiştir. Woojin marka 650 ton bir enjeksiyon makinesi kullanılarak yapılan denemelerin sonuçları Tablo 5.9'da verilmiştir. Seçilen her bir proses plastik enjeksiyon kalıplama yöntemi ile denenmiş ve kalıp rejime girdikten sonra her bir proses için 30'ar adet üretim alınmıştır. Alınan parçalar içinden her bir proses için 3'er adet numune ağırlık ve boy ölçümlerinden sonra montaj ve çarpılma kontrollerine tabi tutulmuştur.

**Tablo 5.9** Enjeksiyon proses denemelerinde uygulanan doğrulama testi şartları

| Deney no | Soğutma Süresi (sn) | Sabit Kalıp Sıcaklığı (°C) | Soğutucu Akışkan Debisi (lt/dk) |
|----------|---------------------|----------------------------|---------------------------------|
| 1        | 24                  | 15                         | 39                              |
| 2        | 21                  | 15                         | 39                              |
| 3        | 24                  | 30                         | 39                              |
| 4        | 24                  | 15                         | 38,4                            |

Numunelerin kendini çekmesinin tamamlanması için 1 gün beklendikten sonra alınan ölçüm sonuçları soğuk ölçüm olarak Tablo 5.10'da verilmiştir. Çarpılma ölçümleri parça kalıptan çıkar çıkmaz da yapılmış ve Tablo 5.10' a sıcak ölçüm olarak raporlandırılmıştır. Bunun sebebi, Moldflow analizindeki çarpılmada ölçüm için geçen 24 saat simule edilememesi ve kalıptan çıktıktan sonraki süreci baz alan



sonuçları vermesidir. Şasi parçasının çevrim süresi tamamlanıp kalıptan çıktıktan hemen sonra yapılan sıcak ölçümlerin, sonlu elemanlar akış analiz sonuçları ve cevap yüzey yönteminden elde edilen eşitliğe göre hesaplanan çarpılma sonuçları ile oldukça yakın çıktığı görülmüştür. Parça çekmesini tamamlandıktan sonra yapılan ölçümlerde ise beklenildiği gibi çarpılma bir miktar artmasına rağmen istenen kalite şartlarının içinde kalmıştır. Üretim bandı üzerinde çarpılma kontrolünden bir görsel Şekil 5.4'te verilmiştir.

Çarpılma haricinde klima şasinin kalite kontrol sürecinde ağırlık ve boy gibi temel ölçümleri de raporlandırılmış ve elde edilen sonuçların toleranslar içinde olduğu görülmüştür. Tüm bu kalite kontrol aşamasından sonra numuneler seri üretim koşullarında bant üzerinde montajlanmış ve herhangi bir probleme rastlanmamıştır.

**Tablo 5.10** Kalite kontrol ölçümleri

| Proses no | Numune no | CYM Tahmini | Çarpılma Miktarı (Sıcak Ölçüm) (mm) |      | Çarpılma Miktarı (Soğuk Ölçüm) (mm) |      | Ağırlık (gr) 930±30 | Boy (mm) 801,9±2 |
|-----------|-----------|-------------|-------------------------------------|------|-------------------------------------|------|---------------------|------------------|
| 1         | 1         | 1,59        | 1,8                                 | Ort: | 2,9                                 | Ort: | 923                 | 801,99           |
|           | 2         |             | 1,7                                 | 1,76 | 2,5                                 | 2,73 | 924                 | 801,96           |
|           | 3         |             | 1,8                                 |      | 2,8                                 |      | 919                 | 801,76           |
| 2         | 1         | 1,63        | 2,3                                 | Ort: | 3,1                                 | Ort: | 922                 | 801,83           |
|           | 2         |             | 2,5                                 | 2,4  | 3,4                                 | 3,26 | 922                 | 801,82           |
|           | 3         |             | 2,4                                 |      | 3,3                                 |      | 922                 | 801,88           |
| 3         | 1         | 1,78        | 2,2                                 | Ort: | 2,9                                 | Ort: | 917                 | 801,70           |
|           | 2         |             | 2,4                                 | 2,26 | 3                                   | 2,93 | 920                 | 801,77           |
|           | 3         |             | 2,2                                 |      | 2,9                                 |      | 917                 | 801,71           |
| 4         | 1         | 1,57        | 1,7                                 | Ort: | 2,7                                 | Ort: | 919                 | 801,71           |
|           | 2         |             | 1,6                                 | 1,7  | 2,4                                 | 2,63 | 921                 | 801,91           |
|           | 3         |             | 1,8                                 |      | 2,8                                 |      | 920                 | 801,70           |



**Şekil 5.4** Bant üzeri çarpılma ölçümü – (a) Sıcak Ölçüm (b) Soğuk Ölçüm

Yapılan kalite kontrol testlerinin dışında, çalışmanın bir diğer amacı olan çevrim süresinin kontrolü de yapılmıştır. Tablo 5.9’ da verilen enjeksiyon şartlarından en düşük çarpılmayı veren 4 nolu proses ile bir vardiya boyunca üretim yapılmış ve çekme süresi tamamlandıktan sonra rastgele alınan numunelerin ölçümlerinin uygun çıktığı görülmüştür. Önceki üretim bandında soğutma süresi 28 saniye iken yapılan çalışma ile çevrim başına 4 saniyelik azalma ile, yıllık üretim adedi ve enjeksiyon makinesi çalışma ücreti göz önüne alındığında yaklaşık %8,5 kazanım elde edilebileceği tespit edilmiştir. Yapılan tüm deneysel çalışmalar sonucunda 5.11’de raporlandırılmış olan iyileştirmeler elde edilmiştir.

**Tablo 5.11** İyileşme hedeflenen parametrelerin ilk ve son değerleri

| İyileştirilen Parametre | Eski | Yeni (soğuk ölçüm) | İyileşme |
|-------------------------|------|--------------------|----------|
| Çarpılma (mm)           | 5,5  | 2,4 – 2,8          | %53      |
| Çevrim Süresi (sn)      | 47   | 43                 | %8,5     |

Bu tez çalışmasında, klima şasinin plastik enjeksiyon kalıplama ile imal edilmesinde karşılaşılan çarpılmanın azaltılması ve aynı zamanda çevrim süresinin de azaltılması amaçlanmıştır. Bu amaçla, sırasıyla hammadde testleri, sonlu elemanlar akış analizi, deneysel tasarım yöntemleri ve doğrulama testleri için de enjeksiyon kalıplama baskıları yapılmıştır. Deneysel çalışmada kullanılan polipropilenin bünyesinde cam elyaf ve köpürtücü ajan katkısının aynı anda bulunması ile sık çalışılan hammaddeler sınıfının dışına çıkmıştır. Elde edilen sonuçlar aşağıda madde madde verilmiştir.

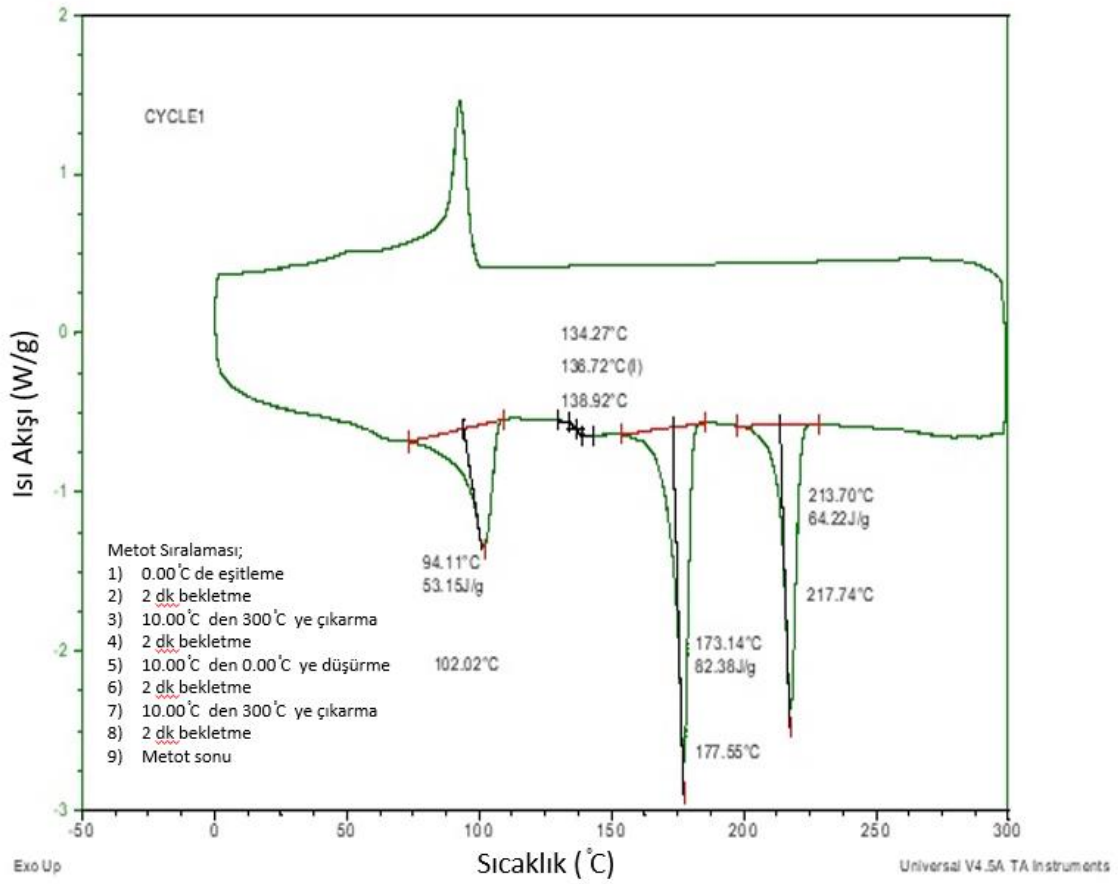
- Sonlu elemanlar akış analizinde dolum, ütüleme, soğutma ve çarpılma analizleri sonrası y-ekseninde 1,55 mm ile 1,95 mm arasında değişen çarpılma değerleri görülmüştür.
- Sonlu elemanlar analizinden alınan çarpılma değerlerine göre yapılan Taguchi analizinde hareketli kalıp sıcaklığının, seçilen klima şasi parçasının y-eksenindeki çarpılması için etkisinin düşük olduğu tespit edilmiştir. Bunun nedeni, şasi parçasının hareketli kalıbın sabit kalıba göre daha az plastik alanı olması dolayısıyla çarpılmaya daha az müsait olması ve hareketli kalıpta kullanılan berilyum-bakır lokmaların ısı iletkenlik katsayısının kalıp çeliğine kıyasla yüksek olması nedeniyle daha efektif bir soğutma sağlaması olarak değerlendirilmiştir.
- Cevap-yüzey metodunda 3 faktörlü bir Box Behnken deney matrisi kullanılarak soğutma süresi, sabit kalıp sıcaklığı ve soğutucu akışkan debisinin baz alındığı analizler edilmiştir. Analiz sonucunda soğutma süresinin 24 saniye, sabit kalıp sıcaklığının 15°C ve soğutucu akışkan debisinin 38,41 lt/dk olduğu optimum proses ile çarpılma değerinin 1,53

mm olabileceği görülmüş ancak gerçek imalat sürecinde bu değer 1,70 mm (sıcak ölçüm) olarak elde edilmiştir.

- Yapılan sanal analizler sonucu elde edilen parametrelerin en etkili seviyeleri ve küçük farklılıklar ile oluşturulan yeni parametre seviyeleri ile enjeksiyon kalıplama yönteminde denenmek üzere 4 enjeksiyon kalıplama proses şartı oluşturulmuş ve çarpılma değerini kalite şartnamesine bağlı olarak 3,5 mm olan sınır değerinin altına indiği görülmüştür. Proses no-1 (ort. 2,6 mm) ve Proses no-4 (ort. 2,55 mm) proseslerin soğutma sürelerinin seviyeler arasındaki en yüksek değer olan 24 saniye çıkması cevap yüzey analizlerinin sonuçlarında da değerlendirilen ve beklenen bir durumdur. Sabit kalıp sıcaklığı ise seçilen seviyelerin en düşüğü olan 15°C'de optimum sonucu vermiştir. Bu durum, seçilen cam elyaf ve köpük ajan takviyeli hammadde ile üretilen şasi parçasının çarpılması için düşük sıcaklıkların daha az çarpılmaya sebep olacağını göstermiştir.
- Sonlu elemanlar akış analizi ile yapılan enjeksiyon proses denemeleri sonrası elde edilen soğuk çarpılma ölçüm değerlerinin bir miktar farklı çıkmasının birkaç nedeni vardır. Bunlardan ilki ve en önemlisi; sanal ortamda verilen çarpılma değerlerinin parçanın çevrim süresi bittiğinde bir başka deyişle kalıptan ilk çıktığındaki çarpılma değeri olması, üretim bandında ise kalite çarpılma ölçümleri için parçanın tamamen çekmesinin beklenmesidir. Sıcak ölçüm değerleri ise sonlu elemanlar akış analizi sonuçlarına yakın çıkmıştır. İkinci neden, köpürtücü ajan katkılı malzeme analizlerinin doğruluk oranının standart malzemelerin analizlerin doğruluk oranına göre düşük olmasıdır. Üçüncü neden; sanal analizlerde soğutucu akışkan sıcaklığı ve debisi gibi değerlerin analiz boyunca sürekli aynı kalacak şekilde mükemmel şartlara göre analiz yapılırken enjeksiyon denemelerinde kullanılan şebeke suyundaki muhtemel dengesizliklerin kullanılan şartlandırıcılara rağmen küçük değişkenlikler göstermesidir. Dördüncü neden, kullanılan hammadde içinde cam elyaf ve köpürtücü ajan dışında başka küçük katkıların bulunma ihtimalinin olması fakat katkıların içeriği bilinmediği için sonlu elemanlar akış analizinde etkisinin görülememesidir.

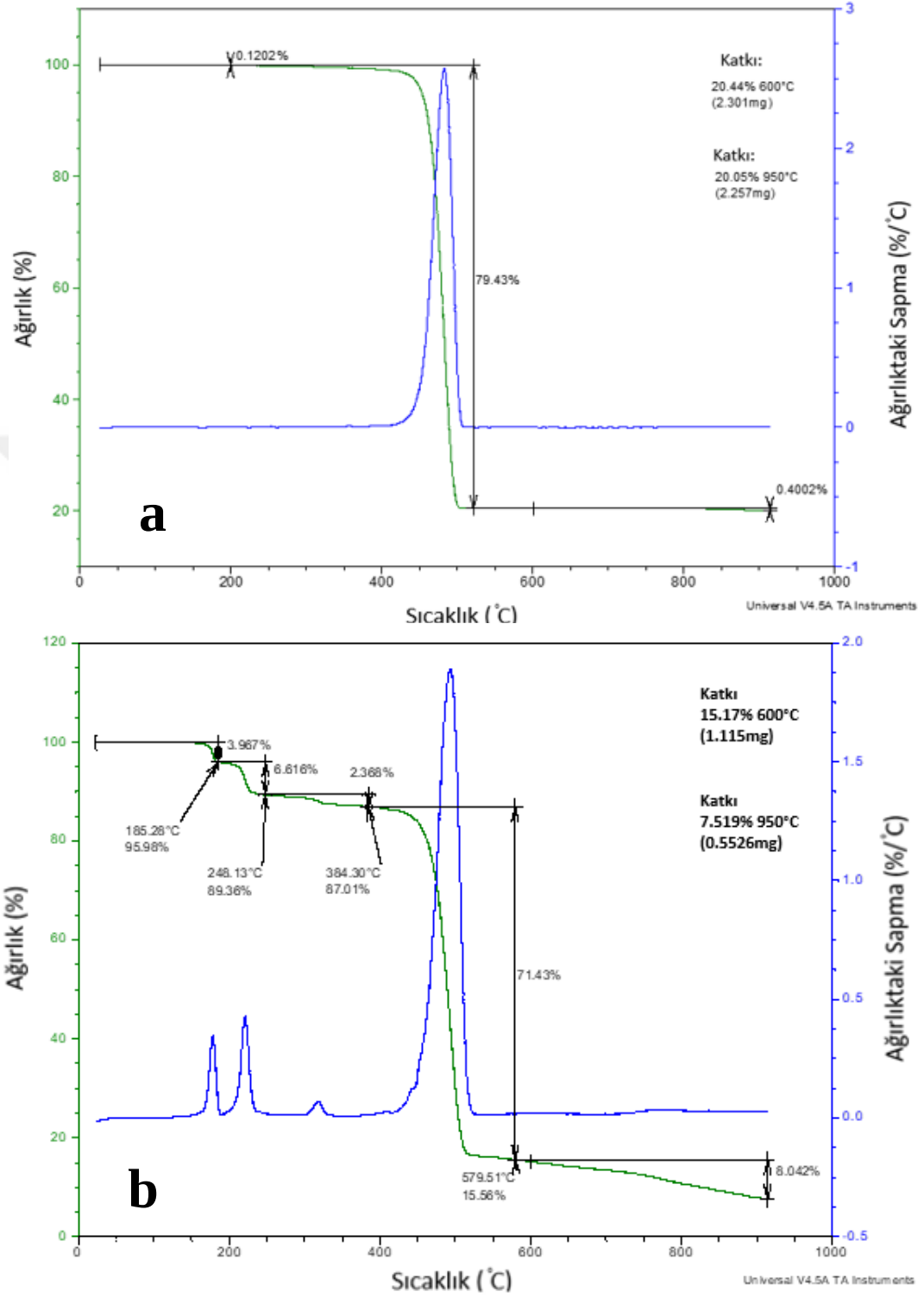
- Mevcut prosesle y-ekseninde yaklaşık 5,5 mm'lik bir çarpılma ile üretilen klima şasi parçasının üst tolerans olan 3,5 mm'ye indirilmesine çalışılmıştır. Yapılan enjeksiyon kalıplama denemeleri sonrası ölçülen numunelerin çarpılmasının 2,4-2,8 mm aralığında olduğu gözlemlenmiştir.
- Çarpılmanın azaltılmasının yanı sıra bu tezin bir diğer amacı olan çevrim süresinin azaltılmasına da soğutma süresinin 4 saniye azaltılması ile ulaşılmıştır. Mevcut durumda 47 saniyede üretilen şasi parçası kurulan yeni proses ile 43 saniyede üretilmeye başlanmıştır. Normal şartlarda, çarpılmanın ve soğutma süresini düşürerek çevrim süresinin, eş zamanlı iyileştirilmesi sık çalışılan bir durum olmamakla beraber aksine birbirleri ile ters orantılı parametrelerdir. Fakat bu tezde her iki değerin optimum çalışacağı prosesin bulunabileceği gösterilmiştir.
- Çevrim süresinde yapılan 4 saniyelik iyileşme enjeksiyon makinesinin çalışma masrafları ve üretim miktarı da düşünüldüğünde yaklaşık %8,5 kazanç sağlanmıştır. Ayrıca; çarpılma üzerinde yapılan iyileştirme ile üretim bandı üzerinde yeniden yapılmak zorunda kalınan yıllık ortalama adedi 1000 adedi bulan yeniden işleme maliyeti de ortadan kalkmıştır.
- Çalışma sonucunda, başlangıçta amaçlanan çarpılma miktarını 3,5 mm'nin altına indirirken aynı zamanda çevrim süresini azaltacak optimum proses parametrelerini belirlemek hedeflerine ulaşılmıştır. Çarpılma miktarında %53, çevrim süresinde ise %8,5 iyileşme sağlanmıştır.
- Bu çalışma kapsamında elde edilen sonuçlar ile gelecek çalışmalar için standart dışı ticari polimer malzemeler için çevrim süresi ve parça kalitesi iyileştirme çalışmalarının olabileceği, malzemenin ısı, akış karakterinin belirlenmesinden sonra yapılacak olan sonlu elemanlar akış analizi ile süreç iyileştirmelerin yapılabileceği görülmüştür. Çarpılma üzerine yapılacak gelecek çalışmalarda, soğutma süresi ve kalıp soğutma sıcaklıklarının yanı sıra çarpılma üzerinde etkili olabilecek ergiyik sıcaklığı da eklenerek optimum proses çalışmaları yapılabilir. Bu çalışmada sadece çarpılma üzerinde durulmuştur, kaynak izi gibi akış özellikleri ile doğrudan ilişkili olan parça hataları da gelecek çalışmalar da incelenebilecektir.

### A.1 Diferansiyel Taramalı Kalorimetre (DSC) Analizi Isıtma ve Soğutma Diyagramı



Şekil A.1 Malzemenin DSC eğrisi

## A.2 Termogravimetrik (TGA) Analiz Diyagramı

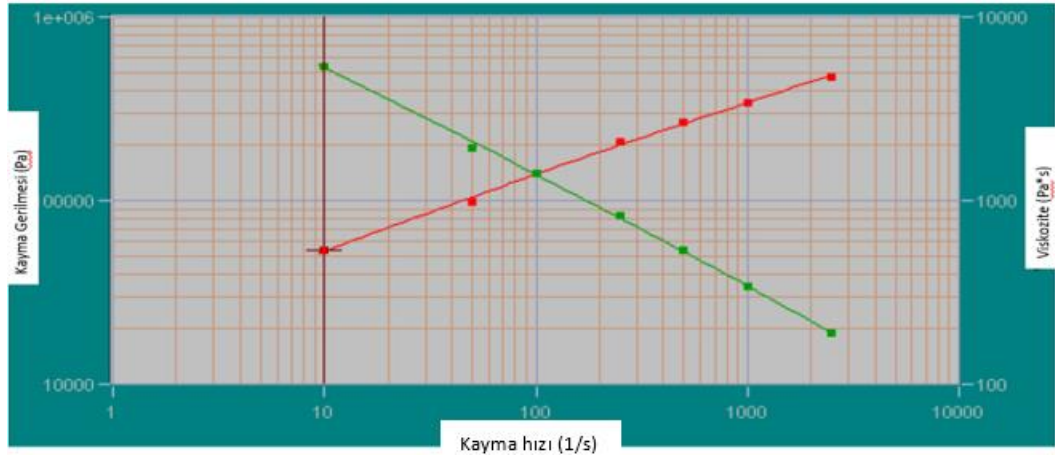


**Şekil A.2** TGA Sıcaklık-Ağırlık grafiği a) Polipropilenin TGA eğrisi b) Köpük ajanlı polipropilenin TGA eğrisi

### A.3 Kapiler Reometri Analizi Sonuçları

**Tablo A.1** Kapiler reometre sonuçları – 190°C

| Deney | Basınç (Mpa) | Hız (mm/s) | Kayma hızı | Kayma gerilmesi | Viskozite |
|-------|--------------|------------|------------|-----------------|-----------|
| 1     | 4,332        | 0,00566    | 10         | 54,150          | 5,415.00  |
| 2     | 7,808        | 0,02778    | 50         | 97,600          | 1,952.00  |
| 3     | 11,183       | 0,06666    | 100        | 139,787         | 1,397.87  |
| 4     | 16,676       | 0,13889    | 250        | 208,437         | 833.75    |
| 5     | 21,410       | 0,27778    | 500        | 267,625         | 535.25    |
| 6     | 27,366       | 0,55556    | 1000       | 341,937         | 341.94    |
| 7     | 37,732       | 1,38889    | 2500       | 471,650         | 188.66    |

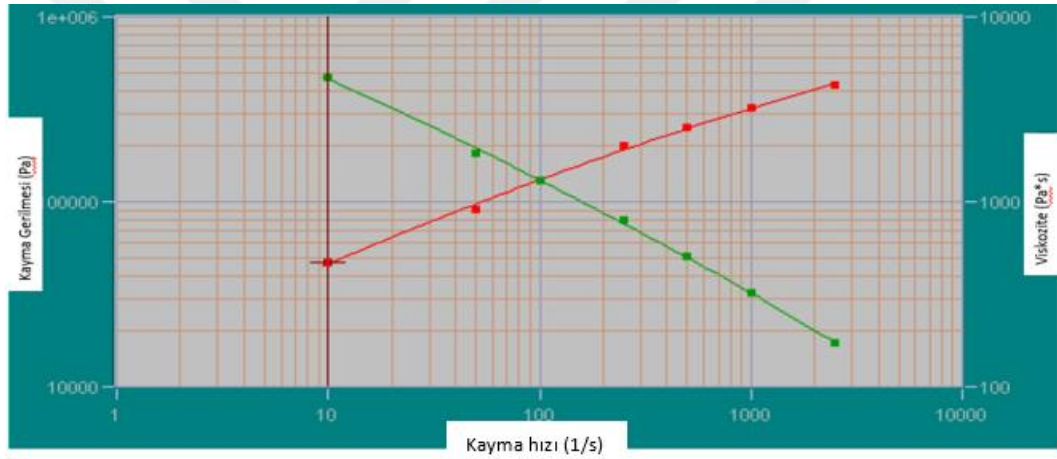


**Şekil A.3** Kayma gerilmesi, kayma hızı ve viskozite diyagramı – 190°C



**Tablo A.2** Kapiler reometre sonuçları – 200°C

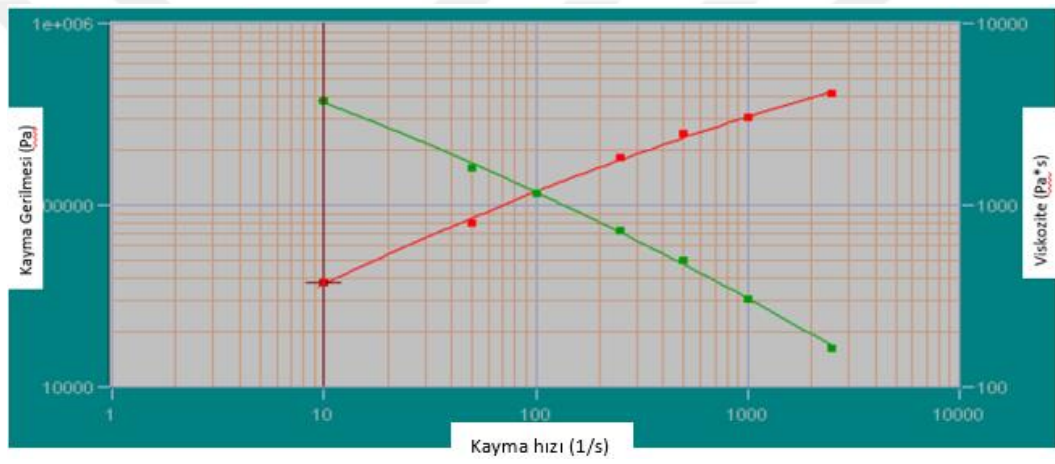
| Deney | Basınç (Mpa) | Hız (mm/s) | Kayma hızı | Kayma gerilmesi | Viskozite |
|-------|--------------|------------|------------|-----------------|-----------|
| 1     | 3,785        | 0,00566    | 10         | 47,313          | 4,731.25  |
| 2     | 7,318        | 0,02778    | 50         | 91,475          | 1,829.50  |
| 3     | 10,397       | 0,06666    | 100        | 129,963         | 1,299.62  |
| 4     | 16,000       | 0,13889    | 250        | 200,000         | 800.00    |
| 5     | 20,340       | 0,27778    | 500        | 254,250         | 508.50    |
| 6     | 25,539       | 0,55556    | 1000       | 319,237         | 319.24    |
| 7     | 34,321       | 1,38889    | 2500       | 429,012         | 171.61    |



**Şekil A.4** Kayma gerilmesi, kayma hızı ve viskozite diyagramı – 200°C

**Tablo A.3** Kapiler reometre sonuçları – 205°C

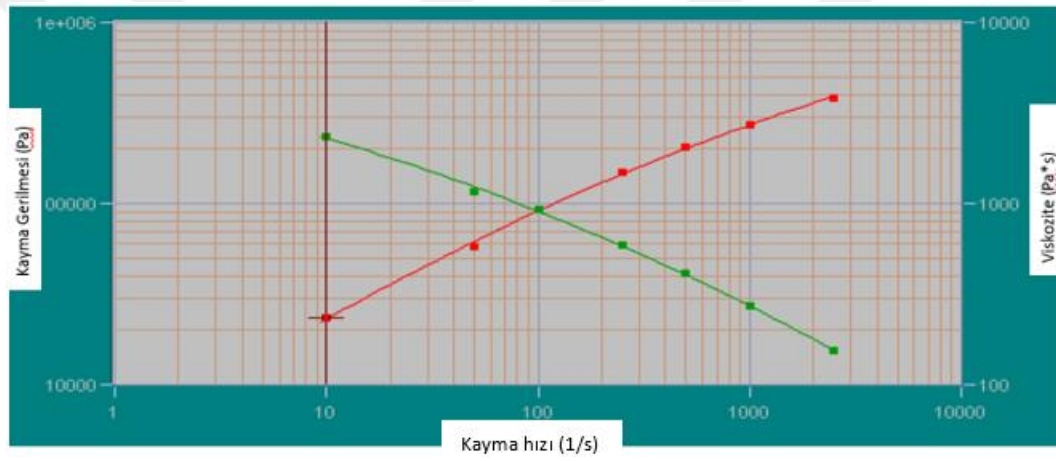
| Deney | Basınç (Mpa) | Hız (mm/s) | Kayma hızı | Kayma gerilmesi | Viskozite |
|-------|--------------|------------|------------|-----------------|-----------|
| 1     | 3,025        | 0,00566    | 10         | 37,813          | 3,781.25  |
| 2     | 6,404        | 0,02778    | 50         | 80,050          | 1,601.00  |
| 3     | 9,328        | 0,06666    | 100        | 116,600         | 1,166.00  |
| 4     | 14,522       | 0,13889    | 250        | 181,525         | 726.10    |
| 5     | 19,766       | 0,27778    | 500        | 247,075         | 494.15    |
| 6     | 24,506       | 0,55556    | 1000       | 306,325         | 306.32    |
| 7     | 32,927       | 1,38889    | 2500       | 411,587         | 164.63    |



**Şekil A.5** Kayma gerilmesi, kayma hızı ve viskozite diyagramı – 205°C

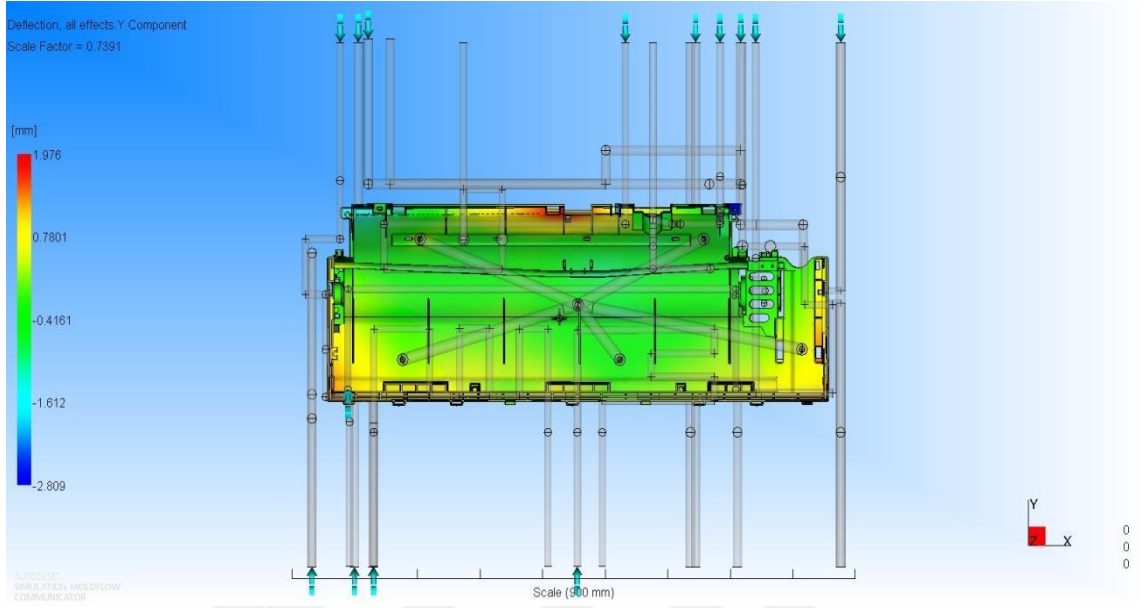
**Tablo A.4** Kapiler reometre sonuçları – 215°C

| Deney | Basınç (Mpa) | Hız (mm/s) | Kayma hızı | Kayma gerilmesi | Viskozite |
|-------|--------------|------------|------------|-----------------|-----------|
| 1     | 1,874        | 0,00566    | 10         | 23,425          | 2,342.50  |
| 2     | 4,610        | 0,02778    | 50         | 57,625          | 1,152.50  |
| 3     | 7,397        | 0,06666    | 100        | 92,462          | 924.62    |
| 4     | 11,855       | 0,13889    | 250        | 148,187         | 592.75    |
| 5     | 16,466       | 0,27778    | 500        | 205,825         | 411.65    |
| 6     | 21,785       | 0,55556    | 1000       | 272,312         | 272.31    |
| 7     | 30,601       | 1,38889    | 2500       | 382,512         | 153.01    |

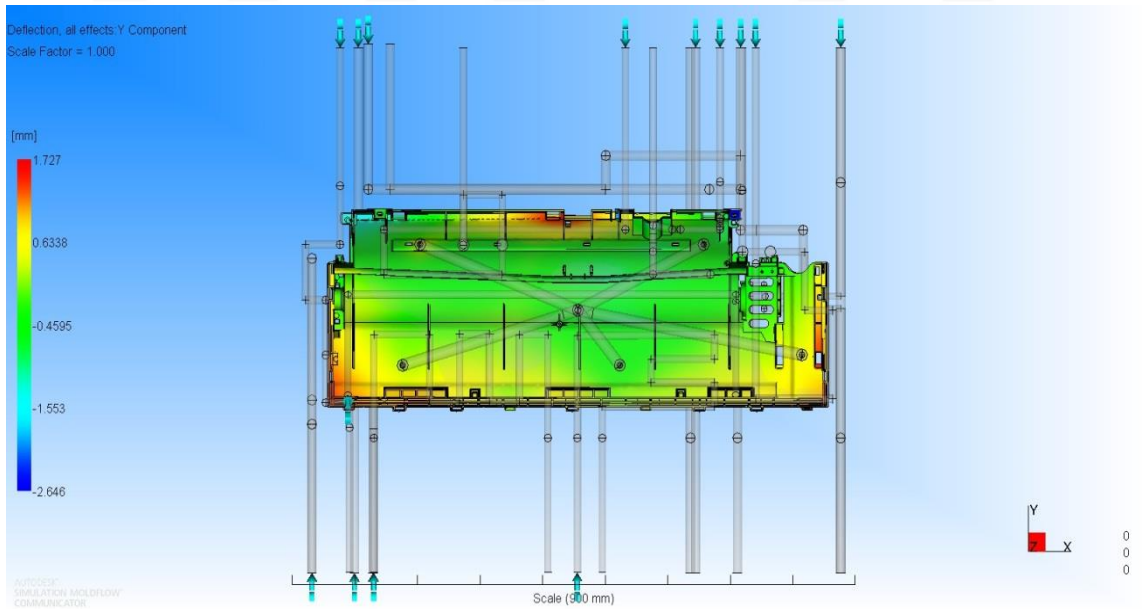


**Şekil A.6** Kayma gerilmesi, kayma hızı ve viskozite diyagramı – 215°C

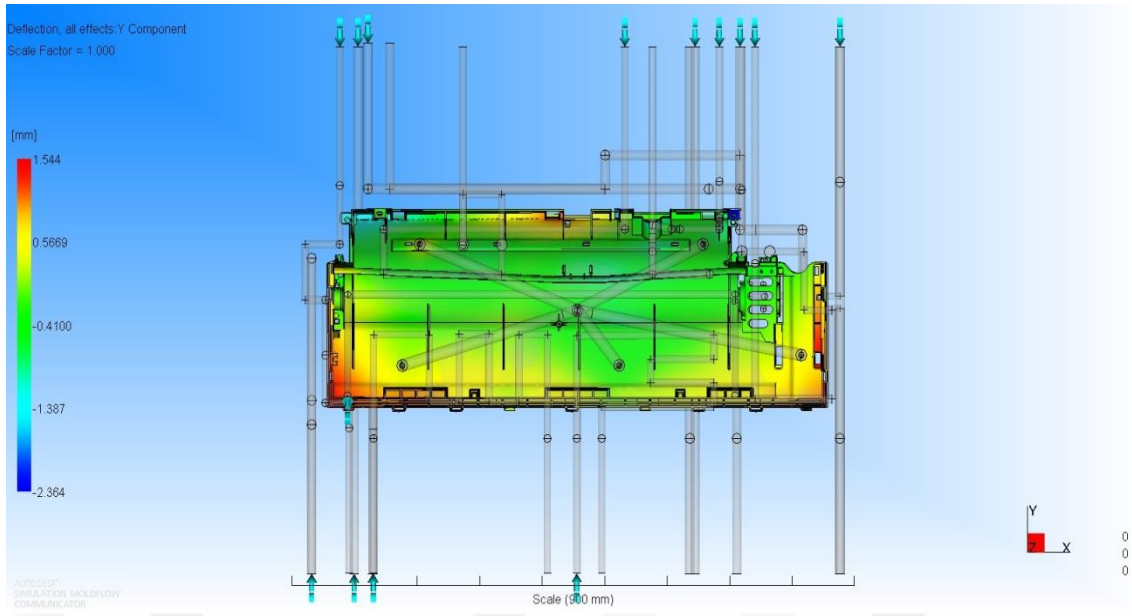
#### A.4 Cevap Yüzey Deneysel Tasarım Matrisine Göre Moldflow Analizi Sonuçları



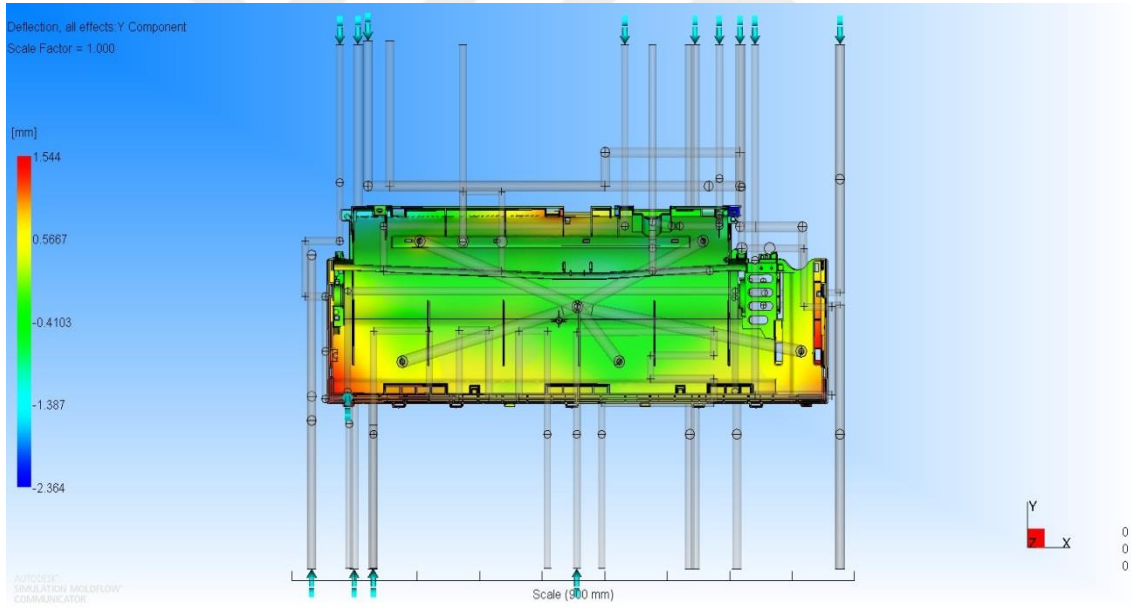
Şekil A.7 Moldflow analizi çarpılma sonucu deney no- 1



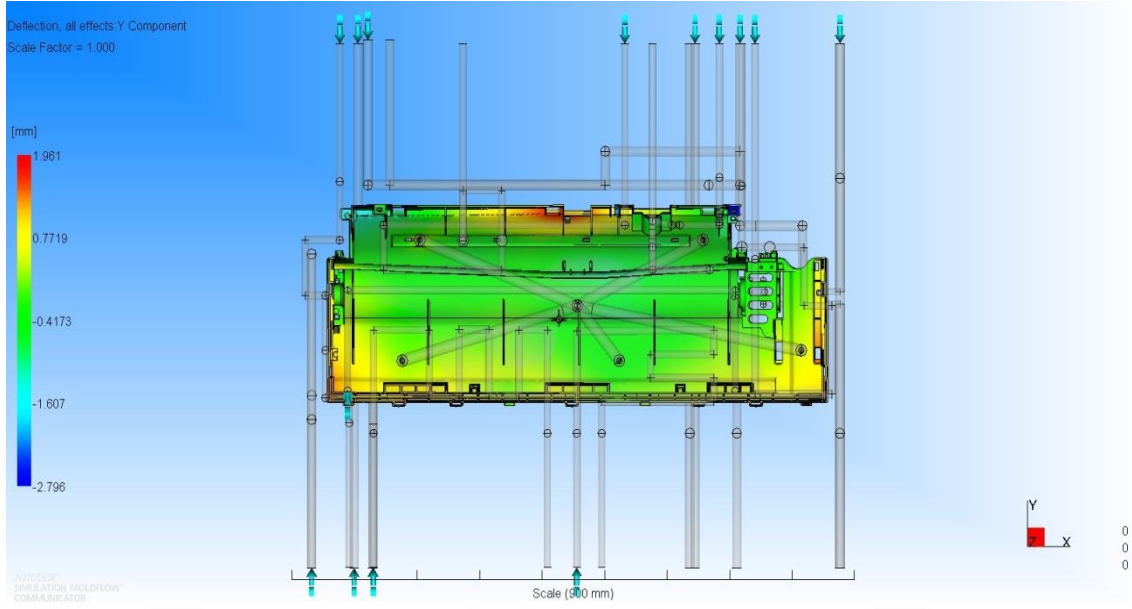
Şekil A.8 Moldflow analizi çarpılma sonucu deney no- 2



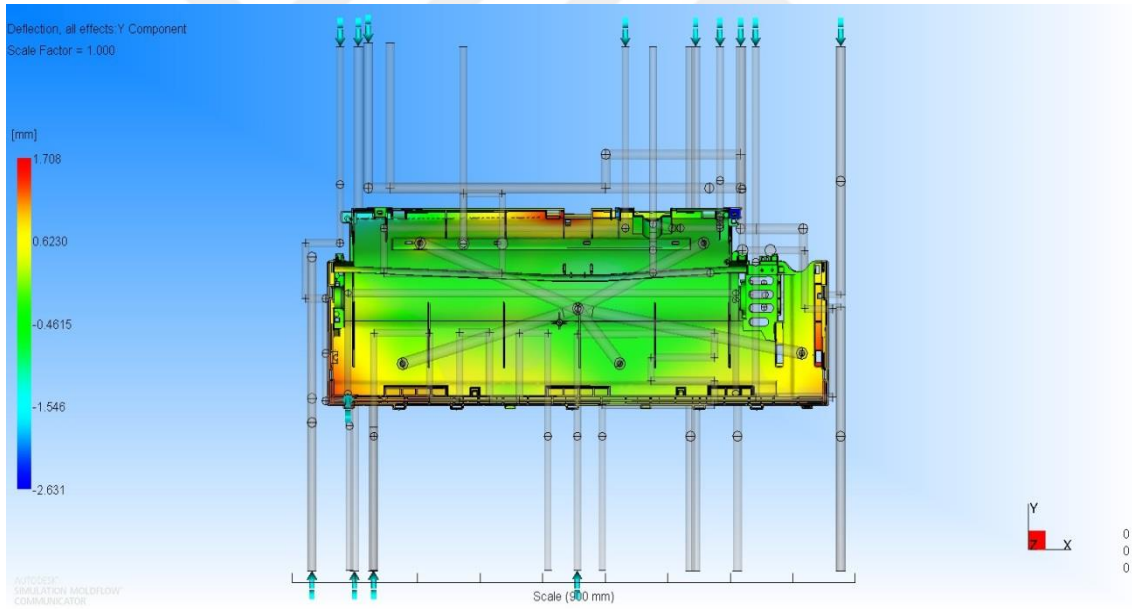
**Şekil A.9** Moldflow analizi çarpılma sonucu deney no- 3



**Şekil A.10** Moldflow analizi çarpılma sonucu deney no- 4

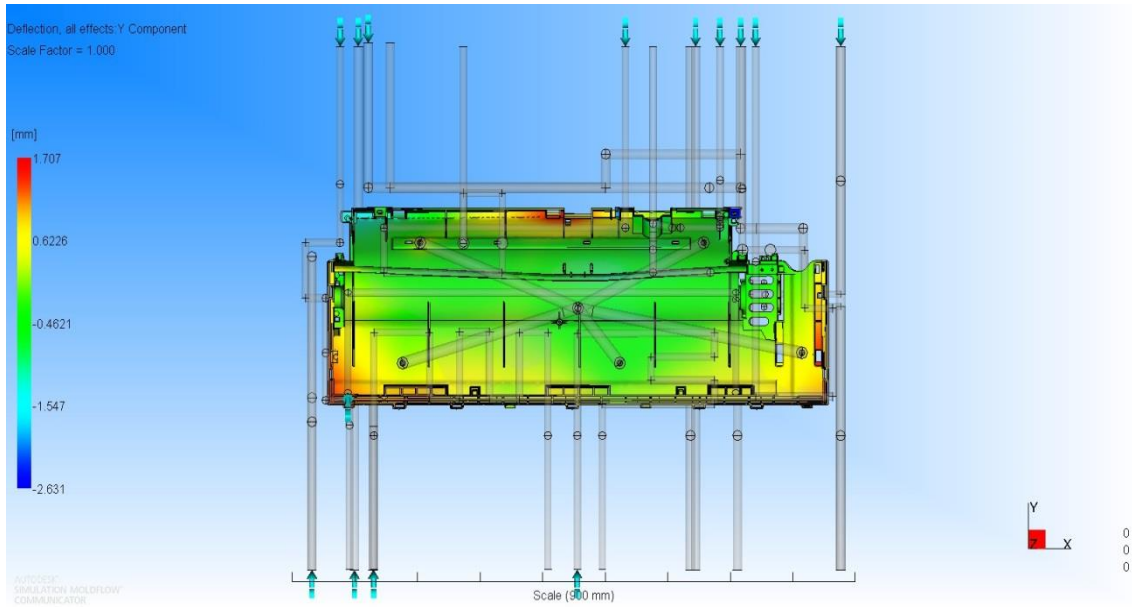


**Şekil A.11** Moldflow analizi çarpılma sonucu deney no- 5

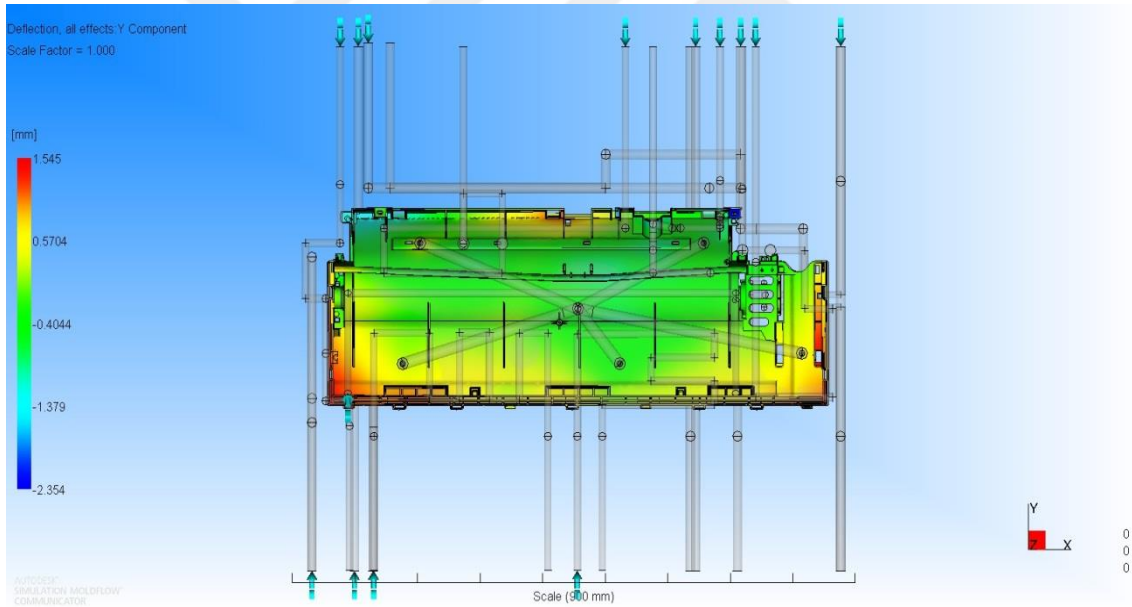


**Şekil A.12** Moldflow analizi çarpılma sonucu deney no- 6

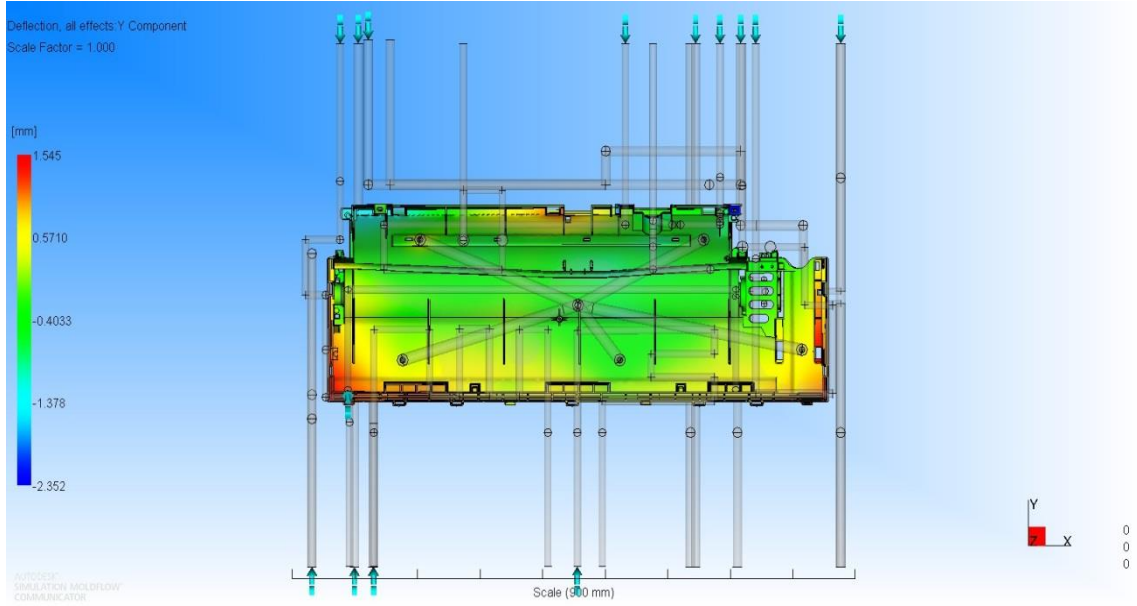




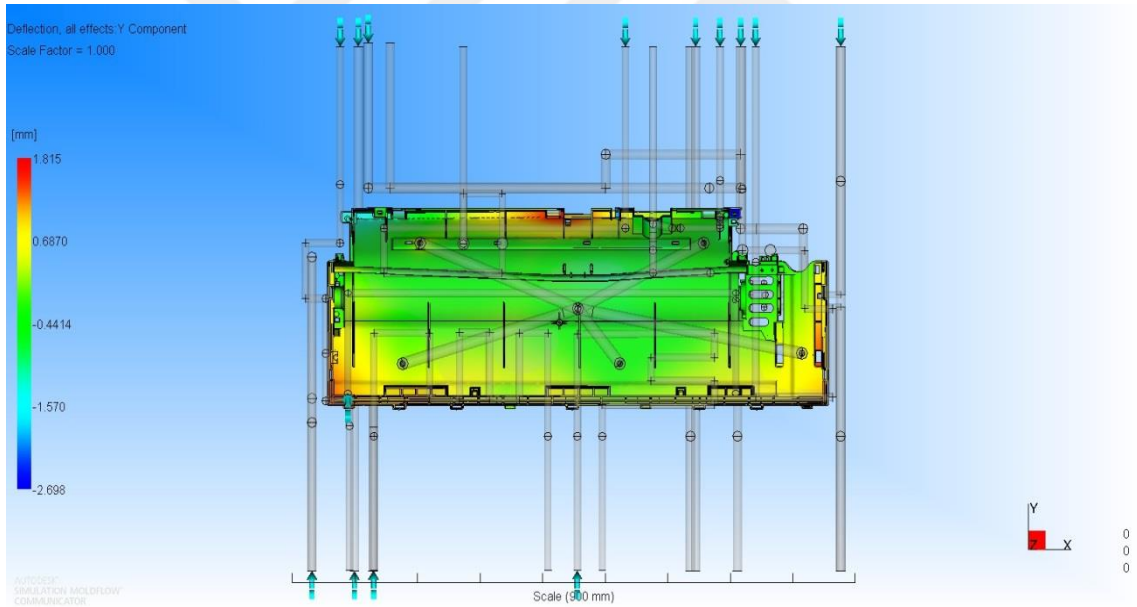
**Şekil A.13** Moldflow analizi çarpılma sonucu deney no- 7



**Şekil A.14** Moldflow analizi çarpılma sonucu deney no- 8

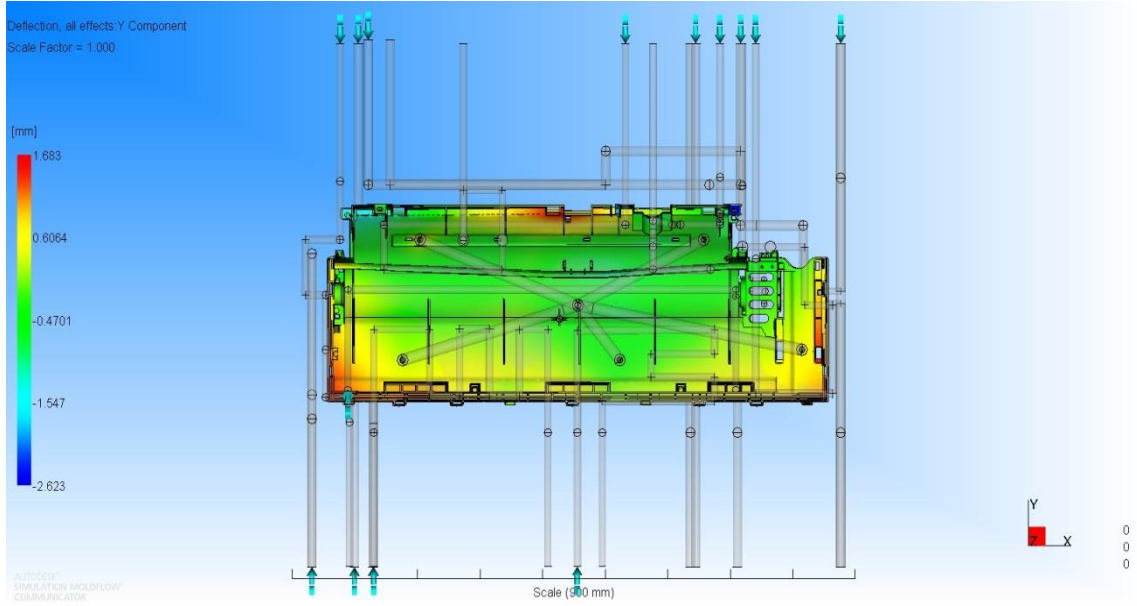


**Şekil A.15** Moldflow analizi çarpılma sonucu deney no- 9

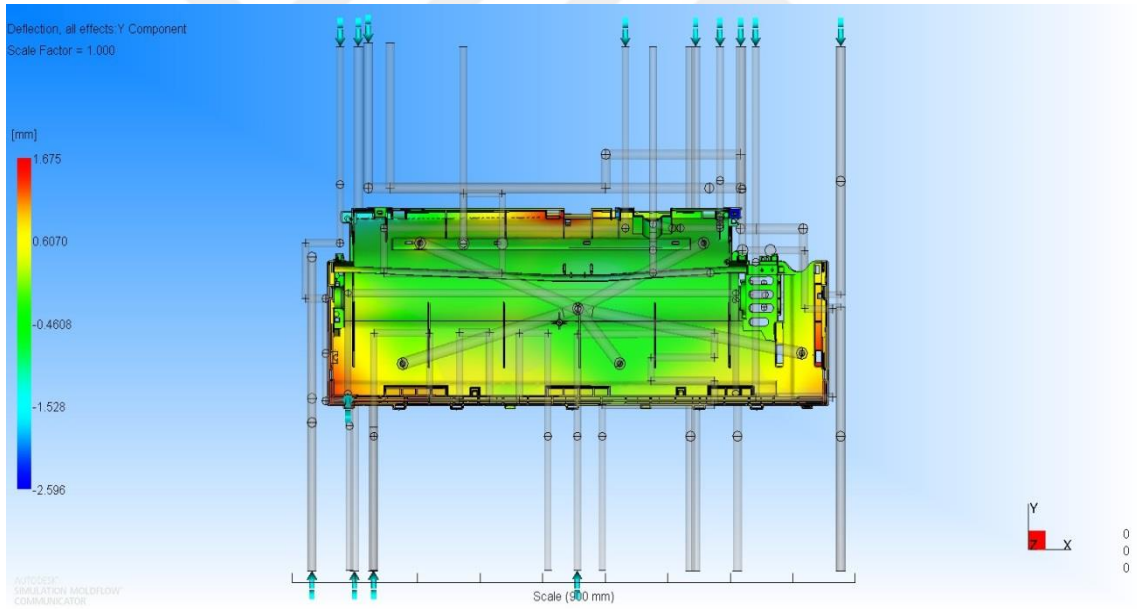


**Şekil A.16** Moldflow analizi çarpılma sonucu deney no- 10

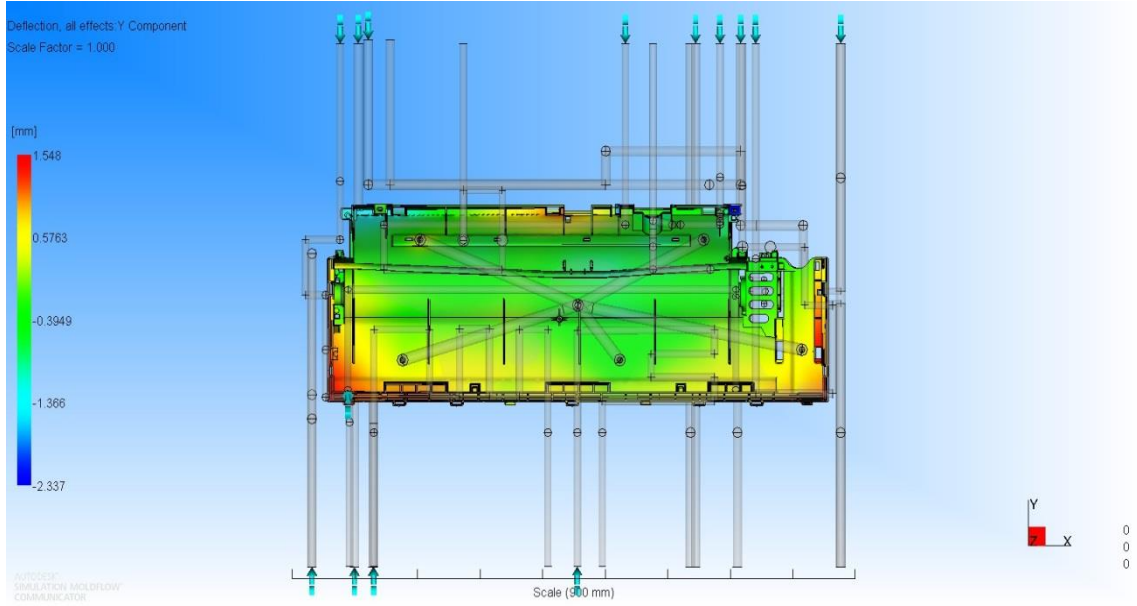




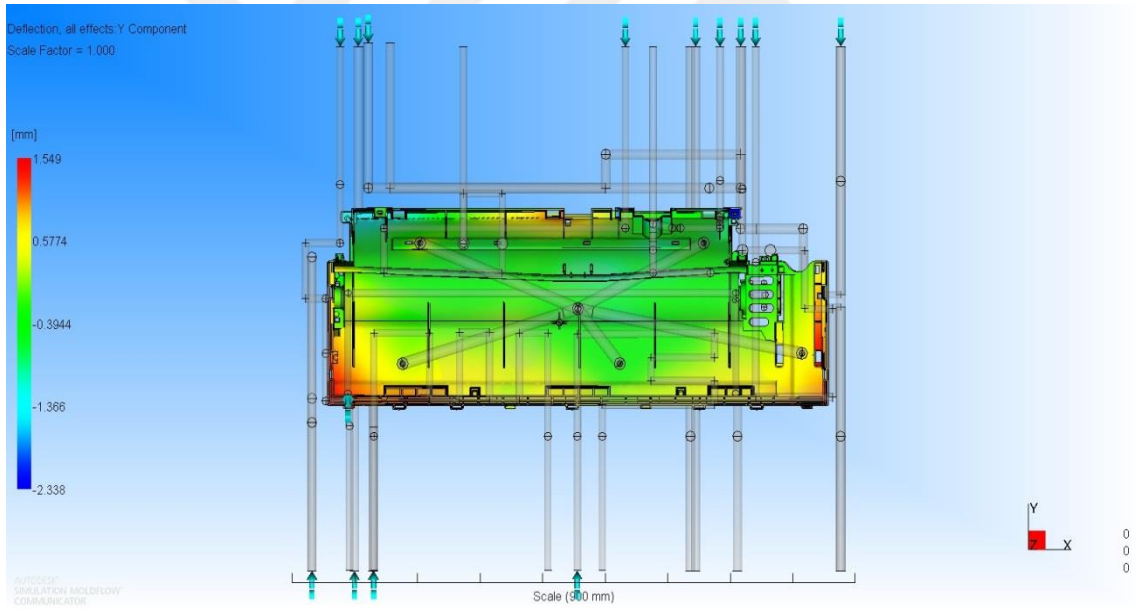
**Şekil A.17** Moldflow analizi çarpılma sonucu deney no- 11



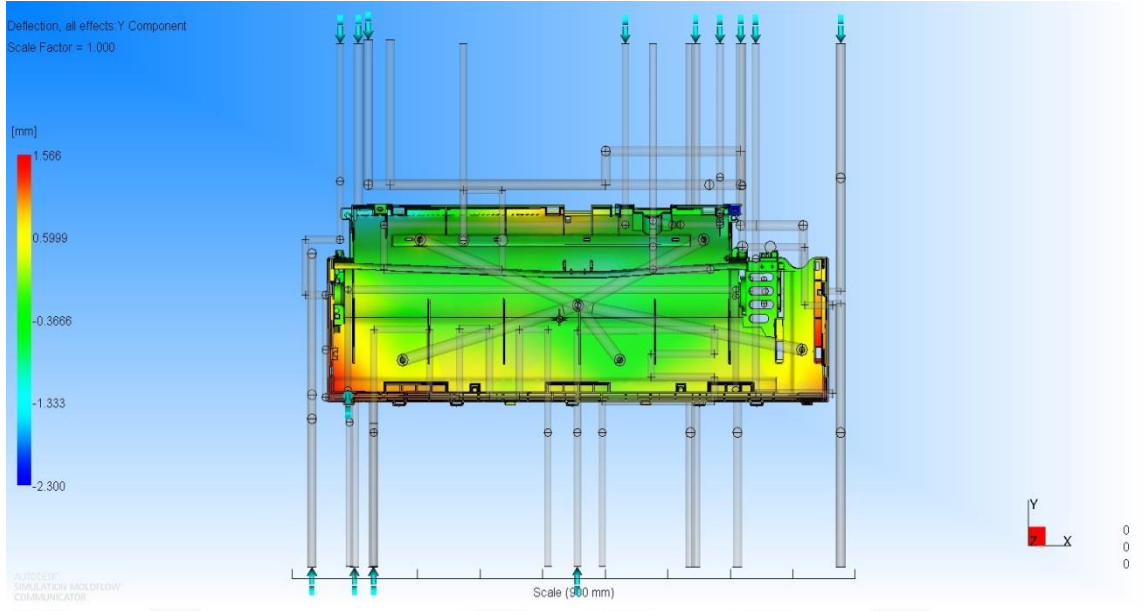
**Şekil A.18** Moldflow analizi çarpılma sonucu deney no- 12



**Şekil A.19** Moldflow analizi çarpılma sonucu deney no- 13



**Şekil A.20** Moldflow analizi çarpılma sonucu deney no- 14



**Şekil A.21** Moldflow analizi çarpılma sonucu deney no- 15

- [1] B. Özçelik and T. Erzurumlu, "Comparison of the warpage optimization in the plastic injection molding using ANOVA, neural network model and genetic algorithm," *Journal of Materials Processing Technology* 171, pp. 437-445, 2006.
- [2] H. Öktem, T. Erzurumlu and I. Uzman, "Application of Taguchi optimization technique in determining plastic injection molding process parameters for a thin-shell part," *Materials and Design* 28, pp. 1271-1278, 2007.
- [3] S.H. Tang, Y.J. Tan, S.M. Sapuan, S. Sulaiman, N. Ismail and R. Samin, "The use of Taguchi method in the design of plastic injection Mould for reducing warpage," *Journal of Materials Processing Technology* 182 pp. 418-426, 2007.
- [4] B. Ozcelik and I. Sonat, "Warpage and structural analysis of thin shell plastic in the plastic injection molding" *Materials and Design* 30, pp. 367-375, 2009.
- [5] J.G. Kovács and B. Sikló, "Test method development for deformation analysis of injection moulded plastic parts," *Polymer Testing* 30, pp. 543-547, 2011.
- [6] S. Kitayama and S. Natsume, "Multi-objective optimization of volume shrinkage and clamping force for plastic injection molding via sequential approximate optimization" *Simulation Modelling Practice and Theory* 48, pp. 35-44, 2014.
- [7] E. Oliaei, B. S. Heidari, S. M. Davachi, M. Bahrami, S. Davoodi, I. Hejazi and J. Seyfi, "Warpage and Shrinkage Optimization of Injection-Molded Plastic Spoon Parts for Biodegradable Polymers Using Taguchi, ANOVA and Artificial Neural Network Methods," *Journal of Materials Science & Technology* 32, pp. 710-720, 2016.
- [8] D. Masato, J. Rathore, M. Sorgato, S. Carmignato and G. Lucchetta, "Analysis of the shrinkage of injection-molded fiber-reinforced thin-wall parts," *Materials and Design* 132, pp. 496-504, 2017.
- [9] M.H. Othman, S. Hasan, S.Z. Khamis, M.H.I Ibrahim and S.Y. M.Amin, "Optimisation of Injection Moulding Parameter towards Shrinkage and Warpage for Polypropylene-Nanoclay-Gigantochloa Scortechinii Nanocomposites," *Procedia Engineering* 184, pp. 673 - 680, 2017.
- [10] A. Çavdar, "Plastik enjeksiyon kalıpcılığında çarpılma ve iklimik

koşullarda mekanik deformasyon önleme” 2017.

- [11] M.C. Song, Z. Liu, M.J. Wang, T.M. Yu and D.Y. Zhao, “Research on effects of injection process parameters on the molding process for ultra-thin wall plastic parts,” *Journal of Materials Processing Technology* 187–188, pp. 668–671, 2007.
- [12] Ö.S. Kamber, “Plastik enjeksiyon kalıplarında basınç vesıcaklık parametrelerinin ürün kalitesine etkileri ve taguchi yöntemi ile optimizasyonu,” 2008.
- [13] H. Unal and S. H. Yetgin, “Polipropilen Köpük Malzemenin Mekanik Özelliklerine ve Hücre Morfolojisine Proses Şartlarının Etkisinin İncelenmesi” 6th International Advanced Technologies Symposium (IATS’11), 2011.
- [14] B. Ozcelik, E. Kuram and M. M. Topal, “Investigation the effects of obstacle geometries and injection molding parameters on weld line strength using experimental and finite element methods in plastic injection molding,” *International Communications in Heat and Mass Transfer* 39, pp. 275–281, 2012.
- [15] Y. Wang, J. Kim and J. Song, “Optimization of plastic injection molding process parameters for manufacturing a brake booster valve body,” *Materials and Design* 56, pp. 313–317, 2014.
- [16] S. Zhang, R. Dubay and M. Charest, “A principal component analysis model-based predictive controller for controlling part warpage in plastic injection molding,” *Expert Systems with Applications* 42, pp. 2919–2927, 2015.
- [17] S. Zhang, R. Dubay and M. Charest, “A principal component analysis model-based predictive controller for controlling part warpage in plastic injection molding,” *Expert Systems with Applications* 42, pp. 2919–2927, 2015.
- [18] O. Şahin, “Tersine mühendislik yöntemi ile plastik enjeksiyon kalıp tasarımı ve kalıp dolum parametrelerinin incelenmesi” 2018.
- [19] İ. Cengiz, “Polietilen ve polipropilen esaslı ürünlerin, plastik enjeksiyon işlem parametreleri ve termodinamik yöntemlerle ısı yayılımının incelenmesi” 2012.
- [20] F. Ceritbinmez, “Plastik enjeksiyon kalıp tasarımı ve üretilen parçalarda çapaklanmaya etki eden parametrelerin incelenmesi” 2014.
- [21] MEGEB “Plastik Teknolojisi” 2012.
- [22] Kamer Kalıp; <http://kamerkalip.com.tr/kalip>

- [23] M.Sayındı “Gaz enjeksiyon teknolojisi, MMO Yayınları, [https://www.mmo.org.tr/sites/default/files/6d767d2f8ed5d21\\_ek.pdf](https://www.mmo.org.tr/sites/default/files/6d767d2f8ed5d21_ek.pdf)
- [24] Polmak Plastik; <https://www.polmakplastik.com/tr/urundetay-azot-ve-co2-gaz-enjeksiyon-sistemleri-su-ile-enjeksiyon--210.html>
- [25] B. Girginer, A. Küçükoğlu, İ. Mutlu, A. Yıldırım, T. Usta, C. Yaparel “Mikrohücrel Plastik Enjeksiyon Kalıplama Yöntemine Uygun Tasarım Ve Proses Optimizasyonu İle Araç Motor Alt Muhafaza Parçasının Hafifletilmesi”, OTEKON’16 8. Otomotiv Teknolojileri Kongresi, 2016.
- [26] E Yapıcıoğlu, “Ko Enjeksiyon - Birden Çok Bileşenli Enjeksiyon”, TurkCADCAM.net Portalı, 2007.
- [27] M.S. Kafalı, “Bilgisayar destekli plastik enjeksiyon kalıp tasarımı,” 2011.
- [28] M. Altan, M.E. Yurci, “Plastik Enjeksiyonla İmal Edilmiş Polistiren Parçalarda Kalıntı Gerilmelerin Araştırılması” Mühendis ve Makina - Cilt : 49 - Sayı: 577, 2007.

İletişim Bilgisi: ugurdemirci87@gmail.com

### Konferans Bildirileri

1. Demirci, U. ve Altan, M., (2018), "Reduction of cycle time and warpage in injection molding of thin walled polypropylene based product", Proceedings book of fourth international conference on advances in mechanical engineering: ICAME 2018, 19-21 Aralık, İstanbul.

