KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

POLİMER BİLİMİ VE TEKNOLOJİSİ ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

KONVANSİYONEL PLASTİK ENJEKSİYON İLE FARKLI KİMYASAL AJAN KATKILI KÖPÜRTME PROSESLERİNİN KARŞILAŞTIRMALI AKIŞ ANALİZİ VE PARAMETRİK DENEY TASARIMI

BARIŞ BOZKURT

KOCAELİ 2020

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

POLİMER BİLİMİ VE TEKNOLOJİSİ

ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

KONVANSİYONEL PLASTİK ENJEKSİYON İLE FARKLI KİMYASAL AJAN KATKILI KÖPÜRTME PROSESLERİNİN KARŞILAŞTIRMALI AKIŞ ANALİZİ VE PARAMETRİK DENEY TASARIMI

BARIŞ BOZKURT

Doç.Dr. Hasan ÖKTEM		
Danışman,	**Kocaeli Üniversitesi**	**.....**
Doç.Dr. Olcay MERT		
Jüri Üyesi,	**Kocaeli Üniversitesi**	**.....**
Prof.Dr. İlyas UYGUR		
Jüri Üyesi,	**Düzce Üniversitesi**	**.....**

Tezin Savunulduğu Tarih: 22.07.2020

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Bu tez çalışması, konvansiyonel plastik enjeksiyon prosesi ile kimyasal köpürtme ajanlı mikro hücresel enjeksiyon prosesi akış analizi sonuçları ve oluşan üretim aşamalarının karşılaştırılmalı incelenmesi amacıyla yapılmıştır.

Tez çalışmamda hiçbir zaman desteğini esirgemeyen ve çalışmalarıma yön veren danışmanım Doç. Dr. Hasan Öktem'e, proses ve deney çalışmalarımda yardımcı olan Mr.Martin Jacobi ve Mr. Yılmaz Yığcıoğlu'na, simülasyon çalışmalarım için Mr.Hakan Aktaş, Mr. Sven Theissen, Mr. Michael Gossen'e çalışmalarım için her türlü imkânı ve olanakları ile mücadele eden, bir an olsun desteklerini esirgemeyen eşim Şeniz Bozkurt'a teşekkürü borç bilirim.

Temmuz – 2020 Barış BOZKURT

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR i
İÇİNDEKİLER ii
ŞEKİLLER DİZİNİ iv
TABLOLAR DİZİNİ vii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ viii
ÖZET x
ABSTRACT xi
GİRİŞ 1
1. GENEL BİLGİLER 4
1.1. Plastikler 4
1.1.1. Termoplastikler 5
1.1.1.1. Amorf yapı 6
1.1.1.2. Yarı kristalin yapı 6
1.1.2. Termosetler 7
1.1.3. Elastomerler 7
1.2. Plastik Enjeksiyon Kalıplama 7
1.2.1. Plastik enjeksiyon makinesi 7
1.2.1.1. Besleme ünitesi 8
1.2.1.2. Enjeksiyon ünitesi 8
1.2.1.3. Tahrik ünitesi 9
1.2.1.4. Kalıp ünitesi 9
1.2.1.5. Kalıp kilitleme ünitesi 9
1.2.1.6. Kontrol ünitesi 9
1.2.2. Plastik enjeksiyon prosesi 9
1.2.3. Plastik enjeksiyon kalıbı 11
1.2.3.1. Soğuk yolluk sistemleri 13
1.2.3.2. Sıcak yolluk sistemleri 13
1.2.3.3. Soğutma kanalları 15
1.3. Köpürtme Enjeksiyon Kalıplama 15
1.3.1. Kimyasal köpürtme ajanlı plastik enjeksiyon kalıplama 22
1.3.1.1. Kimyasal köpürtme ajanı tasarım önerileri 26
1.3.1.2. Kimyasal köpürtme ajanı proses önerileri 27
1.4. Akış Analizi: Moldflow 29
1.5. Yardımcı Ekipmanlar 30
1.5.1. Sıcak yolluk kontrol üniteleri 30
1.5.2. Kurutucu ve dozajlayıcı sistemler 30
1.5.3. Kalıp şartlandırıcıları 30
2. LİTERATÜR TARAMASI 31
2.1. Köpürtme Plastik Enjeksiyon Prosesi Çalışmaları 31
2.2. Plastik Enjeksiyon Akış Analizleri ve Deney Tasarımları 34
3. MALZEME VE YÖNTEM 36
3.1. Plastik Parça 36
3.2. Plastik Parçanın Katı Modeli 36

3.3. Plastik Parçanın Hammaddesi 37
3.4. Kimyasal Köpürtme Hammadde Bilgisi 39
3.4.1. TecoCell® H1 kimyasal köpürtme ajanı bilgisi 41
3.4.2. TecoCell® CS kimyasal köpürtme ajanı bilgisi 42
3.5. Plastik Parçanın Enjeksiyon Kalıbı 43
3.6. Moldflow Plastik Akış Analizi 46
3.6.1. Konvansiyonel moldflow analizi 46
3.6.1.1. Modelleme 46
3.6.1.2. Örme (Mesh) değerleri 48
3.6.1.3. Akış analizinde kullanılan hammadde bilgisi 48
3.6.1.4. Önerilen proses ayarları 49
3.6.1.5. Reolojik özellikler ve viskozite-kayma oranı ilişkisi 49
3.6.1.6. Basınç, sıcaklık ve özgül hacim ilişkisi 50
3.6.1.7. Mekanik özellikler 51
3.6.1.8. Akış analizi konvansiyonel proses parametreleri 52
3.6.2. Kimyasal köpürtme prosesi akış analizleri 55
3.6.2.1. Modelleme 55
3.6.2.2. Örme (Mesh) değerleri 55
3.6.2.3. Akış analizi ana polimer hammadde bilgisi 56
3.6.2.4. Kimyasal köpürtme hammadde bilgisi (TH) 56
3.6.2.5. Kimyasal köpürtme hammadde bilgisi (TCS) 56
3.6.2.6. Akış analizi kimyasal köpürtme proses parametreleri 56
3.7. Plastik Enjeksiyon Makinesi 61
3.8. Plastik Enjeksiyon Üretim Prosesi ve Deneysel Parametre Setleri 61
3.8.1. Konvansiyonel plastik enjeksiyon prosesi 64
3.8.1.1. Konvansiyonel plastik enjeksiyon deney tasarım seti 65
3.8.2. Kimyasal köpürtme enjeksiyon prosesi 66
3.8.2.1. Kimyasal köpürtme prosesi deney tasarım seti 67
4. BULGULAR VE TARTIŞMA 69
4.1. Akış Analizi Sonuçları ve Karşılaştırması 69
4.1.1. Konvansiyonel enjeksiyon akış analizi sonuçları (KP6) 69
4.1.2. Kimyasal köpürtme prosesi akış analizi sonuçları (TH6) 75
4.1.3. Kimyasal köpürtme prosesi akış analizi sonuçları (TCS6) 82
4.1.4. Karşılaştırmalı akış analiz sonuçları (KP6, TH6, TCS6) 88
4.2. Plastik Enjeksiyon Parametrik Deney Tasarım Seti Sonuçları 92
4.2.1. Konvansiyonel prosesin deney tasarım sonuçları (KP) 93
4.2.2. Kimyasal köpürtme prosesi deney tasarım sonuçları (TH) 100
4.2.3. Kimyasal köpürtme prosesi deney tasarım sonuçları (TCS) 108
4.2.4. Deney tasarım sonuçlarının karşılaştırılması (KP, TH, TCS) 116
4.3. Akış Analizi ve Üretim Sonuçlarının Karşılaştırılması 118
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER 120
KAYNAKLAR 122
KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER 128
ÖZGEÇMİŞ 129

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. Monomer-polimer şematize görüntüsü 5
Şekil 1.2. Amorf moleküler yapı 6
Şekil 1.3. Yarı kristalin yapı 6
Şekil 1.4. Enjeksiyon kalıplama makinesi 8
Şekil 1.5. Enjeksiyon ünitesi spesifikasyonları 8
Şekil 1.6. Enjeksiyon kalıplama çevrimi 10
Şekil 1.7. Çevrim süresinin dağılımı 11
Şekil 1.8. Polimer hammaddenin çevrimdeki aşamaları 11
Şekil 1.9. Enjeksiyon kalıbı fonksiyonlarının kırılımı 12
Şekil 1.10. Açık uçlu sıcak yolluk sistemi 14
Şekil 1.11. Valf pinli sıcak yolluk sistemi 14
Şekil 1.12. Soğutma kanal tasarımları 15
Şekil 1.13 Mucell (sol)-Tecocell (sağ) parça kesit görüntüsü 18
Şekil 1.14. Köpürtme enjeksiyon kalıplama yöntemleri 19
Şekil 1.15. Köpürtme prosesinin fiziksel adımları 20
Şekil 1.16. Gaz çözünürlük diyagramı 21
Şekil 1.17.Çekirdekleşme fazları 21
Şekil 1.18. Baloncuk büyümesi 22
Şekil 1.19. Moldflow çarpılma analiz sonucu 29
Şekil 3.1. Deneysel parçanın görseli 36
Şekil 3.2. Deneysel parça katı modelinin üstten görünüşü 37
Şekil 3.3. Deneysel parça katı model alttan görünüşü 37
Şekil 3.4. Deneysel parça kalıbı dış görünüm 43
Şekil 3.5. 4 gözlü deneysel kalıbın iç görünümü 44
Şekil 3.6. Valf pinli sıcak yolluk sistemi 44
Şekil 3.7. Kalıp dişi ve erkek tarafı 45
Şekil 3.8. İticiler ve itici destek plakaları 45
Şekil 3.9. Kalıp içi soğutma kanalları 46
Şekil 3.10. Deneysel parçanın analiz modeli 47
Şekil 3.11. Analize hazır tam model 47
Şekil 3.12. Örme model değerleri 48
Şekil 3.13. Moldflow genel hammadde bilgisi 48
Şekil 3.14. Moldflow önerilen işlem ayarları 49
Şekil 3.15. Hammadde reolojik özellikleri ve viskozite-kayma oranı grafiği 50
Şekil 3.16. Hammadde basınç, sıcaklık ve özgül hacim grafiği 51
Şekil 3.17. Hammadde mekanik özellikleri 51
Şekil 3.18. Analiz tipi seçimi 52
Şekil 3.19. Konvansiyonel proses soğutma fazı ayarları 53
Şekil 3.20. Konvansiyonel proses dolum-tutma fazı ayarları 53
Şekil 3.21. Konvansiyonel proses dolum fazı parametreleri 53
Şekil 3.22. Konvansiyonel proses dolumdan tutmaya geçiş parametreleri 54
Şekil 3.23. Konvansiyonel proses tutma fazı parametreleri 54
Şekil 3.24. Konvansiyonel proses çarpılma fazı parametreleri 54

Şekil 3.25. Konvansiyonel proses çarpılma fazı parametreleri 55
Şekil 3.26. Analiz tipi seçimi 57
Şekil 3.27. Kimyasal köpürtme prosesi soğutma fazı ayarları 57
Şekil 3.28. Kimyasal köpürtme prosesi dolum-tutma fazı ayarları 58
Şekil 3.29. Kimyasal köpürtme prosesi dolum fazı ayarları 58
Şekil 3.30. Kimyasal köpürtme prosesi dolumdan tutmaya geçiş fazı ayarları 59
Şekil 3.31. Kimyasal köpürtme prosesi tutma fazı ayarları 59
Şekil 3.32. Kimyasal köpürtme ajanı parametreleri 59
Şekil 3.33. Köpürtme analiz tipi seçimi 60
Şekil 3.34. Köpürtme analiz model seçimi 60
Şekil 3.35. Köpürtücü gaz seçimi 60
Şekil 3.36. Köpürtücü gazın reaktiflik yüzdesi 61
Şekil 3.37. X yönü uzunluk-Y yönü genişlik ölçüsü 62
Şekil 3.38. Z yönü çarpılma ve et kalınlığı ölçüsü 62
Şekil 3.39. Ocak sıcaklıkları 64
Şekil 4.1. Zamana bağlı dolum profili (KP6) 69
Şekil 4.2. Ön akış sıcaklığı (KP6) 70
Şekil 4.3. Tutmaya geçiş basıncı (KP6) 70
Şekil 4.4. Çevrim süresi (KP6) 71
Şekil 4.5. Yolluk girişi donma süresi (KP6) 71
Şekil 4.6. Dolum sonu donmuş katman oranı (KP6) 72
Şekil 4.7. Çöküntü tahmini (KP6) 72
Şekil 4.8. Ortalama hacimsel çekme (KP6) 73
Şekil 4.9. Birleşme çizgileri (KP6) 73
Şekil 4.10. Ortalama göz ağırlığı (KP6) 74
Şekil 4.11. X yönü çekme değerleri (KP6) 74
Şekil 4.12. Y yönü çekme değerleri (KP6) 75
Şekil 4.13. Z yönü çarpılma değerleri (KP6) 75
Şekil 4.14. Dolum profili (TH6) 76
Şekil 4.15. Ön akış sıcaklığı (TH6) 76
Şekil 4.16. Tutmaya geçiş basıncı (TH6) 77
Şekil 4.17. Çevrim süresi (TH6) 77
Şekil 4.18. Yolluk girişi donma süresi (TH6) 78
Şekil 4.19. Dolum sonu donmuş katman oranı (TH6) 78
Şekil 4.20. Çöküntü tahmini (TH6) 79
Şekil 4.21. Ortalama hacimsel çekme (TH6) 79
Şekil 4.22. Birleşme çizgileri (TH6) 80
Şekil 4.23. Ortalama göz ağırlığı (TH6) 80
Şekil 4.24. X yönü çekme değerleri (TH6) 81
Şekil 4.25. Y yönü çekme değerleri (TH6) 81
Şekil 4.26. Z yönü çarpılma değerleri (TH6) 81
Şekil 4.27. Dolum profili (TCS6) 82
Şekil 4.28. Ön akış sıcaklığı (TCS6) 82
Şekil 4.29.Tutmaya geçiş basıncı (TCS6) 83
Şekil 4.30. Çevrim süresi (TCS6) 83
Şekil 4.31. Yolluk girişi donma süresi (TCS6) 84
Şekil 4.32. Dolum sonu donmuş katman oranı (TCS6) 84
Şekil 4.33. Çöküntü tahmini (TCS6) 85
Şekil 4.34. Ortalama hacimsel çekme (TCS6) 85

Şekil 4.35. Birleşme çizgileri (TCS6) 86
Şekil 4.36. Ortalama göz ağırlığı (TCS6) 86
Şekil 4.37. X yönü çekme değerleri (TCS6) 87
Şekil 4.38. Y yönü çekme değerleri (TCS6) 87
Şekil 4.39. Z yönü çarpılma değerleri (TCS6) 87
Şekil 4.40. Karşılaştırmalı dolum zamanları (KP6, TH6, TCS6) 88
Şekil 4.41.Karşılaştırmalı dolum basınçları (KP6, TH6, TCS6) 88
Şekil 4.42. Karşılaştırmalı kapama kuvvetleri (KP6, TH6, TCS6) 89
Şekil 4.43. Karşılaştırmalı çevrim süreleri (KP6, TH6, TCS6) 89
Şekil 4.44. Karşılaştırmalı yolluk donma süreleri (KP6, TH6, TCS6) 90
Şekil 4.45. Karşılaştırmalı yüzeydeki çöküntü miktarı (KP6, TH6, TCS6) 90
Şekil 4.46. Karşılaştırmalı hacimsel çekme oranları (KP6, TH6, TCS6) 90
Şekil 4.47. Karşılaştırmalı parça ağırlığı (KP6, TH6, TCS6) 91
Şekil 4.48. Karşılaştırmalı X yönü çekme (KP6, TH6, TCS6) 91
Şekil 4.49. Karşılaştırmalı Y yönü çekme (KP6, TH6, TCS6) 92
Şekil 4.50. Karşılaştırmalı Z yönü çarpılma (KP6, TH6, TCS6) 92
Şekil 4.51. X yönü uzunluk ölçüsü tornado grafiği (KP) 94
Şekil 4.52. Y yönü genişlik ölçüsü tornado grafiği (KP) 95
Şekil 4.53. Z yönü çarpılma ölçüsü tornado grafiği (KP) 96
Şekil 4.54. X yönü uzunluk ölçüleri (KP) 97
Şekil 4.55. X yönü uzunluk ortalamasına göre % sapma (KP) 97
Şekil 4.56. Y yönü genişlik ölçüleri (KP) 98
Şekil 4.57. Y yönü genişlik ortalamasına göre % sapma (KP) 98
Şekil 4.58. Z yönü çarpılma ölçüleri (KP) 99
Şekil 4.59. Optimum proses ölçüleri (KP) 100
Şekil 4.60. X yönü uzunluk ölçüsü tornado grafiği (TH) 102
Şekil 4.61. Y yönü genişlik ölçüsü tornado grafiği (TH) 103
Şekil 4.62. Z yönü çarpılma ölçüsü tornado grafiği (TH) 104
Şekil 4.63. X yönü uzunluk ölçüleri (TH) 105
Şekil 4.64. X uzunluk ortalamasına göre % sapma (TH) 105
Şekil 4.65. Y yönü genişlik ölçüleri (TH) 106
Şekil 4.66. Y yönü genişlik ortalamasına göre % sapma (TH) 106
Şekil 4.67. Z yönü çarpılma ölçüleri (TH) 107
Şekil 4.68. Optimum proses ölçüleri (TH) 108
Şekil 4.69. X yönü uzunluk ölçüsü tornado grafiği (TCS) 110
Şekil 4.70. Y yönü genişlik ölçüsü tornado grafiği (TCS) 111
Şekil 4.71. Z yönü çarpılma ölçüsü tornado grafiği (TCS) 112
Şekil 4.72. X yönü uzunluk ölçüleri (TCS) 113
Şekil 4.73. X yönü uzunluk ortalamasına göre % sapma (TCS) 113
Şekil 4.74. Y yönü genişlik ölçüleri (TCS) 114
Şekil 4.75. Y yönü genişlik ortalamasına göre % sapma (TCS) 114
Şekil 4.76. Z yönü çarpılma ölçüleri (TCS) 115
Şekil 4.77. Optimum proses ölçüleri (TCS) 116

TABLOLAR DİZİNİ

Tablo 3.1. Malzemenin fiziksel özellikleri ve test şartları 38
Tablo 3.2. Malzemenin mekanik özellikleri 38
Tablo 3.3. Malzemenin darbe özellikleri 38
Tablo 3.4. Malzemenin sertlik özellikleri 38
Tablo 3.5. Malzemenin termal özellikleri 38
Tablo 3.6. Polimer hammadde özellikleri (Autodesk Moldflow kütüphanesi)..... 39
Tablo 3.7. TecoCell® H1 özellikleri..... 42
Tablo 3.8. TecoCell® CS özellikleri..... 42
Tablo 3.9. TecoCell® H1 Moldflow parametreleri 56
Tablo 3.10. TecoCell® CS Moldflow parametreleri 56
Tablo 3.11. Konvansiyonel proses verileri 65
Tablo 3.12. Konvansiyonel prosesin deney tasarım faktör ve seviyeleri..... 65
Tablo 3.13. Konvansiyonel prosesin deney tasarım seti (KP) 66
Tablo 3.14. Kimyasal köpürtme proses verileri (TH, TCS)..... 67
Tablo 3.15. Kimyasal köpürtme prosesinin deney tasarım faktör ve seviyeleri 68
Tablo 3.16. Kimyasal köpürtme prosesi deney tasarım setleri (TH, TCS) 68
Tablo 4.1. Konvansiyonel proses deney tasarım seti sonuçları (KP)..... 93
Tablo 4.2. Optimum proses değerleri (KP)..... 99
Tablo 4.3. Kimyasal köpürtme prosesi deney tasarım seti sonuçları (TH)..... 101
Tablo 4.4. Optimum proses değerleri (TH)..... 108
Tablo 4.5. Kimyasal köpürtme prosesi deney tasarım seti sonuçları (TCS)..... 109
Tablo 4.6. Optimum proses değerleri (TCS)..... 115
Tablo 4.7. En etkili parametreler (KP, TH, TCS) 117
Tablo 4.8. TH ve TCS en başarılı prosesler 117
Tablo 4.9. Karşılaştırmalı gerçek ve akış simülasyon sonuçları 119

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

$C_6H_4O_5$: Transakonitik Anhidrit
$C_6H_6O_6$: Transakonitik Asit
$C_5H_4O_3$: İtakonik Anhidrit
$C_6H_7NaO_7$: Monosodyum Sitrat
CO_2 : Karbondioksit
D : Vidanın Dış Çapı
gr : Gram
gr/cm³ : Yoğunluk
gr/10dk : Eriyik Akış İndeksi
h_F : Vida Besleme Bölümü Uçuş Derinliği
h_M : Vida Ölçüm Bölümü Uçuş Derinliği
H_2O : Su
L_f : Vida Besleme Bölümü Uzunluğu
L_c : Vida Sıkıştırma Bölümü Uzunluğu
L_m : Vida Öçüm Bölümü Uzunluğu
L : Vidanın Etkili Toplam Uzunluğu
L_{KP} : Konvansiyonel Enjeksiyon Parçasının X Yönü Uzunluk Ölçüsü
L_{TH} : Tecocell H1 Kimyasal Köpürtme Parçasının X Yönü Uzunluk Ölçüsü
L_{TCS} : Tecocell CS Kimyasal Köpürtme Parçasının X Yönü Uzunluk Ölçüsü
mm : Milimetre
mm/s : Hız
N : Geri Dönüşsüz Valf
N_2 : Nitrojen
P : Vida Adımı
s : Saniye
T_g : Camsı Geçiş Sıcaklığı
$X_{TH/KP}$: L_{TH}'ın L_{KP}'ye göre % Küçülmesi
$X_{TCS/KP}$: L_{TCS}'nin L_{KP}'ye göre % Küçülmesi
$Y_{TH/KP}$: W_{TH}'ın W_{KP}'ye göre % Küçülmesi
$Y_{TCS/KP}$: W_{TCS}'nin W_{KP}'ye göre % Küçülmesi
W_{KP} : Konvansiyonel Enjeksiyon Parçasının Y Yönü Genişlik Ölçüsü
W_{TH} : Tecocell H1 Kimyasal Köpürtme Parçasının Y Yönü Genişlik Ölçüsü
W_{TCS} : Tecocell CS Kimyasal Köpürtme Parçasının Y Yönü Genişlik Ölçüsü

Kısaltmalar

ABS : Akrilonitril Bütadiene Styrene (Akrilonitril Bütadiyen Sitren)
AR : Aspect Ratio (En Boy Oranı)
CA : Citric Acid (Sitrik Asit)
CBA : Chemical Blowing Agent (Kimyasal Köpürtme Ajanı)
DSC : Differential Scanning Calorimetry (Diferansiyel Taramalı Kalorimetre)
HDPE : High Density Polyethylene (Yüksek Yoğunluklu Polietilen)

MFI : Melt Flow Index (Akış Erime İndeksi)
MPa : Megapascal (Megapaskal)
PBA : Physical Blowing Agent (Fiziksel Köpürtme Ajanı)
PC : Polycarbonate (Polikarbonat)
PE : Polyethylene (Polietilen)
PET : Polyethylene Terephthalate (Polietilen Tereftalat)
PP : Polypropylene (Polipropilen)
PVC : Polyvinyl Chloride (Polivinil Klorür)
SB : Sodium Bicarbonate (Sodyum Bikarbonat)
TGA : Thermogravimetric Analysis (Termo Gravimetrik Analiz)
TPO : Thermoplastic Polyolefin (Termoplastik Poliolefin)

KONVANSİYONEL PLASTİK ENJEKSİYON İLE FARKLI KİMYASAL AJAN KATKILI KÖPÜRTME PROSESLERİNİN KARŞILAŞTIRMALI AKIŞ ANALİZİ VE PARAMETRİK DENEY TASARIMI

ÖZET

Son yıllarda plastik enjeksiyon kalıplamadaki rekabet artışı, tasarım ve proses maliyet kazanımlarını ön plana çıkarmıştır. Kimyasal ajan katkılı köpürtme prosesi, parçada ağırlık, çevrim süresi, kapama kuvveti kazanımları ve parça kalitesinde çarpılma iyileşme avantajları ile paketlemeden beyaz eşyaya, otomotivden gıda sektörlerine kadar farklı alanlarda yaygınlaşan bir üretim teknolojisidir. Bu teknolojinin fayda-maliyet analizi ve parça kalitesindeki iyileşmeleri ileri seviye akış analizi programları ile üretim aşamasına geçmeden simüle edilebilir. Bu çalışmada, konvansiyonel plastik enjeksiyon ile kimyasal köpürtme proseslerinin Autodesk Moldflow Ultimate programında yapılan karşılaştırmalı akış analizleri, data analiz ve proses geliştirme programı Nautilus ile tasarlanmış deneysel proses parametre setleri ile enjeksiyon makinesindeki gerçek üretim denemeleri sonucunda ağırlıkça %1 oranında kullanılan endotermik TecoCell® H1 ajanının yine ağırlıkça %1 oranında kullanılan TecoCell® CS ajanına göre ağırlık düşüşü açısından daha avantajlı, CS ajanının ise parçanın çekme ve çarpılma iyileşmeleri konusunda H1 ajanına göre daha avantajlı olduğu ortaya çıkmıştır. Ayrıca H1 ve CS prosesleri, konvansiyonel enjeksiyon prosesine göre gözle görülür seviyede kapama kuvveti ve çevrim süresi düşüşü sağlamıştır. Sonuç olarak, konvansiyonel proses ile üretilen parçanın, kimyasal köpürtme prosesi sayesinde yaklaşık %7,5 oranında daha hafif, %33 oranında daha az kapama kuvveti, %10 seviyelerinde çevrim süresinden kazanç ve %40 çarpılma iyileşmesi ile üretilebileceği hem akış simülasyonu hem de gerçek üretimler sonucunda kanıtlanmıştır. Çalışmada, Moplen EP548P polipropilen hammaddesi, TecoCell® H1 ve CS kimyasal köpürtme ajanları kullanılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Kimyasal Köpürtme Ajanı, Mikro Hücresel Plastik Enjeksiyon Prosesi, Moldflow, Polipropilen, TecoCell®.

COMPARATIVE FLOW ANALYSIS AND PARAMETRIC EXPERIMENT DESIGN OF CONVENTIONAL PLASTIC INJECTION AND VARIOUS ENDOTHERMIC CHEMICAL AGENT ADDED FOAMING PROCESS

ABSTRACT

In recent years, the increase in competition in plastic injection molding technology has brought design and process cost gains to the fore. Chemical agent additive foaming technology that has become widespread in different fields from packaging to white goods, automotive to food industries with its weight, cycle time, clamping tonnage reductions and warpage improvement. Benefit-cost analysis and part quality improvements can be simulated with advanced flow analysis programs before production. As a result of comparative Autodesk Moldflow simulations and gerçek production study which is designed experimental parameter sets by Nautilus data analysis and process improvement program, at the rate of 1% by weight Tecocell H1 is more advantageous in terms of weight reduction compared to at the same rate Tecocell CS agent while CS agent is more advantageous in terms of shrinkage and warpage improvements as per H1 agent. In addition, the H1 and CS processes provided a considerable clamping force and cycle time reduction compared to the conventional injection process. Consequently, it has been proven as a result of both flow simulation and real productions that the part produced by conventional process can be produced with approximately 7.5% lighter, 33% less clamping force, close to 10% cycle time gain and 40% warpage reduction with the chemical foaming process. In this study, polypropylene EP548P raw material, TecoCell® H1 and CS chemical blowing agent were used.

Keywords: Chemical Blowing Agent, Microcellular Injection Molding, Moldflow, Polyproplene, TecoCell®.

GİRİŞ

1868 yılında, John Wesley Hyatt adında girişimci bir genç beyefendi, bir bilardo topu üreticisi tarafından oluşturulan bir yarışmaya katılmak için selüloit adı verdiği plastik bir malzeme geliştirdi. Şirket, fildişi yerine geçecek yeni bir malzeme arıyordu, bu da pahalı ve elde edilmesi zor hale geliyordu. Selüloit aslında 1851'de Alexander Parkes tarafından icat edildi, ancak Hyatt bunu bitmiş formda işlenebilmesi için geliştirdi. Selüloit bir bilardo topu yarattı ve o günlerde yüksek bir miktar olan 10,000 dolarlık yarışma büyük ödülünü kazandı. Ne yazık ki, ödül kazanıldıktan sonra, bir gösteri sırasında (selüloidin kararsızlığı ve yüksek alevlenebilirliği nedeniyle) bazı bilardo topları patladı ve ticari girişimlerde kullanılabilmesi için daha fazla mükemmellik gerekiyordu. Fakat plastik endüstrisi Hyatt ve kardeşi Isaiah 1872'de ilk olarak enjeksiyon makinesinin patentini aldıklarında doğdu. Bu makine ile kardeşler selüloit plastik kalıplayabilir durumdalardı. Sonraki 40 ile 50 yıl boyunca, diğerleri yaka baleni, düğmeler ve saç tarakları gibi ürünlerin üretimi için bu yeni süreci araştırmaya başladı. 1920 yılına gelindiğinde, enjeksiyon kalıplama endüstrisi temelini atmış ve o zamandan beri inşa ediliyor.

1940'lı yıllarda, plastik enjeksiyon kalıplama endüstrisi, 2. Dünya Savaşı'nın ucuz, seri üretilen ürünler için bir talep yaratması nedeniyle (selüloidin kararsızlığı nedeniyle değil) bir patlama ile patladı. Süreç için düzenli olarak yeni malzemeler icat edilmiş ve teknik gelişmeler giderek daha başarılı uygulamalara yol açtı [1].

Hyatt kardeşlerin icat ettiği makine ilkeldi, ancak amaçları için iyi performans gösterdi. Büyük bir hipodermik iğne gibi davranması ve plastiği ısıtılmış bir silindirden bir kalıba enjekte etmesi için basit bir piston içermesi basitti. 1946'da James Hendry yakın zamanda patentli vidalı enjeksiyon makinesini pazarlamaya başladı. Bu burgu tasarımı geleneksel Hyatt piston cihazının yerini aldı ve plastiklerin işlenmesinde devrim yarattı. Vida makineleri artık tüm enjeksiyon makinelerinin yaklaşık %95'ini oluşturmaktadır [1]. 1800'lü yılların sonundan günümüze kadar enjeksiyon kalıplama endüstrisi hızlı ve istikrarlı bir şekilde büyümüştür. Otomotiv,

medikal, havacılık, tüketici, oyuncak, sıhhi tesisat, paketleme ve inşaat dahil olmak üzere çeşitli endüstriler için tarak ve düğmeler üretmekten otomobil tamponları, yoğurt kapları, diş fırçaları, kapaklar, kan tüpleri, emniyet kemer tokaları gibi envai çeşit kalıplama ürünlerine dönüşmüştür [1].

Son yıllarda plastik enjeksiyon kalıplama teknolojileriyle üretilen parçalara artan talep, kapasite artışlarını, beklenen ürün kalitesindeki mükemmellik, malzeme, ekipman ve proses maliyetlerindeki artışları, bunun sonucunda rekabetçi piyasa, malzeme, ekipman ve proses kalemlerinde tasarruf edebilecek yeni teknolojileri beraberinde getirmiştir. Özellikle artan hammadde maliyeti ve çevre kirliliği, istenen özellikleri elde ederken daha az malzeme kullanarak hafif ürünler üretmenin etkili yollarını bulmaya zorlamaktadır.

Kimyasal köpürtme ajanı (CBA) katkılı plastik enjeksiyon prosesinde, %0,5-%2 aralığında değişen köpürtücü ajan oranı ile ana polimer hammadde karıştırılarak konvansiyonel enjeksiyon makinesinde proses edilir. İçerde oluşan mikro hücresel köpüksü yapı eriyik viskozitesini düşürerek kolay akış sağlar ve kullanılan ana polimer hammadde miktarını da azaltmış olur. Bunun yanında proses açısından sağladığı avantajlar da vardır. Viskozite düşüşüyle sağlanan kolay akış daha düşük enjeksiyon (dolum) basıncına ihtiyaç duyarken bunun sonucunda kesin olarak kullanılan tutma basıncı fazı da belirli bir miktara kadar elemine edilebilir ve böylece gereken kapama kuvveti miktarı ve kalıp direnci azaltılmış olur. Ayrıca içerideki gaz baloncuklarının her bölgeye eşit seviyede kendiliğinden sağladığı içsel tutma basıncı sayesinde farklı çekmeler sonucu oluşan çarpılma problemleri azalır ve ölçüsel istikrar sağlanır [2]. Bu tezde, konvansiyonel ve kimyasal köpürtme ajanlı plastik enjeksiyon proseslerinin hem simülasyon hem de üretim aşamaları karşılaştırmalı olarak incelenecektir.

Yapılan çalışmanın temel amacı, konvansiyonel plastik enjeksiyon prosesi ile üretilmiş bir parçayı, köpürtücü kimyasal ajan katkılı plastik enjeksiyon yöntemiyle, parçanın ağırlık, kapama kuvveti ve çevrim süresinde elde edilen kazanımları üretim ve simülasyon çalışmaları ile birlikte karşılaştırmalı olarak ortaya koymaktır.

İlk olarak plastik parça akış simülasyon programı olan Autodesk Moldflow' un Ultimate modülünde, konvansiyonel plastik enjeksiyon prosesiyle üretilecek parçanın akış analizi yapılmıştır. Daha sonra aynı programda aynı parçanın 2 farklı kimyasal

köpürtme ajanı ile plastik enjeksiyon prosesi üretimleri için akış analizleri yapılmıştır. Bu sonuçlar çerçevesinde 3 proses için de plastik enjeksiyon makinesindeki üretim aşamaları tamamlanıp elde edilen sonuçlar karşılaştırmalı incelenmiştir.

Çalışmada, Moplen polipropilen hammaddesi, Engel marka 50 ton enjeksiyon makinesi, TecoCell® H1 ve CS kimyasal köpürtme ajanları, Brightworks firmasının eğitimler için kullandığı 4 gözlü Otto Maenner marka valf iğneli sıcak yolluk sistemi içeren kalıp kullanılmıştır.

1. GENEL BİLGİLER

Plastik parçalar otomotiv, beyaz eşya, paketleme, elektrik, medikal başta olmak üzere birçok sektörde kullanılmaktadır. Bunların büyük bir çoğunluğu düşük üretim maliyetleri nedeniyle genellikle plastik enjeksiyon kalıplama ile üretilmektedir.

Plastik enjeksiyon prosesi, eriyik hammaddeyi plastik enjeksiyon kovanında eriterek basınçlı bir şekilde kapalı bir kalıp gözü içerisine enjekte edilmesi akabinde soğutularak kalıptan çıkarılması olarak düşünülebilir. Oldukça hızlı bir üretim metodu olması yönüyle seri üretime ihtiyaç duyan parçalarda tercih edilir.

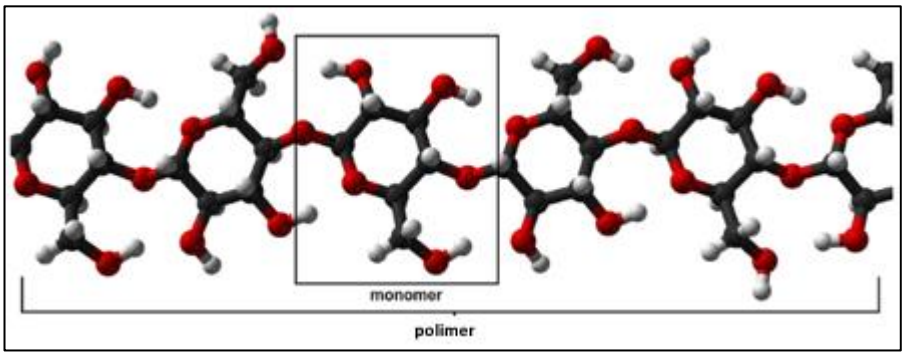
Birçok ürün için artan talepler, yükselen kalitesel beklentiler, daha kısa tedarik süreçleri ve rekabetin her konuda artması gibi nedenlerden dolayı oluşan zaman, üretim, operasyonel maliyetlerin önemi oldukça artmıştır. Bu rekabet ortamında ilk yatırım maliyeti olan fakat günümüz dünyasında yatırım geri dönüş analizleri ile kendisini amorti edecek enjeksiyon teknolojileri oldukça popüler bir konuma gelmiştir. Temel amaç plastik enjeksiyon prosesine özel geliştirilmiş yeni teknolojilerle daha az maliyetle daha kaliteli, daha ucuz, daha hafif parçalar üretmektir.

Plastik enjeksiyon kalıplama ile uygun nihai parçanın elde edilmesi için denklemdeki eşitliğin karşısında birbirini etkileyen hammadde viskozitesinden kalıp sıcaklıklarına kadar birçok parametrenin kontrolü ve istikrarlı olma gerekliliği bu prosesi zor yapan başlıca nedenlerdendir. Bu zorlukların üstesinden gelebilmek için plastik malzemelerin davranışlarını, akış simülasyonları ve üretim deney seti tasarımları yardımıyla belirlemek gerekir.

1.1. Plastikler

Plastikler, şekillendirilebilen veya oluşturulabilen herhangi bir kompleks, organik, polimerize bileşik olarak tanımlanabilir. Genellikle, plastik ve polimer terimleri birbirinin yerine kullanılır, ancak kesin olarak söylemek gerekirse, bir polimer bir plastiktir, ancak bir plastik bir polimer olmayabilir. Şekil 1.1'de gösterildiği gibi birim monomerlerin bir araya gelmesi ile atomlarının zincir halkalarına benzer şekilde

birbirine bağlandığı yüksek molekül ağırlığına sahip sentetik polimerler malzemelerdir [3].



Şekil 1.1. Monomer-polimer şematize görüntüsü [4]

Plastikler 3 ana grupta toplanır. Bunlar:

1. Termoplastikler
1.1. Amorf
1.2. Yarı Kristalin
2. Termosetler
3. Elastomerler

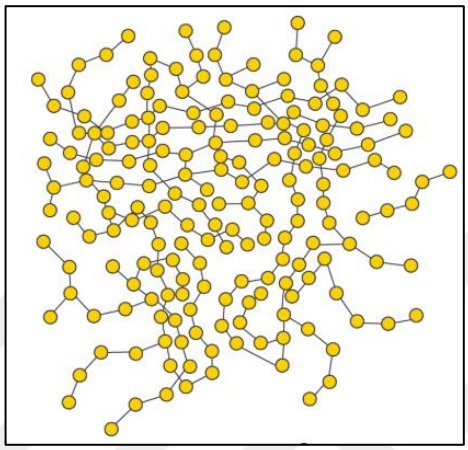
1.1.1. Termoplastikler

Termoplastikler ısı ve basınç uygulandığında eriyip akan, soğutulduğu zaman sertleşerek şeklini koruyabilen malzemelerdir. Bu işlemler esnasında kimyasal yapılarında değişim göstermezler ve tekrar tekrar kullanılabilirler. Isıtıldığında fiziksel bir değişikliğe uğrayan plastik malzemelerdir. Tekrar tekrar ısıtılabilir ve yeniden şekillendirilebilir.

Termoplastik malzemelerin örnekleri akrilonitril bütadien sitren (ABS) ve polietilendir (PE). Termoplastikler çok çeşitli birincil formülasyonların yanı sıra birçok karışım ve alaşımda mevcuttur. Kolay işlenirler, sadece ısıtma, bir kalıpta şekillendirme ve soğutma gerektirirler. Isıtıldıklarında bir katıdan bir sıvıya ve soğutulduklarında, tekrar tekrar, kimyasal yapılarını değiştirmeden tekrar değiştirebilecekleri anlamıyla su ile karşılaştırılabilirler. Ancak sudan farklı olarak, iki farklı kategoriden birinde veya diğerinde tanımlanırlar: Amorf ve Yarı kristalin [3].

1.1.1.1. Amorf yapı

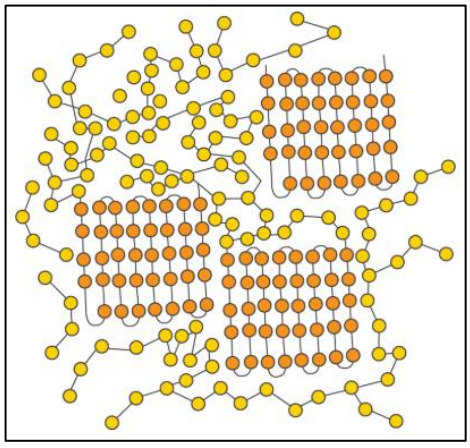
Amorf malzemeler, Şekil 1.2'de gösterildiği gibi moleküler zincir yapısının rastgele olduğu ve geniş bir sıcaklık aralığında hareketli olduğu malzemelerdir. Bu basitçe, bu malzemelerin tam anlamıyla erimediği, aksine yumuşadığı ve onlara ısı uygulandığında yumuşamaya başladığı anlamına gelir. Isı emildikçe, aşırı ısının emilmesinin bir sonucu olarak bozulana kadar yumuşarlar [3].



Şekil 1.2. Amorf moleküler yapı [5]

1.1.1.2. Yarı kristalin yapı

Kristalin malzemelerde, Şekil 1.3'te gösterildiği gibi moleküler zincir yapısı iyi düzenlenmiştir. Sadece malzeme erime noktasına ısıtıldıktan sonra kristalin yapı hareketlenir. Bu durum, bu malzemelerin bir yumuşatma aşamasından geçmediği, hemen eriyen belirli bir noktaya ısıtılana kadar sert kaldığı anlamına gelir. Aşırı ısı emilirse bozunurlar [3].



Şekil 1.3. Yarı kristalin yapı [5]

1.1.2. Termosetler

Termoset plastiklerde yumuşama sıcaklığının bozunma sıcaklığından yüksek olması bir defa şekillendirilmek için ısıtıldıklarında büyük oranda çapraz bağlar oluşturmasına sebep olur. Bu yüzden geri dönüşüm özelliği göstermezler.

Isıtıldığında, kimyasal bir değişikliğe uğrayan ve "sertleşen" plastik bir malzeme yeniden şekil değiştiremez ve yeniden ısıtma ile sadece bozunur. Termoset malzemelere örnek olarak fenolik otomotiv distribütör kapakları ve melamin plastik yemek tabakları için gösterilebilir. Termoset malzemeler işlendiklerinde kürlenirler. Bu durum kürlenme sonucu, termoplastikler gibi tekrar eritilemeyecekleri anlamına gelir. Kalıplanmış termosetler bir toz haline getirilebilir ve diğer termoset bileşiklerin veya termoplastik bileşiklerin yapımında dolgu maddesi olarak kullanılabilir. Asla basit bir depolama alanına atılmamalıdır [3].

1.1.3. Elastomerler

Elastomerler için kullanım sıcaklığı camsı geçiş sıcaklığının üstüdür. Ergime ve çözünme özelliklerine sahip değillerdir. Sıvı emebilirler [3].

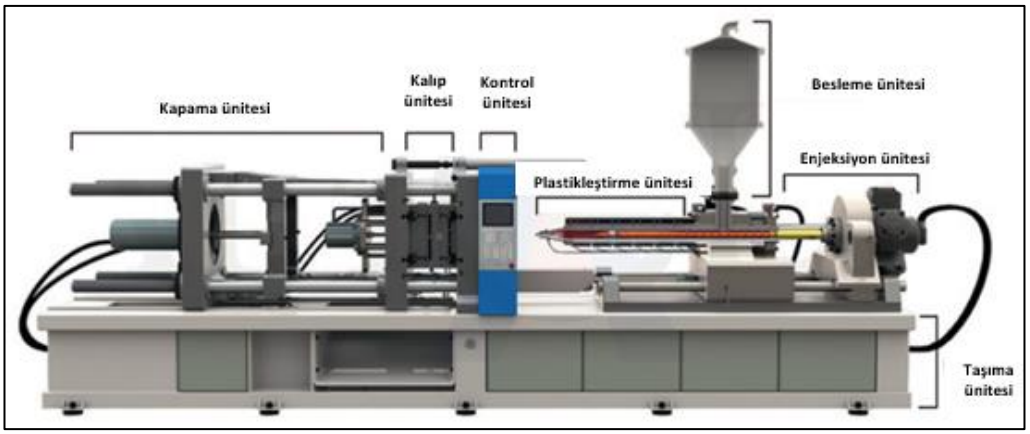
Elastomerler çok çeşitli elastik veya kauçuk benzeri özellikler sergileyen polimerlerdir. Tipik elastomerik malzemelere örnek olarak poliüretanlar, silikonlar, polisülfit söylenebilir. Tekrar kullanılamamasının temel sebebi yapısında çapraz bağların bulunmasıdır. En çok kullanılan örneği araba lastikleridir [3].

1.2. Plastik Enjeksiyon Kalıplama

Plastik enjeksiyon kalıplama işleminin ana bileşenleri olarak plastik enjeksiyon makinesi, prosesi, kalıbı, yardımcı ekipmanları ve akış simülasyonları tanıtılmıştır. Plastik enjeksiyon kalıplama yöntemini daha iyi anlamak için öncesinde polimer bilgisine sahip olmak gerekir.

1.2.1. Plastik enjeksiyon makinesi

Bir enjeksiyon kalıplama makinesinin ana bileşenleri, Şekil 1.4'te gösterildiği gibi besleme, enjeksiyon, kalıp, kalıp kilitleme, tahrik ve kontrol üniteleridir. Temel olarak 6 ana bölümde incelenir [6].



Şekil 1.4. Enjeksiyon kalıplama makinesi [6]

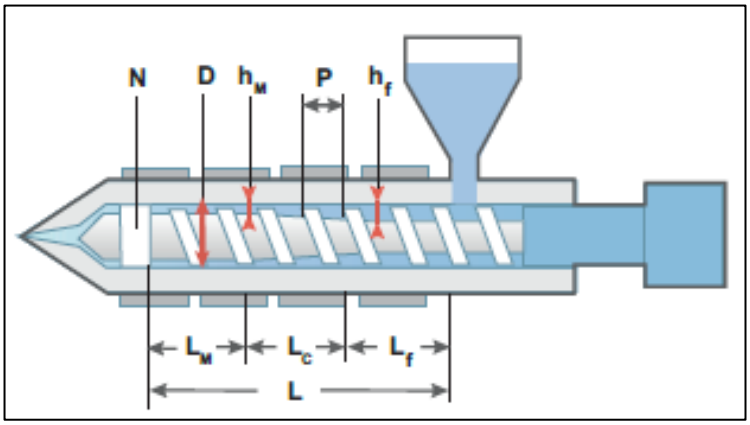
1.2.1.1. Besleme ünitesi

Besleme ünitesinin işlevi esas olarak plastiğin vidaya düzgün bir şekilde girmesine izin vermektir. Genellikle, plastikler, beslemeye girmeden önce belirli bir sıcaklık ve süre altında kurutularak ön işlemden geçirilir [6].

1.2.1.2. Enjeksiyon ünitesi

Şekil 1.5'te gösterildiği gibi, vidanın içinde bir besleme bölümü (L_f), bir sıkıştırma bölümü (L_c) ve bir ölçüm bölümü (L_m) vardır. L vidanın etkili uzunluğu, D dış vida çapı, P vida adımı, N geri dönüşsüz valf, h_M ve h_F sırasıyla ölçüm ve besleme bölümlerindeki uçuş derinliğidir.

Vida, katı plastiği sürekli dönerek, nozüle doğru hareket ettirir. Bu sırada plastik, erimek için katı halden eriyik hale döndürülür ve enjekte edilmeye hazır vidanın önünde birikir [6].



Şekil 1.5. Enjeksiyon ünitesi spesifikasyonları [6]

1.2.1.3. Tahrik ünitesi

Enjeksiyon işlemi dolum ve ütüleme işlemlerini içerir. Bu aşamaların tahrik sistem türleri hidrolik, elektrikli servo motor ve hidrolik-elektrikli hibrit olabilir [6].

1.2.1.4. Kalıp ünitesi

Eriyik kalıp sistemine makine nozülünden girer ve bir parça oluşturmak için ana dağıtıcı yolluk girişi, yolluklar ve parça yolluk girişlerinden geçer. Kalıptan parçanın çıkarılabilmesi için plastiği katılaştıran soğutma kanalları da kalıp ünitesine dahildir [6].

1.2.1.5. Kalıp kilitleme ünitesi

Kalıp döngüsünde kalıp açma ve kapama, aynı zamanda bir makinenin spesifikasyonunu temsil eden kalıp kilitlemenin kontrol edildiği ünitedir. Genellikle, enjeksiyon makineleri en yüksek sıkma kuvveti ton ile ifade edilir [6].

1.2.1.6. Kontrol ünitesi

Kalıplama ayarları, makineye, kalıp açma / kapama zamanı, sıkma kuvveti ayarı, vidanın enjeksiyon hızı, ütüleme basıncı vb. gibi tüm makine hareketlerini tanımlayan bir kontrol ünitesi aracılığıyla girilir [6].

1.2.2. Plastik enjeksiyon prosesi

Plastik enjeksiyon kalıplama, enjeksiyon döngülerini sürekli olarak tekrarlayan bir işlemdir. Şekil 1.6'da komple bir kalıplama işleminin adımları gösterilmektedir. Adımlar şu şekildedir:

1- Kalıp kapama fazı

Enjeksiyon işlemine başlamak için kalıp makine tahrik üniteleri ile kapatılır.

2- Enjeksiyon fazı

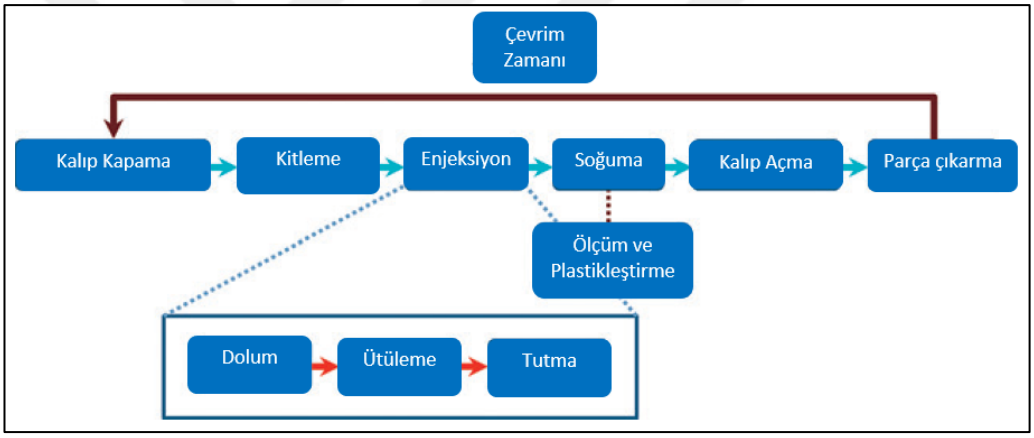
Genellikle enjeksiyon aşaması, kalıba eriyiği enjekte etmek için vidanın hızı ve basıncı ile kontrol edilen doldurma ve ütüleme olarak tanımlanır.

3- Plastikleştirme ve soğuma fazı

Plastikleştirme fazında ısıtıcılar ve vida dönmesi neticesindeki sürtünme kaynaklı plastik ergitilerek bir sonraki çevrime hazır edilir. Plastikleştirme, soğuma zamanı içerisinde tamamlanır. Parçanın katılaşması için gereken soğuma zamanı her zaman daha uzun olur.

4- Kalıp açma ve itici vurma fazı

Soğuduktan sonra eriyiğin sıcaklığı ve basıncı düşer. Basınç, kalıp açılmadan ve bitmiş parçanın çıkarılmasından önce serbest bırakılır. Kalıp açıldıktan sonra iticilerin de açılmasıyla parça düşürülür ve iticiler tekrardan kapanır. Tüm çevrimin şematize görüntüsü Şekil 1.6'da gösterilmiştir.

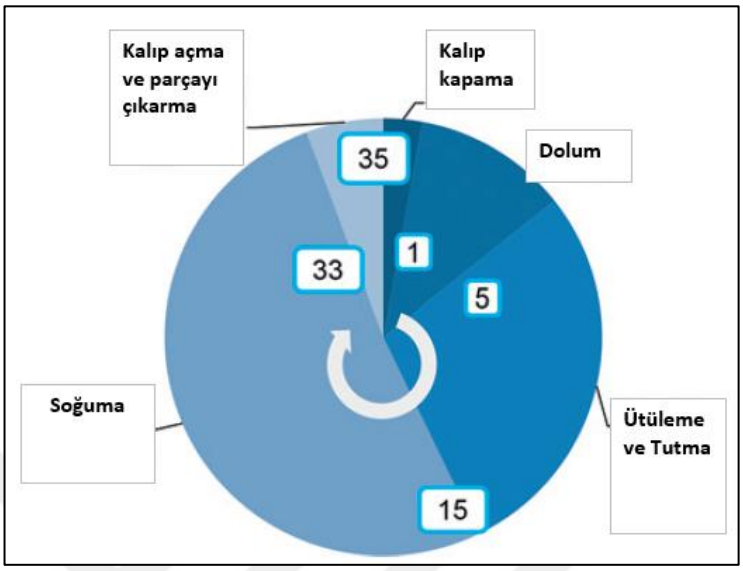


Şekil 1.6. Enjeksiyon kalıplama çevrimi [6]

Enjeksiyon fazı, doldurma, ütüleme ve tutma aşamalarını içerir. Ütüleme, yolluk girişinden göz içerisine daha fazla eriyik sokar, böylece yolluk girişi bölgesinde eriyik yoğunluğu dolum sonundan daha yüksek olmasını sağlar. Tutma ise, enjeksiyon makinesi tarafından sağlanan orta basınç uygulanarak eriyik yoğunluğunu göz içinde daha muntazam bir dağılım haline getirerek hapsetmeye yarar.

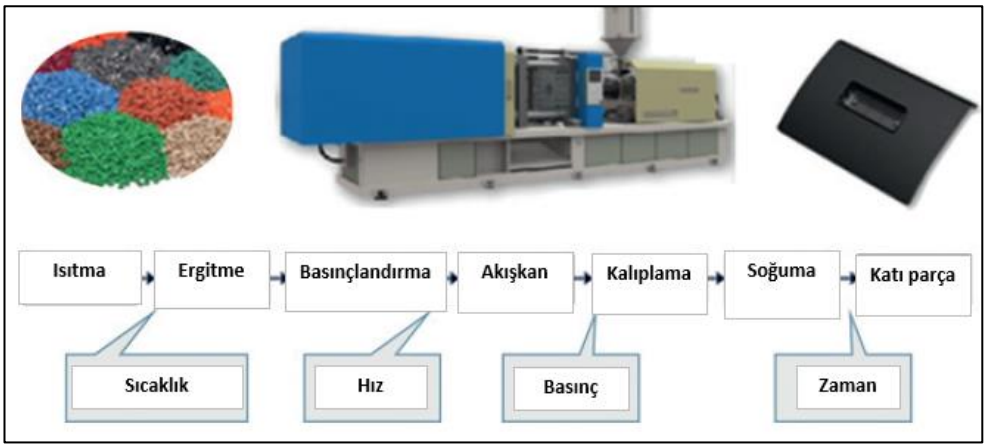
Şekil 1.7'de, 2-3 milimetre (mm) et kalınlığına sahip genel bir parça için bir kalıp çevriminde her aşamanın çevrim süresi içerisindeki dağılımını göstermektedir. Tüm çevrim yaklaşık 30-40 saniye (s) aralığında sürer, kalıp açmak için 1-2 s, doldurma için 1-5 s, ütüleme (ve tutma) için 8-10 s, soğutma için 10-20 s, 2-5 s plastikleştirme

için, kalıp açılması için 1-3 s ve 1-3 s aralıklarında parçayı çıkartma aşaması olarak gösterilir. En uzun adım soğutma adımıdır.



Şekil 1.7. Çevrim süresinin dağılımı [6]

Şekil 1.8'de, kovandaki ısıtıcıların ısıtılması, kovan içinde plastik taneciklerin öğütülmesi ve eritilmesi, basınçlı eriyik akışı, doldurma ve ütüleme tamamlanması, kalıplar içinde soğutma, katılaşma ve parçayı fırlatma dahil olmak üzere enjeksiyon kalıplama sırasında plastik perspektifindeki değişiklikleri göstermektedir.



Şekil 1.8. Polimer hammaddenin çevrimdeki aşamaları [6]

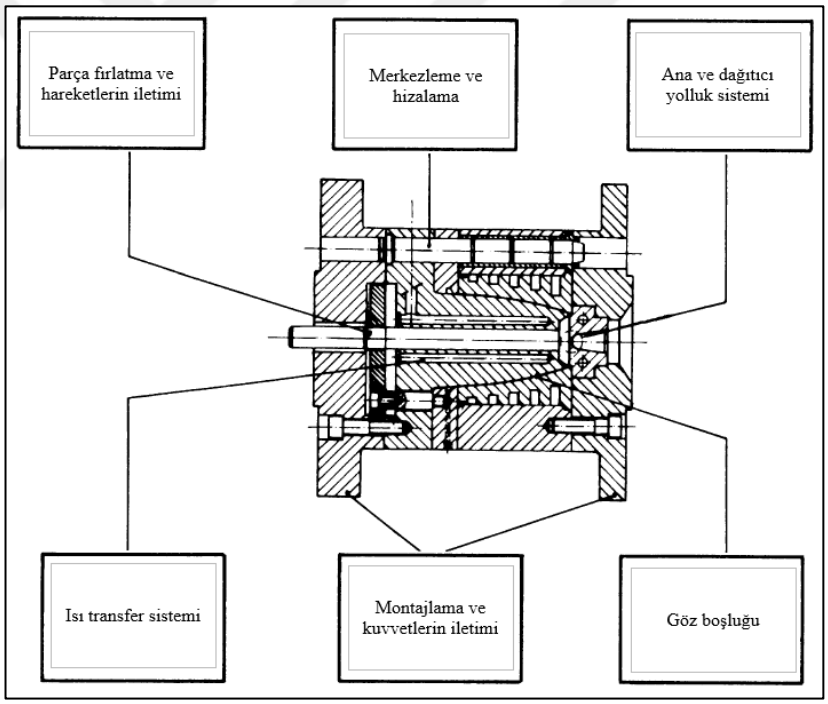
1.2.3. Plastik enjeksiyon kalıbı

Bir çevrimde az çok karmaşık parçaların üretimi için bir veya birkaç boşluk içeren bir kalıba ihtiyaç vardır. Kalıp her durumda ayrı ayrı yapılmalıdır. Bir kalıbın temel

görevleri eriyiğin girişi ve dağıtımı, malzemenin şekillendirilmesi ve soğutulması (veya termosetler ve elastomerler için aktif ısı eklenmesi), eriyiğin katılaştırılması ve parçanın çıkarılmasıdır. Bir kalıbın tüm bu görevleri aşağıdaki fonksiyonel sistemlerle gerçekleştirilebilir:

- Ana ve dağıtıcı yolluk sistemleri,
- Göz boşluğu (Havalandırma dahil),
- Isı transfer sistemleri,
- Parça fırlatma ve hareket iletim sistemleri,
- Merkezleme ve hizalama sistemleri,
- Montaj ve destek plaka sistemleri,

Şekil 1.9 bu işlevleri, bir bardak kalıbının kesitinde göstermektedir [7].



Şekil 1.9. Enjeksiyon kalıbı fonksiyonlarının kırılımı [8]

Yolluk sistemi ocaktan kalıba gelen eriyik plastiği kalıp gözüne ulaştırmaya yarayan sistemdir. Bir yolluk sisteminin ana işlevi, enjektörden enjekte edilen eriyiği hızlı ve eşit bir şekilde kalıp boşluğuna yönlendirmektir. Eriyik, bir nozül, enjeksiyon ana yollukları, birincil yolluklar, dallanmış yolluklar ve yolluk girişleri yardımıyla sistemde ilerler. Optimize edilmiş eriyik enjeksiyon tasarımında parçanın yolluk sistemi, yolluk giriş yerleri, enjeksiyon teknikleri (sıcak yolluk, soğuk yolluk), yolluk

girişleri, tipleri, boyutları ve miktarına göre belirlenir. Soğuk yolluk ve sıcak yolluk sistemleri olarak ikiye ayrılır [6].

1.2.3.1. Soğuk yolluk sistemleri

Soğuk yolluk kalıpları genellikle kalıp tabanı içinde tutulan iki veya üç plakadan oluşur. Erimiş termoplastik ilk önce kalıba, ana yolluk vasıtasıyla bir nozülden enjekte edilir, bu da kalıp boşluklarına doldurur. Bu sistemde, yolluklar ısıtılmaz ve erimiş plastiği ayrı kalıplama boşluklarına dağıtan bir dağıtım sistemi olarak işlev görür. Soğuk yolluk sistemi daha sonra kalıplanmış parça ile birlikte ana yolluk, dağıtıcı yolluk ve yolluk girişini soğutur.

İki plakalı kalıplarda, ana yolluk ve dağıtıcı yolluk sistemi nihai ürüne bağlı kalır. Daha sonra kalıplanmış bileşeni kalıbın çekirdek yarısından ayırmak için bir fırlatma sistemi kullanılır.

Üç plakalı kalıplarda, bir sıyırma plakası, erimiş termoplastikleri ayrı bir boşluk plakasında bulunan yolluklara ileten yapı içerir. Nihai kalıplanmış parça, herhangi bir yolluk ya da yolluk girişi eklenmeden plakanın yarısında oluşturulur ve soğutulur. Üç plakalı kalıp sistemi, kalıp açılırken yolluğu otomatik olarak parçadan ayırır. Hem iki plakalı hem de üç plakalı kalıp sistemlerinde, yolluk yeniden taşlanabilir ve geri dönüştürülebilir, böylece plastik atık azaltılır [9].

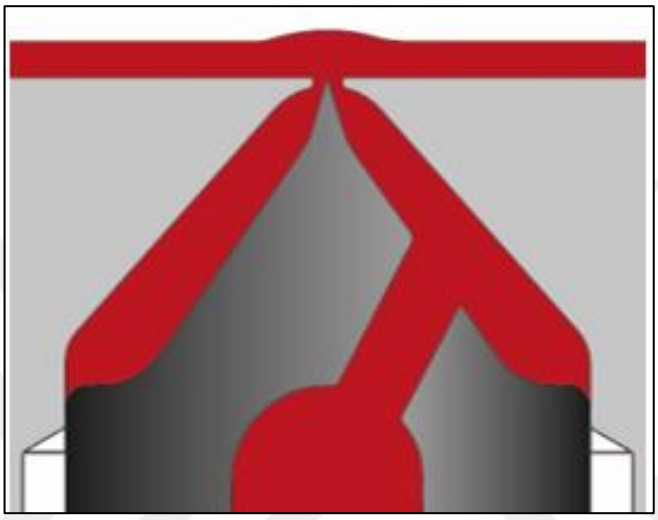
1.2.3.2. Sıcak yolluk sistemleri

Sıcak yolluk kalıpları, bir dağıtıcı sistem ile ısıtılan iki plakadan oluşur. Dağıtıcı, yolluklarındaki erimiş termoplastikleri ısıtma silindiriyle aynı sıcaklıkta tutarak tutarlı bir sıcaklığın korunmasına yardımcı olur. Isıtmalı yolluklar, erimiş plastiği son parçayı oluşturmak için göz boşluğunu dolduran nozüllere iletir. Isıtmalı sıcak yolluk sistemi ayrı bir plaka içine yerleştirilmiştir. Bu plaka kalıplama döngüsü sırasında sabit kalır. Ana çekirdek kalıplama plakası daha sonra herhangi bir yolluğa bağlı olmadan nihai kalıplanmış kısmı ortaya çıkarmak için açılır.

Birkaç çeşit sıcak yolluk sistemi vardır. Bununla birlikte, genel olarak, harici olarak ısıtılan ve dahili olarak ısıtılan şekilde iki ana kategoriye ayrılırlar. Harici olarak ısıtılan sistemler, termal varyasyonlara duyarlı polimerler için çok uygundur. Dahili

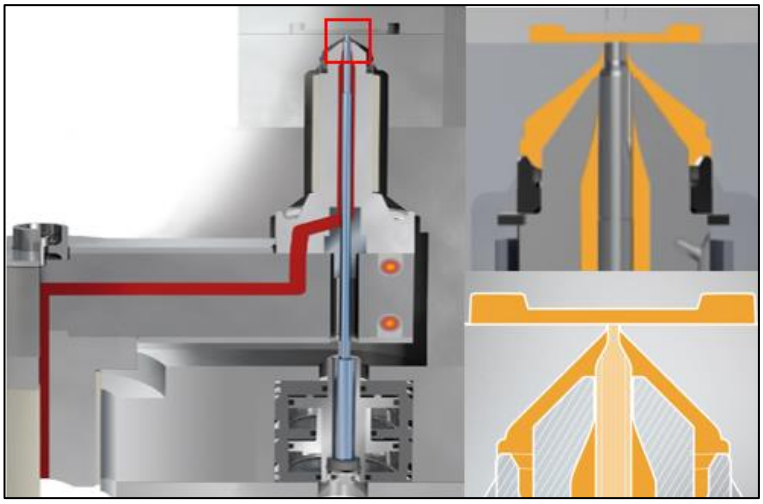
olarak ısıtılan sistemler daha iyi akış kontrolü sağlar. Sıcak yolluk işlemi, yollukları tamamen ortadan kaldırır, bu nedenle geri dönüşüm ve yeniden taşlama (sadece işlenmemiş plastiklerle yapılabilir) çevrim sürelerini etkilemez [9].

Sıcak yolluk sistemleri kendi içinde açık uçlu ve valf iğneli tip olarak ikiye ayrılır. Şekil 1.10'da gösterildiği gibi açık uçlu sistemlerin yolluk girişleri sürekli açık konumda, sürekli eriyik akıntısının önüne geçebilmek için torpido yapıları mevcuttur.



Şekil 1.10. Açık uçlu sıcak yolluk sistemi [10]

Şekil 1.11'de gösterildiği gibi valf pinli sıcak yolluk sistemi bir iğne yardımıyla yolluk girişini istediğiniz zaman kapatıp açabilecek bir yapıya sahiptir. Valf pini, çok hassas toleranslarda işlenip aşınmaya dayanıklı malzemelerden ve sertleştirilmiş olarak üretilir.

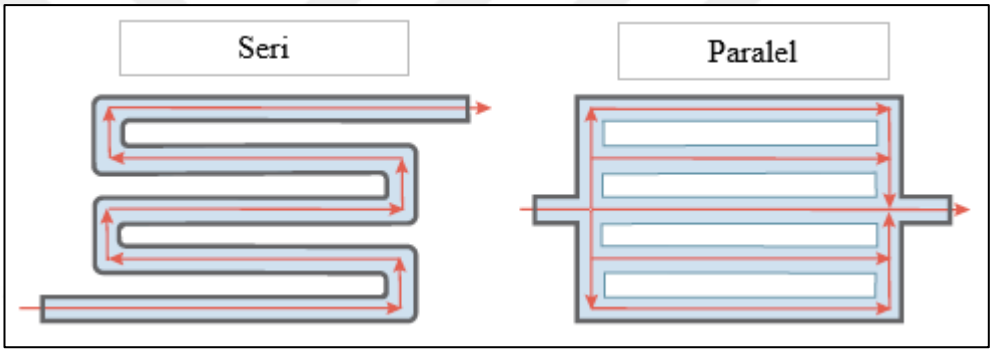


Şekil 1.11. Valf pinli sıcak yolluk sistemi [10]

1.2.3.3. Soğutma kanalları

Soğutma kanalları termoplastikler için bir kalıpta gereklidir ve kalıp tasarımında özenle dikkat edilmelidir. Isıyı kalıplanmış kısımdan yeterli bir oranda dışarı aktarmak için soğutma ortamı laminer akış yerine türbülanslı akışta olmalıdır. Soğutucu genellikle sudur, ancak ısıyı emebilen ve kaynağından verimli bir şekilde aktarabilen herhangi bir sıvı veya gaz (hava gibi) olabilir. Soğutma sıvıları kalıplarda, soğutuculardа vb. kullanılır. Su, en etkili ve düşük maliyetli soğutucu akışkanlardan biridir [11].

Soğutma kanalları kalıp içerisinde kademeli (seri) ve paralel soğutma sistemi tasarımları olarak Şekil 1.12'de gösterildiği gibi en yaygın görülen iki tiptir [6].



Şekil 1.12. Soğutma kanal tasarımları [6]

1.3. Köpürtme Enjeksiyon Kalıplama

Mikro hücresel termoplastiklerin üretilmesi için kullanılan köpürtme prosesi son 10 yılda yaygın olarak araştırılmaktadır. Mikro hücresel plastikler genellikle hücre çekirdeklenmesi ve polimer matrisindeki kabarcıkların büyümesi ile oluşur.

Tipik bir polimer köpürtme işlemi birkaç aşama içerir: erimiş polimer içindeki bir gaz şişirme ajanının yüksek bir basıncı altında çözünme, ortamdaki basıncın serbest bırakılması üzerine süper doymuş çözelti içindeki bir gaz kümesinin çekirdekleşmesi ve polimer içindeki çekirdekli kabarcıkların büyümesi ve nihayet denge boyutlarına çıkmasıdır. Nihai köpük yoğunluğu orijinal gaz yüküne, katılaşınca polimer matrisinde çözünmüş halde kalan gaz oranına, çevreye verilen gazın kaybına ve basınçsızlaştırma oranına bağlıdır. Hücre büyüklüğü ve hücre büyüklüğü dağılımı, çekirdeklenmenin kinetiğine, çekirdeklenmenin ve genleşme sırasındaki birleşmenin ardından kabarcık

büyüme prosesine bağlıdır. Bu tür malzemeler işlenirken farklı adımlar düşünülebilir. İlk önce polimer / gaz çözeltisi oluşumu, ikinci olarak mikro hücresel çekirdeklenme ve son olarak hücre büyümesi ve sonuçta ortaya çıkan yoğunluk azalmasıdır.

İlk aşamada, polimer / gaz çözeltisi oluşumu, bir polimeri yüksek bir gaz basıncı altında doyurmak suretiyle basıncın ve daha az oranda sıcaklığın bir işlevi olan polimer matris içindeki gaz çözeltisi tarafından yönetilen tek fazlı aşırı doymuş bir çözelti oluşturarak gerçekleştirilir. Gazın çözünürlüğünün çeşitli polimerlerde, özellikle de PP deki karbondioksit (CO_2) 'de çözünürlüğünün bağımlılığını analiz eden bazı çalışmalar yapılmıştır [12-14].

İkinci aşamada, polimer / gaz çözeltisini, mikro hücreleri çekirdekleştirmek amacı ile bir termodinamik kararsızlığa göndermek gerekir. Bu çekirdeklenme, çözeltinin çözünürlüğünün sıcaklık ve sistemin basıncı ile azaltılmasıyla sağlanabilir. Genellikle, hızlı bir basınç düşüşü polimer matrisinde yüksek bir çekirdeklenme oranı üretir ve ideal durumda bu çekirdeklenme anında gerçekleşir.

Plastik köpüklendirme işleminde, çekirdeklenme, bir polimer eriyiğinde gaz kabarcıkları üretme işlemini, tersinir bir termodinamik işlemle ifade eder. Küçük baloncukların yaratılması her zaman serbest bir enerji artışına neden olur ve çevre ile kararsız bir dengededir. Klasik çekirdeklenme teorisinde, bir kabarcığın büyümesi için en düşük yarıçapı tanımlayan kritik bir çekirdek vardır. Büyüklüğü kritik çekirdek yarıçapından daha büyük olan çekirdekli kabarcıklar hayatta kalacaktır, buna karşılık küçük olanlar çökecektir. Hücre çekirdeklenmesi homojen veya heterojen olabilir. Heterojen çekirdeklenme genellikle homojen çekirdeklenmeden 100 ile 1000 kat arasında daha uygundur. Polimer köpükleme işlemlerinde çekirdeklenme bölgeleri olarak çeşitli katkı maddeleri veya organik yükler kullanılabilir [15,16]. Hücreler çekirdeklendikten sonra, çözünmüş gazın polimer matristen kabarcıklara difüzyonu ile genişlemeye devam ederler. Sürecin bu aşamasında, gaz-polimer sistemlerinin difüzyon özelliklerini düzenleyen fiziksel parametrelerin derin bir bilgisi gereklidir [17-20]. Gaz molekülleri çekirdeklenmiş hücrelere yayıldıkça hücreler polimer yoğunluğunu azaltarak büyürler. Hücrelerin büyüdüğü hız, difüzyon hızı ve polimer / gaz çözeltisinin reolojisi ile sınırlıdır. Hücre büyüme süreci, katılaşma öncesinde hücrelerin büyümesi için izin verilen süre, sistemin sıcaklığı ve basıncı, diğer

baloncukların varlığı, v.b. ile kontrol edilir [21]. Temel olarak gazı polimer matrisine sokma yoluna bağlı olarak mikro hücresel polimerik köpüklerin üretilmesi için iki ana işlem vardır. Fiziksel köpürtme ajanları (PBA) prosesinde, gazlar doğrudan bir ekstrüzyon presinin veya bir enjeksiyon kalıplama makinesinin plastikleştirme ünitesinde polimer matrisine sokulur. Bu yöntem (Mucell® işlemi), Park ve Tomasko tarafından kapsamlı bir şekilde analiz edilmiştir [22, 23, 24]. CO_2, nitrojen (N_2), kloroflorokarbonlar veya argon gibi birçok PBA tipi, polipropilen, polietilen veya polisitren gibi farklı polimer reçineleri ile kullanılmıştır [25, 26].

Fiziksel köpürtme ajanları hem ekstrüzyon hem de enjeksiyon işlemlerinde kullanılabilse de CO_2 veya N_2 kullanan köpüklü enjeksiyon kalıplama işlemi yaygın olarak kullanılır. Bununla birlikte, PBA köpüklemesi, gaz dozaj ünitesi, kontrol cihazı, gaz enjektörü, özel olarak tasarlanmış bir vida ve yüksek basınçlı bir gaz kaynağı gibi özel ekipmanlara ihtiyaç duyar.

İkinci köpükleme işlemi grubu, kimyasal reaksiyon veya termal ayrışma nedeniyle belirli işlem koşulları altında gazları serbest bırakabilen CBA'ların kullanımını içerir. Çoğu CBA'lar ayrışmadan sonra N_2 veya CO_2 üretir [27-29].

Kimyasal köpürtme ajanlarının reaksiyonları endotermik veya ekzotermik olabilir. Azodikarbonamid, 170°C ile 200°C arasında ayrışma sıcaklıkları ile birlikte genellikle yüksek bir gaz verimine sahip en temsili ekzotermik kimyasal köpürtme ajanıdır [30]. Sodyum bikarbonat ve çinko bikarbonat ise en yaygın endotermik kimyasal köpürtme ajanlarıdır [31].

CBA'lar tarafından köpüklenen enjeksiyonla kalıplanmış plastik parçaların yoğunluğu, çöküntü izleri azalmış ve proses edilebilirliği kolaylaşmıştır, ancak kabarcıklar PBA ile elde edilenden daha büyüktür ve prensip olarak mekanik özelliklerin düşmesine neden olur. Mucell ve Tecocell teknolojileri ile elde edilmiş aynı ürünün yolluklarından alınmış kesit görüntüleri Şekil 1.13'te gösterilmiştir. Her iki köpürtme işlemi farklı fiziksel senaryolar sunar. Fiziksel köpürmede, dışarıdan harici gaz beslemesi yapılırken, kimyasal köpürtme prosesinde ana polimer ile karıştırılan ajan reaksiyona girer ve reaksiyon sonucunda ortaya çıkan gaz köpürtücü ve akış kolaylaştırıcı olarak kullanılır.



Şekil 1.13 Mucell (sol)-Tecocell (sağ) parça kesit görüntüsü [32]

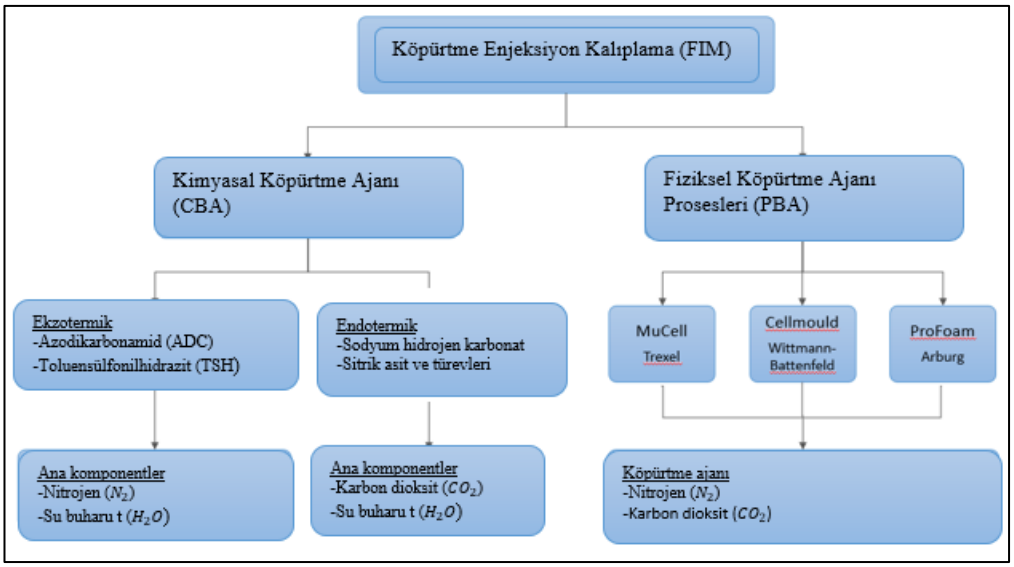
PBA köpürtme işlemi durumunda, tek bir gaz-polimer aşırı doymuş fazın oluşumu, sadece sistemin doyma basıncına ve sıcaklığına bağlıdır, ancak enjeksiyon sıcaklık ve basınç değişimlerinin kontrol edilmesi zor olabilir, bu nedenle çekirdeklenme ve genişleme işleminden hemen önce polimerde seyreltilmiş toplam gaz miktarını belirlemek doğru değildir. İdeal bir senaryoda, gaz çözünme işlemi sadece vida / kovan sisteminde gerçekleşirken, çekirdeklenme ve büyüme olayları kalıp doldurma sırasında veya sonrasında gerçekleşir. Her iki süreç de tamamen bağımsız ve ayrıdır.

CBA köpürtme işleminde, ayrışma reaksiyonunun vida-kovan sisteminde tamamlandığı ve tüm gazın polimer matrisinde üretildiği, dağıldığı ve çözündüğü ilk yaklaşımda düşünülebilir. Gazın polimer içerisinde çözünmesi, plastikleştirme ünitesindeki basınca bağlıdır, aynı zamanda plastikleştirme süresi ve difüzyon süresi arasındaki orana da bağlıdır. Ayrışma tepkimesi plastikleştirme ünitesinde tamamlanmazsa, analiz edilecek fiziksel sistem daha karmaşık hale gelir. Gazın bir kısmı CBA partiküllerinde reaksiyona girmeden kalır ve tüm gaz tamamen oluşturulamadığında bile köpürtme işlemi başlar.

Köpürtme teorik alt yapısı ile Şekil 1.14'te gösterildiği gibi kimyasal, fiziksel, endotermik, ekzotermik, N_2 ve CO_2 gibi farklı köpürtücü ajan çıktılarıyla günümüze kadar ulaşmıştır.

Fiziksel köpürtme alanında günümüzde en çok kullanılan, kendini kanıtlamış patentli yöntem Mucell teknolojisidir.

Mucell teknolojisinden sonra farklı makine üreticileri köpürtme teknolojisi üzerine çalışmalar yapıp farklı ticari isimlerle endüstride yerleri almışlardır.



Şekil 1.14. Köpürtme enjeksiyon kalıplama yöntemleri [33]

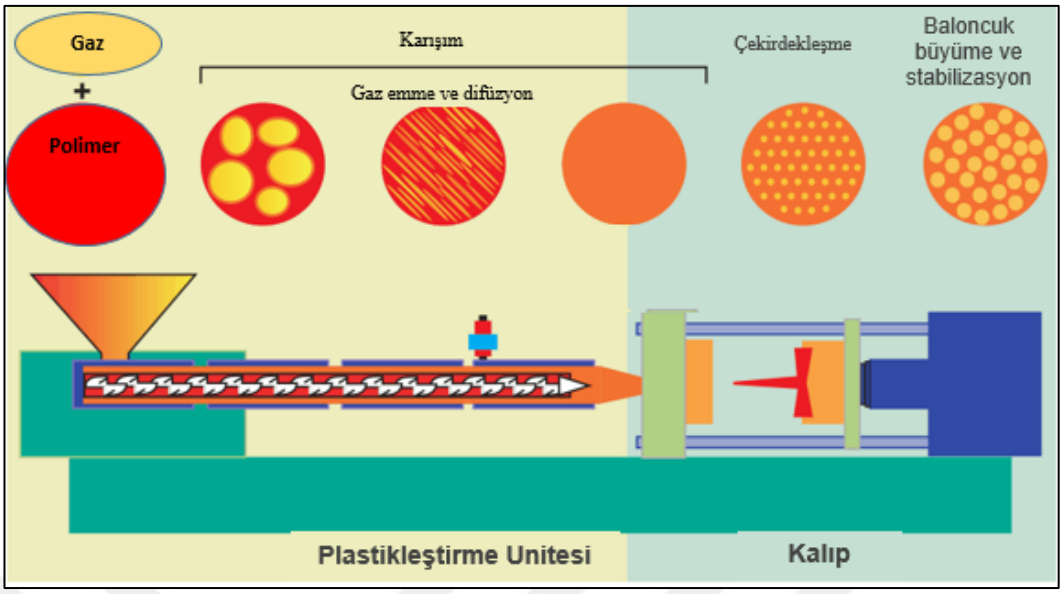
Köpürtme prosesinin avantajları şu şekilde sıralanır:

- Daha az hammadde kullanımı
- Daha kısa çevrim süresi
- Viskozite düşüşü, daha düşük basınç ve kapama kuvveti ihtiyacı, daha küçük enjeksiyon makinesi kullanımı
- Daha fazla tasarım seçeneği
- Daha az iç kalıntı gerilimi ve çarpılma, daha fazla ölçü stabilizasyonu, daha az kalıp bakımı
- Çöküntü izlerinin azlığı

Dezavantajlardan bahsedecek olur isek:

- Yüzey kalitesine negatif etki
- FBA'nın ilk yatırım maliyeti daha yüksek
- CBA'nın işletme maliyeti daha yüksek

Köpürtme prosesi Şekil 1.15'te gösterildiği gibi sırasıyla tek fazlı polimer gaz çözeltisi oluşumu, çekirdekleşme, baloncuk gelişimi ve stabilizasyon olmak üzere 4 temel fiziksel adımdan oluşur. Gaz çözeltisi oluşumu enjeksiyon kovanı içerisinde gerçekleşirken, çekirdekleşme, baloncuk büyüme ve stabilizasyon aşamaları kalıp boşluğu içerisinde gerçekleşir.



Şekil 1.15. Köpürtme prosesinin fiziksel adımları [33]

1. Tek fazlı polimer gaz çözeltisi oluşumu

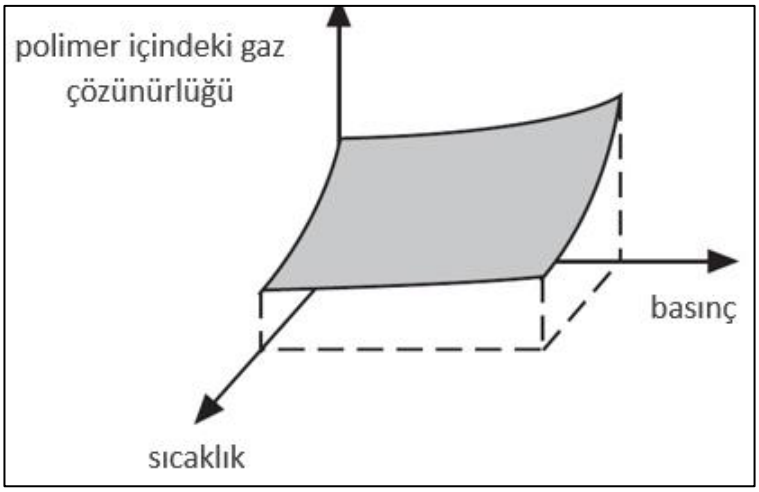
- Polimer ve gazın karışımı: Plastikleştirme aşamasında gaz eriyik ile karıştırılır.
- Yüzeye bağlama: Gaz molekülleri kendilerini plastik yüzeye bağlarlar.
- Emme: Eriyik tarafından gaz moleküllerinin hapsolması
- Yayılma: Gaz, konsantrasyon farkı olmadan ve homojen bir polimer-gaz çözeltisi oluşana kadar konsantrasyon gradyanı yönünde yayılır.
- Tek fazlı polimer gaz çözeltisi: İşlemler neticesinde gerçekleşmiş olur.

Bu fazdaki çözünürlük aşağıdakilere bağlıdır:

- Polimer gaz kombinasyonu
- Sıcaklık
- Basınç

Şekil 1.16'daki grafiğe göre çözünürlük artan basınçla yükselirken, artan sıcaklıkla düşer. Gerçekleşen gaz moleküllerinin polimer zincirleri arasında birikmesi sonucunda moleküller arası bağlanma kuvvetlerinin zayıflaması, polimer zincirlerin daha kolay hareketi ve viskozitenin azalması gözlenir [33].

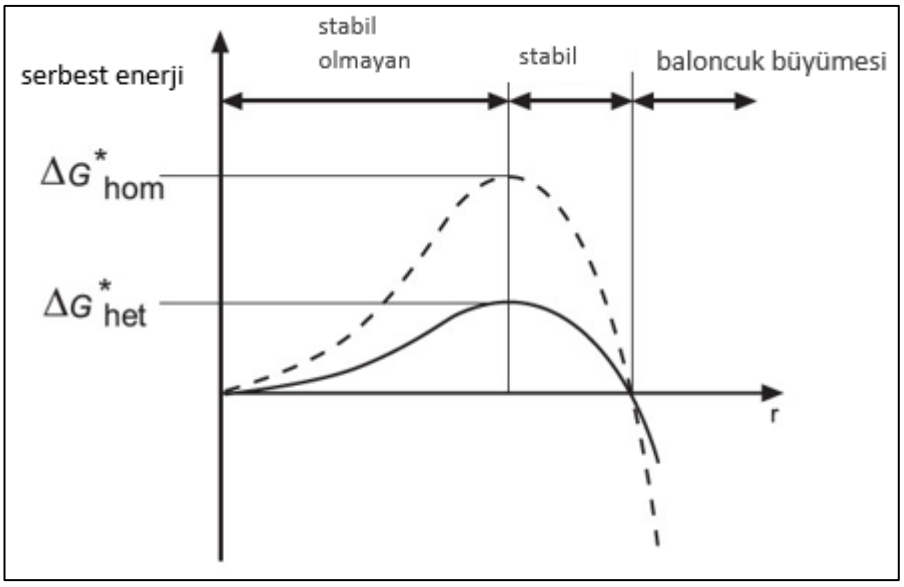
Viskozite azalması sonucu polimer gaz karışımı, kalıp boşluğunu daha düşük basınç ihtiyacı ile doldurur. Daha düşük basınç ihtiyacı, göz içerisinde de daha düşük basınç oluşumu ve sonucunda daha düşük kapama kuvveti gereksinimini ortaya çıkarır.



Şekil 1.16. Gaz çözünürlük diyagramı [33]

2. Çekirdekleşme

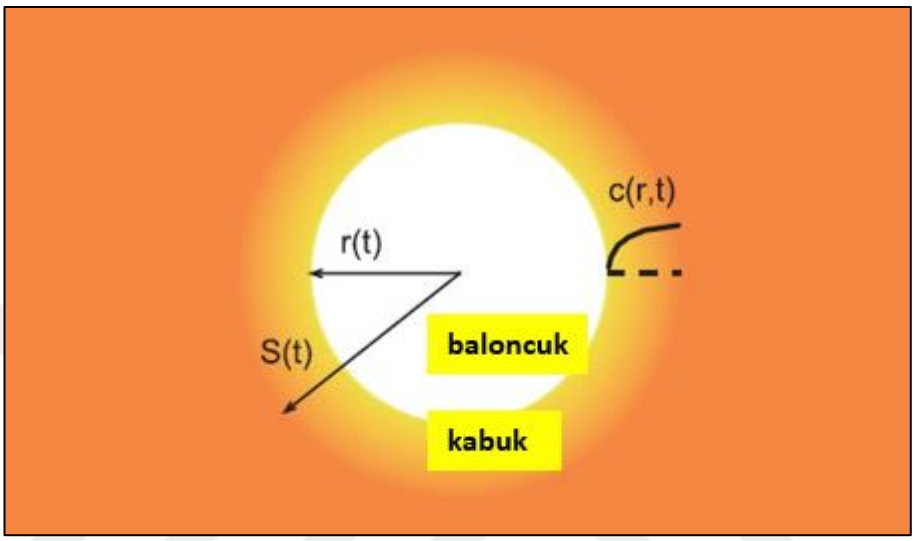
Çekirdekleşme homojen ve heterojen çekirdeklenme olarak iki tipte gerçekleşir. Şekil 1.17'de çekirdekleşme fazları gösterilmiştir. Homojen çekirdeklenme, heterojen çekirdeklenmeden daha yüksek serbest enerjiye ihtiyaç duyar. Stabil olmayan termodinamik dengesizlikler homojen çekirdeklenme aşamasında gerçekleşirken, heterojen çekirdeklenme sınır duruma daha yakın aşamada stabil olarak gerçekleşir. Ayrıca mevcut köpüklerin birleşmesi enerjisel açıdan daha verimli olsa da istenmez, buna karşın yeni köpüklerin oluşması ise yüksek basınç düşüşleri sebebiyle tercih edilirken yüksek bir enjeksiyon hızına ihtiyaç duyar [33].



Şekil 1.17.Çekirdekleşme fazları [33]

3. Baloncuk (Köpük) Gelişimi

Belirli oranda köpürtücü ajan kabuk içerisinde oluşur. Kabuktan köpürtücü baloncuklara doğru gazın difüzyonu gerçekleşir. Hücrelerde büyüme gerçekleşir. Şekil 1.18'de baloncuk büyümesi gösterilmiştir. Büyüme denge kriterini, baloncuk içerisindeki basınç-hacim ilişkisi belirler [33].



Şekil 1.18. Baloncuk büyümesi [33]

4.Stabilizasyon

Stabilizasyon aşamasında en önemli iki faktör kalıp sıcaklığı ve parça et kalınlığıdır. Soğuk kalıp veya düşük et kalınlıklı bir durumda stabilizasyon hızlı gerçekleşir ve homojen bir köpük yapısı oluşur. Sıcak kalıp veya yüksek et kalınlıklı durumda ise stabilizasyon yavaş gerçekleşir, polimer uzun süre eriyik olarak kalır, proseste difüzyon ve hücresel birleşmeler gerçekleşir bu da geniş ve homojen olmayan köpük yapılarına neden olur [33].

1.3.1. Kimyasal köpürtme ajanlı plastik enjeksiyon kalıplama

CBA, plastik endüstrisinde uzun zamandan beri kullanılmaktadır. Bununla birlikte, geleneksel kimyasal şişirici maddelerin çoğu yanıcıdır ve kullanımları ve salıverilmeleri için özel işleme teknikleri, uzun ürün depolama süreleri ve yasal onaylar gerektirir. Bu durumun değiştirilmesi gerekir, çünkü bazı kimyasal şişirme ajanları ozon tabakasına zarar vermek için bazı gazları serbest bırakabilir. Bu yüzden yeni kimyasal şişirme ajanları geliştirilmiştir ve endüstrinin kimyasal şişirme

ajanlarını ozon tüketen kimyasal şişirme ajanından çevre dostu kimyasal şişirme ajanına değiştirmesine yardımcı olmaktadır. Temel olarak yeni bir CBA tarafından üretilen bu çevre dostu gazlar ise azot gazı ve karbondioksit gazıdır. CBA' nın yeni gelişimi günümüzde bazı düzenli köpürtme işlemlerinde ve hatta bazı mikro hücreli işlemlerde yaygın olarak kullanılıyor, çünkü daha kolay proses, daha iyi ürün kalitesi, reaksiyon sırasında yan ürün ya daha az ya da hiç oluşmadan ve karmaşık makine donanım gereksinimi olmadan sadece katkı maddesi olarak avantajını gösteriyor. N_2 ve CO_2 üreten kimyasal köpürtme ajanları olmak üzere ikiye ayrılırlar.

Azodikarbonamid gibi ekzotermik köpükleme ajanlarından biri, ayrışma sıcaklıklarının üzerindeki sıcaklığa maruz kaldıklarında N_2 üretir. Ekonomik olmasına rağmen, N_2 gazı, yüzeyin içinden geçerken yüzey pürüzlülüğü ile ilgili sorunlar yaratabilen oldukça çözünmeyen bir gazdır. Bu nedenle, azot gazı üreten kimyasal şişirme maddesi, endüstride popüler bir köpürtme maddesi değildir.

CBA, termoplastik köpüklerin üretiminde yaygın olarak kullanılan şişirme maddesi için karbondioksit kullanır. Çalışmalar, CO_2'nin benzersiz bir düşük basınçlı çözünürlüğe sahip olduğunu göstermiştir. CO_2 yeterince basınçlandırıldığında süper kritik bir akışkan haline gelir ve bir çözücü olarak işlev görür, bu da camsı geçiş sıcaklığının düşmesine ve erime akış karakteristiklerinin önemli ölçüde iyileşmesine neden olur. CO_2'den elde edilen ekstra fayda, CO_2'nin, eriyiğin soğutmasına katkıda bulunan, dolayısıyla düşük çevrim süresi ve düşük parça gerilmelerini sağlayan süper kritik bir akışkan ve bir gaz geçişi sırasında ısı enerjisini emmesidir.

Kalın parça (4 mm veya daha fazla) donanım maliyetinden tasarruf etmek için CBA teknolojisini kullanabilir, çünkü CBA ilave gaz dozajlama ekipmanı olmadan sadece iyi bir karıştırma vidası ile işlem görebilir. Hammadde bir CBA ile karıştırılabilir. 130-230°C aralığında bir işleme sıcaklığında çözünen endotermik çekirdeklenme gösteren CBA, CO_2 gazını açığa çıkarır. Bu teknoloji, ince bir hücresel çekirdeğin çevresinde pürüzsüz katı bir yüzeye sahip olan mikro hücresel bir yapı ile sonuçlanmaktadır. Parçacık büyüklüğü, dağılım saflığı ve kontrollü bir gaz salımı, bu ince ve düzgün mikro hücresel yapıyı oluşturan çok sayıda çekirdeklenme bölgesi sağlamak için uyarlanmıştır [34]. Reaksiyonlara ısı girişi veya çıkışı durumuna göre endotermik ve ekzotermik kimyasal köpürtme reaksiyonu adı verilir.

Genel olarak kimyasal ajanlar birden fazla reaksiyon sonucu tüm işlemi tamamlar. Sitrik asit (CA) ve sodyum bikarbonat (SB) toksik olmayan gereksinimleri karşılar ve poliolefinlerin enjeksiyonla kalıplanmasında yaygın olarak kullanılır, çünkü ayrışma reaksiyonlarının sıcaklık aralığı işlem sıcaklığına uygundur. Örnek olarak aşağıda Hydrocerol® ajanı için gerçekleşen reaksiyon denklemlerine yer verilmiştir [35-37]. Sodyum bikarbonat, 1. derece reaksiyonda veya 2 ve 3. derece reaksiyonda geniş bir sıcaklık aralığında (100–180°C) düşük sıcaklıkta ayrışır [38-40]. Wu ve Shih'e [41] göre araştırmacılar arasındaki reaksiyon sırası farklılıkları [42,43] esas olarak parçacık boyutundan kaynaklanabilir. Sitrik asit, 160-270 ° C geniş bir sıcaklık aralığında ayrışır. Barbooti ve diğerleri [44], sitrik asidin önce 153°C'de eridiğini ve daha sonra köpürtme ajanının üçte birinin dönüşümünün ardından akonitik asit vermek için dehidrasyon yoluyla daha yüksek sıcaklıklarda ayrıştığını ve son olarak dekarboksilasyon ile metil maleik anhidritin (sitrakonik asit anhidrit) ayrıldığını göstermiştir. Toplam reaksiyon sırası, ikiye yakın bulunmuştur. Wyrzykowski ve arkadaşları [36] reaksiyon ara maddelerini, cis-akonitik asit ve trans-akonitik asit ($C_6H_6O_6$) ve ayrıca transakonitik anhidrit ($C_6H_4O_5$) veya itakonik anhidrit ($C_5H_4O_3$) veren dehidrasyon ve dekarboksilasyon reaksiyonlarını doğrulamıştır. Denklem (1.1)' de 1. reaksiyon sodyum bikarbonat ayrışması gösterilmiştir:

$$2NaHCO_3 \rightarrow Na_2CO_3 + CO_2 + H_2O \quad (1.1)$$

Denklem (1.2) ve Denklem (1.3)' te sitrik asit ayrışması (2.ve 3.reaksiyon) gösterilmiştir:

$$C_6H_8O_7 \rightarrow C_6H_6O_6 + H_2O \quad (1.2)$$

$$C_6H_6O_6 \rightarrow C_5H_6O_4 + CO_2 \quad (1.3)$$

Son olarak, Denklem (1.4)' te 4. reaksiyon olarak sodyum bikarbonat ve sitrik asit CO_2 ve su (H_2O) üretmek için birlikte reaksiyona girdiğinde bir bağlanma reaksiyonu meydana gelir:

$$C_6H_8O_7 + 3\ NaHCO_3 \rightarrow Na_3C_6H_5O_7 + 3\ H_2O + 3\ CO_2 \quad (1.4)$$

Çeşitli oranlarda sitrik asit ve sodyum bikarbonat karışımları, orta hücre boyutlarına sahip köpükler elde edilmesini sağlar. Reaksiyon 160°C'de başlar ve yaklaşık

210°C'de tamamlanır [45] ve su buharı, karbon dioksit ve katı bir tortu (sodyum sitrat dihidrat) verir. Hydrocerol® kimyasal şişirme maddeleri, genellikle stokiyometrik oranlarda harmanlanmış tipik sitrik asit ve sodyum bikarbonat karışımlarıdır. Ayrışma, CO_2, H_2O, Na_2CO_3, $C_6H_6O_6$, $C_6H_4O_5$ ve $C_5H_4O_3$'ün bulunduğu çeşitli gaz, sıvılar ve katı ürünler üretir. Behravesh ve diğerleri, bu bileşiklerin ayrışma davranışının ısıtma hızına duyarlı olduğunu göstermiştir [46]. Soares ve Nachtigall, PP / odun unu kompozitlerinde karıştırılan ve polietilende renk katkıları kullanan bu üfleme ajanını incelemişler [47]. Sodyum bikarbonat ve sitrik asit karışımının reaksiyon kinetiği hem izotermal hem de dinamik koşullar kullanılarak çapraz bağlı poliolefin grubundan PP içinde Dixon ve arkadaşları [48] tarafından araştırılmıştır. Son çalışmalar, poliolefinlerin ekstrüzyonu veya enjeksiyonla kalıplanması sırasında köpüklenmeyi daha iyi kontrol altına almak için ayrışma kinetiği hakkında iyi bir bilgi edinme eğilimini göstermiştir [49-52].

Gazın geçirgenliği ayrıca polimer yapısına da bağlıdır. Kristalimsi polimerler, gaz difüzyonuna karşı çok daha büyük direnç gösterirler çünkü kristalimsi yapı lamel kristallerince sıkıca doludur. Gaz molekülü bu kristallere nüfuz edemeyecek kadar büyüktür. Birçok reçine üreticisinin köpüklenebilir bir ürün geliştirmek için önemli bir araştırma ve geliştirme çabası olduğunu belirtmek gerekir. En iyi olarak tanımlanan yüksek yoğunluklu polietilen (HDPE), Polipropilen (PP), naylonlar ve polietilen terafitalat (PET) gibi yarı kristalin polimerlerdir. Amorf polimerde, moleküller arasındaki boşluklar, gaz moleküllerinin küçük kabarcıklar oluşturmasına izin verecek kadar büyüktür.

Kimyasal köpük teknolojisi çeşitli avantajlar sunar. Bu teknoloji eriyik akış özelliklerini iyileştirmek ve dağılımı düzgün hücre oluşumunu sağlamak için CBA' lar kullanabilir. Çoğu durumda, endotermik ajan köpük yapmak için kullanılmaz, ancak polimerin erime davranışını bir işleme yardımcısı olarak geliştirmek için kullanılır. Bununla birlikte, köpük oluşumundan bağımsız, CBA ana polimerin kalıptaki akışını iyileştirir. Çoğu endotermik madde, malzeme karışımına eklendiğinde, katı bir granül veya toz, önce katkı maddesinin ayrışması yoluyla gaz halindeki CO_2'ye dönüştürülür. 7,59 megapaskal'ın (MPa) altında CO_2, eriyik akışını iyileştiren bir kayganlaştırıcı olarak işlev görür. 11,72 MPa' nın üzerinde yüksek basınçta CO_2, gazdan süper kritik bir sıvıya dönüştürülür. Bu durumda, CO_2 gazı polimer eriyiğine çok daha kolay emilir

ve çoğu polimerin viskozitesini önemli ölçüde azaltır. Polimerin viskozitesini düşürerek, işlem sıcaklığını düşürme ya da aynı sıcaklıkta geliştirilmiş eriyik akışını kullanma seçeneği sunar. Geliştirilmiş eriyik akışı, daha az yolluk, daha ince duvar bölümleri, daha az iç gerilme ve kesme ısısı altında daha az yanma anlamına gelir. Bazı durumlarda, endotermik ajanların kullanımı, çok gözlü kalıpların gözler arası dengelenmesini kolaylaştırır.

Viskoziteyi düşürmenin en önemli avantajı, düşük erime sıcaklıklarında eş değer akış karakteristikleri elde etme olasılığıdır. Polimer matrisinde yüksek konsantrasyonlarda gaz molekülü varlığı, camsı geçiş sıcaklığındaki (Tg) bir düşüş ile kanıtlandığı gibi polimerde kayda değer bir plastikleştirme sağlar. Spesifik mikro hücreli polivinil klorür (PVC) köpükler için Tg, doygunluk üzerine 78,2°C'den (saf PVC) yaklaşık 14°C'ye düşer. Kabarcık çekirdeklenmesi ve köpük büyümesi, orijinal CO_2 doygunluğunda polimer Tg' sinin altında mümkündür.

CO_2, basınç düşmesinden dolayı süper kritik bir akışkandan gaz halindeki bir kabarcığa dönüştüğünde gerçekleşen durum endotermik bir ısı emme işlemidir. Polimer kalıba girerken, köpükleme sırasında ve ayrıca kalıp yüzeyine fiziksel temasta içeriden soğur. İşte bu kalın duvar kesitli CBA teknolojisinin bir örneğinde, endotermik şişirme ajanının %0,1-0,5 aktif seviyesini ekleyerek, çevrim süresi %10'dan daha fazla azaltılmıştır.

Doymuş CO_2, polimerik malzemenin çok tutarlı bir şekilde beslemesini mümkün kılan, gelişmiş malzeme akış özellikleriyle ortaya çıkan üründe, bir iç basınç uygulamaktadır. Bu iç basınç, bir soda şişesinin içindeki basınca benzerdir. Kapak çıkarıldıktan sonra basınç atmosfer basıncına düşer ve CO_2 gazı sıvıdan kaçmaya başlar. Ürün hala CO_2 ile doygun olduğundan ve önemli ölçüde plastikleştirildiği için, üründe daha düşük kalıplama gerilmeleri belirgindir. Malzeme, moleküler zincirlerin gevşemesi ve gerilmelerin dağılması için daha fazla zamana sahiptir [34].

1.3.1.1. Kimyasal köpürtme ajanı tasarım önerileri

Enjeksiyon kalıplamada, endotermik şişirme ajanları ile ana gelişimi görülmesi beklenir. Bu teknoloji, tasarımcıların, iç gerilmeler veya çöküntü olmadan, ince ve kalın kesitli kalıplar üretmelerini sağlayacaktır. Kolaylıkla tek bir kalıplamada duvar

kalınlıkları 1 mm ile 10 mm arasında veya daha fazla olan kalıplanmış ürünler üretmek için, endotermik şişirici bir maddenin sadece %0,1-0,5 aktif seviyesini eklemek gerekir. Endotermik genellikle seyreltici reçinenin erime mukavemetini veya özelliklerini artıran ve haznede yüksek hassasiyetli bir yan karıştırıcı / besleyiciden başka hiçbir ek masraf olmadan kullanılabilen taşıyıcı reçinelerle formüle edilir. Bununla birlikte, basit karıştırma da istenen sonucu verecektir.

İyi bir köpük dağılımına sahip "A" sınıfı yüzey kalitesine sahip kalıpları üretmek için hem tasarım hem de işleme önerilerini gözlemlemek gerekir. Uygulamada, bunların çoğu N_2 gaz enjeksiyon sistemleri veya gaz karşı-basınç sistemleri için kullanacağınız koşullara benzerdir. Bir kalıbın içinde serpintiyi veya erken köpürtmeyi önlemek için, eriyiğin ön akışında 0.24 MPa' lık bir gaz basıncının muhafaza edilmesi gerekir. Kalıp doldurma aşamasında kabarcıklar ve yüzey oluştuğu için, kabarcığın yüzeyde ortaya çıkma eğilimi azalır, bu da kalın kesitlerde daha iyi bir görünüm sağlar. Kalıp içinde 0.24 MPa' lık kalıp ventilasyon deliklerinin alanını azaltarak veya enjeksiyon hızını arttırarak kolayca elde edilir. Çoğu kalıpta, normalde yetersiz havalandırma olarak görülen şey, CBA kalıplama ile yapılan parçanın iyi yüzey kalitesi için aslında daha iyidir. Ana giriş yolluğu ve diğer yolluklar da kesme ısısını düşürmek ve hızlı doldurmaya izin vermek için mümkün olduğunca kısa olmalıdır.

Ürünleri tasarlarken yolluk girişleri mümkün olduğu kadar geniş olmalı, ancak beslenen ürün et kalınlığının üçte ikisinden fazla olmamalıdır. Kesit kalınlığının keskin geçişleri, özellikle enjeksiyon noktasına yakın yüzeyde gazlanma konusunda daha fazla zorluk yaratacaktır. Mümkünse, yumuşak geçişler kullanılmalıdır. CBA ile parça tasarımı göz önüne alındığında, düşük viskozite nedeniyle, CBA kullanıldığında malzeme akışının iyileştirileceğini göz önünde bulundurmak gerekir [34].

1.3.1.2. Kimyasal köpürtme ajanı proses önerileri

Kimyasal köpürtme ajanı, proses açısından, çoğu standart kalıplama makinesi iyi kalitede CBA kalıplamalı parça üretebilir. Polimer eriyiğinin viskozitesindeki değişiklikleri yansıtacak şekilde enjeksiyon basıncı ve enjeksiyon hızının ayarlanması gerekecektir. Kalıplama koşullarını oluştururken, bir kerede yalnızca bir değişkeni değiştirmek önemlidir. En iyi koşullar normal olarak erime sıcaklığının yaklaşık 5°C artırılması, enjeksiyon basıncının azaltılması, parça ağırlığının azaltılması, soğutma

süresinin azaltılması ve enjeksiyon hızının arttırılmasıyla belirlenir. Her baskı ağırlığı / yoğunluğu azaltması için, tekrarlanabilir parametreler hızlı bir şekilde oluşturulabilir. Her durumda, makine operatörleri, her bir polimer için işlem penceresinin oldukça genişleyeceğini görecektir.

CBA teknolojisi, gaz destekli veya gaz enjeksiyon sistemlerine benzer ağırlık ve eşit çevrim zamanlarında ürünler üretir; Örnek olarak, ayna muhafazası parçası denemeleri, parça yüzeylerinin ve köpük davranışının gerçek durumla karşılaştırmasını sağlamıştır. Kalıplama, enjekte edilen N_2 gazının ve CBA kaynaklı gazın nasıl davrandığını görmek için doğal bir şekilde üretilmiştir. İlk önce, sabit koşullar sağlayan ve aynı koşullar altında iyi görünüm veren bir dizi işlem parametresi belirlenmiştir. Endotermik gaz, en yüksek basınç düşüşü olan bölgelerde köpük bir yapı oluşturmuştur. Yakın incelemede, yüksek basınca maruz kalan ince kesitlerde gözle görülebilir bir köpük yoktur, ancak köpük yapısı en kalın alanlarda daha belirgin hale gelmiştir. En düşük yoğunluk en kalın alanlarda elde edilebilmiş, bu gaz genleşmesi, çöküntüleri önleyen itici güç olarak ortaya çıkmıştır.

Bir başka endüstriyel uygulamada, N_2 gaz enjeksiyon işlemi ve CBA arasındaki karşılaştırmayı göstermektedir. Bu durumda, ince cidarlı alandan kalın cidarlı tutamağa geçiş daha da çarpıcı olmuştur. Her iki durumda da iyi bir görünüm elde edilmesine rağmen, çevrim süresi CBA endotermik ajanı ile N_2 gazı enjeksiyon işleminden daha kısa sürmüştür.

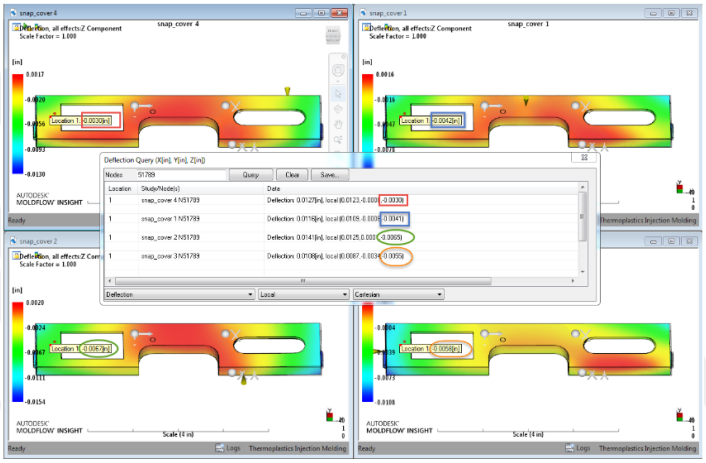
Özetle, CBA kalıplaması, kalıpta aşırı kesme ısısına ve kimyasal köpürtme maddesinin istenmeyen bir reaksiyonuna neden olabilecek çok fazla akış kısıtlamasını önleyecektir. Ek olarak, CBA kalıplamanın, kalıp doldurma sırasında ani olarak eşit olmayan basınç düşmelerini önlemesi gerekir; bu durum, erimiş yüzde yetersiz gaz karşı-basıncına neden olur ve kalıbın içinde erken köpüklenme veya püskürmeye neden olabilir. Şimdi artan çevresel baskı ve CO_2 kullanımına yapılan yeni vurgu ile yeni fırsatlar mevcuttur.

Bazı uygulamalarda, CBA teknolojisi geleneksel doğrudan gaz enjeksiyon uygulamalarını tamamlar. Yüksek basınç enjeksiyonlu gaz, bir araya gelen polimer için hızlandırıcı görevi görürken, CO_2 polimer çözeltisi, genel performansta iyileşmelere yol açan erime akış özelliklerini geliştirir [34].

1.4. Akış Analizi: Moldflow

Moldflow® simülasyon yazılımı, plastik enjeksiyon ve sıkıştırma kalıplama ile ilgili sorunların giderilmesini sağlar. Gelişmiş araçlar ve basitleştirilmiş bir kullanıcı arabirimi, parça eğriliği, soğutma kanalı verimliliği ve döngü süresinin azaltılması gibi üretim zorluklarını gidermeye yardımcı olur [53].

Otomotiv, beyaz eşya ve ince cidarlı paketleme alanlarında akış simülasyonu olarak en çok kullanılan yazılımdır. Şekil 1.19'da karşılaştırmalı çarpılma analiz sonuçlarından bir program görüntüsüne yer verilmiştir.



Şekil 1.19. Moldflow çarpılma analiz sonucu [54]

Autodesk Moldflow yazılımının farklı prosesler ve analiz seviyesine göre beş farklı versiyonu vardır. Bunlar:

Autodesk Moldflow Adviser Premium: Başlangıç versiyonu olup, sadece plastik enjeksiyon dolum analizleri gerçekleştirilir.

Autodesk Moldflow Adviser Ultimate: Premium versiyonuna ek olarak; soğutma, çarpılma analizleri de yapılabilir.

Autodesk Moldflow Insight Standart: Adviser paketlerine ek olarak daha çok akış uzunluğu fazla olan parçalarda kullanılan sıralı enjeksiyon simülasyonları yapabilmek mümkündür.

Autodesk Moldflow Insight Premium: Diğer modüllere ek olarak, 3 analizi aynı anda çalıştırma özelliğine sahiptir.

Autodesk Moldflow Insight Ultimate**:** Programın en ileri paketidir. En büyük farkı konformal soğutma, fiziksel köpürtme, kimyasal köpürtme, hızlı ısıtma soğutma gibi katma değeri yüksek özel plastik enjeksiyon prosesleri yalnızca bu modül ile çalıştırılabilir. Akış simülasyonu ile prosesin tüm parça ve kalıp tasarım hatalarını üretime geçmeden ortaya koyabilme, efektif kalıp ve üretim zaman yönetimi, doğru proje tekliflendirme ve bilimsellikten uzak yöntemler dışında parça kalite problemlerini minimize ederek enjeksiyon işlemini devreye alma gibi yeteneklere sahip olunur.

1.5. Yardımcı Ekipmanlar

Plastik enjeksiyon prosesinde enjeksiyon makinesi ve kalıbı dışında belirli yardımcı ekipmanlar bulunmaktadır. Üretimde kullanılan yardımcı ekipmanlar, sıcak yolluk kontrol üniteleri, kurutucu ve dozajlayıcı sistemler, kalıp şartlandırıcılarıdır.

1.5.1. Sıcak yolluk kontrol üniteleri

Sıcak yolluk sistemi için gerekli ısı ve kontrolü sağlayan cihazlardır. Manifold ve nozül bölgeleri ayrı ayrı kontrol edilebilir durumdadır.

1.5.2. Kurutucu ve dozajlayıcı sistemler

Plastik hammaddelerin nem oranları, prosese girmeden önce istenilen seviye getirilmesi gerekir. Kurutucular, kendi siloları içerisinde her polimere özel kurutma işlemi uygulayan prosese hazır hale getiren sistemlerdir. Dozajlayıcı sistemler ise özellikle ana polimere karıştırılacak dolgu ve katkı maddelerinin seri üretime paralel istenilen hacimsel ve kütlesel yüzdelerle beslenmesini sağlar.

1.5.3. Kalıp şartlandırıcıları

Şartlandırıcılar, soğutma kanallarına gönderdikleri akışkanın sıcaklık ve debi kontrolünü yaparak plastik enjeksiyon prosesinin stabil bir şekilde gerçekleşmesi için kalıp sıcaklığının, proses boyunca her bir polimere özgü olması gereken sıcaklıkta kalmasını sağlayan sistemlerdir.

2. LİTERATÜR TARAMASI

Çalışmanın amacına uygun olarak literatür çalışması; konvansiyonel plastik enjeksiyon prosesi ve köpürtme prosesleri ile parça üretimi ve akış analizleri, deneysel tasarım setleri ile proses parametre değişkenlerinin etkileri, farklı kimyasal köpürtme ajanlı köpürtme proseslerinin ağırlık, çevrim, kapama kuvveti gibi işlem kazanımlarının incelenmesi üzerine yapılmıştır.

Çalışmanın amacı, otomotivden beyaz eşya sektörüne kadar birçok sektörde vazgeçilmez olan, birim parça maliyetini düşürme çalışmaları adına, parça üzerinde herhangi bir kalite ve ölçüsel kıstas bozulmadan parça ağırlığı, çevrim süresi ve kapama kuvveti düşürme gibi kazanımları ortaya koymaktır. Çalışmanın özgünlüğü, daha önce akış simülasyonları ile ortaya koyulmamış olan kimyasal köpürtme prosesi kazanımlarının simülasyon ortamında analiz edilmesi ve bunların gerçek üretim koşullarındaki doğruluğunun deneysel parametrik çalışmalar ile teyit edilmesidir. Ayrıca daha önce farklı kimyasal ajan içeriklerinin morfolojik yapılarının incelendiği çalışmaların üzerine aynı parametrelerle farklı ajan kullanımının, proses kazanımları üzerindeki etkisi incelenerek daha önceden yapılmamış bir kısım doldurulmuştur.

2.1. Köpürtme Plastik Enjeksiyon Prosesi Çalışmaları

Köpürtme enjeksiyon ile plastik parça üretiminde bugüne kadar yapılmış çalışmalar incelenerek özetlenmiştir. Genel olarak yapılan çalışmalar, karışımın eriyik reolojisi, morfolojisi, kimyasal fiziksel köpürtme karşılaştırmaları ve farklı kimyasal ajanların mekanik özelliklere etkisi üzerine yapılmıştır. Kimyasal köpürtme teknolojisinin, üretim aşamasına geçmeden sanal ortamda kazanımlarının simüle edilmesi ile ilgili bir çalışmaların yetersizliği bu tez çalışmasıyla giderilmeye çalışılmıştır.

Martin Jacobi ve arkadaşları (2013), Trexel Inc. Firmasının patentli teknolojisi olan MuCell mikro hücresel enjeksiyon kalıplama prosesini akış simülasyonları ve gerçek üretim sonuçları ile karşılaştırmalı incelemişlerdir. Çalışma farklı hammaddeler, farklı enjeksiyon hızları ve farklı N_2 gazı miktarları kullanılarak yapılmıştır. Sonuç olarak,

basınçlar, kapama kuvveti gerekliliği, akış yolu ve hücre yapısı açısından simülasyon ile gerçek parça arasında ciddi bir korelasyon olduğunu kanıtlamışlardır. Fakat parçanın tam ve eksik dolum tahminleri konusunda ilerleyen çalışmalara yer verileceğinden bahsedilmiştir [55].

O.S. Kamber (2019), yılında robot temizleme silindir parçası üzerinde sıcaklık, basınç, soğutma zamanı ve köpürtme ajanının parça üzerindeki ölçüsel etkisini incelemiştir. Parçanın çap ölçüsünün soğutma süresi değişkenliğinden oldukça yüksek oranda etkilendiğini göstermiştir. Sıcaklık ve köpürtücü ajan oranı düştükçe ölçüsel stabilite arttığı sonucuna ulaşmıştır. Parçanın dairesellik ölçüsü tutarlılığını sağlamak için %3 oranının üzerinde köpürtücü ajan katkısı kullanılması gerektiği sonucuna ulaşmıştır [56].

Sung Woon Cha arkadaşları, çarpılmayı cam elyaf takviyeli polimerde mikro hücresel köpürtme işlemi ile en aza indirgemeyi amaçlayan çalışmalar yapmışlardır. Köpürtme prosesinde 0 ile %40 arasında cam elyaf kullanımının çarpılmayı iyileştirdiği, bu oranın üzerinde kullanımlarda çarpılmayı iyileştirme yönündeki etkisinin bozulduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca cam elyaf katkılı polimerlere uygulanan köpürtme prosesinde parçanın termal özelliklerinde iyileşme gözlemlemiştir [57].

X. Qin ve arkadaşları (2006), yılında termoplastik poliolefin (TPO) içerisinde kimyasal ve fiziksel köpürtme ajanlarını reolojik olarak karşılaştırmalı incelemişlerdir. 55 tonluk bir enjeksiyon makinesinin çıkışına bağlanmış kılcal reometre kullanılarak TPO malzeme içerisine karıştırılan endotermik ekzotermik kimyasal köpürtme ajanlarının eriyik reolojisine etkisi incelenmiştir. En fazla viskozite düşüşü %47 oranında 250°C'de %3,2 ağırlıkça CO_2 katkısı olan deneysel çalışmada elde edilmiştir. Ekzotermik kimyasal köpürtme ajanı endotermik olana göre daha fazla viskozite düşüşü sağlamıştır. Ayrıca fiziksel köpürtücü ajanlardan karbon dioksit, nitrojene olana göre daha fazla viskozite düşüşüne neden olmuştur [58].

Jose Antonio Reglero Ruiz ve arkadaşları, kimyasal köpürtmeye ek olarak karşı gaz basıncı ve çekirdek genişleme proseslerini morfolojik açıdan incelemişlerdir. Saf ve katkılı polipropilen hammadde ile farklı tipte kimyasal köpürtme ajanları kullanılarak çalışmalar yapılmıştır. Karşı gaz basınçlı proseste, parametrelerin etkisi parça yüzeyini etkilediğini, akış debisi düşüşü ile köpük hücre çapının arttığı gözlemlenmiştir. Karşı

gaz basınçlı ve çekirdek geri çekmeli kimyasal köpürtme prosesinde standart köpürtme işlemlerine göre daha homojen yapıya sahip hücreler ve daha düşük yoğunluklu örnekler elde edilmiştir. Ayrıca ana polipropilen hammaddenin katkılı ve katkısız olmasından köpük yapısının etkilendiği kanıtlanmıştır [59].

Cristina Saiz-Arroyo ve arkadaşları, polipropilen köpük yapıların yoğunluklarının kontrol edilebilmesi üzerine çalışmalar yapmışlardır. Daha önce CO_2 ile köpürtme işlemi yapılmış ve nihai ürün yoğunluklarının kontrol edildiğine dair bir çalışma yapılmamıştır. Mukavemet açısından en iyi malzemeler, gaz çözünmesi ile yapılanlar ve ardından en düşük azodikarbonamid kullanılarak yapılanlardır. Ayrıca CO_2 kullanılarak üretilen numunelerin enerji eğilimi açısından daha iyi bir performansa sahip olduğu ortaya çıkmıştır. Kimyasal köpürtme yöntemi ile azodikarbonamid ayrışma reaksiyonu sonucu oluşan yan atık ürünler polipropilen matrisinde bir miktar elastikiyet kaybına neden olmuştur [60].

Michel Vincent ve arkadaşları (2015) tarafından farklı kimyasal köpürtme ajanları (CBA) kullanılarak polimer köpürtme işleminin deneysel ve teorik bir analizi yapılmıştır. PP/CO_2 sisteminin köpürtme işlemini, çeşitli kimyasal köpürtme ajanları kullanarak farklı basınç koşulları altında analiz etmek için basit bir deney tasarlanmıştır. Her bir CBA parçacığını çekirdekleşme alanı olarak kabul ederek ve çevresindeki polimer matrisinde gaz difüzyonunu hesaba katarak, ilgili Diferansiyel Taramalı Kalorimetri (DSC) ve Termo Gravimetrik Analiz (TGA) deneylerine dayanan tek bir kabarcık simülasyonu oluşturulmuştur. Bu, bir CBA' nın köpüklü bir yapı geliştirme yeteneğini ve sonuçta ortaya çıkan mekanik özellikleri tahmin etmek için basit bir yöntem geliştirilmesini sağlamışlardır [61].

Hyun Keun Kim ve arkadaşları (2019), tipik olarak bir katı polimerinkinden daha kötü olan cam elyaf takviyeli polimer içindeki çarpılmayı en aza indirmek için mikro hücresel köpükleme işleminin temel prensiplerini ve özelliklerini analiz etmişlerdir. Akış ve akışa dik yöndeki çekme farkının, çarpılmaya neden olduğunu doğrulamışlardır. Ayrıca, mikro hücresel köpürtme prosesinin, darbe mukavemeti, çekme mukavemeti, eğilme mukavemeti ve sapma sıcaklığı ölçümlerine dayanılarak mekanik ve termal özelliklerin iyileştirdiğini ortaya koymuşlardır [62].

Eunse Chang ve arkadaşları (2017), çalışmalarında polipropilen köpürtme enjeksiyon işlem parametrelerinin köpük yapısı, mekanik ve yüzey özellikleri üzerindeki etkisini araştırmışlardır. En küçük köpük hücre boyutuna %5 CBA katkılı, en büyük hücre boyutuna %9 CBA katkılı proseste ulaşmışlardır. Buna ilave olarak, gerilme özellikleri ve yüzey pürüzlülüğü değerleri de aşırı CBA kullanımının köpüklü plastikler üzerinde zararlı etkileri olabileceği sonucuna varmışlardır [63].

2.2. Plastik Enjeksiyon Akış Analizleri ve Deney Tasarımları

Plastik enjeksiyon kalıplama ile üretilecek olan parçalara akış analizi yapmak, proseste birçok parametreyi tahmin etmek ve doğrulamak için avantaj sağlamaktadır. En kısa zamanda en düşük maliyette plastik parçanın kalıplanmasını ve kalıplama sonrası plastik parçadan beklenen özellikleri tahmin etmede çeşitli plastik akış analiz programları kullanılmaktadır. Bu konuda yapılan çalışmalar literatürde oldukça kısıtlıdır.

Baofu Sun ve arkadaşları (2017), çalışmalarında plastik tarak parçası için dolum, çarpılma, yolluk giriş yeri analizlerini yapmış, analiz sonuçları doğrultusunda istenen proses parametrelerini bulmuşlardır. Moldflow programında yapılan analizler, parçaların kalitesini iyileştirerek, deneme sürelerini ve üretim maliyetini azaltarak üretimi daha verimli hale getirebileceği saptanmıştır [64].

HU Guang-hong ve arkadaşları (2010), çalışmalarında yolluk çapı, ütüleme basıncı ve ütüleme süresinin çekme üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Çalışma sonunda yolluk çapının, ütüleme süresini etkilediği, uygun ütüleme süresi verildiğinde çekme ve çarpılmanın azaldığını tespit etmişlerdir [65].

J. Koszkul ve arkadaşları (2010) Moldflow'u kullanarak farklı matematiksel modellerin akışa karşı direnç sonuçlarını kıyaslamıştır. Farklı matematik modellerinin farklı parçalar için daha uygun olabileceğini ortaya koymuştur [66].

Jorge ve arkadaşları (2018), üretilecek plastik parçanın geometrisinin tanınmasına dayalı olarak enjeksiyon kalıplama işlemindeki döngü süresinin otomatik olarak hesaplanması için, giriş verileri olarak sadece plastik parçanın ve formattaki malzemenin geometrisini alarak yeni bir prosedür oluşturmayı amaçlamışlardır.

Analitik-ampirik algoritma, geometrisi hacmine, kalınlığına ve eriyik plastik akışının yoluna ve Moldflow akış analizlerine göre dikdörtgen bir plaka şekli test parçası kullanarak enjeksiyon aşamasının sayısal simülasyonlarının otomatik bir analizini gerçekleştirir. Bu şekilde, tasarımcıların, döngü süresinin değerini en kısa sürede elde ederek, müşteriye hızlı ve doğru bir şekilde yanıt vermesini sağlamışlardır [67].

Öktem ve arkadaşları (2007) hem Taguchi deneysel tasarım metodu hem de Moldflow analizleri kullanılarak ince cidarlı parça üzerinde çarpılma optimizasyonu ile iyileşme sağlamışlardır [68].

Özçelik ve Erzurumlu (2006) yapay sinir ağ metodu ve deneysel tasarım yöntemleri kullanılarak yapılan analizlerle ince cidarlı parça üzerinde çarpılmaya etki eden en etkili parametrelerin sırasıyla ütüleme basıncı, kalıp sıcaklığı, eriyik sıcaklığı, ütüleme zamanı, soğutma zamanı, yolluk tipi ve yolluk yeri olduğunu tespit etmişlerdir. Çarpılmayı yaklaşık %50 oranında iyileştirilerek yapılan optimizasyon yöntemlerinin gerekliliği ortaya koyulmuştur [69].

Ünal ve Yetgin (2011), enjeksiyon basıncı, enjeksiyon hızı ve eriyik sıcaklığı parametrelerini sonucu oluşan köpük yoğunluğunu ve hücre boyutlarının parçanın darbe dayanımı üzerindeki etkisini incelenmiştir. Eriyik sıcaklığı arttıkça darbe dayanım azaldığı bulunmuştur [70].

Zhang ve arkadaşları (2015) enjeksiyon parametrelerinin parça ağırlığı üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Hammaddesi ABS/Polikarbonat (PC) olan menteşe parçanın ağırlığını etkileyecek faktörleri Taguchi yöntemi ile bulmaya çalışmışlardır. Parametrelerin, menteşe yapının iki tarafında menteşenin ince geçiş kesiti yüzünden parça ağırlığını farklı şekilde etkilediği bulunmuştur [71].

3. MALZEME VE YÖNTEM

Bu bölümde yapılan çalışmada kullanılan malzeme ve deneysel yöntemler detaylı olarak incelenmiştir.

3.1. Plastik Parça

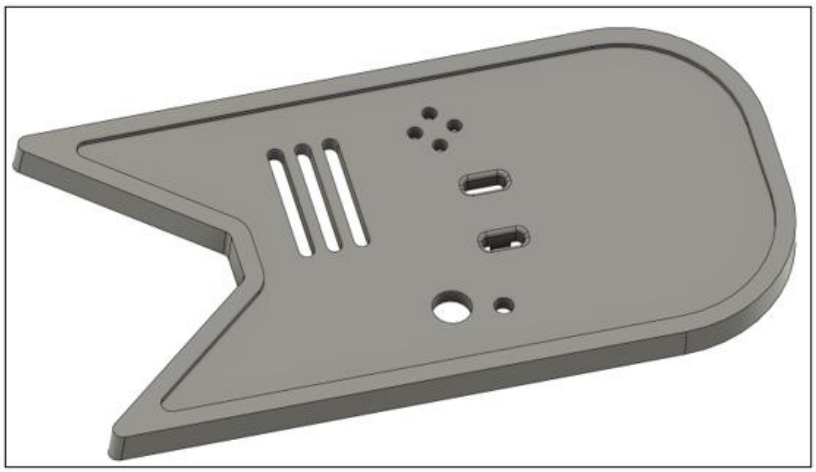
Çalışmada kullanılan parça, anahtarlığa benzeyen bir yapıda plastik enjeksiyon eğitimlerinde kullanılan farklı modellerin yer aldığı bir yapıdadır. Üzerinde birkaç tırnak şekli, ızgara yapısı, deliklerin bulunduğu bu parça yapılan tüm üretim denemelerde kullanılmıştır. Parça, Şekil 3.1'de gösterildiği gibi temel olarak dolumda problem yaşanabilecek şekilleri içeren yapıda tasarlanmıştır.



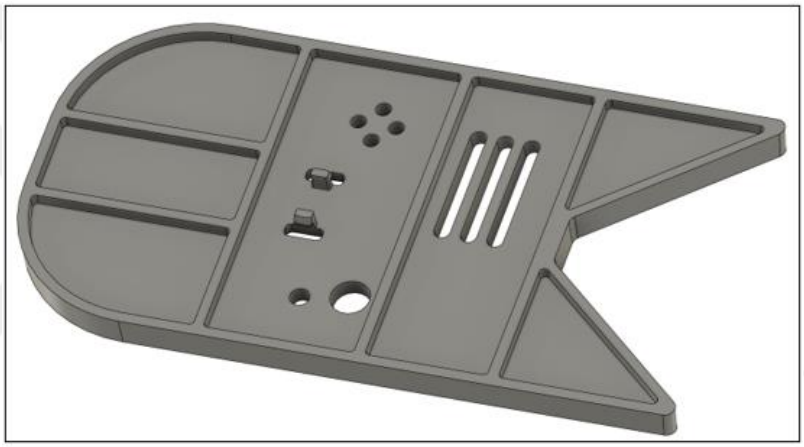
Şekil 3.1. Deneysel parçanın görseli

3.2. Plastik Parçanın Katı Modeli

Parçanın yaklaşık uzunluğu 73,07 mm'dir. Et kalınlığı 1,5 mm ile 3,5 mm arasında değişkenlik göstermektedir. Eni 38,29 mm'dir. Parça üzerinde 12 mm uzunluğunda 1,5 mm genişliğinde 3 adet ızgara yapı, 4 mm çapında 1 adet, 2 mm çapında 1 adet ve 1,5 mm çapında 4 adet delik bulunmaktadır. Ayrıca 2 adet 4 mm boyunda 1,6 mm genişliğinde tırnak şekli yer almaktadır. Parçanın katı model görselleri Şekil 3.2 ve Şekil 3.3'de gösterilmiştir.



Şekil 3.2. Deneysel parça katı modelinin üstten görünüşü



Şekil 3.3. Deneysel parça katı model alttan görünüşü

3.3. Plastik Parçanın Hammaddesi

Plastik parçanın hammaddesi Lyondellbasell firmasının Moplen EP548P ticari isimli PP polimer hammaddesidir. Bu hammadde plastik enjeksiyon endüstrisinde kullanım alanı olarak en geniş yelpazeye sahiptir. Hammadde tedarikçisinin oluşturduğu sertifikaya göre malzemenin fiziksel özellikleri ve test şartları Tablo 3.1' de verilmiştir. Malzemenin mekanik özellikleri Tablo 3.2' de verilmiştir. Malzemenin darbe dayanım özellikleri Tablo 3.3' te verilmiştir.

Malzemenin sertlik özellikleri Tablo 3.4' te verilmiştir. Malzemenin termal özellikleri Tablo 3.5'te verilmiştir.

Autodesk Moldflow kütüphanesinde yer alan polimer hammadde özellikleri Tablo 3.6' da verilmiştir.

Tablo 3.1. Malzemenin fiziksel özellikleri ve test şartları

Fiziksel özellikler	Test Koşulları	Test Metodu	Birim	Değer
Eriyik Akış İndeksi	230°C/2,16 kg	ISO 1133-1	gr/10dk	16
Özgül Ağırlık	23°C	ISO 1183-1	gr/cm³	0,90

Tablo 3.2. Malzemenin mekanik özellikleri

Mekanik özellikler	Test Metodu	Birim	Değer
Çekme Modülü	ISO 527-1,2	Mpa	1400
Çekme Mukavemeti @ Akma	ISO 527-1,2	Mpa	0,90
Çekme Gerinimi @ Kopma	ISO 527-1,2	%	>50
Çekme Gerinimi @ Akma	ISO 527-1,2	%	7

Tablo 3.3. Malzemenin darbe dayanım özellikleri

Darbe özellikleri	Test Koşulları	Test Metodu	Birim	Değer
Charpy Darbe Dayanımı-Çentikli	(23°C, Tip 1, Yanlamasına, Çentik A)	ISO 179	kJ/m²	8
Charpy Darbe Dayanımı-Çentikli	(0°C, Tip 1, Yanlamasına, Çentik A)	ISO 179	kJ/m²	6
Charpy Darbe Dayanımı-Çentikli	(-20°C, Tip 1, Yanlamasına, Çentik A)	ISO 179	kJ/m²	3
Sünek / Gevrek Geçiş Sıcaklığı		ISO 6603-2	°C	-45

Tablo 3.4. Malzemenin sertlik özellikleri

Sertlik özellikleri	Test Koşulları	Test Metodu	Birim	Değer
Top Girinti Sertliği	(H 358/30)	ISO 2039-1	MPa	69

Tablo 3.5. Malzemenin termal özellikleri

Termal özellikler	Test Koşulları	Test Metodu	Birim	Değer
Vicat Yumuşama Sıcaklığı	(A/50 N)	ISO 306	°C	147
Vicat Yumuşama Sıcaklığı	(B50)	ISO 306	°C	70

Tablo 3.6. Polimer hammadde özellikleri (Autodesk Moldflow kütüphanesi)

Özellikler	Test Koşulları	Test Metodu	Birim	Değer
Reolojik özellikler				
Eriyik Akış İndeksi	230°C/2,16 kg	ISO 1133-1	gr/10dk	16
Geçiş Sıcaklığı			°C	130
Mekanik özellikler				
Elastik Modülü	1. ana yön (E1)	ISO 527-2	MPa	1550
Elastik Modülü	2. ana yön (E1)	ISO 527-2	MPa	1550
Poisson Oranı	(v12)	ISO 527-2		0,39
Poisson Oranı	(v23)	ISO 527-2		0,39
Kayma Modülü	(G12)	ISO 527-2	MPa	560
Proses Özellikleri				
Kalıp Yüzey Sıcaklığı			°C	30 (20-60)
Eriyik Sıcaklığı			°C	240
En Yüksek Eriyik Sıcaklığı			°C	260
Kalıptan Çıkma Sıcaklığı			°C	70
En Yüksek Kayma Gerilimi			MPa	0,25
En Yüksek Kayma Oranı			1/s	100000

Plastik hammaddenin akış erime indeksi (MFI) değeri 230ºC/2,16 kg test şartlarında ISO 1133-1 test metodu ile yapılan ölçümde 16 gram (gr)/10 dakika (dk) gelmiştir.

3.4. Kimyasal Köpürtme Hammadde Bilgisi

Kimyasal köpürtme ajanı olarak Trexel Inc. Firmasının patentli ürünü olan TecoCell® ürünleri kullanılmıştır. Özel ve patentli bir işlemle üretilen TecoCell® teknolojisi, nano boyutlu (<=0,08 mikron) kalsiyum karbonat ($CaCO_3$) partiküllerinin kullanımıyla polimer eriyiğinde elde edilebilecek en küçük hücre boyutunu (50-200 mikron) üretmek ve CO_2 salınımı yapmak için kullanılır. TecoCell®'in hücre büyüklüğü ve homojen dağılımı, geleneksel kimyasal şekillendirme maddelerine kıyasla üstün mekanik özellikler ve yüzey görünümü sağlar. $CaCO_3$ nano parçacıkları kendilerini malzeme sisteminde eşit bir şekilde dağıtırlar ve böylece kalıplanmış veya enjeksiyonla kalıplanmış kısım boyunca güçlü ve sabit bir hücre yapısı oluştururlar. Hücrenin homojenliği, kullanıcıya düşük çarpılma, daha hızlı çevrim süreleri, daha iyi sertlik ve daha yüksek ısıl bozulma özellikleri olan hafif bir parça verir. Bu eşit dağılım ve TecoCell® katkı maddesinin küçük hücre boyutu, dolgusuz PP ve PE malzemelerde

özellikle etkilidir. Bu malzemeler genellikle şişirme kalıplı otomotiv parçalarında ve enjeksiyon kalıplamada ince cidarlı ambalajlar için kullanılır.

TecoCell® kimyası, parça boyunca diğer kimyasal köpük ajanları tarafından elde edilenden daha muntazam bir dispersiyon üretir. Parça boyunca tek tip hücre yapısı daha iyi performans ve parçanın daha büyük boyutlu bütünlüğünü sağlar.

TecoCell® ürünleriyle köpük yapmak genellikle enjeksiyonla kalıplanmış kısımda ağırlıkça %5-10 tasarruf sağlar. Tasarruf miktarı, parça ve kalıp tasarımındaki faktörlerden etkilenecektir. Et kalınlığı, akış uzunluğu, gaz kanalları yerleşimi, yolluk girişi lokasyonu ve diğer tasarım özellikleri, enjeksiyonla kalıplanmış parçada meydana gelen köpüklenme hareketinin etken faktörleri olacaktır.

TecoCell® bazlı kimyasal köpürtücü ajanlar, polimerin performans özelliklerini değiştirebilecek ilave inorganik çekirdekleştirici ajanlara olan ihtiyacı ortadan kaldıran çekirdekleştirici ajanlar olarak görev yapar. Çekirdeklenme, TecoCell® nano partikülleri ve polimer arasındaki ara yüzde gerçekleşir. Bu heterojen çekirdeklenme, çevrim süresini azaltan polimer kristalleşme oranlarını arttırır.

Genel olarak, köpüklenmenin amacı, parça yoğunluğunu azaltırken, darbe dayanımı, gerilme dayanımı ve kopma uzaması gibi mekanik özellikleri korumak için mümkün olan en küçük hücre yapısını elde etmektir. TecoCell® ürünleriyle üretilen bu tercih edilen küçük, kapalı hücreli yapı, mekanik özelliklerin ve parça özelliklerinin korunmasında çok önemlidir.

TecoCell® kimyasal köpürtme ajanlarının temel özellikleri aşağıda belirtilmiştir:

- Daha iyi yüzey kalitesi
- Düşük eriyik viskozitesi
- Daha hızlı çevrim süreleri
- Hafif parçalar
- Düşük kapama kuvveti
- Düşük iç gerilme
- Daha iyi boyutsal kararlılık
- Çöküntü probleminin ortadan kaldırılması

- Kalın kesitlerde boşlukların giderilmesi
- Daha geniş proses penceresi

Rekabetçi kimyasal köpürtme ajanlarının temel özellikleri aşağıda belirtilmiştir:

- Piyasadaki birçok geleneksel kimyasal köpürtme ajanları kalıpları paslandırabilen ve çevreye zarar verebilecek tehlikeli yan ürünler üretir.
- Önde gelen endotermik CBA' lar raf ömrünü ve ürünün tekrar üretilebilirliğini azaltan higroskopik bir bileşen gerektirir.
- Kalıplanmış kısımda lokalize düzensizliğe yol açan hücre boyutunun geniş dağılımı vardır.

Buna karşılık TecoCell®'in diğer kimyasal köpük ajanlara göre avantajları:

- Kalıba zarar vermeyen temizleyici bir kimyasal yapıda olmasıdır.
- TecoCell® formülasyonundaki tüm bileşenler ve bunların reaksiyon ürünleri çevre dostudur. CO_2, su ve sitrik tuzlar, hepsi inert ve zararsız yan ürünlerdir.
- Hidrofobik bir kaplama kullanılması nedeniyle daha uzun raf ömrüne sahip olmasıdır.
- Tek fazlı reaksiyon sıcaklığı, daha yüksek proses kontrolü ve istikrarlı proses sağlamadır.
- Daha iyi boyutsal kararlılık ve parça estetiğini elde etmek için homojen bir şekilde dağılmış mikro hücreli yapıya yol açan patentli nano ölçekli hücresel yapıda olmasıdır.

3.4.1. TecoCell® H1 kimyasal köpürtme ajanı bilgisi

TecoCell® H1, enjeksiyon kalıplama işleminde aşağıda belirtilen özellikleri geliştirmek için poliolefin ve polisitren malzemelerle birlikte kullanılan özel olarak formüle edilmiş kimyasal bir köpüklendirme ve çekirdeklenme ajanıdır.

Denklem (3.1)' de gösterilen TecoCell® H1, monosodyum sitrat ($C_6H_7NaO_7$) ve nano boyutlu ($\geq$ 0,08 micron) $CaCO_3$ endotermik tepkimesi sonucu doğrudan tek reaksiyon ile CO_2, A ve B olarak gösterilen çekirdekleştirici ajan görevi gören katı reaksiyon ürünleri, H_2O, sitrik asit, inert ve zararsız yan ürünler çıkarır.

$$C_6H_7NaO_7+CaCO_3=A+B+C_6H_8O_7+CO_2+H_2O \quad (3.1)$$

TecoCell® H1, ağırlıkça %50 oranında taşıyıcı polimer, %50 oranında reaktif madde içerir. Ajan, yaklaşık 205℃'nin üzerindeki sıcaklıklarda aktifleşir. Köpürtücü gaz dönüşüm oranı ağırlıkça %50'dir. Özellikler aşağıdaki Tablo 3.7'de verilmiştir.

Tablo 3.7. TecoCell® H1 özellikleri

Özellikler	Birim	Değer
Aktivasyon Sıcaklığı	°C	>200
En Düşük Proses Sıcaklığı	°C	>220
Reaktif Madde	%	50
Köpürtücü Gaz Oranı	%	50
Renk ve Görünüm		Beyaz yuvarlak veya oval peletler
Yoğunluk	gr/cm^3	1,329
Kullanım Oranı	%	1-3

3.4.2. TecoCell® CS kimyasal köpürtme ajanı bilgisi

TecoCell® CS, H1 ile aynı kimyasal formülasyona sahip fakat ağırlıkça %75 oranında taşıyıcı polimer, %25 oranında reaktif madde içeren maliyeti daha düşük bir ajandır. Ajan, yaklaşık 205℃'nin üzerindeki sıcaklıklarda aktifleşir. Reaktif CBA' nın köpürtücü gaz dönüşüm oranı ağırlıkça %19,7'dir. TecoCell® CS' nin özellikleri Tablo 3.8'de verilmiştir.

Tablo 3.8. TecoCell® CS özellikleri

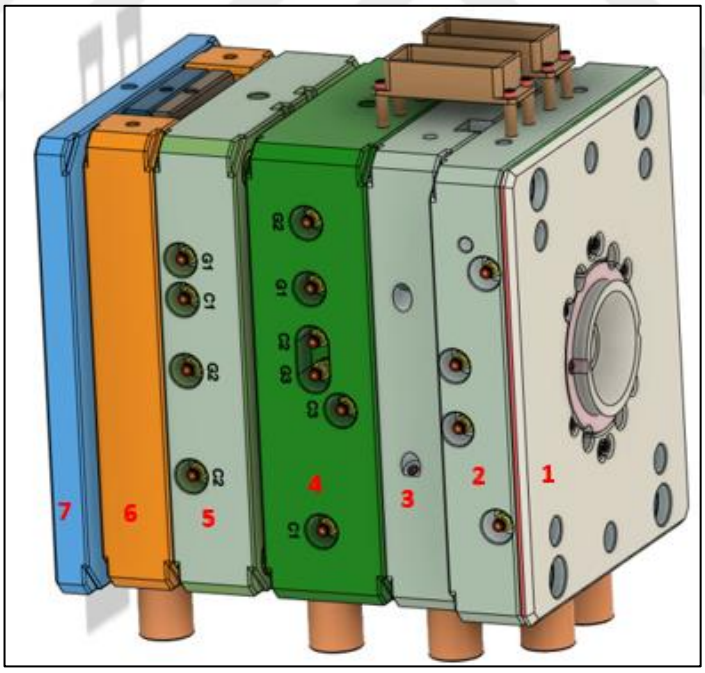
Özellikler	Birim	Değer
Aktivasyon Sıcaklığı	°C	>200
En Düşük Proses Sıcaklığı	°C	>220
% Reaktif Madde	%	25
% Köpürtücü Gaz Oranı	%	19,7
Renk ve Görünüm		Beyaz yuvarlak veya oval peletler
Yoğunluk	gr/cm^3	1,329
Kullanım Oranı	%	1-3

3.5. Plastik Parçanın Enjeksiyon Kalıbı

Parçanın enjeksiyon kalıbı dört gözden oluşur. Şekil 3.4'te kalıbın katı modeli ve genel data görünümleri aşağıda gösterilmiştir. Plastik enjeksiyon kalıpların genelindeki yapıya benzer iki ayrı kalıp yarımından oluşan bir şekilde tasarlanmıştır.

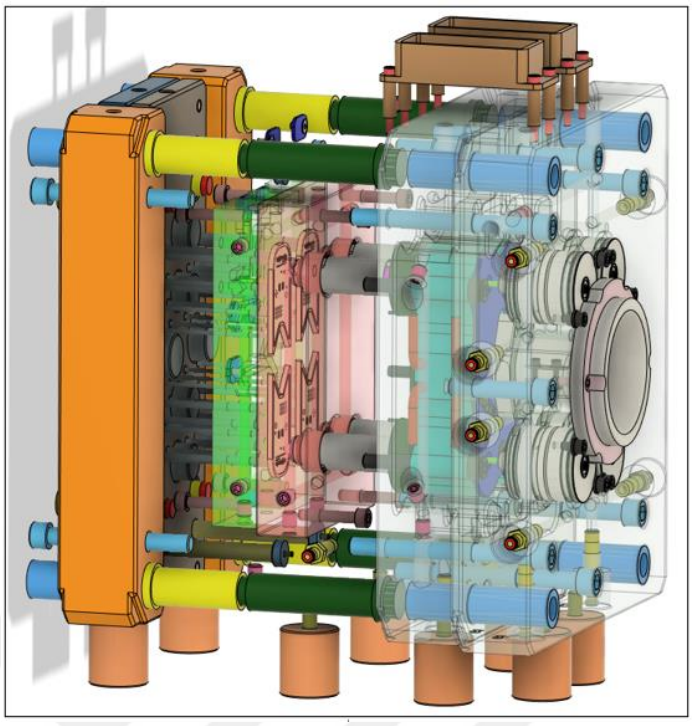
Kalıp, toplamda yedi farklı plakadan oluşturulmuştur. Şekil 3.4'te görüldüğü gibi sırasıyla;

1. İzolasyon plakası
2. Manifold destek plakası (Pnömatik sistem plakası)
3. Manifold plakası
4. Dişi plaka
5. Erkek plaka
6. İtici destek plakası
7. Erkek destek plakası



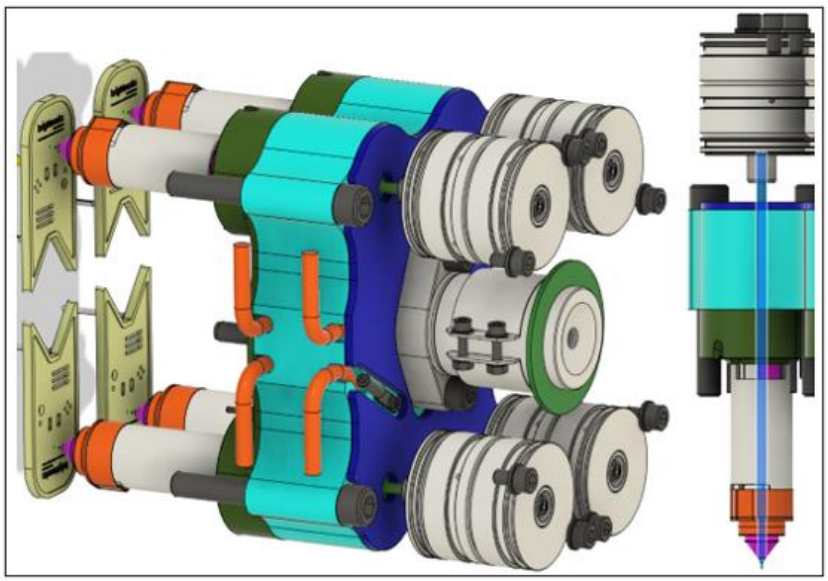
Şekil 3.4. Deneysel parça kalıbı dış görünüm

Kalıp, Şekil 3.5'te gösterildiği gibi 4 gözlü, sıcak yolluk manifold yapısı, her bir göze ayrı valf pinli nozül ile malzeme enjekte edilecek şekilde tasarlanmıştır. Ayrıca makine nozülünün oturduğu kalıp oturma bileziği ve nozül ve manifoldun ısıtıcılarının bağlandığı ana konnektör gösterilmiştir.



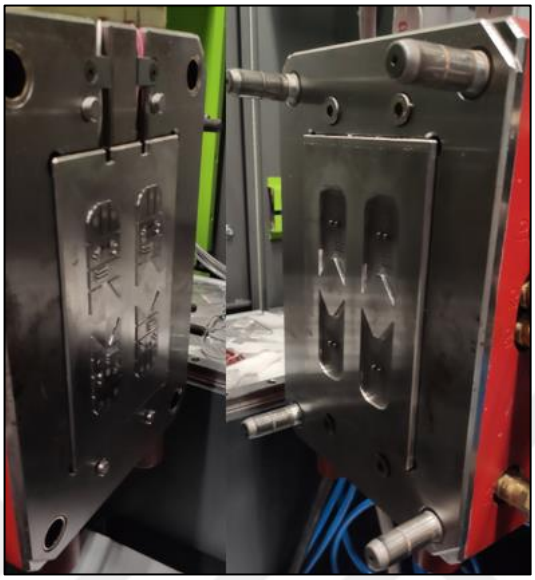
Şekil 3.5. 4 gözlü deneysel kalıbın iç görünümü

Kalıbın dişi tarafının en arka plakasının içerisinde hava valf sistemi mevcuttur. Sistemin, nozül içinde bulunan iğne ile enjeksiyon, tutma-ütüleme fazı bitince nozülün ucunu kapatma özelliği vardır. Pnömatik plakadan sonra, manifold plakasının içerisinde 4 adet pnömatik valfli iğne yolluklu manifold sistemli Otto Maenner marka sıcak yolluk sistemi manifold bloğu, ana makine girişi ve nozüller aşağıdaki gibi Şekil 3.6'da gösterilmiştir.



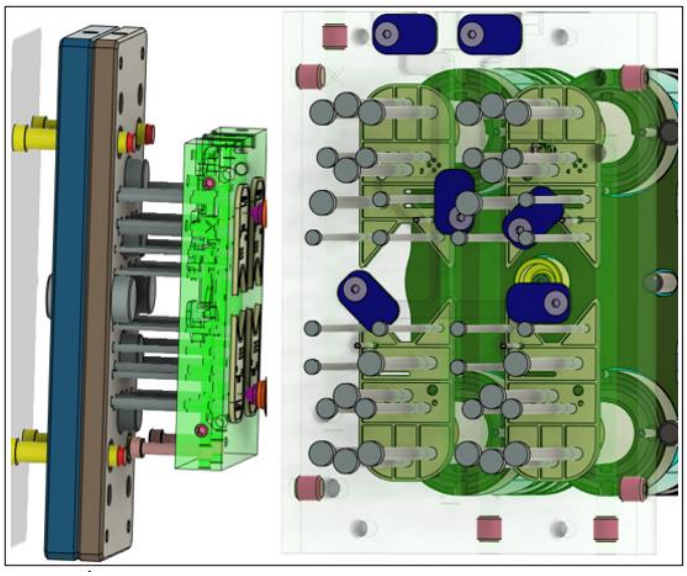
Şekil 3.6. Valf pinli sıcak yolluk sistemi

Kalıbın enjeksiyon tarafı (dişi taraf) olarak adlandırılan parçanın bir kısmını oluşturan kalıp yarısı, kalıbın bir diğer yarısı olan itici tarafta (erkek taraf) parçanın diğer kısmını oluşturulan bölgeler aşağıda Şekil 3.7'de gösterilmiştir.



Şekil 3.7. Kalıp dişi ve erkek tarafı

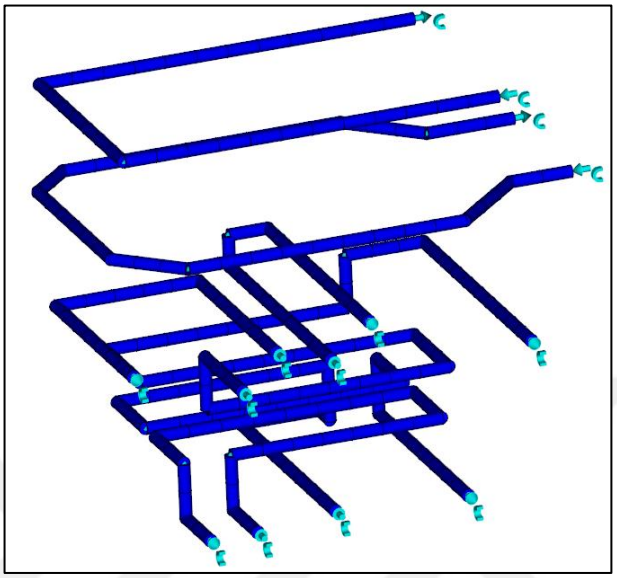
Parçanın kalıptan çıkarılmasını sağlayan iticiler ve itici destek plakaları Şekil 3.8'de gösterilmiştir.



Şekil 3.8. İticiler ve itici destek plakaları

Kalıbın bir diğer önemli parçası soğutma kanallarıdır. Soğutma kanalları bir enjeksiyon kalıbının olmazsa olmazıdır. Görevi ise plastik parçanın dolumu esnasında

eriyiğin temas edeceği yüzeyi stabil sıcaklıkta tutmak akabinde ise plastik malzemenin camsı geçiş sıcaklığının altına getirerek parçanın kalıptan çıkmasını sağlamaktır. Kalıbın Şekil 3.9'da tüm soğutma düzeni aşağıda mavi kanallar ile gösterilmiştir.



Şekil 3.9. Kalıp içi soğutma kanalları

3.6. Moldflow Plastik Akış Analizi

Plastik deneysel parçanın konvansiyonel prosesleri KP, TecoCell® H1 ajan katkılı ve TH TecoCell® CS ajan katkılı kimyasal köpürtme prosesleri sırasıyla TH ve TCS olarak adlandırılmış ve seçili işlemler için akış analizleri yapılmıştır.

3.6.1. Konvansiyonel moldflow analizi

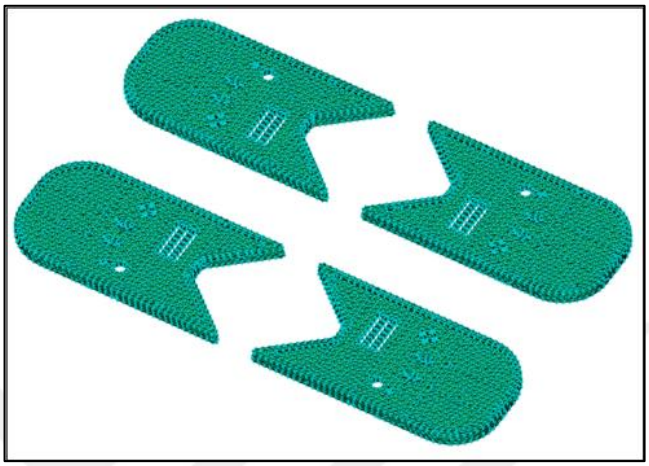
Analiz önce modelleme, hammadde seçimi ve proses parametre girişleri yapılarak 3 adımda tamamlanır.

3.6.1.1. Modelleme

Moldflow'da parçayı modellemek için ağ yapısı ile örme (mesh) metodu kullanılır. Moldflow'un içerisinde 3 örme tipi mevcuttur:

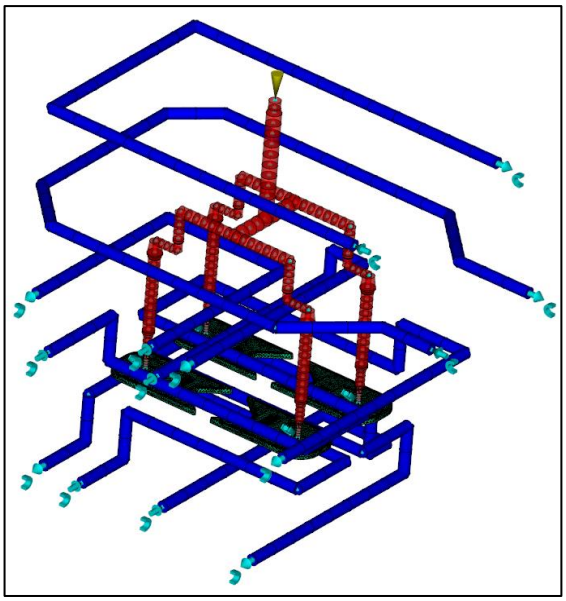
i. Midplane
ii. Dualdomain
iii. 3D

Şekil 3.10'da gösterilen parça için en gelişmiş olan 3D örme tipi kullanılmıştır. Örme tipi seçiminde parçanın ufak boyutlarda ve küçük karmaşık geometrik yapıda olması göz önünde bulundurulmuştur. Şekil 3.10'da parçanın hazır örme modeli gösterilmiştir.



Şekil 3.10. Deneysel parçanın analiz modeli

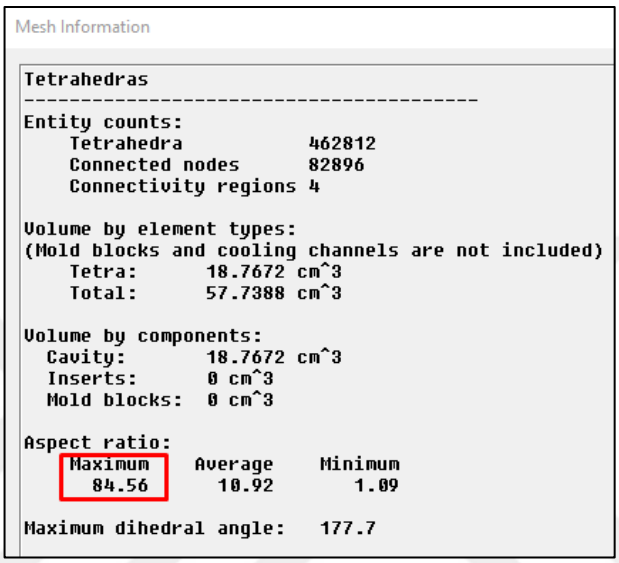
Parça modellemesi sonrası, sıcak yolluk modellemesi için tedarikçi tarafından sağlanan manifold içi kanal dağılımına göre sonlu elemanlar yöntemi kullanılmıştır. Sonlu eleman ile modelleme, program içerisinde yollukları ve soğutma kanallarını modellemek için kullanılan araçtır. Şekil 3.11'de kırmızı ile gösterilen bölgeler sıcak yolluk kanallarını, mavi ile gösterilen kanallar ise kalıp içi soğutma kanallarının sonlu elemanlar ile modellenmiş hali gösterilmiştir.



Şekil 3.11. Analize hazır tam model

3.6.1.2. Örme (Mesh) değerleri

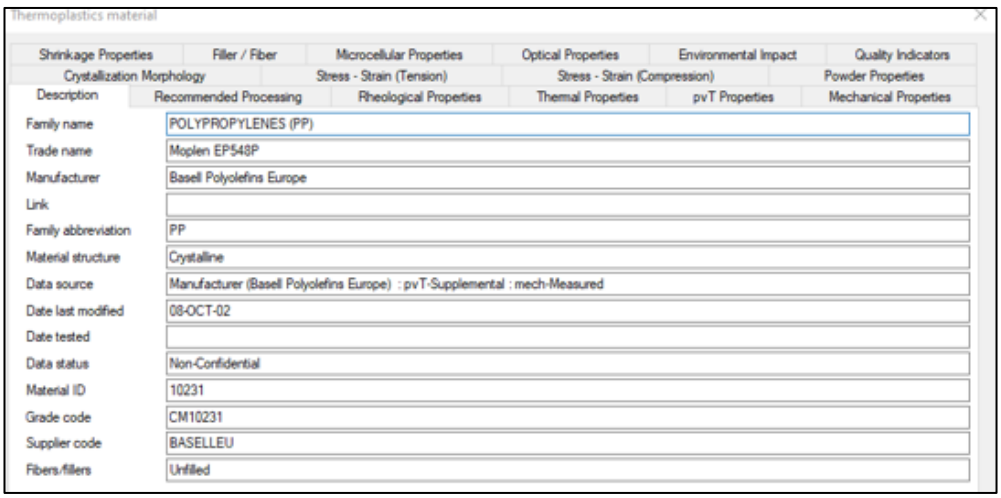
3D örme yapısında, örme modeli üçgenlerinin en büyük en boy oranını (AR) 100 değerinin altında olması modellemenin doğru yapıldığını gösteren parametredir. Yapılan analizde bu değer 84,56'dir. Şekil 3.12'de gösterilen değerler analiz yapılacak parçanın örme model uygunluğunu teyit eder niteliktedir.



Şekil 3.12. Örme model değerleri

3.6.1.3. Akış analizinde kullanılan hammadde bilgisi

Lyondellbasell firmasının ürettiği polipropilen Moplen EP548P hammaddesinin Autodesk Moldflow analiz programında tanımlanmış genel bilgileri Şekil 3.13'te gösterilmiştir.

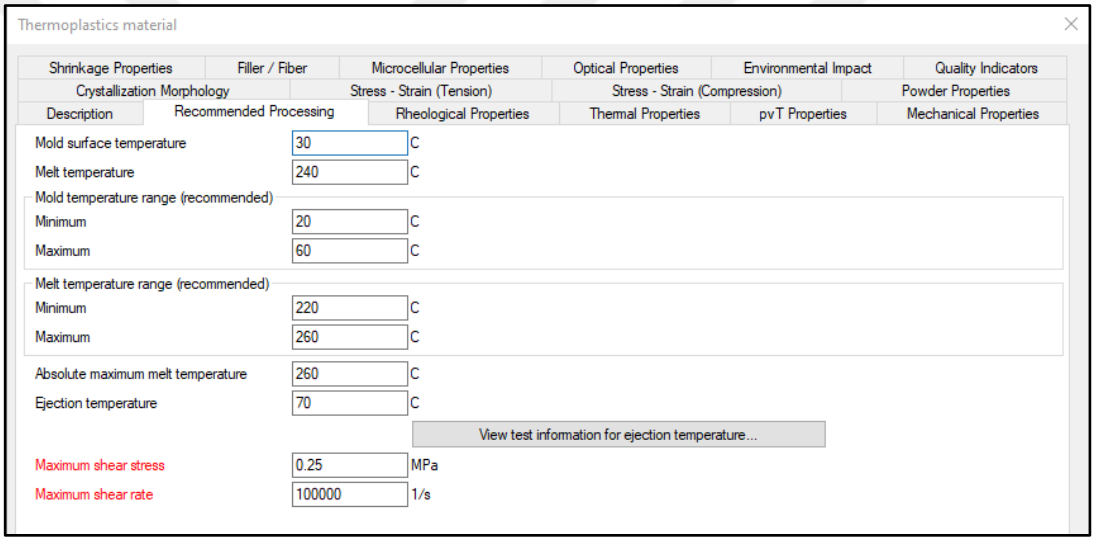


Şekil 3.13. Moldflow genel hammadde bilgisi

3.6.1.4. Önerilen proses ayarları

Lyondellbasell firmasının ürettiği polipropilen Moplen EP548P hammaddesinin Autodesk Moldflow Analiz programında önerilen proses parametre bilgileri Şekil 3.14'te gösterilmiştir.

Hammadde için yapılan testler sonucu, kalıp yüzey sıcaklığının 20 ile 60°C aralığında optimum 30°C, eriyik sıcaklığının 220 ile 260°C aralığında optimum 240°C, parçanın kalıptan çıkma sıcaklığı olarak 70°C belirlenmiştir. Hammadde eriyik sıcaklığının 260°C'yi geçmemesi gerektiği belirtilmiştir. Ayrıca en yüksek kayma gerilmesi 0,25 MPa ve en yüksek kayma oranı 100000 1/s olarak belirtilmiştir.



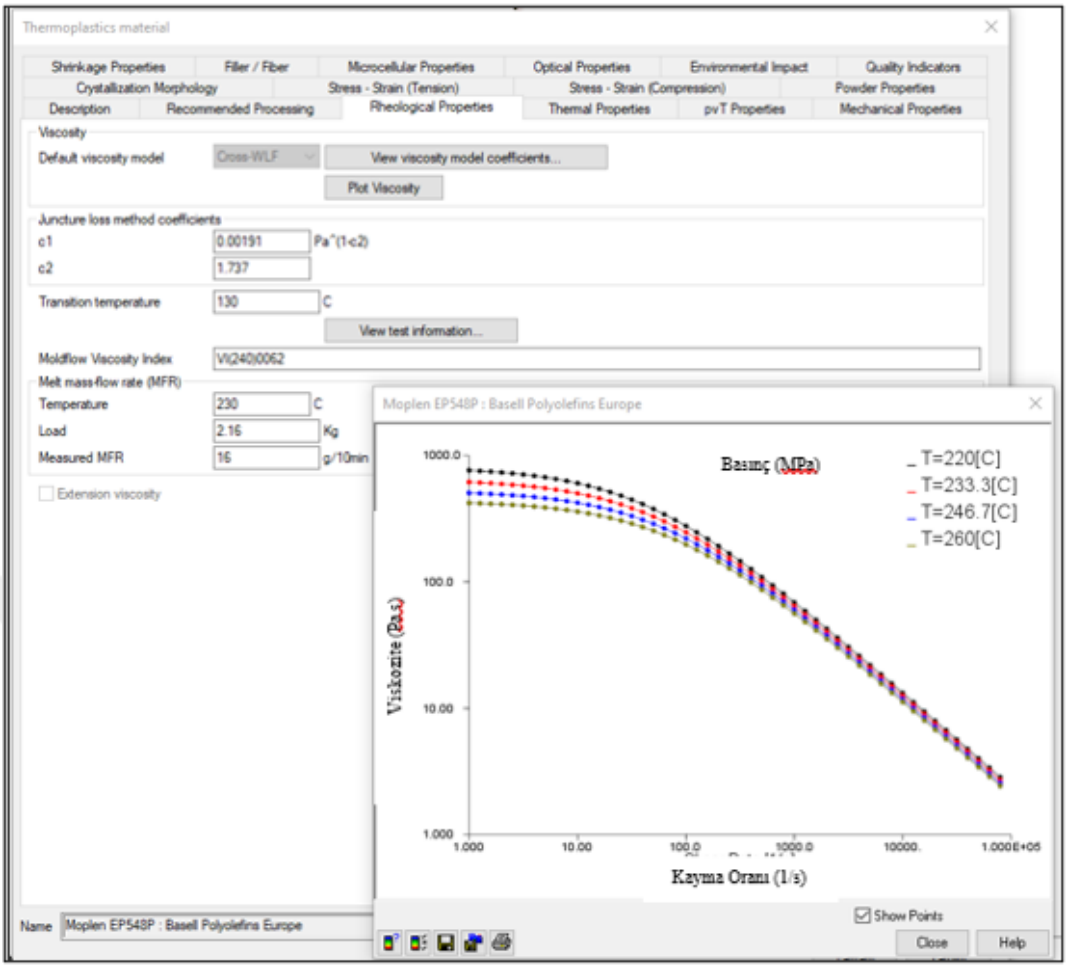
Şekil 3.14. Moldflow önerilen işlem ayarları

3.6.1.5. Reolojik özellikler ve viskozite-kayma oranı ilişkisi

Reolojik açıdan incelendiğinde, sıcaklık 220°Cden 260°Cye arttıkça, viskozite düşüşü görüldüğü Şekil 3.15'te grafik üzerinde gösterilmiştir.

Ayrıca eriyik halden katı hale geçiş sıcaklığı olarak adlandırılan camsı geçiş sıcaklığı bu polimer için 130°C'dir. Eriyik akış indeksi değeri, 2,16 kg yük ve 230°C test şartlarında 16gr/10min olarak verilmiştir.

Moplen EP548P PP hammaddesinin reolojik özellikleri ve viskozite-kayma oranı grafiği, Autodesk Moldflow laboratuvarlarında test edilmiş ve Moldflow kütüphanesine işlenmiştir.



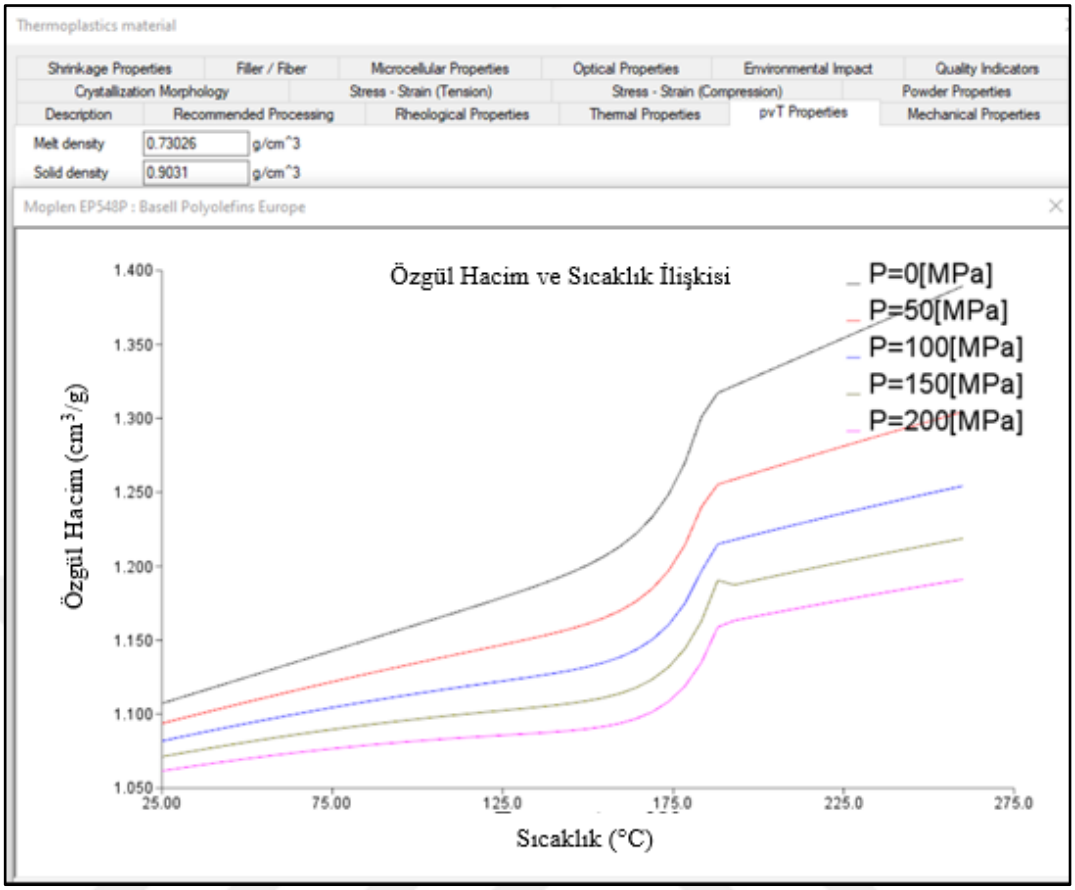
Şekil 3.15. Hammadde reolojik özellikleri ve viskozite-kayma oranı grafiği

3.6.1.6. Basınç, sıcaklık ve özgül hacim ilişkisi

Moplen EP548P PP hammaddesinin basınç, sıcaklık ve özgül hacim ilişkisi Şekil 3.16'da grafik olarak gösterilmiştir. Eriyik yoğunluk 0,73006 gr/cm^3, katı yoğunluk ise 0,9031 gr/cm^3 olarak verilmiştir.

Grafikteki basınç değerleri, 0Mpa'dan 200Mpa'a kadar, sıcaklık değeri de 25°C' den 275°C' ye kadar gösterilmiştir. Aynı grafikte özgül hacim 1,05 gr/cm^3' ten 1,40 gr/cm^3 aralığında gösterilmiştir.

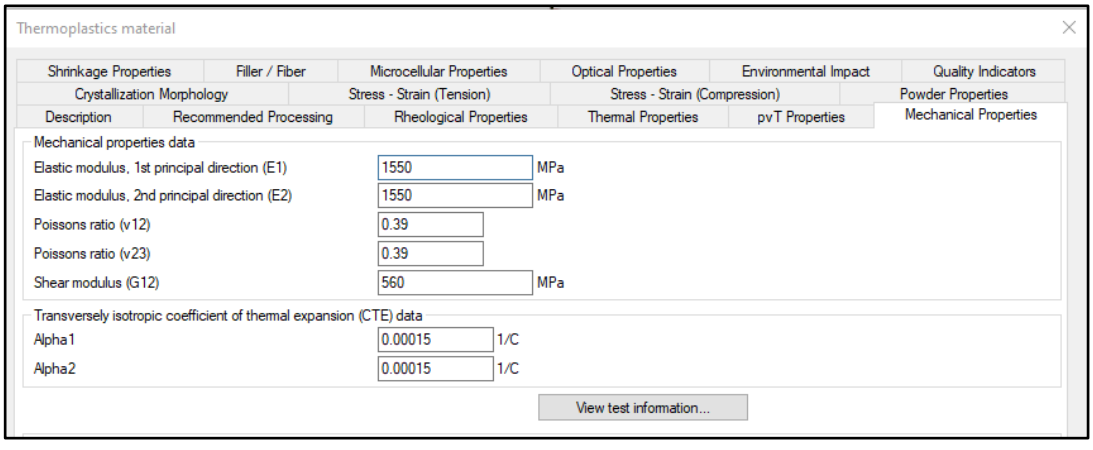
Oda sıcaklığından (25°C), yaklaşık 175°C'ye kadar tüm basınç değerlerinde, özgül hacimde lineer bir artış gözlemlenirken, yaklaşık 175°C-200°C aralığında özgül hacimdeki artış oranı yükselmiştir. Burada, özgül hacimdeki dramatik artışın sebebi Moplen EP548P polipropilen hammaddesinin içerisinde yer alan kristalin bozulduğu aşamadır.



Şekil 3.16. Hammadde basınç, sıcaklık ve özgül hacim grafiği

3.6.1.7. Mekanik özellikler

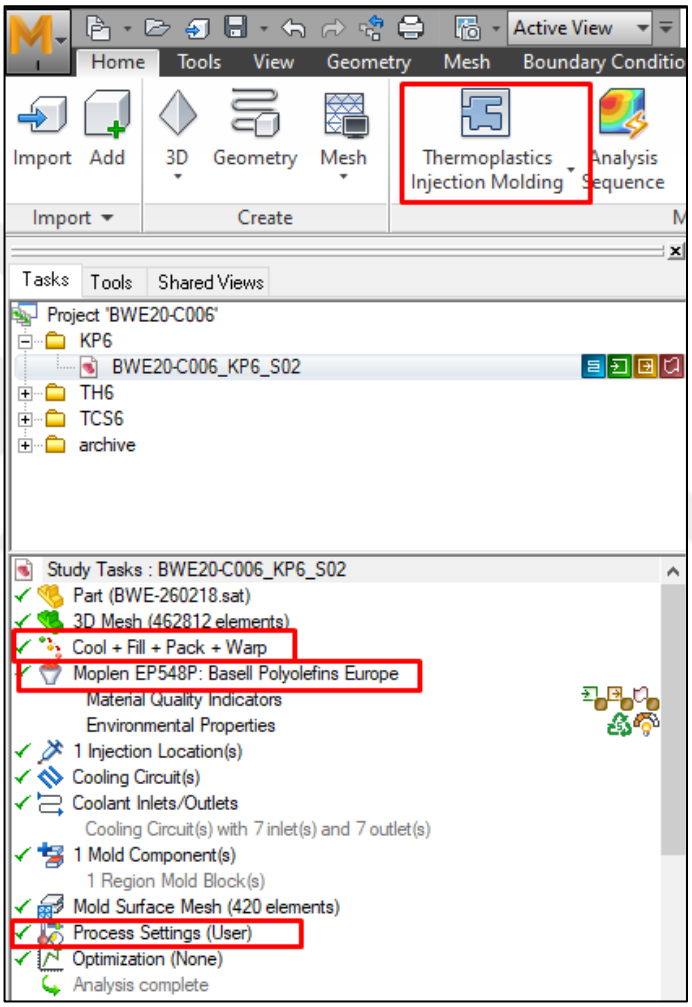
Hammaddenin elastik ve kayma modülleri gibi mekanik özellikler Şekil 3.17'de gösterilmiştir. Elastik modülü, 1550 MPa olarak gösterilmiştir. Ayrıca malzemenin uzama, genişlik oranları ve termal genleşme katsayıları Autodesk Moldflow kütüphanesinde gösterilmiştir.



Şekil 3.17. Hammadde mekanik özellikleri

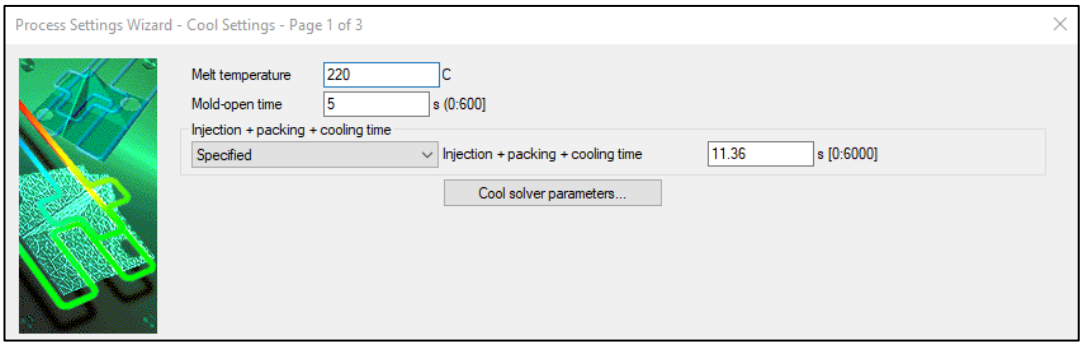
3.6.1.8. Akış analizi konvansiyonel proses parametreleri

İlk olarak, programın ana menüsünden kırmızı ile belirtilen termoplastik enjeksiyon kalıplama modülü ve devamında soğutma, dolum, tutma ve çarpılma analizi olarak en detaylı analiz seçeneği olan analiz tipi seçilmiş olur. Ardından kütüphaneden ilgili hammadde seçilmiştir ve son olarak proses parametre ayarlarına giriş seçeneği Şekil 3.18'de gösterildiği gibi seçilip parametre girişleri yapılmıştır.



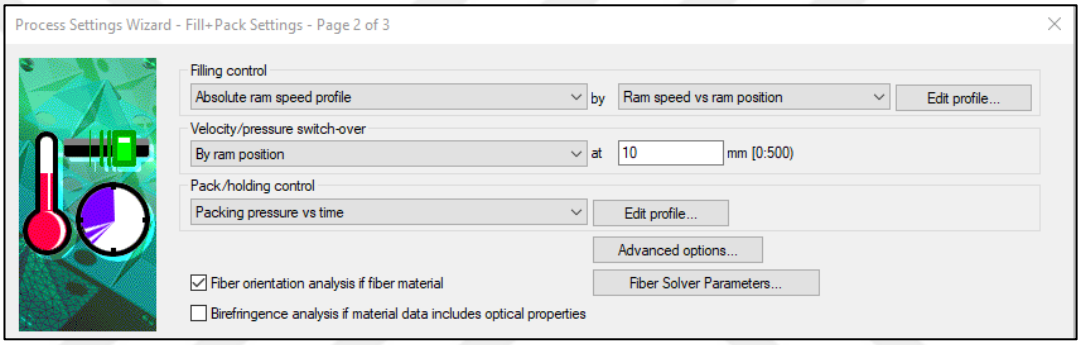
Şekil 3.18. Analiz tipi seçimi

Konvansiyonel analiz için proses parametre soğutma ayarları olarak birinci sayfada eriyik sıcaklığı 220°C, kalıp açma süresi 5 s, enjeksiyon, ütüleme ve soğuma süreleri toplamı 11,36 s olarak Şekil 3.19'da da gösterildiği gibi Moldflow programına girilmiştir. Soğuma süresi, parçanın kalıptan çıkma sıcaklığına kadar geçen süre olarak tanımlanmıştır. Üretimde, parçanın soğuma süresi belirlenirken, et kalınlığının en fazla olduğu bölgenin sıcaklığı ölçülmüştür.



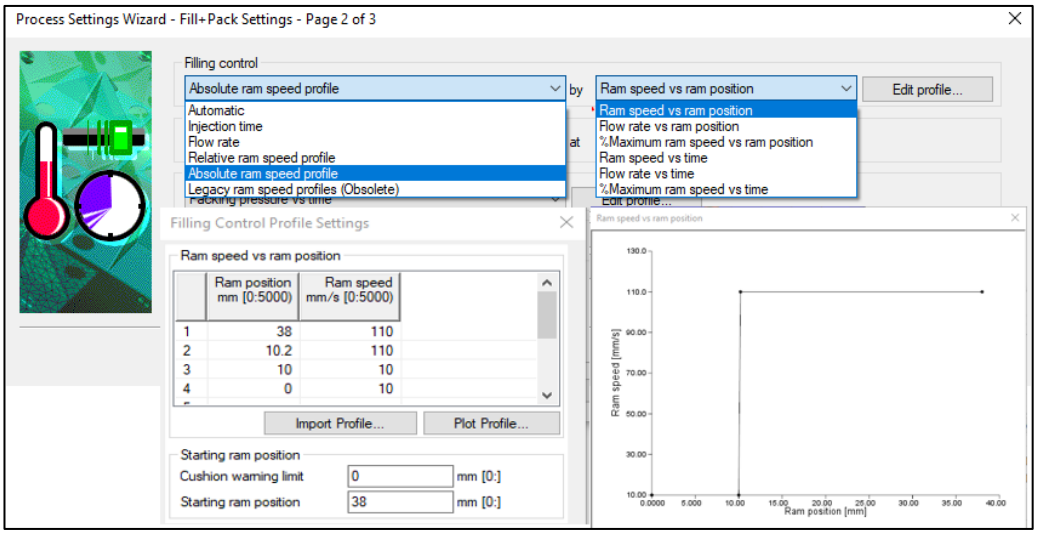
Şekil 3.19. Konvansiyonel proses soğutma fazı ayarları

Proses parametre dolum ve tutma kontrol ayarları olarak ikinci sayfada Şekil 3.20'de gösterilmiştir.



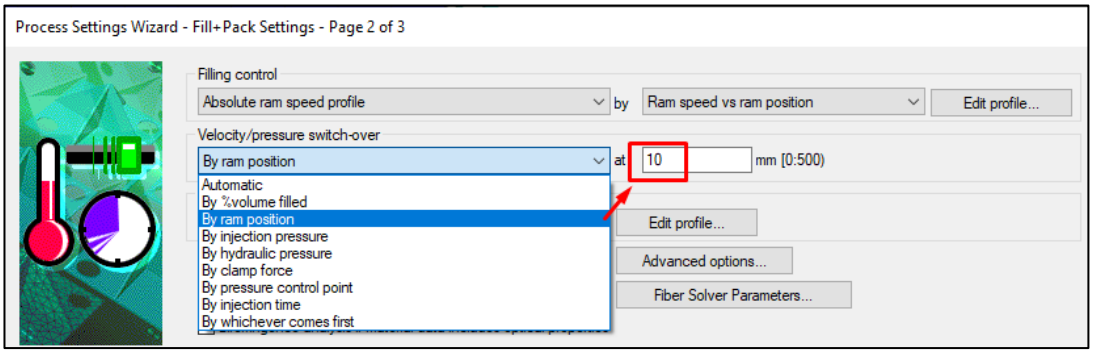
Şekil 3.20. Konvansiyonel proses dolum-tutma fazı ayarları

Dolum kontrolü olarak vida hızı profili, vida pozisyonu seçenekleri seçilip girilen enjeksiyon hız, vida konumu değerleri ve Şekil 3.21'de gösterildiği gibi tanımlanmıştır.



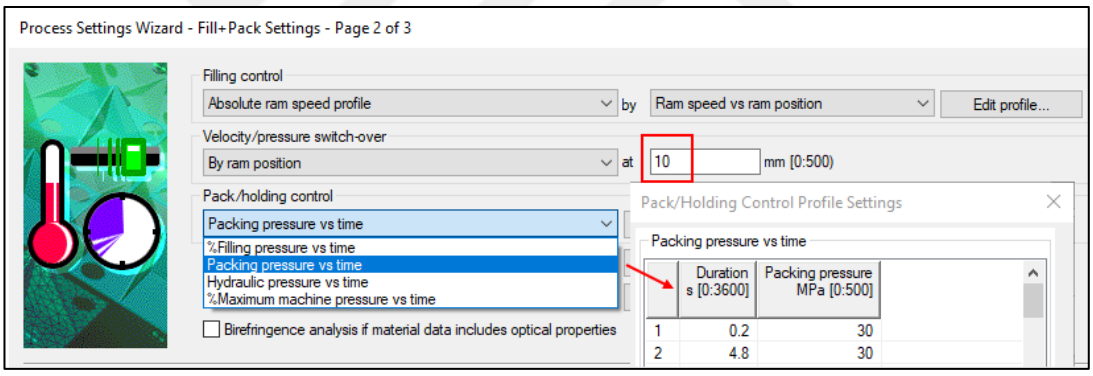
Şekil 3.21. Konvansiyonel proses dolum fazı parametreleri

Dolumdan tutma fazına geçiş için vida pozisyonu ile seçeneği seçilmiş ve 10 mm olarak vida geçiş pozisyonu Şekil 3.22'de gösterilmiştir. Vida geçiş pozisyonuna ulaştıktan sonra tutma fazı uygulanır ve vida çevrimdeki son konumuna ulaşır.



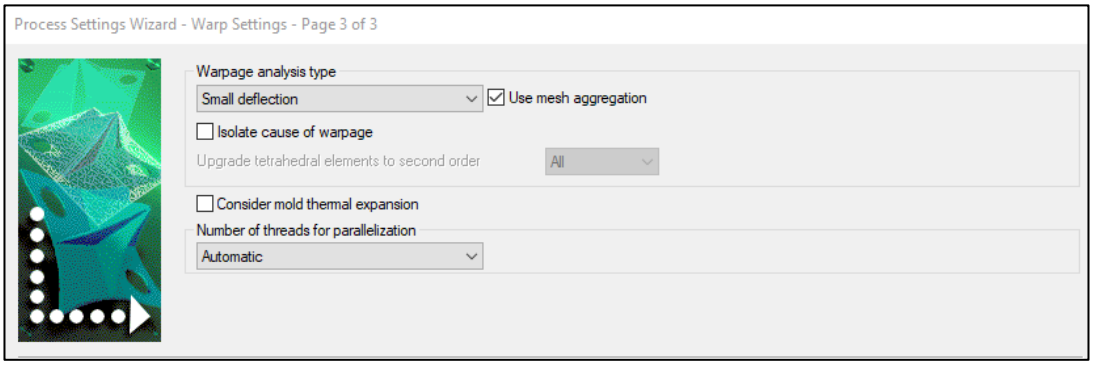
Şekil 3.22. Konvansiyonel proses dolumdan tutmaya geçiş parametreleri

Prosesin tutma fazında uygulanan tutma basıncı ve tutma süreleri profili Şekil 3.23'te gösterilmiştir.



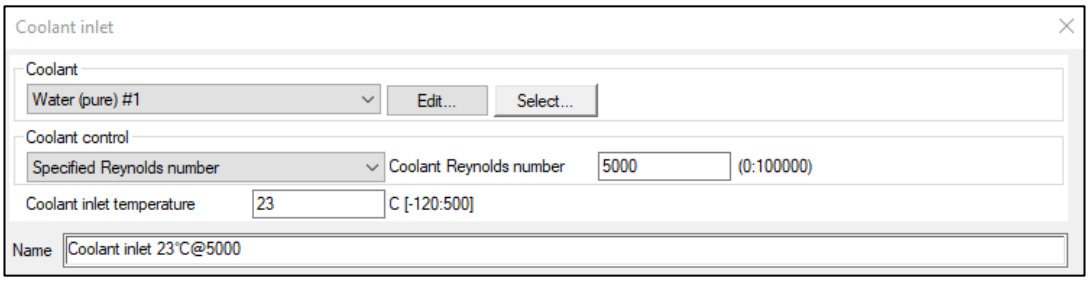
Şekil 3.23. Konvansiyonel proses tutma fazı parametreleri

Prosesin ayarlama kısmının son sayfasında çarpılma ayarları Şekil 3.24'te gösterildiği gibi standart seçim olarak seçilmiştir.



Şekil 3.24. Konvansiyonel proses çarpılma fazı parametreleri

Son olarak soğutucu akışkan suyu sıcaklığı olarak 23°C ve türbülanslı akış kabul edilecek şekilde 5000 Reynold sayısı Şekil 3.25'te gösterildiği gibi girilmiştir.



Şekil 3.25. Konvansiyonel proses çarpılma fazı parametreleri

3.6.2. Kimyasal köpürtme prosesi akış analizleri

Analiz, önce modelleme, hammadde seçimi ve proses parametre girişleri yapılarak üç adımda tamamlanır.

3.6.2.1. Modelleme

Kimyasal köpürtme prosesinde de konvansiyonel prosesteki gibi aşağıda gösterildiği şekilde parçayı modellemek için ağ yapısı ile üç örme (mesh) metodu kullanılır:

i. Midplane
ii. Dualdomain
iii. 3D

Bunun dışında kimyasal köpürtme prosesi için özel modeller tanımlanmıştır:

i. Sabit çekirdek yoğunluk modeli (Constant Nucleation Density)
ii. Klasik çekirdeklenme yoğunluk modeli (Fitted Classical Nucleation Density)

Gerçeğe en yakın ve son geliştiren model olduğu için klasik çekirdeklenme yoğunluk modeli ve 3D ağ örme metodu kullanılarak parça analize hazır hale getirilmiştir.

3.6.2.2. Örme (Mesh) değerleri

Konvansiyonel proseste kullanılan ağ örme yapısı, kimyasal köpürtme prosesi akış analizlerinde de kullanılmıştır. Örme değerleri, analizin doğru bir şekilde yapılıp yapılmadığını gösteren en önemli akış analiz parametrelerinden biridir. Örme değerleri, akış analizine başlamadan önce kontrol edilmelidir.

3.6.2.3. Akış analizi ana polimer hammadde bilgisi

Konvansiyonel yöntemlerde kullanılan PP hammadde, kütlesel yüzde %99 oranında bu proseste kullanılmıştır.

3.6.2.4. Kimyasal köpürtme hammadde bilgisi (TH)

Kimyasal köpürtme ajanı olarak Trexel Inc. Firmasının patentli ürünü olan TecoCell® H1 isimli hammaddesi %1 oranında kullanılmıştır. %1 ajanın %50'si %0,5 ağırlıkça reaktif CBA oluşturur. Reaktif CBA, köpürtme gaz dönüşüm oranı %50'dir. Özellikler aşağıdaki Tablo 3.9'da verilmiştir.

Tablo 3.9. TecoCell® H1 Moldflow parametreleri

Özellikler	Birim	Değer
Kullanım oranı	%	1
CBA ağırlığı	%	0,5
Köpürtücü gaz oranı	%	50

3.6.2.5. Kimyasal köpürtme hammadde bilgisi (TCS)

Kimyasal köpürtme ajanı olarak Trexel Inc. Firmasının patentli ürünü olan TecoCell® CS isimli hammaddesi %1 oranında kullanılmıştır. %1 ajanın %25'si %0,25 ağırlıkça reaktif CBA oluşturur. Reaktif CBA, köpürtme gaz dönüşüm oranı %19,7'dir. Özellikler aşağıdaki Tablo 3.10'da verilmiştir.

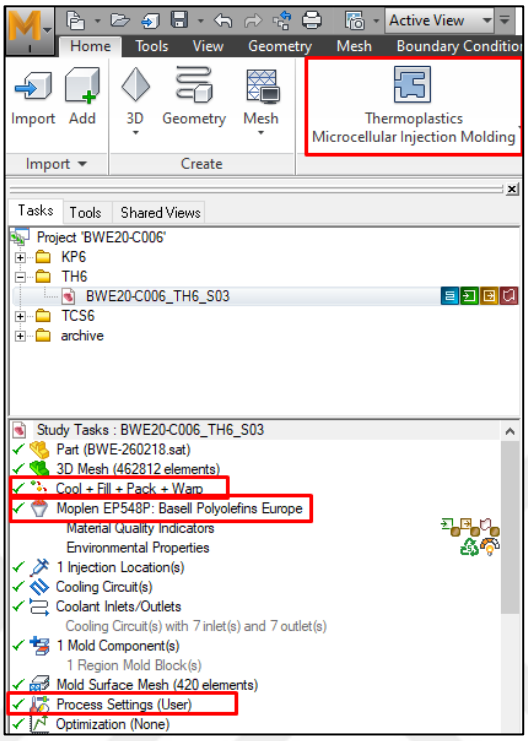
Tablo 3.10. TecoCell® CS Moldflow parametreleri

Özellikler	Birim	Değer
Kullanım oranı	%	1
CBA ağırlığı	%	0,25
Köpürtücü gaz oranı	%	19,7

3.6.2.6. Akış analizi kimyasal köpürtme proses parametreleri

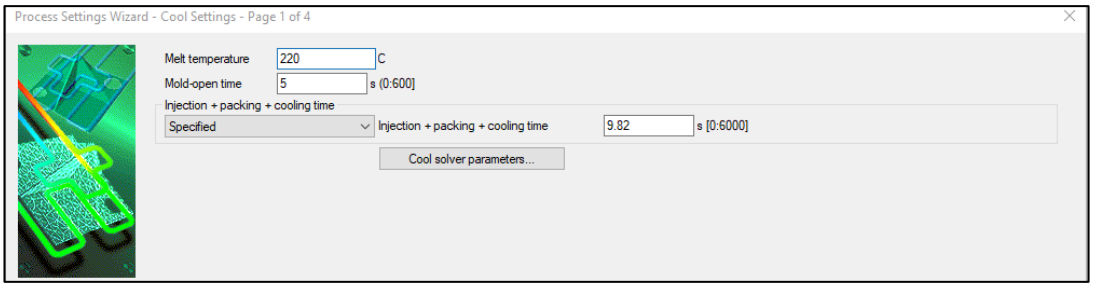
İlk olarak, programın ana menüsünden kırmızı ile belirtilen mikro hücresel enjeksiyon kalıplama modülü ve devamında soğutma, dolum, tutma ve çarpılma analizi olarak en detaylı analiz seçeneği olan analiz tipi seçilmiş olur. Ardından kütüphaneden ilgili

hammadde seçilmiştir ve son olarak proses parametre ayarlarına giriş seçeneği Şekil 3.26'da gösterildiği gibi seçilip parametre girişleri yapılmıştır.



Şekil 3.26. Analiz tipi seçimi

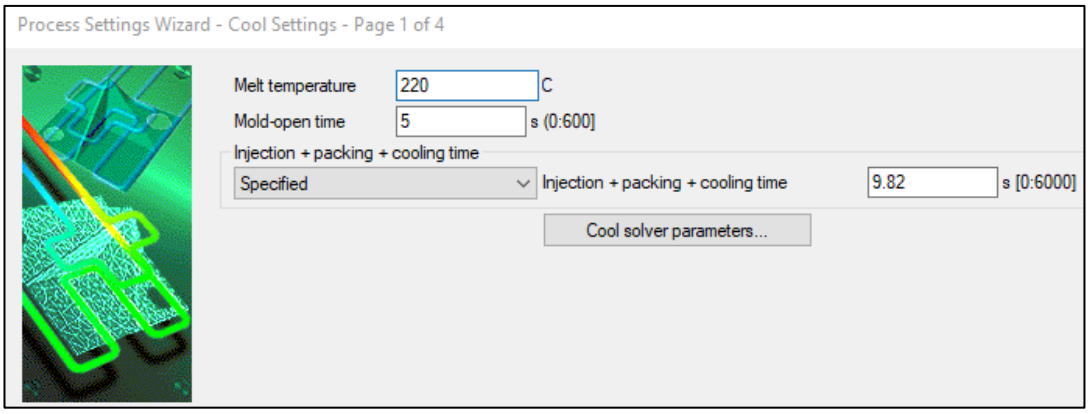
Kimyasal köpürtme analizi proses parametre soğutma ayarları olarak birinci sayfada eriyik sıcaklığı 220°C, kalıp açma süresi 5 s, enjeksiyon, ütüleme ve soğuma süreleri toplamı 9,82 s olarak Şekil 3.27'de gösterildiği gibi girilmiştir.



Şekil 3.27. Kimyasal köpürtme prosesi soğutma fazı ayarları

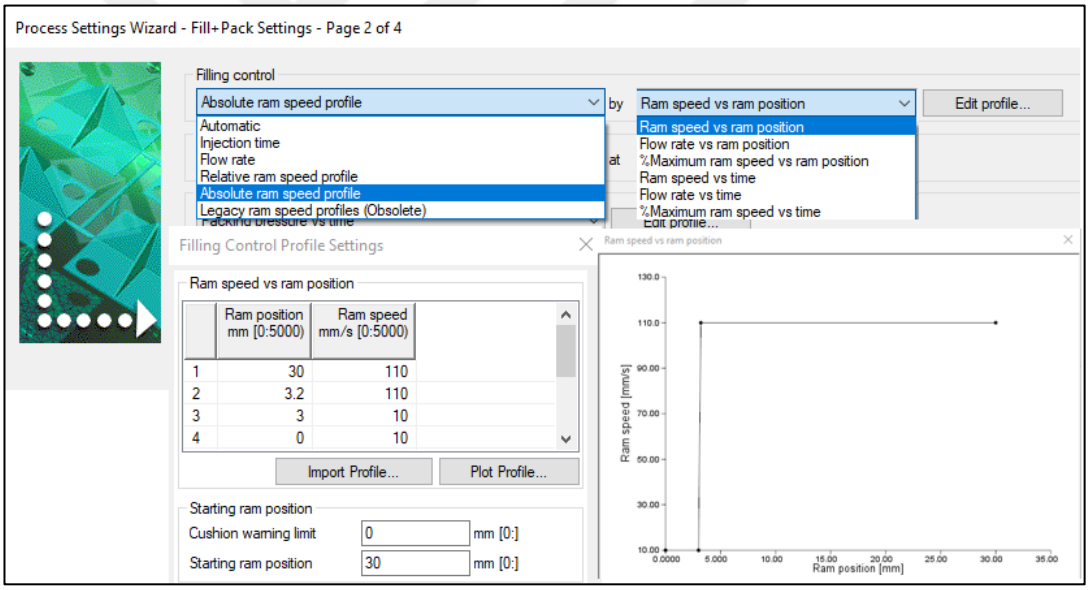
Proses parametre dolum ve tutma kontrol ayarları olarak ilk sayfada Şekil 3.28'de gösterilmiştir.

Enjeksiyon zamanı 0,32 s, tutma zamanı 0,5 s, soğuma zamanı da 9 s olacak şekilde toplamda 9,82 s' lik çevrim süresi tanımlanmıştır.



Şekil 3.28. Kimyasal köpürtme prosesi dolum-tutma fazı ayarları

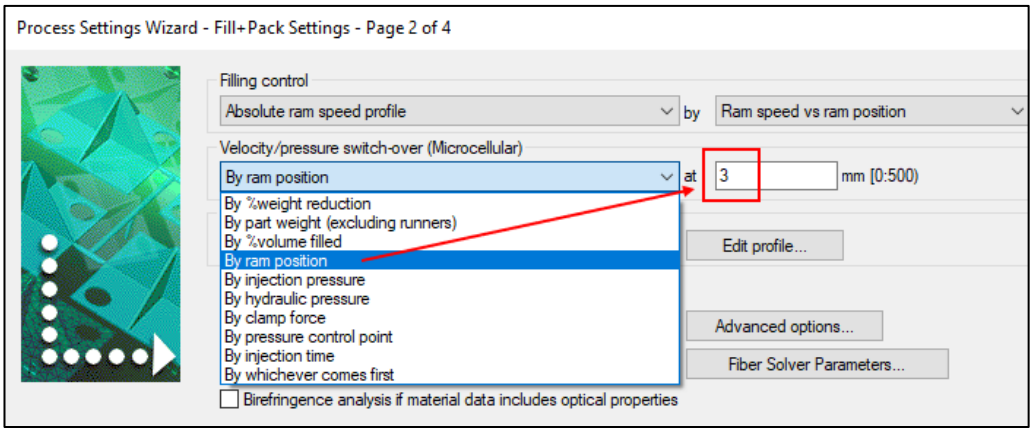
Dolum kontrolü olarak vida hızı profili, vida pozisyonu seçenekleri seçilip girilen enjeksiyon hız, vida konumu değerleri ve Şekil 3.29'da gösterildiği gibi tanımlanmıştır.



Şekil 3.29. Kimyasal köpürtme prosesi dolum fazı ayarları

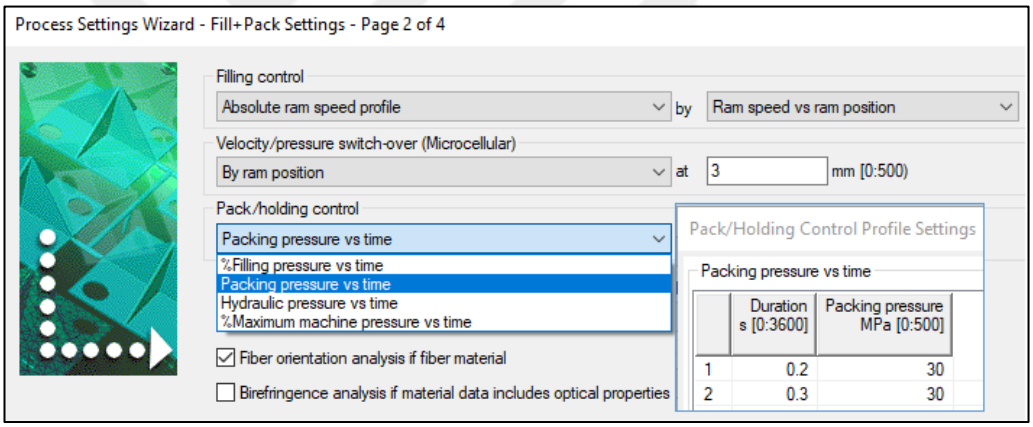
Dolumdan tutma fazına geçiş için vida pozisyonu ile seçeneği seçilmiş ve 3 mm olarak vida geçiş pozisyonu Şekil 3.30'da gösterilmiştir. Tutma fazı neredeyse olmadığından, mümkün olduğu kadar düşük geçiş pozisyonu ve vida sıfır noktasına çarpmayacak kadar yastıklama bırakılmıştır.

En düşük yastıklama bırakılmasının sebebi, hammadde içerisindeki köpürtücü gaz karışımının vidanın ön boşluğunda köpürmesine engel olmaktır. Böylece köpürmenin tamamı kalıp içerisindeki göz boşluğunda sağlanır.



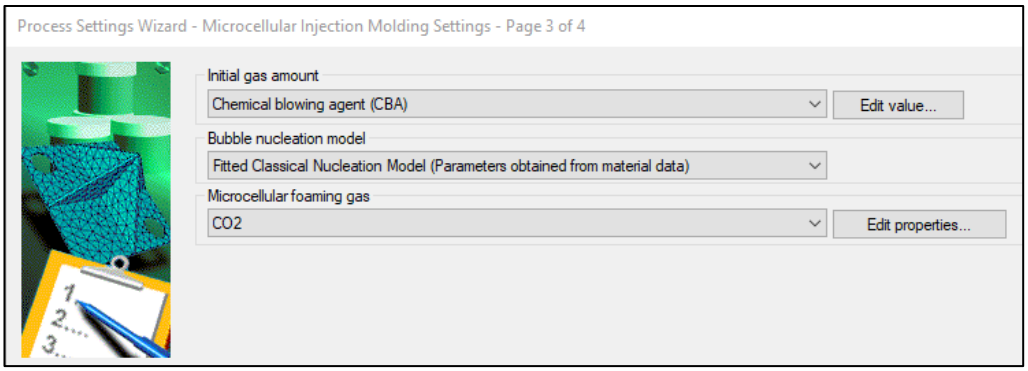
Şekil 3.30. Kimyasal köpürtme prosesi dolumdan tutmaya geçiş fazı ayarları

Prosesin tutma fazında uygulanan tutma basıncı ve tutma süreleri profili Şekil 3.31'de gösterilmiştir. Tutma süresi neredeyse yok denecek kadar az verilmiştir. İçerideki köpük yapı parçanın tutma prosesini gerçekleştirecektir.



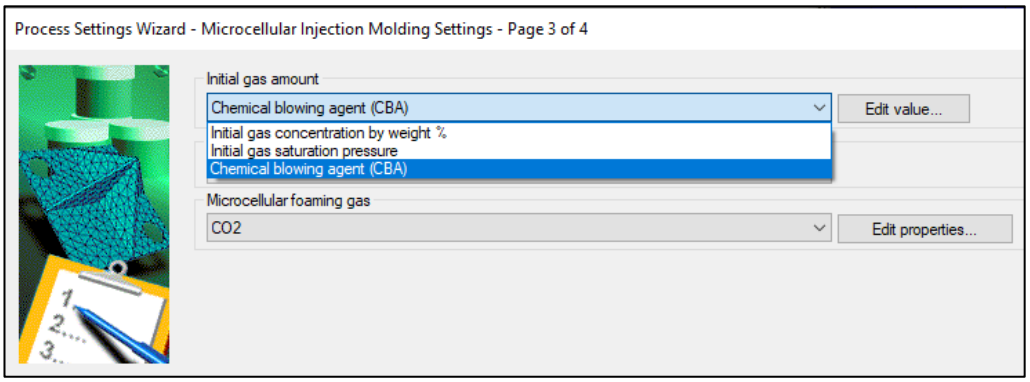
Şekil 3.31. Kimyasal köpürtme prosesi tutma fazı ayarları

Prosesin ayarlama kısmının üçüncü sayfasında köpürtme ile ilgili ayarları Şekil 3.32'de gösterilmiştir.



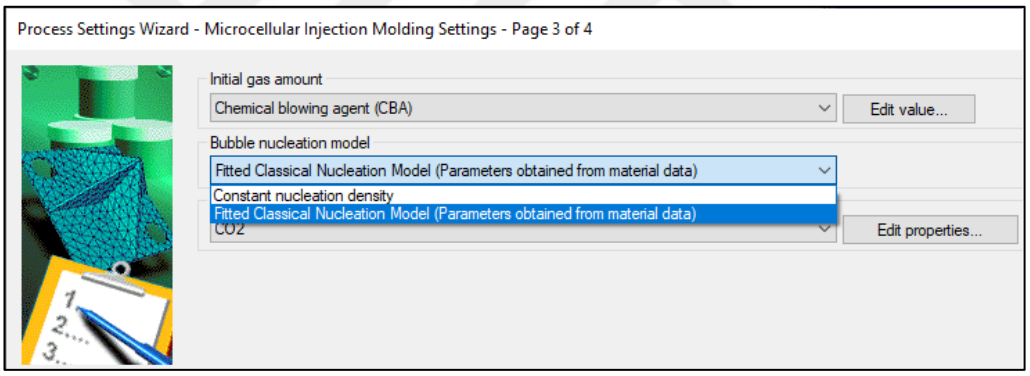
Şekil 3.32. Kimyasal köpürtme ajanı parametreleri

Kimyasal köpürtme analizi yapılacağı için ilk olarak Şekil 3.33'te gösterildiği gibi CBA seçeneği seçilmiştir.



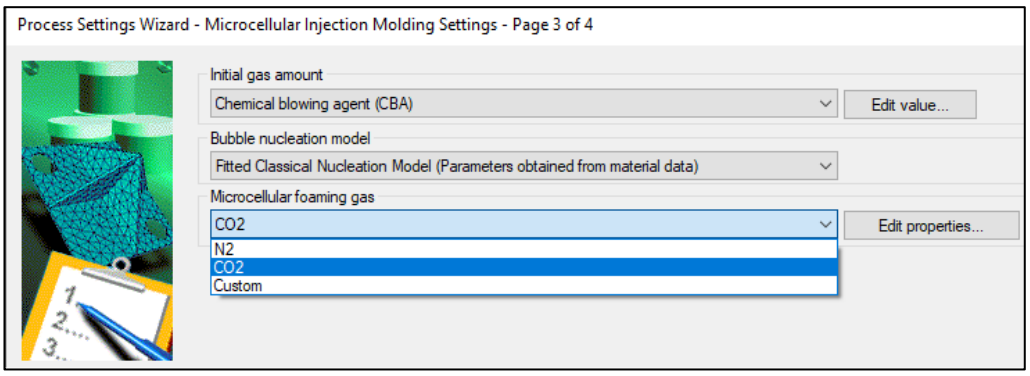
Şekil 3.33. Köpürtme analiz tipi seçimi

Modelleme başlığında anlatıldığı gibi köpüklendirme modeli olarak "Fitted Classical Nucleation Model" Şekil 3.34'te gösterildiği gibi seçilmiştir.



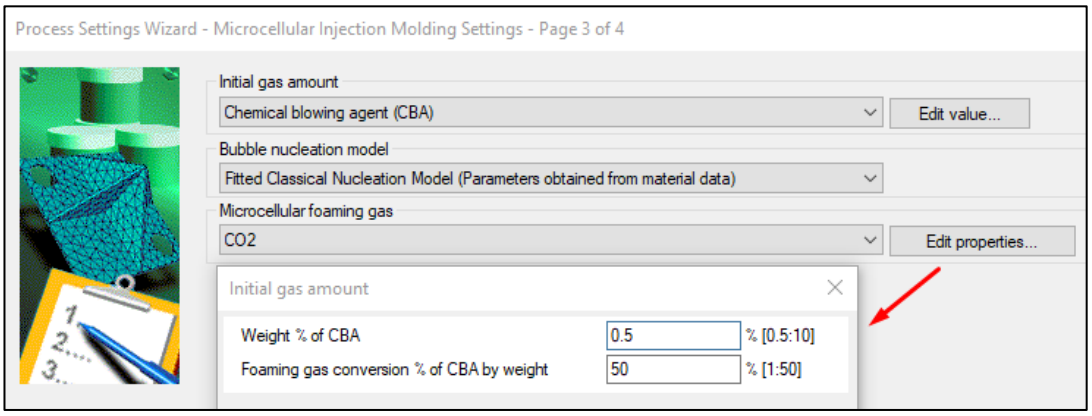
Şekil 3.34. Köpürtme analiz model seçimi

Kullanılan ajanın girdiği reaksiyon sonucu polimer içerisinde çözünür gaz olan CO_2 Şekilde 3.35'de gösterildiği gibi köpürtücü gaz olarak seçilmiştir.



Şekil 3.35. Köpürtücü gaz seçimi

Son olarak köpürtücü gaz ile yüzdesel olarak karışımdaki ajan ağırlığı ve ajan içerisindeki yüzdesel reaktif köpürtücü gaz oranları Şekil 3.36'da olduğu gibi girilir.



Şekil 3.36. Köpürtücü gazın reaktiflik yüzdesi

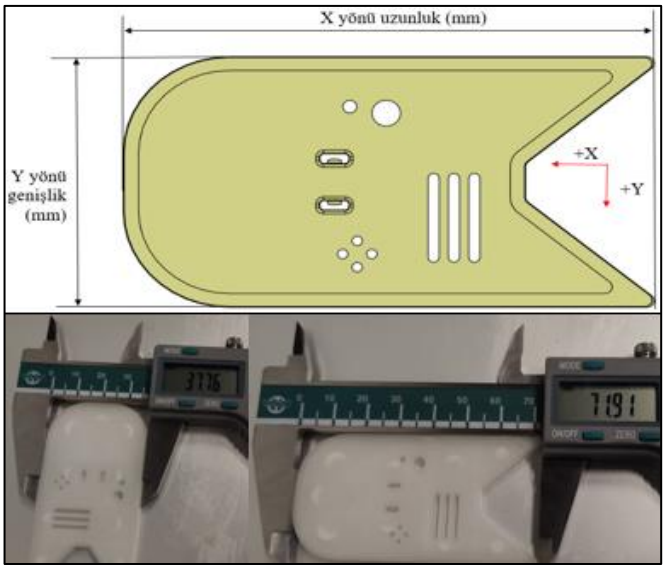
3.7. Plastik Enjeksiyon Makinesi

Üretimin yapıldığı enjeksiyon makinesinin markası Engel, modeli ise Victory-50'dir. Kapama kuvveti 500 KN, plastikleştirme kapasitesi 99 cm^3, en büyük vida stroku 140 mm ve vida çapı 30 mm'dir. Enjeksiyon oranı 150 cm^3/s'dir. En yüksek enjeksiyon hızı 211 mm/s'dir. En yüksek plastik enjeksiyon basıncı ise 2210 bar, buna karşılık makinenin uygulayabildiği en yüksek hidrolik enjeksiyon basıncı 210 bar olarak gözükmektedir. Yapılan hesaba göre makinenin vida katlama oranı 10,52 olarak bulunur.

3.8. Plastik Enjeksiyon Üretim Prosesi ve Deneysel Parametre Setleri

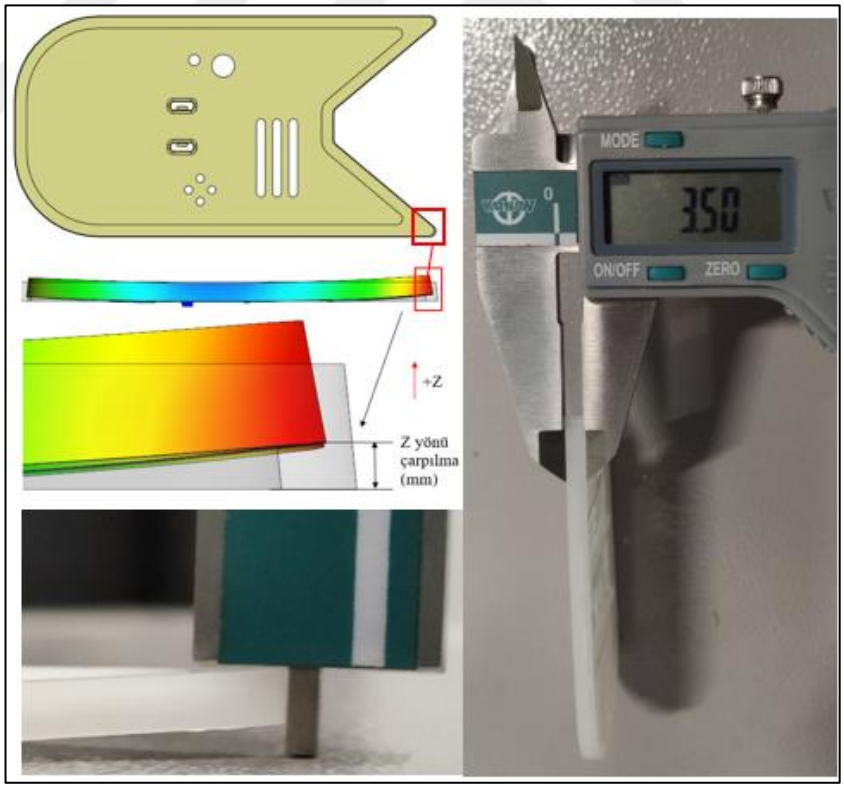
Gerçek üretimleri yapılan konvansiyonel proses, TecoCell® H1 ajanı katkılı ve TecoCell® CS ajanı katkılı kimyasal köpürtme prosesleri veri analiz ve geliştirme programı Nautilus ile belirlenip, belirli proses parametrelerin değişkenliğine göre deney tasarım setleri kurulmuştur.

Kurulan deney tasarım setlerindeki her bir deneyde sadece bir parametre değeri değiştirilerek bu parametrenin, parçanın kritik ölçülerine olan etkisi incelenmiştir. Deney tasarım setlerinin, proses geçişlerinden etkilenmemesi ve stabil sonuç vermesi için her bir deneyin üçüncü alınana numunesinde ölçümler yapılmıştır. Yapılan deneylerin sonucu olarak ölçümlerde kontrol edilen uzunluk ve genişlik Şekil 3.37' de gösterilmiştir.



Şekil 3.37. X yönü uzunluk-Y yönü genişlik ölçüsü

Ayrıca, Şekil 3.38'de bir diğer ölçümü yapılan Z yönü çarpılma ölçüsü ve parça et kalınlığı gösterilmiştir.



Şekil 3.38. Z yönü çarpılma ve et kalınlığı ölçüsü

Daha sonra, parçaların seri üretim kabul şartı olan kritik ölçüleri (uzunluk-X yönü çekme, genişlik-Y yönü çekme, çarpılma değerleri-Z yönü çarpılma) 0,01 mm

hassasiyetli kalibrasyonu yapılmış kumpas ile ölçülmüştür. L_{KP}, konvansiyonel enjeksiyon prosesi parçasının X yönü uzunluk ölçüsü, L_{TH}, Tecocell H1 ajanlı kimyasal köpürtme prosesi parçasının X yönü uzunluk ölçüsü, L_{TCS} ise Tecocell CS ajanlı kimyasal köpürtme prosesi parçasının X yönü uzunluk ölçüsüdür.

Denklem (3.2)' de gösterilen $X_{TH/KP}$ yönü çekme (%), L_{KP}'nin % kaç küçülmesi ile L_{TH} ölçüsüne eşitlendiği gösteren orandır. W_{KP}, konvansiyonel enjeksiyon prosesi parçasının Y yönü genişlik ölçüsü, W_{TH}, Tecocell H1 ajanlı kimyasal köpürtme prosesi parçasının Y yönü genişlik ölçüsü, W_{TCS} ise Tecocell CS ajanlı kimyasal köpürtme prosesi parçasının Y yönü genişlik ölçüsüdür.

Denklem (3.3)' te gösterilen $Y_{TH/KP}$ yönü çekme (%), W_{KP}'nin % kaç küçülmesi ile W_{TH} ölçüsüne eşitlendiği gösteren orandır.

Denklem (3.4)'te gösterilen $X_{TCS/KP}$ yönü çekme (%), L_{KP}'nin % kaç küçülmesi ile L_{TCS} ölçüsüne eşitlendiği gösteren orandır.

Denklem (3.5)'te gösterilen $Y_{TCS/KP}$ yönü çekme (%), W_{KP}'nin % kaç küçülmesi ile W_{TCS} ölçüsüne eşitlendiği gösteren orandır. W_{KP}, konvansiyonel enjeksiyon prosesi parçasının Y yönü genişlik ölçüsüdür.W_{TH}, Tecocell H1 ajanlı kimyasal köpürtme prosesi parçasının Y yönü genişlik ölçüsüdür. W_{TCS}, Tecocell CS ajanlı kimyasal köpürtme prosesi parçasının Y yönü genişlik ölçüsüdür. Konvansiyonele göre % X yönü çekme ölçüsü, % Y yönü çekme ölçüsü gibi hesap edilmiştir. Ayrıca parçanın ağırlık düşüşünü görüntüleyebilmek için kalibrasyonlu ölçüm hassasiyeti 0,01 gr olan hassas terazi ile parça ağırlıkları ölçülmüştür. Ayrıca 3 proses için de seri üretim şartları sonucunda üretilen parçaların tüm bu kritik değerleri, akış simülasyonu sonuçları olarak da ortaya konmuştur.

$$X_{TH/KP} \text{ yönü çekme (\%)} = \frac{(L_{KP} - L_{TH})}{L_{KP}} \times 100 \quad (3.2)$$

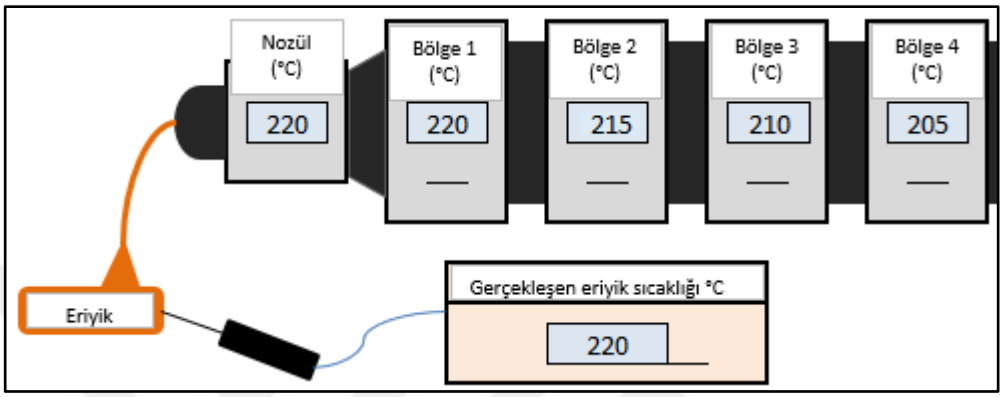
$$Y_{TH/KP} \text{ yönü çekme (\%)} = \frac{(W_{KP} - W_{TH})}{W_{KP}} \times 100 \quad (3.3)$$

$$X_{TCS/KP} \text{ yönü çekme (\%)} = \frac{(L_{KP} - L_{TCS})}{L_{KP}} \times 100 \quad (3.4)$$

$$Y_{TCS/KP} \text{ yönü çekme (\%)} = \frac{(W_{KP} - W_{TCS})}{W_{KP}} \times 100 \quad (3.5)$$

3.8.1. Konvansiyonel plastik enjeksiyon prosesi

Deneysel parçanın prosesinde, Şekil 3.39'da gösterilen makine ısıtıcıları üzerindeki eriyik bölge sıcaklıkları gösterilmiştir. Eriyik makine nozülünde 220 °C'ye ulaşmaktadır. Ayrıca gerçekleşen eriyik sıcaklığı kontrol amaçlı olarak bir sıcaklık ölçüm probu ile ölçülmüştür.



Şekil 3.39. Ocak sıcaklıkları

Makine nozülünden 220°C'de çıkan eriyik sıcak yolluk sisteminde de 220°C'yi koruyacak şekilde proses ayarlanmıştır. Kullanılan polipropilen için eriyik oldukça uygun bir sıcaklıkta kalıba girmektedir. Ayrıca tüm enjeksiyon parametreleri Tablo 3.11'de verildiği gibi ayarlanmıştır.

Kalıp sıcaklığı, kalıp şartlandırıcı cihazından gönderilen 26°C su ile şartlandırılmıştır. Kalıp göz içi sıcaklığı prob ile 30°C olarak ölçülmüştür. Enjeksiyon vidası, enjeksiyon fazında 38 mm mal alma son pozisyonundan 10 mm olan tutmaya geçiş pozisyonuna kadar 110 mm/s enjeksiyon hızı ve 0,36 s enjeksiyon süresinde yol almıştır.

Enjeksiyon fazı tamamlandıktan sonra 5 s boyunca 30 bar tutma basıncı ve ardından parçanın kalıptan çıkma sıcaklığına gelebilmesi için 6 s soğutma süresi uygulanmıştır. Enjeksiyon ve tutma anında kalıp 30 ton kapama kuvveti ile kilitlenmiştir.

Enjeksiyon, mal alma pozisyonu sonu olan 38 mm'den başlayıp tutmaya geçiş noktası olan 10 mm'ye kadar devam etmiş ve ardından tutma fazı uygulanmıştır. Tutma fazı tamamlandıktan sonra ise vida yastıklama pozisyonuna erişmiştir.

Yastıklama pozisyonu, üretimin tekrar edilebilirliğinin kanıtlanması açısından en önemli parametrelerden biridir. Her çevrim sonu toleranslar içinde sabit kalmalıdır.

Tablo 3.11. Konvansiyonel proses verileri

Konvansiyonel Proses		
Ocak sıcaklıkları (°C)	Nozül	220
	1. Bölge	220
	2. Bölge	215
	3. Bölge	210
	4. Bölge	200
Sıcak yolluk sıcaklığı (°C)		220
Kalıp sıcaklığı (°C)		30
Enjeksiyon hızı (mm/s)		110
Tutma basıncı (bar)		30
Tutma süresi (s)		5
Soğuma süresi (s)		6
Mal alma pozisyonu sonu (mm)		38
Tutmaya geçiş noktası (mm)		10
Kapama kuvveti (ton)		30

3.8.1.1. Konvansiyonel plastik enjeksiyon deney tasarım seti

Konvansiyonel enjeksiyon prosesi ayarlandıktan sonra özellikle prosesi etkileyen en önemli birkaç parametrenin değişkenliği üzerine deney tasarım seti kurulmuştur ve parametrelerin değişimi ile parçanın belirli kritik ölçülerinin ve ağırlığın nasıl değiştiği ortaya konulmuştur. Deney için seçilen en etkili 3 proses parametre faktörleri enjeksiyon hızı, tutma basıncı ve kalıp sıcaklığıdır. En yüksek ve en düşük olarak iki seviye belirlenmiştir. Seviyelerin en düşük ve en yüksek noktaları belirlenirken parçanın tam dolu olarak kalıptan çıkarılma ve kozmetik görünüş olarak kabul şartlarına göre belirlenmiştir. Konvansiyonel prosesin deney tasarımı Tablo 3.12'de verilmiştir.

Tablo 3.12. Konvansiyonel prosesin deney tasarım faktör ve seviyeleri

Konvansiyonel prosesin faktörleri ve seviyeleri					
Kalıp yüzey sıcaklığı (°C)		Enjeksiyon hızı (mm/s)		Tutma basıncı (bar)	
En düşük	En yüksek	En düşük	En yüksek	En düşük	En yüksek
30	50	55	110	30	48

Deney tasarım ilkelerine göre 3 faktör ve 2 seviye ile Tablo 3.13'te verildiği gibi toplamda sekiz ayrı proses denemesi KP kodu ile numaralandırılarak KP1'den KP8'e kadar tabloya yerleştirilmiştir. Her bir proses denemesinde yalnızca bir parametre değeri değiştirilerek, proseslerin birbirleri ile kıyaslama yapılması sağlanmıştır.

Tablo 3.13. Konvansiyonel prosesin deney tasarım seti (KP)

Proses Parametreleri		Konvansiyonel Proses							
		KP1	KP2	KP3	KP4	KP5	KP6	KP7	KP8
Ocak sıcaklıkları (°C)	Nozül	220	220	220	220	220	220	220	220
	1. Bölge	220	220	220	220	220	220	220	220
	2. Bölge	215	215	215	215	215	215	215	215
	3. Bölge	210	210	210	210	210	210	210	210
	4. Bölge	200	200	200	200	200	200	200	200
Sıcak yolluk sıcaklığı (°C)		220	220	220	220	220	220	220	220
Kalıp sıcaklığı (°C)		50	50	50	50	30	30	30	30
Enjeksiyon hızı (mm/s)		110	110	55	55	110	110	55	55
Tutma basıncı (bar)		48	30	48	30	48	30	48	30
Tutma süresi (s)		5	5	5	5	5	5	5	5
Soğuma süresi (s)		6	6	6	6	6	6	6	6
Kalıp açma-kapama süresi (s)		5	5	5	5	5	5	5	5
Kapama kuvveti (ton)		30	30	30	30	30	30	30	30

3.8.2. Kimyasal köpürtme enjeksiyon prosesi

Kimyasal köpürtme enjeksiyon prosesinde, konvansiyonel işleme göre belirli farklılıklar olması gerekir. Prosesteki incelikleri doğru uygulamak beklenilen kazançları daha da net ortaya koyacaktır. Öncelikle köpürtücü ajan temel olarak ağırlıkça %1 oranında yapılan katkı ile karışımın viskozitesi düşürerek daha kolay dolum olmasını sağlar. Karışım kolay dolum ile kalıp gözüne mümkün olduğu kadar hızlı bir şekilde ilerlemelidir. Karışım içerisindeki köpük oluşumu, vida-kovan grubu içerisinde gerçekleşmeden kalıp gözü içerisinde başlaması gerekir. Bu yüzden vida hareketinin sonunda yastıklama olarak adlandırılan mesafe en düşükte tutulur. Kalıp gözü içerisinde büyüyen köpüksü yapı, göz içerisinde hem kolay dolumu hem de homojen basınç dağılımını sağlar. Bu yüzden kimyasal köpürtme prosesinin temelinde mümkün olduğu kadar hızlı enjeksiyon yapma kuralı vardır. Ayrıca köpüksü yapı göz içerisinde genişleyerek parçanın oluşmasında homojen basınç dağılımı sağladığı için konvansiyonel proseste yer alan parçanın çekmelerini, görsel yüzey ve ölçülerini kontrol altında tutan tutma süresine neredeyse ihtiyaç yoktur. Bu görevi içerideki köpüksü yapı üstlenmektedir. Köpük yapının kolay bir şekilde oluşması için ve dolum basıncının düşmesi neticesinde kalıp kapama kuvvetleri de düşer. Konvansiyonelde göz içerisine gönderilen plastik hammadde yerine bir miktar köpüksü yapıda hammadde gönderildiği için toplam soğutma sürelerinde (tutma ve soğutma süresi) de

düşüş gözlenebilir. TH ve TCS için köpürtme proses ayarları olarak konvansiyonel prosesteki ocak ve sıcak yolluk sıcaklıkları, kimyasal ajan aktive olma sıcaklığının (205°C) üzerinde olduğu için değiştirilmeden kullanılabilmiştir. Enjeksiyon vidası, enjeksiyon fazında 30 mm mal alma son pozisyonundan 3 mm olan tutmaya geçiş pozisyonuna kadar 110 mm/s enjeksiyon hızı ve 0,32 s enjeksiyon süresinde yol almıştır. Enjeksiyon fazı tamamlandıktan sonra 0,5 s boyunca 30 bar tutma basıncı ve ardından parçanın kalıptan çıkma sıcaklığına gelebilmesi için 5 s soğutma süresi uygulanmıştır. Enjeksiyon ve tutma anında kalıp sırasıyla 20 ve 21 ton kapama kuvveti ile kilitlenmiştir. TH için köpürtme proses ayarları olarak, TCS ile tamamen aynı parametreler kullanılmıştır. TH ve TCS için Tablo 3.14'te tüm proses parametrelerine yer verilmiştir.

Tablo 3.14. Kimyasal köpürtme proses verileri (TH, TCS)

Kimyasal Köpürtme (TH ve TCS-%1 ağırlıkça katkı)		
Ocak sıcaklıkları (°C)	Nozül	220
	1. Bölge	220
	2. Bölge	215
	3. Bölge	210
	4. Bölge	205
Sıcak yolluk sıcaklığı (°C)		220
Kalıp sıcaklığı (°C)		30
Enjeksiyon hızı (mm/s)		110
Tutma basıncı (bar)		30
Tutma süresi (s)		0,5
Soğuma süresi (s)		9
Mal alma pozisyonu sonu (mm)		30
Tutmaya geçiş noktası (mm)		3
Kapama kuvveti (ton)		20-21

3.8.2.1. Kimyasal köpürtme prosesi deney tasarım seti

TH ve TCS kimyasal köpürtme enjeksiyon prosesleri ayarlandıktan sonra özellikle prosesi etkileyen en önemli birkaç parametrenin değişkenliği üzerine deney tasarım seti kurulmuştur ve parametrelerin değişimi ile parçanın belirli kritik ölçülerinin ve ağırlığının nasıl değiştiği ortaya konmuştur. Deney için seçilen en etkili 3 proses parametre faktörü enjeksiyon hızı, tutma basıncı ve kalıp sıcaklığıdır. En yüksek ve en

düşük olarak iki seviye belirlenmiştir. Seviyelerin en düşük ve en yüksek noktaları belirlenirken parçanın tam dolu olarak kalıptan çıkarılma ve görsel kalite olarak kabul şartlarına göre belirlenmiştir.

Köpürtme prosesinin deney tasarımı aşağıdaki Tablo 3.15'te verilmiştir.

Tablo 3.15. Kimyasal köpürtme prosesinin deney tasarım faktör ve seviyeleri

Kimyasal köpürtme prosesinin faktörleri ve seviyeleri (TH ve TCS- %1 ağırlıkça katkı)					
Kalıp yüzey sıcaklığı (°C)		Enjeksiyon hızı (mm/s)		Tutma basıncı (bar)	
En düşük	En yüksek	En düşük	En yüksek	En düşük	En yüksek
30	50	55	110	30	48

Deney tasarım ilkelerine göre 3 faktör ve 2 seviye ile Tablo 3.16'da verildiği gibi 8 adet TH, 8 adet de TCS ajanı için toplamda 16 ayrı proses denemesi yapılmıştır.

Denemeler TH kodu ile TH1'den TH8'e kadar, TCS kodu ile TCS1'den TCS8'e kadar sıralanmıştır. Deneme sonucu elde edilen parçaların uzunluk, genişlik, çarpılma ölçülerinin ilgili parametrelerin en yüksek ve en düşük noktalarında nasıl değiştiğini gösteren karşılaştırılmalı analiz yapılmıştır. Deney tasarımı diğer tüm parametrelerin sabit her denemede sadece bir parametre değişkeni olacak şekilde tasarlanmıştır.

Tablo 3.16. Kimyasal köpürtme prosesi deney tasarım setleri (TH, TCS)

	Kimyasal Ajan	Kimyasal Köpürtme (TH ve TCS- %1 ağırlıkça katkı)							
	Tecocell H1 Deney No	TH1	TH2	TH3	TH4	TH5	TH6	TH7	TH8
Proses Parametreleri	Tecocell CS Deney No	TCS1	TCS2	TCS3	TCS4	TCS5	TCS6	TCS7	TCS8
Ocak sıcaklıkları (°C)	Nozül	220	220	220	220	220	220	220	220
	1. Bölge	220	220	220	220	220	220	220	220
	2. Bölge	215	215	215	215	215	215	215	215
	3. Bölge	210	210	210	210	210	210	210	210
	4. Bölge	200	200	200	200	200	200	200	200
Sıcak yolluk sıcaklığı (°C)		220	220	220	220	220	220	220	220
Kalıp sıcaklığı (°C)		50	50	50	50	30	30	30	30
Enjeksiyon hızı (mm/s)		110	110	55	55	110	110	55	55
Tutma basıncı (bar)		48	30	48	30	48	30	48	30
Tutma süresi (s)		0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
Soğuma süresi (s)		9	9	9	9	9	9	9	9
Kalıp açma-kapama süresi (s)		5	5	5	5	5	5	5	5
Kapama kuvveti (ton)		20-21	20-21	20-21	20-21	20-21	20-21	20-21	20-21

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu bölümde, konvansiyonel ve kimyasal köpürtme proseslerinin akış analizleri ve parametrik deney tasarımları ile yapılan gerçek üretim sonuçları hem kendi içerisinde hem de birbirleri ile karşılaştırmalı olarak incelenip sonuçlar ortaya konulmuştur.

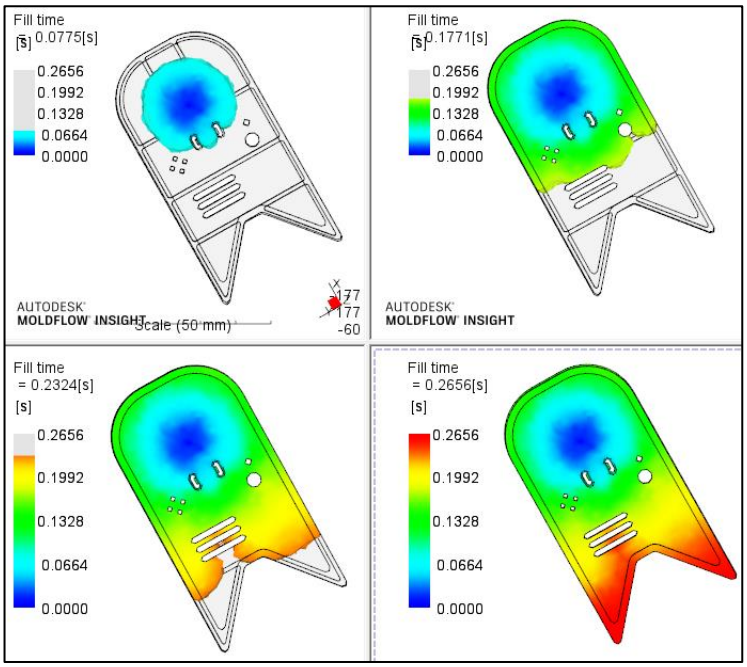
4.1. Akış Analizi Sonuçları ve Karşılaştırması

KP konvansiyonel plastik enjeksiyon proseslerinden seçilen 6 numaralı proses KP6, TH kimyasal köpürtme proseslerinden seçilen 6 numaralı TH6 ve TCS kimyasal köpürtme proseslerinden seçilen TCS6 için 3 ayrı akış analizi yapılmıştır.

Tüm analizlerin sonuçları aşağıda gösterilmiş, ölçü, ağırlık ve proses kazanımları açısından kıyaslanmıştır.

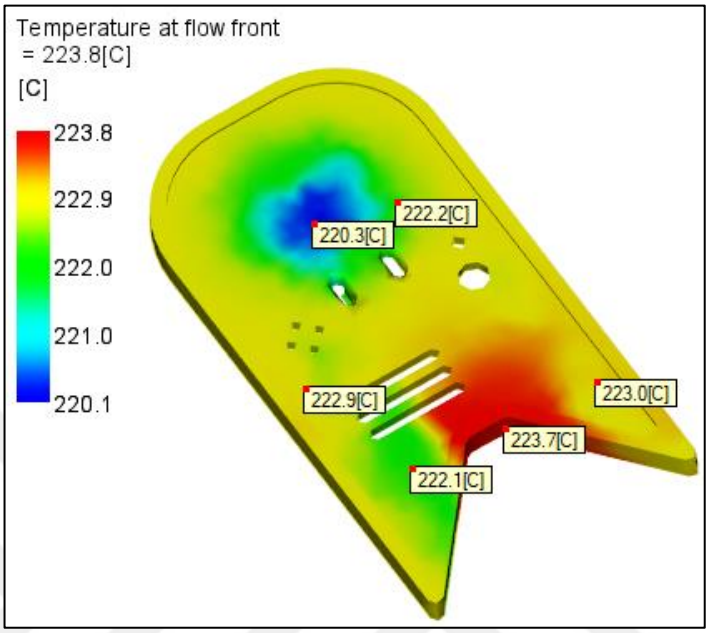
4.1.1. Konvansiyonel enjeksiyon akış analizi sonuçları (KP6)

Dolum sonucuna göre, parça yaklaşık 0,2656 s'de eksik baskı olmadan dolumun zamana bağlı profili Şekil 4.1'de gösterilmiştir. Zamana bağlı dolum seviyeleri eşit oranda dağılmıştır.



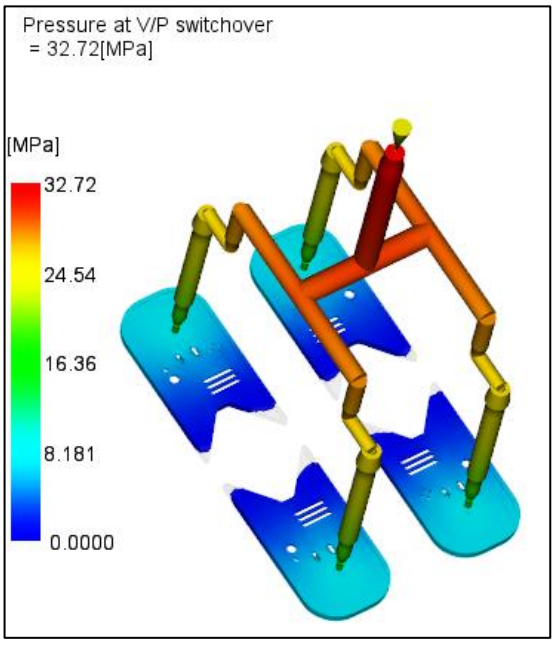
Şekil 4.1. Zamana bağlı dolum profili (KP6)

Ön akış sıcaklığı sonucuna göre, akış boyunca eriyik uç tarafındaki sıcaklık değişim farkı ∓10°C geçmediğinden dolayı oldukça Şekil 4.2'de gösterildiği gibi homojen bir dolum olduğunu söyleyebiliriz.



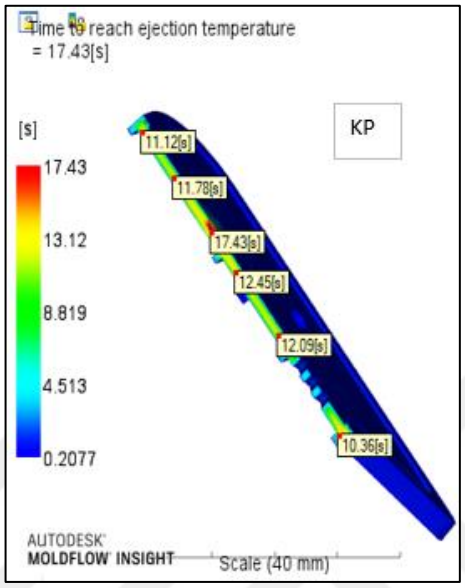
Şekil 4.2. Ön akış sıcaklığı (KP6)

4 gözü doldurmak için tutmaya geçiş anındaki toplam gerekli basıncı Şekil 4.3'te gösterildiği gibi 32,72 MPa'dır. Bu değere oluşan enjeksiyon basıncı da denir. Ayrıca yüzde 50 oranında yollukta basınç tüketimi olduğu gösterilmiştir.



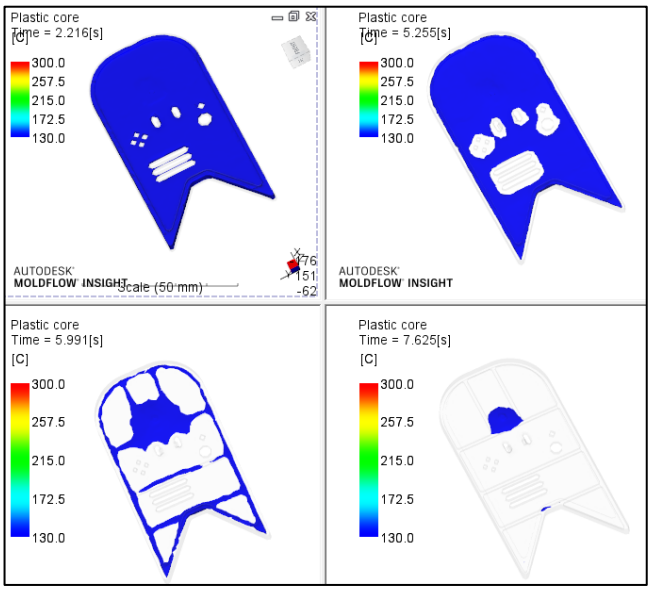
Şekil 4.3. Tutmaya geçiş basıncı (KP6)

Parçanın, prosesten sonra en az şekil değişimi sağlaması için kalıp içerisinde ulaşması gereken sıcaklık değeri ilgili polimer için 70°C'dir. Şekil 4.4'de parçanın kalıptan çıkma zamanları parça üzerinde kesit alınarak birkaç bölge için gösterilmiştir. Yolluğa yakın olan bölgenin en uzun kalıptan çıkma zamanı 17,43 s civarındadır.



Şekil 4.4. Çevrim süresi (KP6)

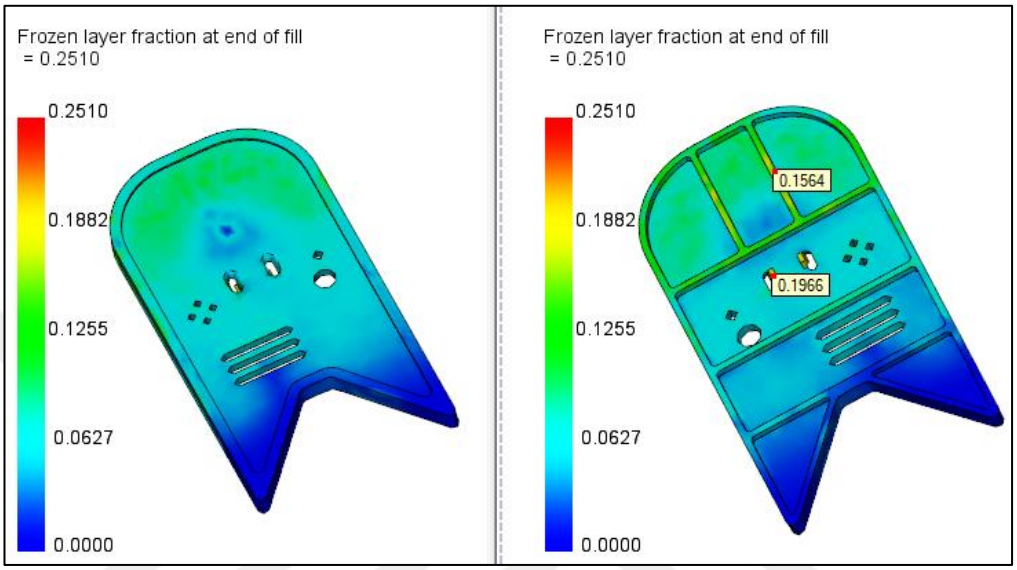
Yolluk girişi donma süresi, sıcaklık sonucuna hareketsizliğin başladığı geçiş sıcaklığı olan 130°C limiti verilerek zamanla bu sıcaklığın üstünde kalan bölgeler mavi altında kalan bölgeler şeffaf bir renk alacak şekilde Şekil 4.5'te gösterilmiştir. Yaklaşık 6,30 s beklendiğinde yolluk bağlantısı tamamen kopmuş oluyor.



Şekil 4.5. Yolluk girişi donma süresi (KP6)

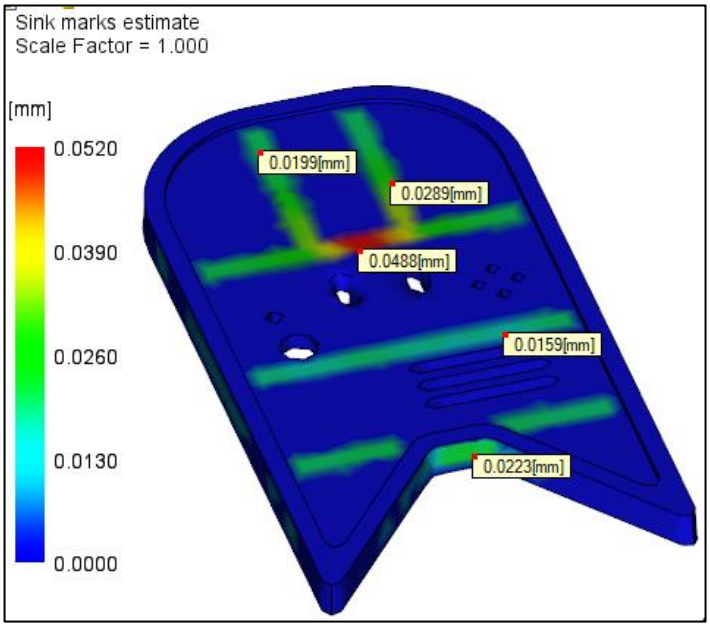
Dolum sonu donmuş katman oranı, dolum süresince %25 üzerinde donmuş bölge istenmediği için kontrol edilmesi gereken bir sonuçtur.

Şekil 4.6'da gösterildiği gibi dolum sonunda en fazla %17 civarında katılaşmış tırnak bölgesi vardır. Parça için bir sorun oluşturmayacaktır.



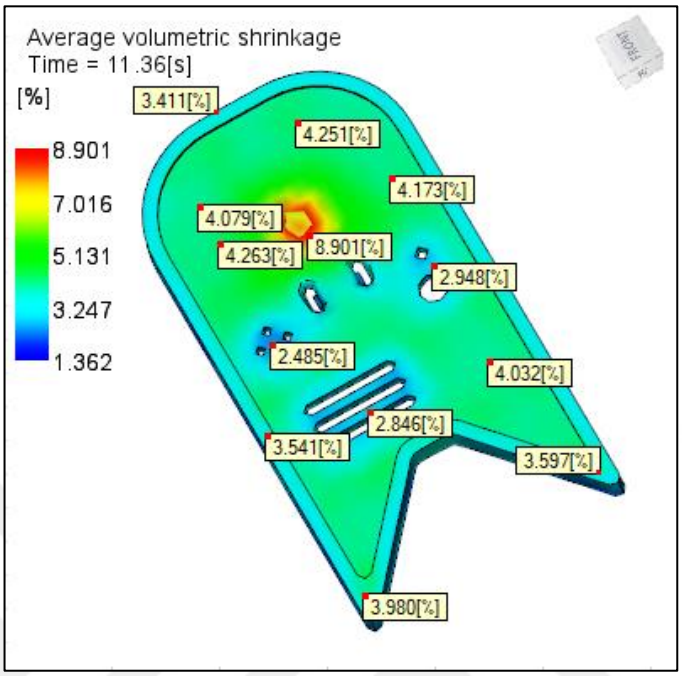
Şekil 4.6. Dolum sonu donmuş katman oranı (KP6)

Çöküntü tahmini olarak parça üzerinde çöküntü izlerinin oluşabileceği ve ne oranda gerçekleşeceğini gösteren sonuçtur. En fazla 0,05 mm bir çöküntü olacağı Şekil 4.7'de gösterilmiştir.



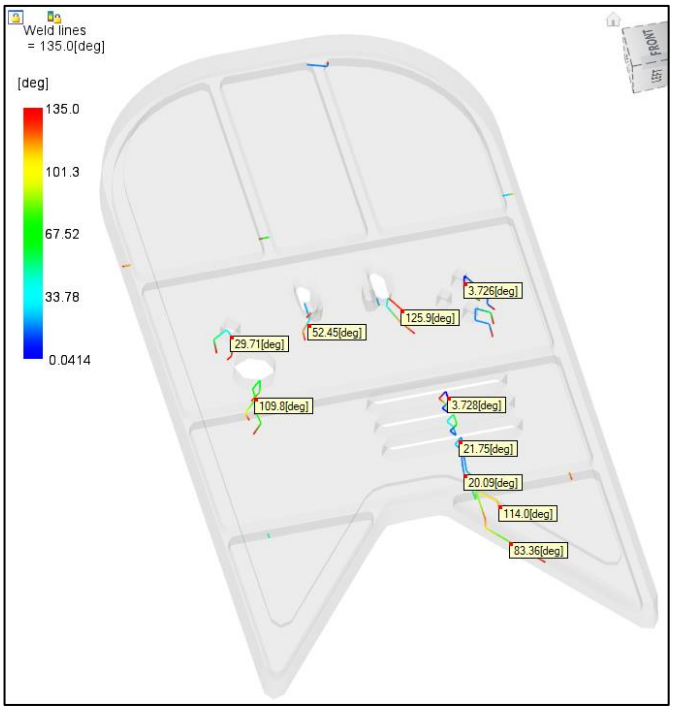
Şekil 4.7. Çöküntü tahmini (KP6)

Çevrim sonunda parçanın üzerinden bölgesel hacimsel çekme oranları Şekil 4.8'de gösterilmiştir. Bölgesel çekme farkları da dağılım olarak gösterilmiştir.



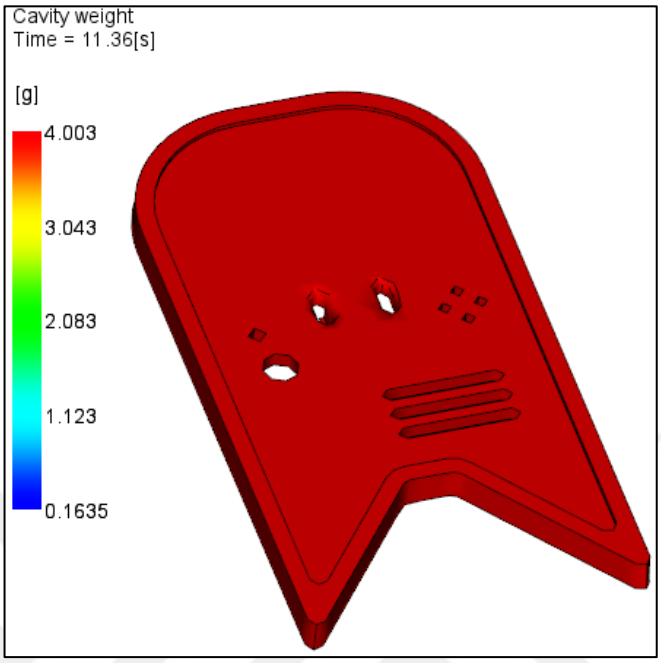
Şekil 4.8. Ortalama hacimsel çekme (KP6)

Parçanın dolumuna göre akışın birleştiği çizgiler Şekil 4.9'da gösterilmiştir. Ne kadar düşük bir açı ile birleşirse o kadar kötü bir birleşme olmuştur.



Şekil 4.9. Birleşme çizgileri (KP6)

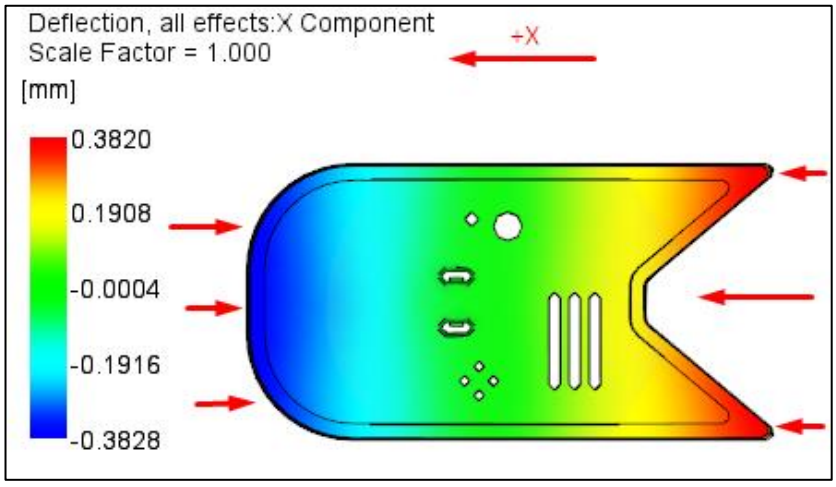
Ortalama göz ağırlığına göre 4 gözlü bir kalıbın ortalama 1 göz ağırlığı 4,003 gr olarak Şekil 4.10'da gösterilmiştir. Hesaplamada, polipropilen yoğunluğu kullanılmıştır.



Şekil 4.10. Ortalama göz ağırlığı (KP6)

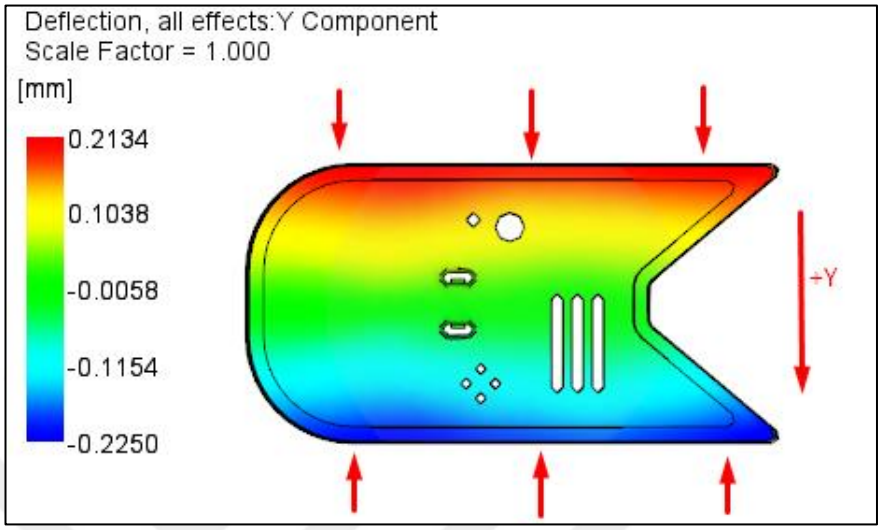
Parçanın X yönünde yer değiştirmesi Şekil 4.11'de gösterilmiştir. X yönü çekme, +X yönünde 0,3820, -X yönünde 0,3820 olacak şekilde toplam 0,7648 mm olarak gösterilmiştir.

Toplam çekme değeri kadar parça kalıp ölçüsünden daha küçük olarak ortaya çıkacaktır. Bu yüzden parçanın kalıbı üretilirken kalıp göz boşluğu toplam çekme değeri kadar büyük işlenmelidir.



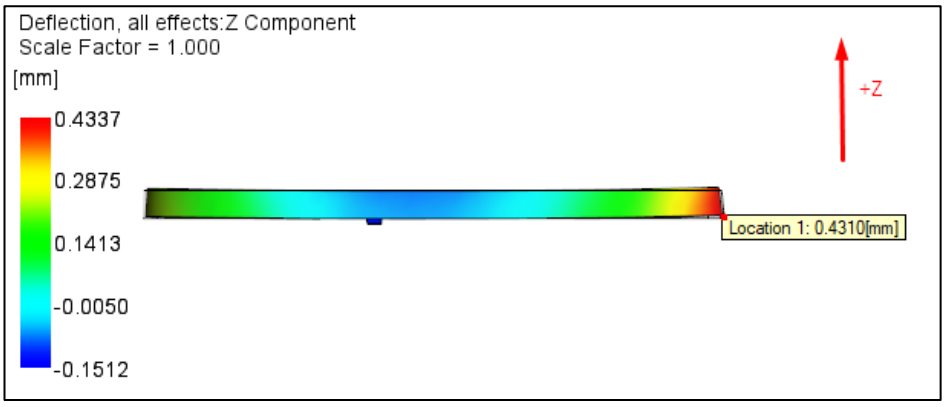
Şekil 4.11. X yönü çekme değerleri (KP6)

Parçanın Y yönünde yer değiştirmesi Şekil 4.12'de gösterilmiştir. Y yönü çekme, +Y yönünde 0,2134, -Y yönünde 0,2134 olacak şekilde toplam 0,4384 mm olarak gösterilmiştir.



Şekil 4.12. Y yönü çekme değerleri (KP6)

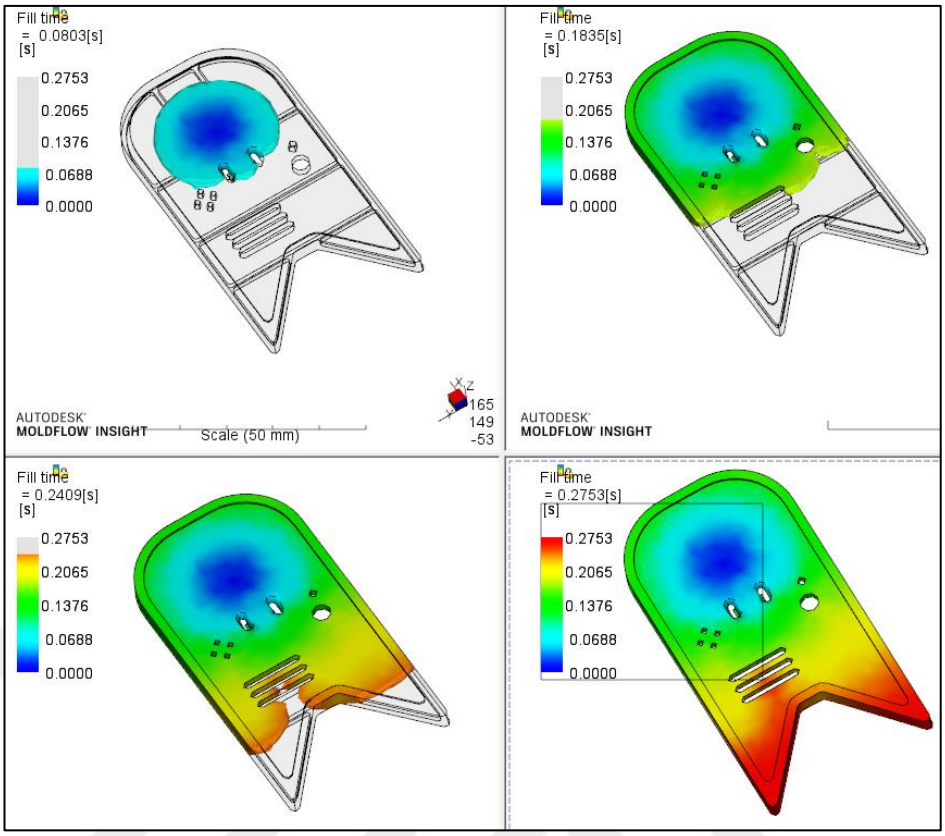
Parçanın Z yönünde yer değiştirmesi Şekil 4.13'te gösterilmiştir. +Z yönü en yüksek çarpılma miktarı, hiç çarpılmayan parça için sıfır noktası referans alınarak, 0,4337 mm olarak gösterilmiştir.



Şekil 4.13. Z yönü çarpılma değerleri (KP6)

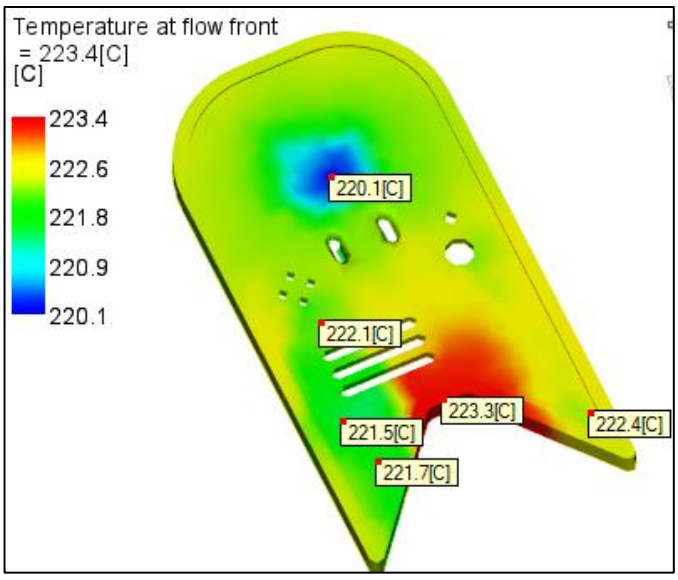
4.1.2. Kimyasal köpürtme prosesi akış analizi sonuçları (TH6)

Dolum sonucuna göre, parça yaklaşık 0,2753 saniyede eksik baskı olmadan dolduruluyor. Dolumun zamana bağlı profili Şekil 4.14'te gösterilmiştir. Dolumun her aşamasında, parça üzerindeki ilerlemesini takip etmek gerekir. Buna göre her dolum fazına karşılık gelen parça et kalınlıklarının akışa etkisi kontrol edilmiş olur.



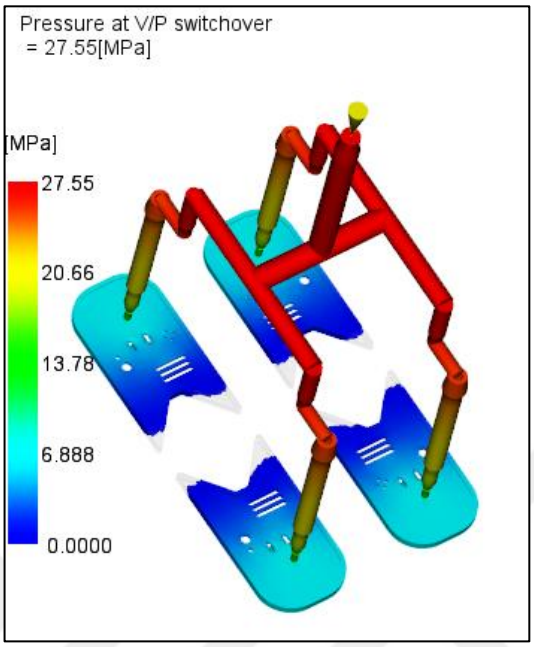
Şekil 4.14. Dolum profili (TH6)

Ön akış sıcaklığı sonucuna göre, akış boyunca eriyik uç tarafındaki sıcaklık değişim farkı ∓10 °C limitinin içerisinde olduğundan dolayı Şekil 4.15'te gösterildiği gibi homojen bir dolum olduğunu söyleyebiliriz. Eriyik ön akış sıcaklığının parçanın küçük bir bölgesinde artış göstermesi önemli değildir.



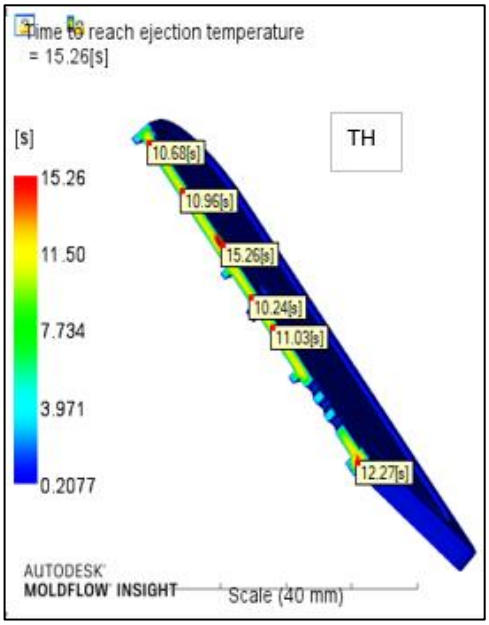
Şekil 4.15. Ön akış sıcaklığı (TH6)

4 gözü doldurmak için tutmaya geçiş anındaki toplam gerekli basıncı Şekil 4.16'da gösterildiği gibi 27,55 MPa'dır. Bu, kimyasal köpürtme prosesi enjeksiyon basıncıdır.



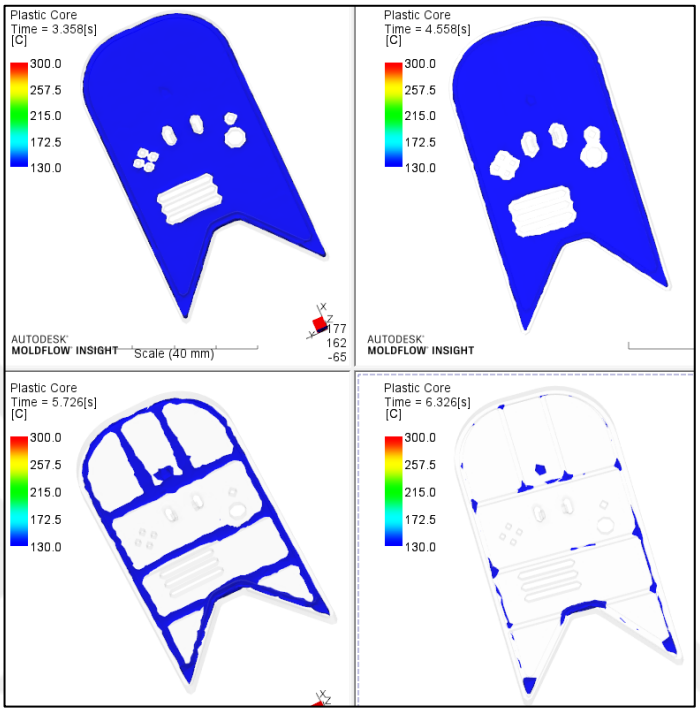
Şekil 4.16. Tutmaya geçiş basıncı (TH6)

Parçanın, prosesten sonra en az şekil değişimi sağlaması için kalıp içerisinde ulaşması gereken sıcaklık değeri ilgili polimer için 70°C'dir. Şekil 4.17'de parçanın kalıptan çıkma zamanları parça üzerinde kesit alınarak birkaç bölge için gösterilmiştir. Yolluğa yakın olan en uzun kalıptan çıkma zamanları 15,26 s civarındadır.



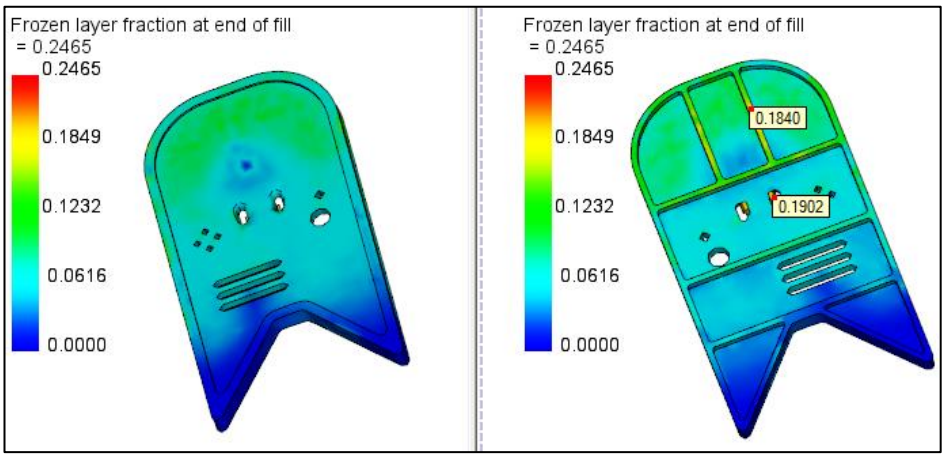
Şekil 4.17. Çevrim süresi (TH6)

Yolluk girişi donma süresi, sıcaklık sonucuna hareketsizliğin başladığı geçiş sıcaklığı olan 130°C limiti verilerek zamanla bu sıcaklığın üstünde kalan bölgeler mavi altında kalan bölgeler şeffaf bir renk alacak şekilde Şekil 4.18'de gösterilmiştir. Yaklaşık 6,20 s içinde yolluk bağlantısı tamamen kopmuş oluyor.



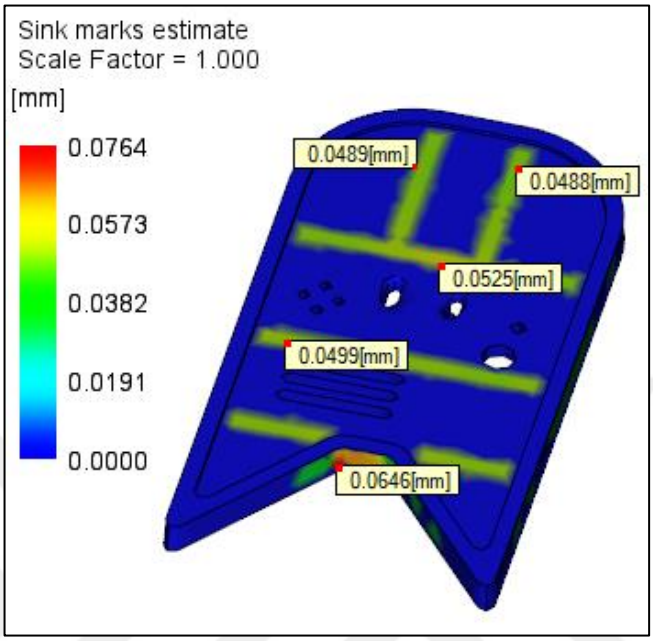
Şekil 4.18. Yolluk girişi donma süresi (TH6)

Dolum sonu donmuş katman oranı, dolum süresince %25 üzerinde donmuş bölge istenmediği için kontrol edilmesi gereken bir sonuçtur. Dolum sonunda en fazla %19 civarında katılaşmış tırnak bölgesi Şekil 4.19'da gösterilmiştir. Parça için bir sorun oluşturmayacaktır.



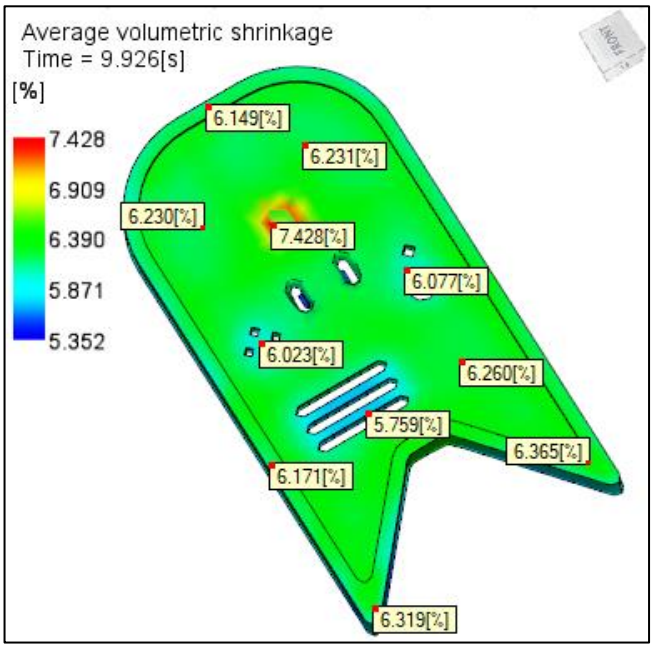
Şekil 4.19. Dolum sonu donmuş katman oranı (TH6)

Çöküntü tahmini olarak parça üzerinde çöküntü izlerinin oluşabileceği ve ne kadar bir oranda gerçekleşeceğini gösteren sonuçtur. En fazla 0,0764 mm bir çöküntü olacağı Şekil 4.20'de gösterilmiştir.



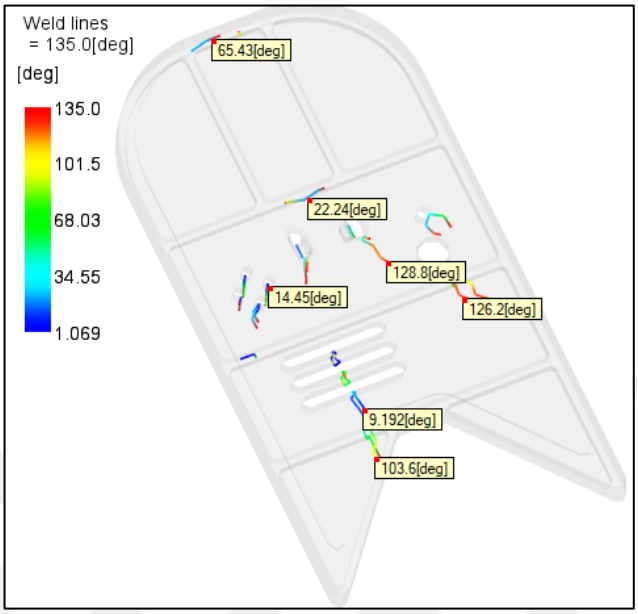
Şekil 4.20. Çöküntü tahmini (TH6)

Çevrim sonunda parçanın üzerinden bölgesel hacimsel çekme oranları Şekil 4.21'de gösterilmiştir. Ortalama hacimsel çekme değerleri %6,30 civarındadır. Parça üzerindeki hacimsel çekmeler, orantılı bir şekilde dağılmıştır.



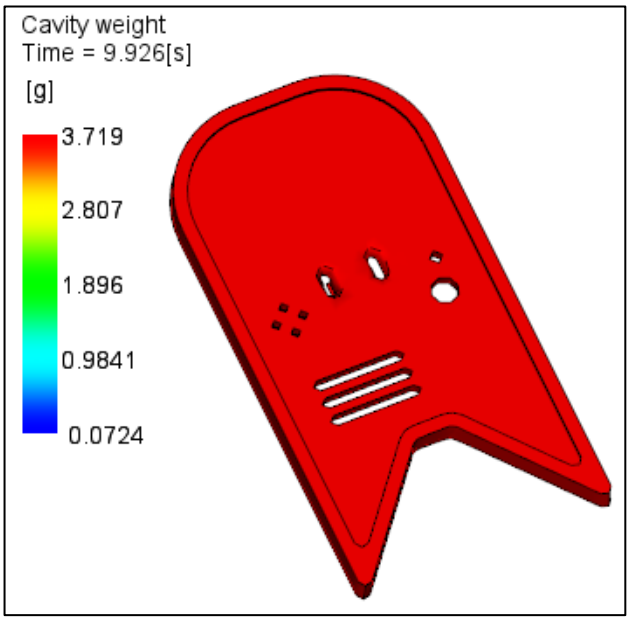
Şekil 4.21. Ortalama hacimsel çekme (TH6)

Parçanın dolumuna göre akışın birleştiği çizgiler Şekil 4.22'de gösterilmiştir. Birleşme açısı azaldıkça, akışlar arasında daha karşı karşıya bir çarpışma olduğunu ifade eder. Daha düşük açılarda birleşme izi, parça yüzeyinde daha görünür haldedir.



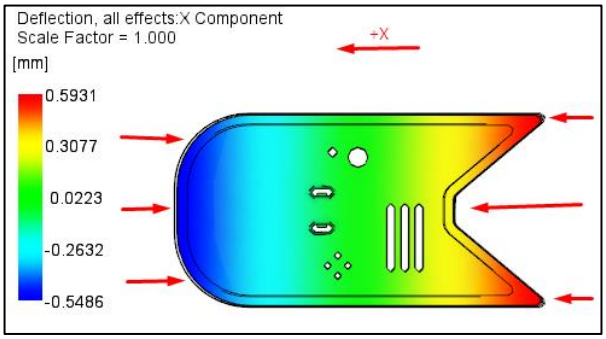
Şekil 4.22. Birleşme çizgileri (TH6)

Ortalama göz ağırlığına göre 4 gözlü bir kalıbın ortalama 1 göz ağırlığı 3,719 gram olarak Şekil 4.23'te gösterilmiştir. Göz ağırlığı proseste uygulanan tutma basınç profiline göre değişkenlik gösterebilir. Bu yüzden yolluk girişi donma süresine kadar tutma fazını kullanmak gerekir.



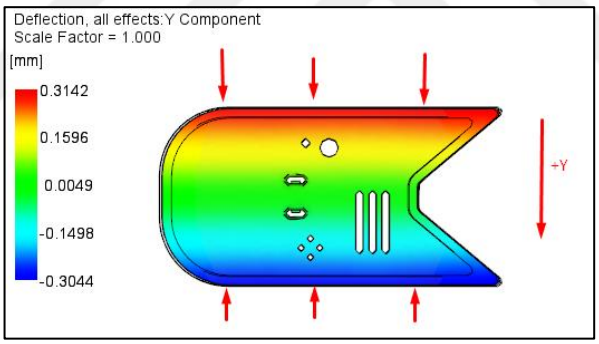
Şekil 4.23. Ortalama göz ağırlığı (TH6)

Parçanın X yönünde yer değiştirmesi Şekil 4.24'te gösterilmiştir. X yönü çekme, +X yönünde 0,5931, -X yönünde 0,5486 olacak şekilde toplam 1,1417 mm olarak gösterilmiştir.



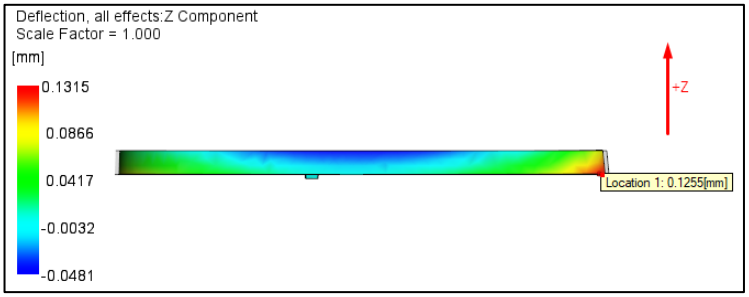
Şekil 4.24. X yönü çekme değerleri (TH6)

Parçanın Y yönünde yer değiştirmesi Şekil 4.25'te gösterilmiştir. Y yönü çekme, +Y yönünde 0,3142, -Y yönünde 0,3044 olacak şekilde toplam 0,6186 mm olarak gösterilmiştir.



Şekil 4.25. Y yönü çekme değerleri (TH6)

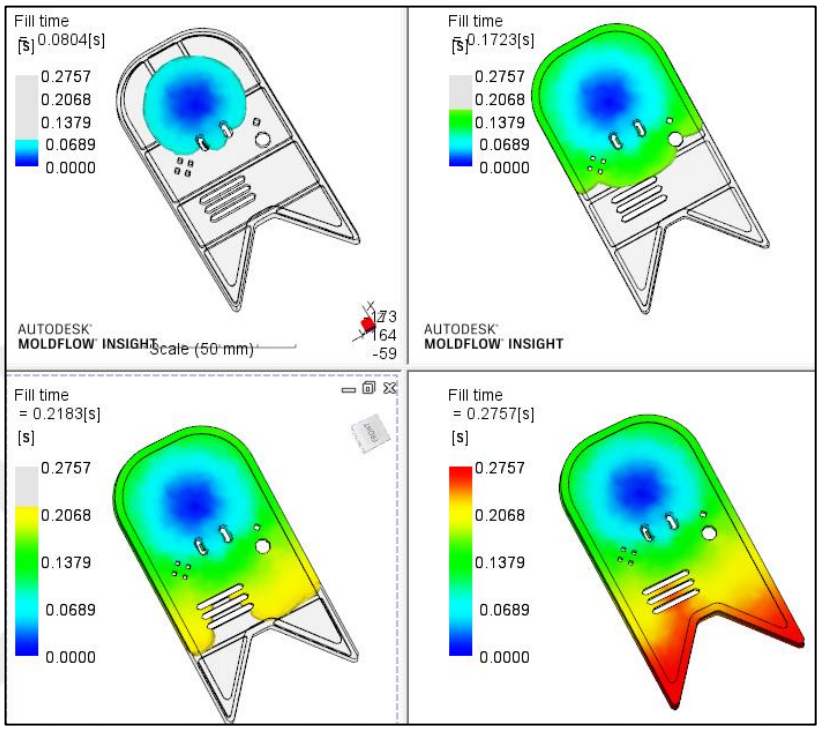
Parçanın Z yönünde yer değiştirmesi Şekil 4.26'da gösterilmiştir. +Z yönü en yüksek çarpılma miktarı, hiç çarpılmayan parça için sıfır noktası referans alınarak, 0,1315 mm olarak gösterilmiştir.



Şekil 4.26. Z yönü çarpılma değerleri (TH6)

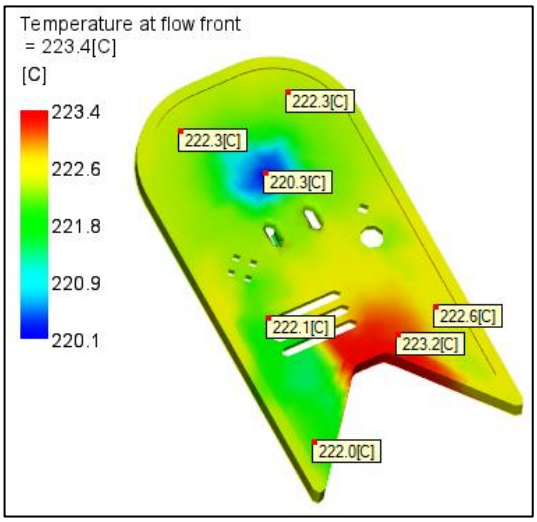
4.1.3. Kimyasal köpürtme prosesi akış analizi sonuçları (TCS6)

Dolum sonucuna göre, parça yaklaşık 0,2757 saniyede eksik baskı olmadan dolumun zamana bağlı profili Şekil 4.27'de gösterilmiştir.



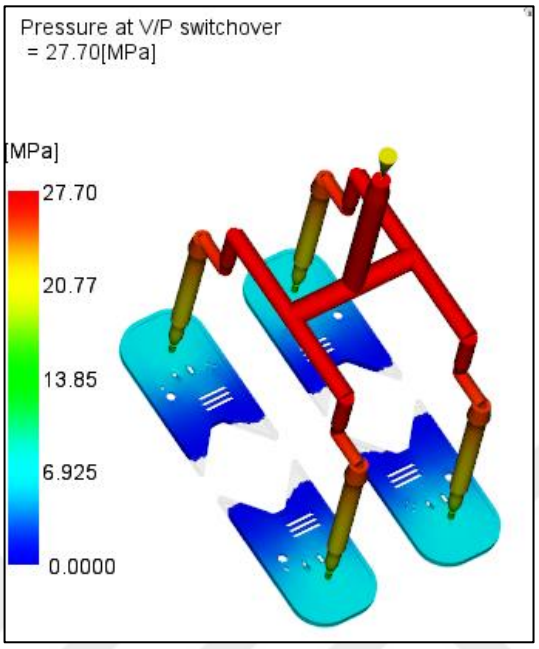
Şekil 4.27. Dolum profili (TCS6)

Ön akış sıcaklığı sonucuna göre, akış boyunca eriyik uç tarafındaki sıcaklık değişim farkı ∓10 °C geçmediğinden dolayı oldukça Şekil 4.28'de gösterildiği gibi homojen bir dolum olduğunu söyleyebiliriz.



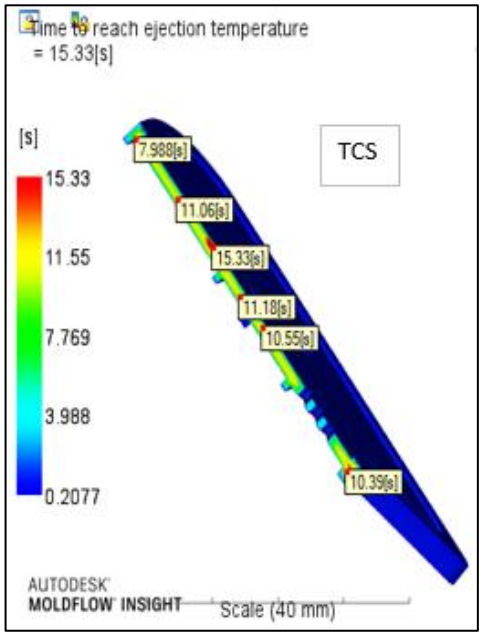
Şekil 4.28. Ön akış sıcaklığı (TCS6)

4 gözü doldurmak için tutmaya geçiş anındaki toplam gerekli basıncı Şekil 4.29'da gösterildiği gibi 27,70 MPa'dır. Bu,kimyasal köpürtme prosesi enjeksiyon basıncıdır.



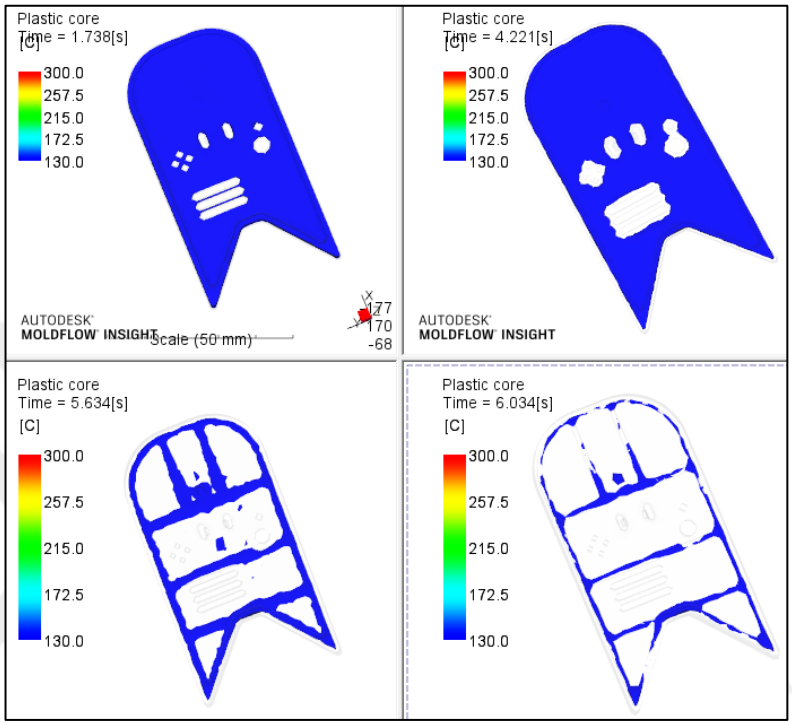
Şekil 4.29.Tutmaya geçiş basıncı (TCS6)

Parçanın, prosesten sonra en az şekil değişimi sağlaması için kalıp içerisinde ulaşması gereken sıcaklık değeri ilgili polimer için 70 °C'dir. Şekil 4.30'da parçanın kalıptan çıkma zamanları parça üzerinde kesit alınarak birkaç bölge için gösterilmiştir. Ortalama kalıptan çıkma zamanları 15,33 s civarındadır.



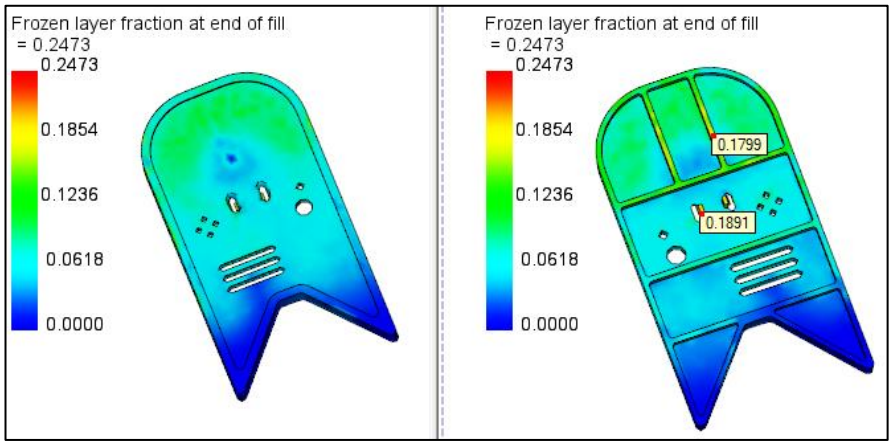
Şekil 4.30. Çevrim süresi (TCS6)

Yolluk girişi donma süresi, sıcaklık sonucuna hareketsizliğin başladığı geçiş sıcaklığı olan 130°C limiti verilerek zamanla bu sıcaklığın üstünde kalan bölgeler mavi altında kalan bölgeler şeffaf bir renk alacak biçimde Şekil 4.31'de gösterilmiştir. Yaklaşık 6,20 saniyesine gelindiğinde yolluk bağlantısı tamamen kopmuş oluyor.



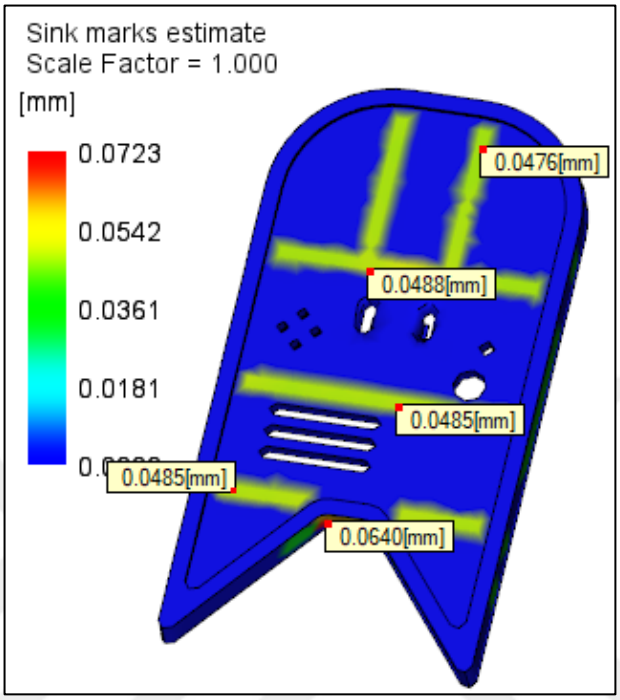
Şekil 4.31. Yolluk girişi donma süresi (TCS6)

Dolum sonu donmuş katman oranı, dolum süresince %25 üzerinde donmuş bölge istenmediği için kontrol edilmesi gereken bir sonuçtur. Dolum sonunda en fazla %18 civarında katılaşmış tırnak bölgesi Şekil 4.32'de gösterilmiştir. Parça için bir sorun oluşturmayacaktır.



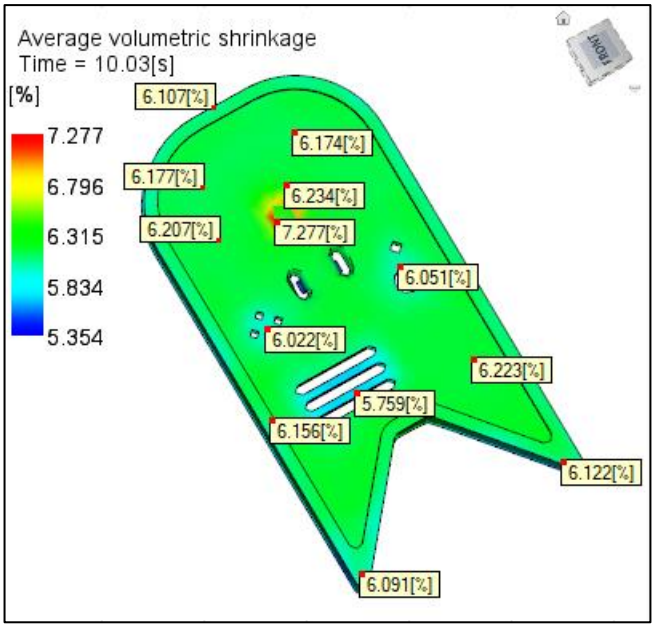
Şekil 4.32. Dolum sonu donmuş katman oranı (TCS6)

Çöküntü tahmini olarak parça üzerinde çöküntü izlerinin oluşabileceği ve ne kadar bir oranda gerçekleşeceğini gösteren sonuçtur. En fazla 0,0723 mm bir çöküntü olacağı Şekil 4.33'te gösterilmiştir.



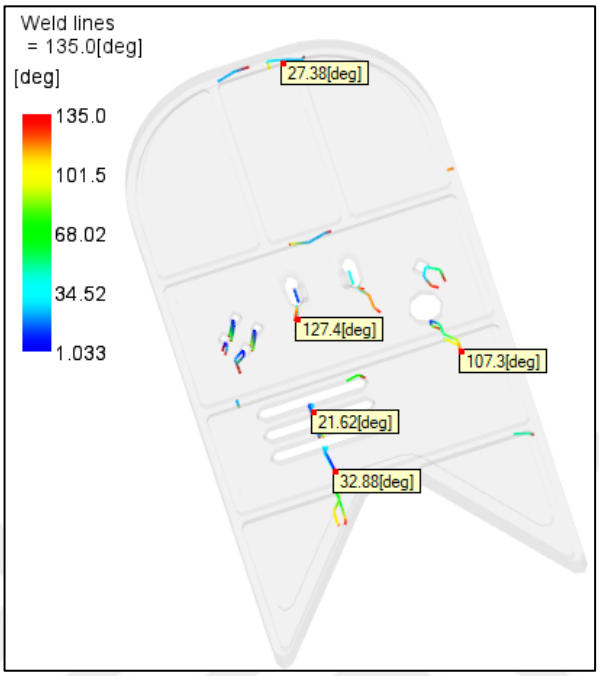
Şekil 4.33. Çöküntü tahmini (TCS6)

Çevrim sonunda parçanın üzerinden elde edilen bölgesel hacimsel çekme oranları, Şekil 4.34'te gösterilmiştir. Ortalama hacimsel çekme değerleri %6,15 civarındadır.



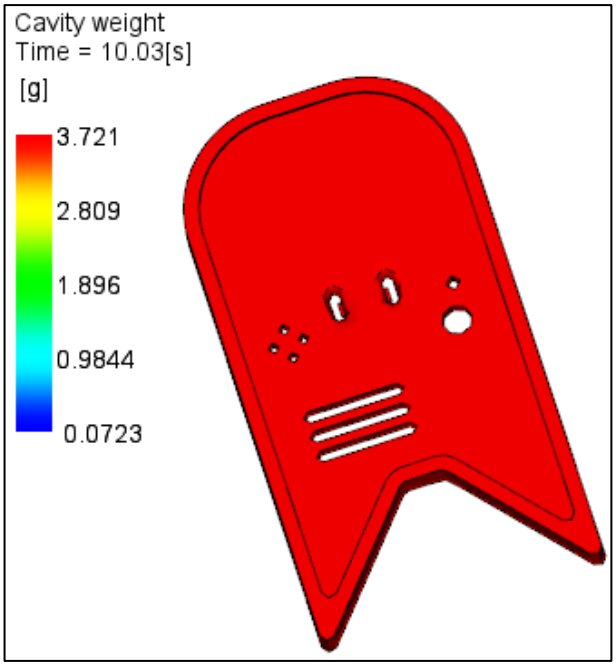
Şekil 4.34. Ortalama hacimsel çekme (TCS6)

Parçanın dolumuna göre akışın birleştiği çizgiler Şekil 4.35'te gösterilmiştir. Daha düşük bir birleşme açısı, o derece olumsuz bir birleşme sonucu doğurur.



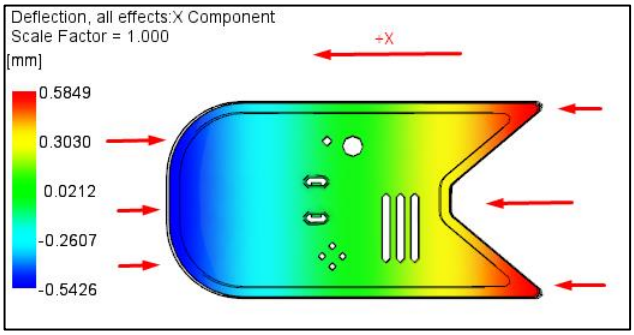
Şekil 4.35. Birleşme çizgileri (TCS6)

Ortalama göz ağırlığına göre 4 gözlü bir kalıbın ortalama 1 göz ağırlığı 3.721 gram olarak Şekil 4.36'da gösterilmiştir. Hesaplamada, polipropilen hammaddenin yoğunluk değeri kullanılmıştır.



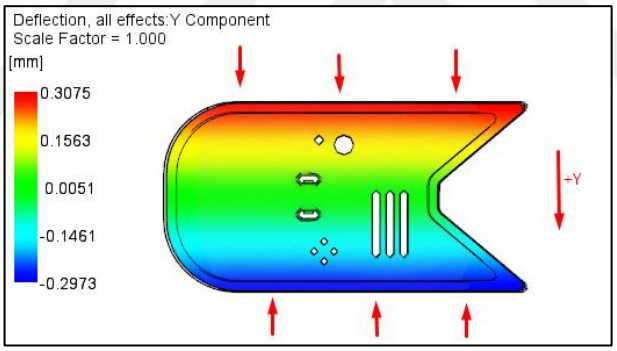
Şekil 4.36. Ortalama göz ağırlığı (TCS6)

Parçanın X yönünde yer değiştirmesi Şekil 4.37'de gösterilmiştir. X yönü çekme, +X yönünde 0,5849, -X yönünde 0,5426 olacak şekilde toplam 1,1275 mm olarak gösterilmiştir.



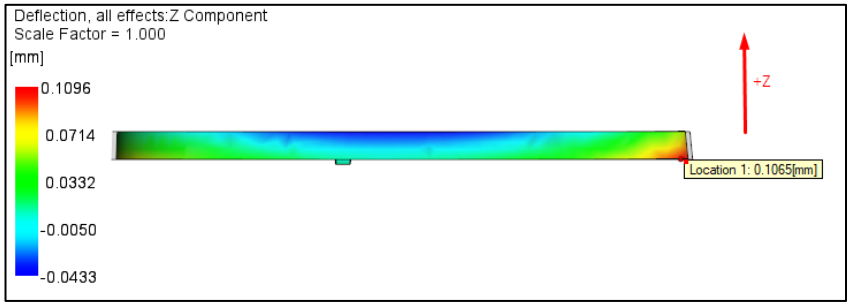
Şekil 4.37. X yönü çekme değerleri (TCS6)

Parçanın Y yönünde yer değiştirmesi Şekil 4.38'de gösterilmiştir. Y yönü çekme, +Y yönünde 0,3075, -Y yönünde 0,3075 olacak şekilde toplam 0,6048 mm olarak gösterilmiştir.



Şekil 4.38. Y yönü çekme değerleri (TCS6)

Parçanın Z yönünde yer değiştirmesi Şekil 4.39'da gösterilmiştir. +Z yönü en yüksek çarpılma miktarı, hiç çarpılmayan parça için sıfır noktası referans alınarak, 0,1096 mm olarak gösterilmiştir.

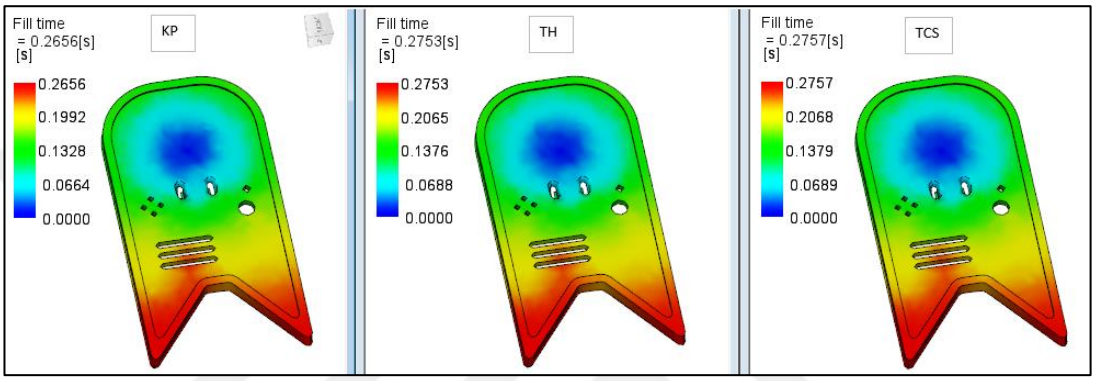


Şekil 4.39. Z yönü çarpılma değerleri (TCS6)

4.1.4. Karşılaştırmalı akış analiz sonuçları (KP6, TH6, TCS6)

Bu bölümde konvansiyonel enjeksiyon için KP6, TH ajanlı kimyasal köpürtme için TH6 ve TCS ajanlı kimyasal köpürtme için TCS6 proseslerinin akış analizleri sonuçları karşılaştırmalı olarak incelenmiştir.

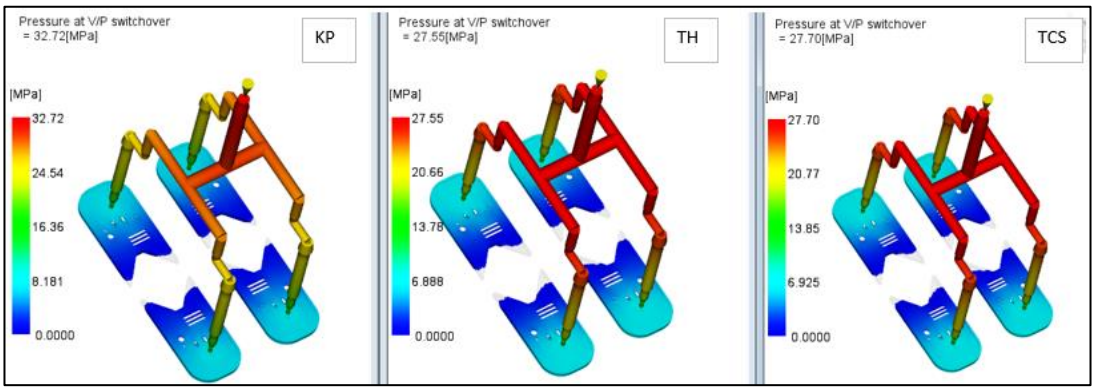
Proses yeterince yüksek hızlara ayarlandığında, dolum zamanlarında çok büyük farklar oluşmamıştır. Dolum zamanları Şekil 4.40'ta gösterilmiştir.



Şekil 4.40. Karşılaştırmalı dolum zamanları (KP6, TH6, TCS6)

Konvansiyonel için en yüksek 32,72 MPa dolum basıncı gerekli olmuştur. TH ve TCS prosesleri için sırasıyla en yüksek 27,55 ve 27,70 tona yakın bir kapama kuvveti gereksinimi gözlemlenmiştir. TH6 ve TCS6 prosesleri basınçları KP6 prosesi kapama kuvveti gereksiniminden yaklaşık %15,8 oranında düşüktür.

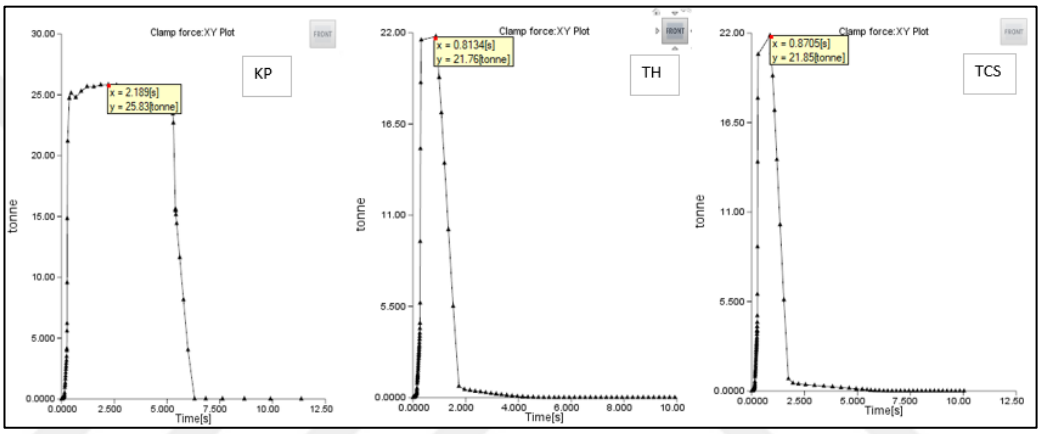
Şekil 4.41'de gösterildiği gibi gerekli dolum basınçları açısından büyükten küçüğe KP6, TCS6 ve TH6 olarak sıralanmıştır. Dolum basınçları, yollukta kaybedilen ve parçanın tamamının dolması için gereken basınçları gösterir.



Şekil 4.41.Karşılaştırmalı dolum basınçları (KP6, TH6, TCS6)

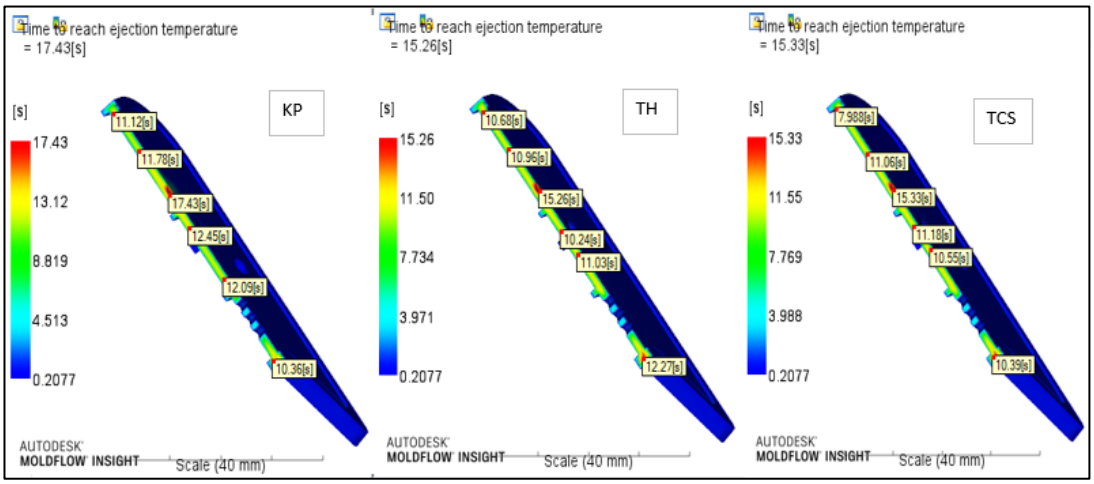
Konvansiyonel için 6,5 saniyelik periyotta en fazla 25,83 ton kapama kuvveti gerekli olmuştur. TH ve TCS prosesleri için yaklaşık 2 saniyelik bir periyotta sırasıyla en fazla 21,76 ve 21,85 tona yakın bir kapama kuvveti gereksinimi gözlemlenmiştir. TH6 ve TCS6 prosesleri kapama kuvveti KP6 prosesi kapama kuvveti gereksiniminden yaklaşık %15 oranında düşüktür.

Şekil 4.42'de gösterildiği gibi gerekli kapama kuvveti açısından büyükten küçüğe KP6, TCS6 ve TH6 olarak sıralanmıştır. Kapama kuvvetlerinin dolum basınçları ile doğrudan korelasyonu vardır.



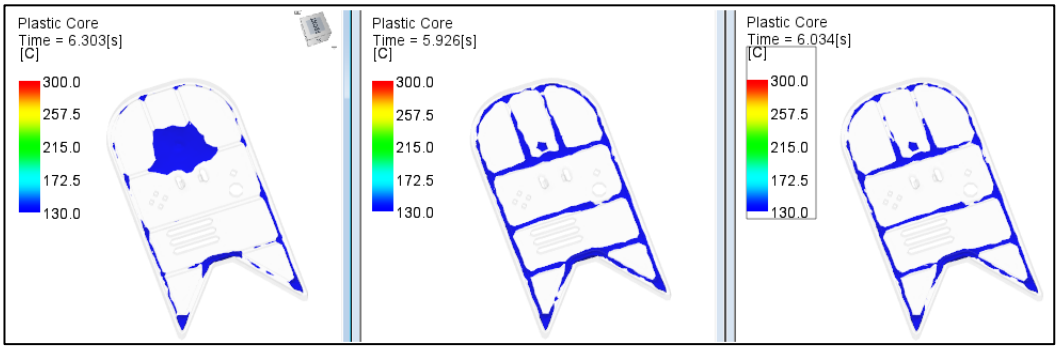
Şekil 4.42. Karşılaştırmalı kapama kuvvetleri (KP6, TH6, TCS6)

Parçanın kalıptan çıkarılması için gereken toplam zamanları büyükten küçüğe KP6, TCS6 ve TH6 olarak Şekil 4.43'te gösterildiği gibi sıralanmıştır. Dolum, tutma, soğuma sürelerinin tamamlanması için gerekli çevrim süreleri, KP6 için 17,43 saniye, TH6 için 15,26 saniye ve TCS6 için 15,33 saniye olarak elde edilmiştir.



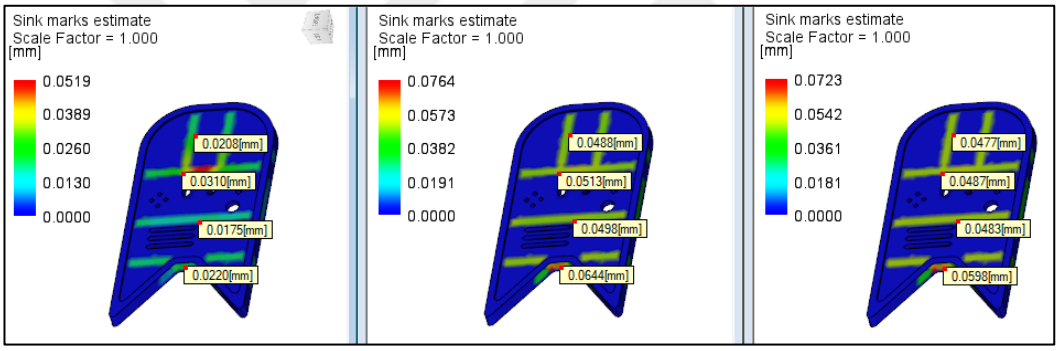
Şekil 4.43. Karşılaştırmalı çevrim süreleri (KP6, TH6, TCS6)

Yolluk girişi donma süreleri Şekil 4.44'te gösterildiği gibi büyükten küçüğe KP6, TCS6 ve TH6 olarak sıralanmıştır.



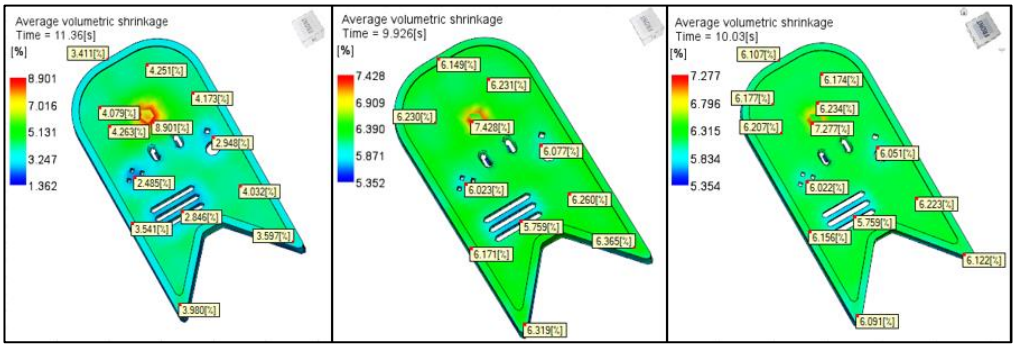
Şekil 4.44. Karşılaştırmalı yolluk donma süreleri (KP6, TH6, TCS6)

Parça yüzeylerindeki ortalama çöküntü miktarlarını Şekil 4.45'te gösterildiği gibi büyükten küçüğe TH6, TCS6 ve KP6 olarak sıralanmıştır.



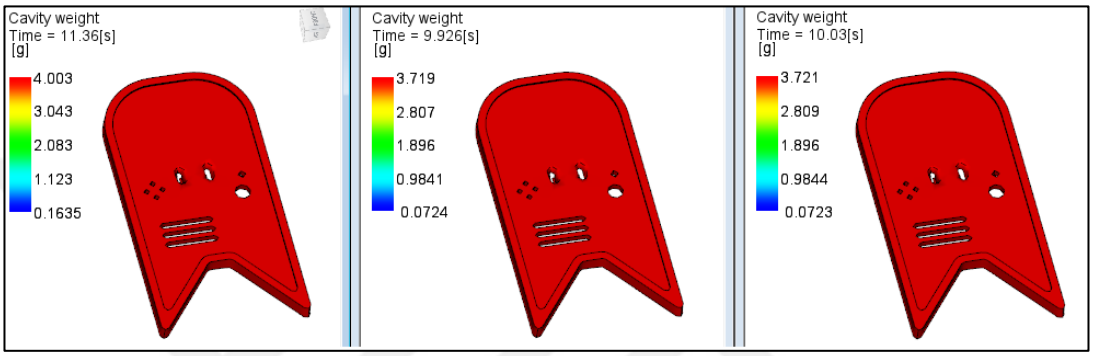
Şekil 4.45. Karşılaştırmalı yüzeydeki çöküntü miktarı (KP6, TH6, TCS6)

Ortalama hacimsel çekme oranları Şekil 4.46'da gösterildiği gibi büyükten küçüğe TH6, TCS6 ve KP6 olarak sıralanmıştır. TH6 ve TCS6 prosesleri KP6'ya göre daha fazla hacimsel çekmeye sahip olmasına rağmen parça yüzeyindeki çöküntülerin dağılımı, KP6 prosesine göre çok daha homojendir.



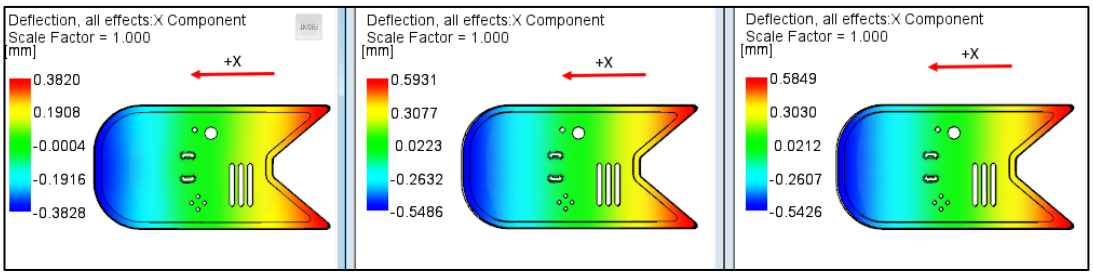
Şekil 4.46. Karşılaştırmalı hacimsel çekme oranları (KP6, TH6, TCS6)

Kimyasal köpürtme prosesinin en büyük avantajlarından biri, konvansiyonel enjeksiyon yöntemleri ile üretilen parçayı, kimyasal ajanın viskozite düşüşü avantajı ile ağırlık düşüşü sağlayarak aynı parçayı üretebilmektir. Şekil 4.47'de gösterildiği gibi KP6 prosesiyle üretilmiş bir parçanın ağırlığı 4,003 gr, TH6 proses 3,71 gr ve TCS6 için 3,72 gr olarak bulunmuştur. KP6 prosesiyle üretilmiş parça ağırlığına göre, TH6 prosesi ile parça ağırlığında yaklaşık olarak %7,31, TC6 prosesi ile yaklaşık %7 ağırlık düşüşü sağlanmıştır.



Şekil 4.47. Karşılaştırmalı parça ağırlığı (KP6, TH6, TCS6)

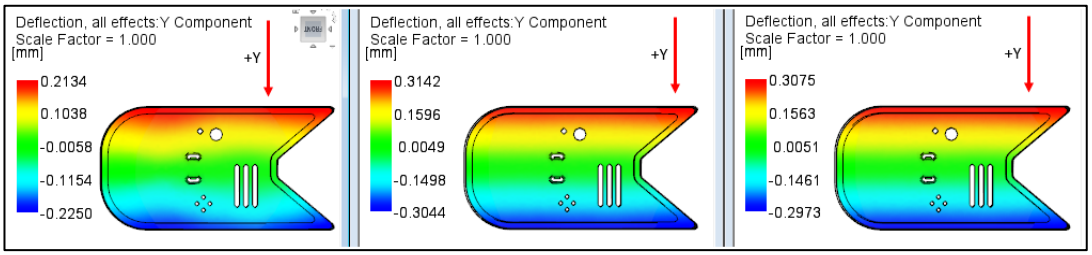
X yönünde toplam yer değiştirme Şekil 4.48'de gösterildiği gibi büyükten küçüğe 1,1417 mm ile TH6, 1,1275 mm ile TCS6 ve 0,7648 mm ile KP6 olarak sıralanmıştır. X yönünde toplam yer değiştirmeyi parçanın uzunluk ölçüsü olarak düşünebiliriz. Parçanın datada uzunluk ölçüsü 73,07 mm'dir. Bu durumda KP6 prosesinin uzunluk ölçüsü 72,30 mm, TH6 için 71,92 mm ve TCS6 için ise 71,9425 olarak bulunur. KP6 parçasına göre TH6 parçası %0,525 oranında X yönünde uzunluk ölçüsünden çekerken, TCS6 parçası %0,49 oranında çeker.



Şekil 4.48. Karşılaştırmalı X yönü çekme (KP6, TH6, TCS6)

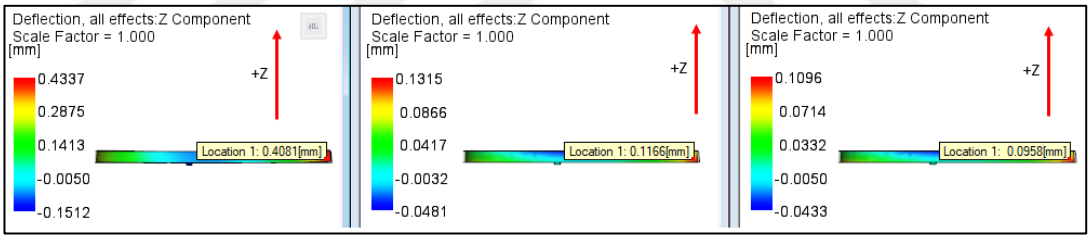
Y yönünde toplam yer değiştirme Şekil 4.49'da gösterildiği gibi büyükten küçüğe 0,6186 TH6, 0,6048 mm ile TCS6 ve 0,4384 mm ile KP6 olarak sıralanmıştır. Y yönünde toplam yer değiştirmeyi parçanın genişlik ölçüsü olarak düşünebiliriz.

Parçanın datada genişlik ölçüsü 38,29 mm'dir. Bu durumda KP6 prosesinin uzunluk ölçüsü 37,85 mm, TH6 için 37,67 mm ve TCS6 için ise 37,6852 olarak bulunur. KP6 parçasına göre TH6 parçası %0,475 oranında Y yönünde genişlik ölçüsünden çekerken, TCS6 parçası %0,435 oranında çeker.



Şekil 4.49. Karşılaştırmalı Y yönü çekme (KP6, TH6, TCS6)

+Z yönünde yer değiştirme Şekil 4.50'de gösterildiği gibi büyükten küçüğe 0,4337 TH6, 0,1315 mm ile TH6 ve 0,1096 mm ile TCS6 olarak sıralanmıştır. KP6 prosesiyle üretilmiş parçanın Z yönünde çarpılmasına göre, TH6 prosesi ile üretilen parçada yaklaşık olarak %69, TCS6 prosesi ile üretilen parçada ise yaklaşık %74 oranında çarpılma düşüşü sağlanmıştır.



Şekil 4.50. Karşılaştırmalı Z yönü çarpılma (KP6, TH6, TCS6)

4.2. Plastik Enjeksiyon Parametrik Deney Tasarım Seti Sonuçları

Parametrik deney tasarım seti Nautilus programında kesirli analiz yöntemi kullanılarak belirlenmiştir. Konvansiyonel, TH ajanı ile kimyasal köpürtme ve TCS ajanı ile kimyasal köpürtme olacak şekilde üç farklı proses için belirlenen 3 proses parametresi kullanılmıştır. Bu parametrelerin en yüksek ve en düşük değerleri, her bir proses için 8 adet olacak şekilde birebir aynı enjeksiyon makinesi ve ortam şartlarında toplam 24 adet deneme üretimi gerçekleştirilmiştir. Konvansiyonel prosesler KP kodu ile, kimyasal köpürtme prosesleri ise TH ve TCS kodları ile numaralandırılmıştır. Bunun sonucunda, giriş değişkenlerinin neleri etkilediği ve çıktıların değişimlerini görüntülemek için belirli ölçümler yapılmıştır. Parçanın uzunluk, genişlik, çarpılma,

ağırlık gibi çıktılarını hem her bir çevrim özelinde hem de üretilen göz başına ölçerek belirli sonuçlar elde edilmiştir. Sonuç olarak; ölçüsel, kütlesel ve proses kazanımları açısından oluşan etkiler karşılaştırmalı olarak ortaya konmuştur.

4.2.1. Konvansiyonel prosesin deney tasarım sonuçları (KP)

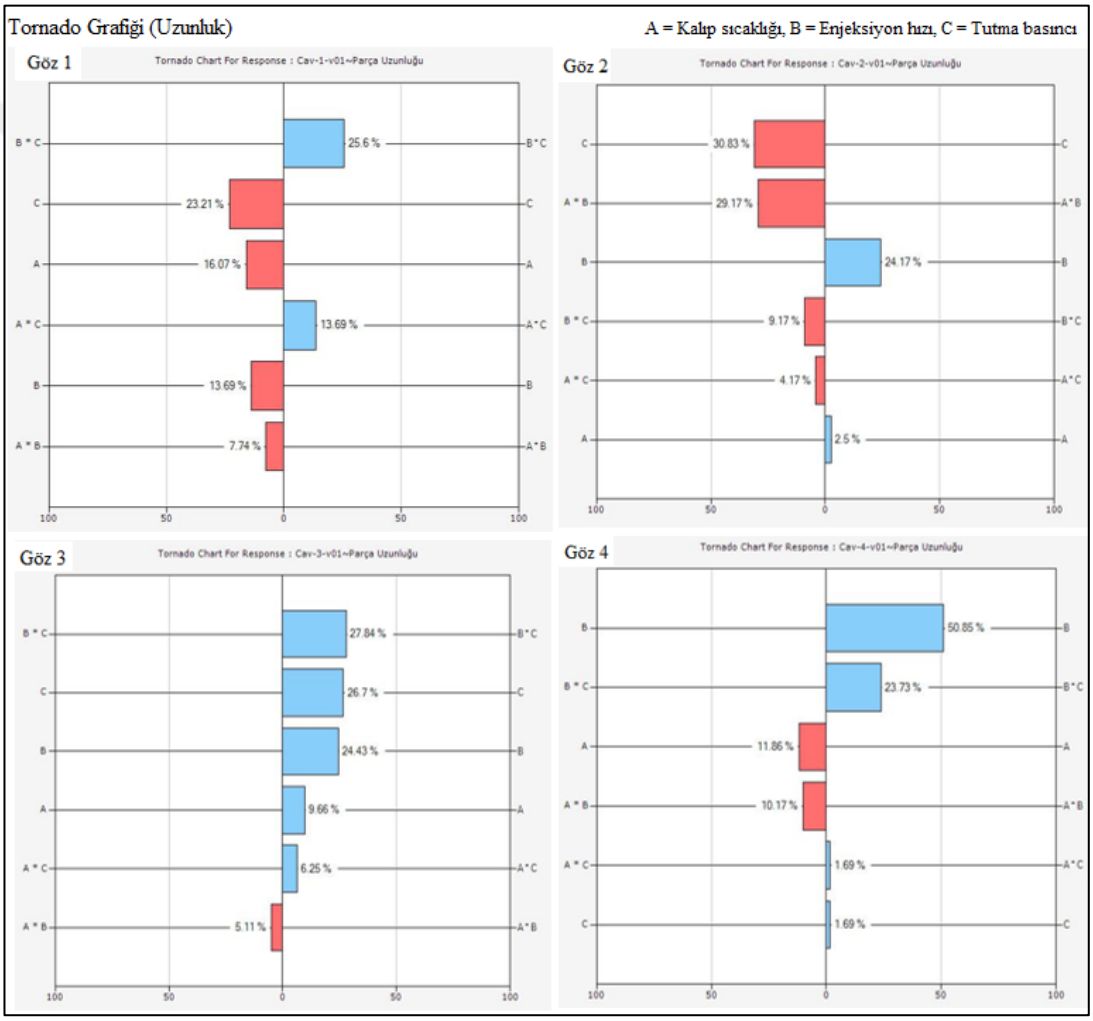
Konvansiyonel proses için 3 farklı proses parametresinin farklı değerlerinde parçanın ölçüsel, ağırlıksal ve proses kazanımlarını gösterebilmek için 8 farklı üretim yapılmış ve sonuçlar çıkarılmıştır.

Sonuç olarak, bütün parçaların X yönü uzunluk, Y yönü genişlik, Z yönü çarpılma ölçüleri, parça ağırlıkları hem toplam hem de göz göz ayrılarak Tablo 4.1'de verilmiştir. Tüm ölçütlerin aritmetik ortalamaları, kapama kuvvetleri ve çevrim süresi de gösterilmiştir.

Tablo 4.1. Konvansiyonel proses deney tasarım seti sonuçları (KP)

Proses Parametreleri	Proses	Konvansiyonel Proses							
	No	KP1	KP2	KP3	KP4	KP5	KP6	KP7	KP8
Ağırlık (gr)	Göz-1	3,95	3,92	3,93	3,98	3,98	4,00	3,96	3,95
	Göz-2	3,93	3,87	3,89	3,90	3,92	3,94	3,92	3,91
	Göz-3	3,92	3,89	3,90	3,94	3,93	3,96	3,93	3,93
	Göz-4	3,92	3,90	3,92	3,94	3,97	3,96	3,96	3,95
	Ortalama	3,93	3,90	3,91	3,94	3,95	3,97	3,94	3,94
X yönü uzunluk (mm)	Göz-1	72,05	71,96	72,01	72,18	72,07	72,14	72,01	72,25
	Göz-2	72,10	72,18	72,09	72,22	72,14	72,30	72,06	72,06
	Göz-3	72,33	71,95	72,01	72,10	72,17	72,07	72,03	71,95
	Göz-4	72,27	72,17	72,06	72,14	72,31	72,26	72,08	72,13
	Ortalama	72,19	72,07	72,04	72,16	72,17	72,19	72,05	72,10
Y yönü genişlik (mm)	Göz-1	37,82	37,71	37,71	37,79	37,80	37,82	37,80	37,82
	Göz-2	37,83	37,74	37,80	37,82	37,80	37,83	37,82	37,78
	Göz-3	37,79	37,74	37,78	37,78	37,80	37,86	37,79	37,78
	Göz-4	37,81	37,89	37,82	37,86	37,84	37,90	37,85	37,81
	Ortalama	37,81	37,77	37,78	37,81	37,81	37,85	37,82	37,80
Z yönü çarpılma (mm)	Göz-1	1,57	1,81	1,71	1,80	1,60	1,89	1,86	1,94
	Göz-2	1,61	2,02	1,99	1,77	1,76	1,85	1,92	1,99
	Göz-3	1,95	1,95	2,10	1,68	1,60	1,72	1,72	1,86
	Göz-4	1,75	1,67	1,57	1,78	1,88	1,88	1,96	2,22
	Ortalama	1,72	1,86	1,84	1,76	1,71	1,84	1,87	2,00
Kapama kuvveti (ton)	Değer	30,00	30,00	30,00	30,00	30,00	30,00	30,00	30,00
Çevrim Süresi (s)	Değer	16,32	16,32	16,60	16,60	16,33	16,33	16,66	16,66

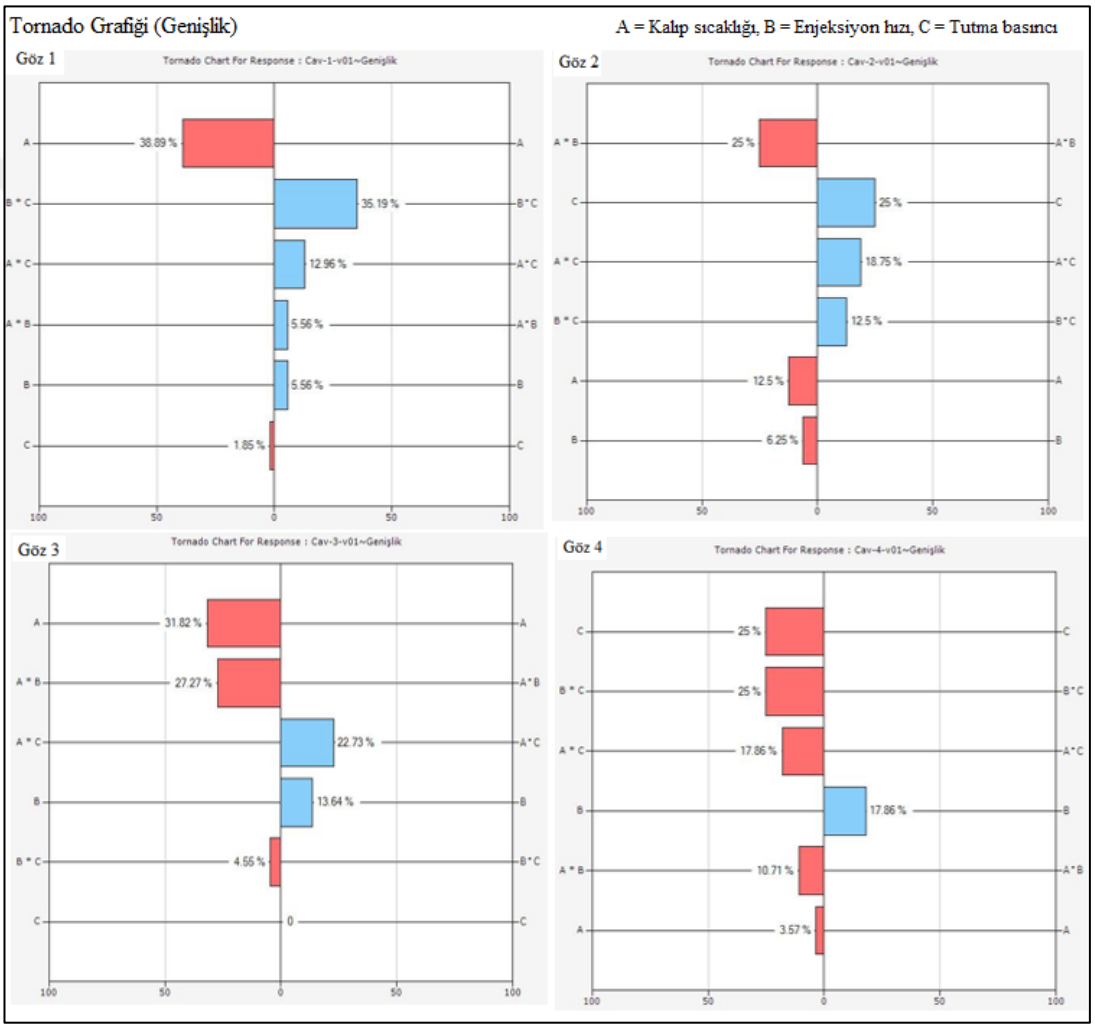
Elde edilen sonuçlar, deneysel parametrik analiz programında analiz edilmiştir. İlk sonuç olarak, diğer bütün faktörler merkez değere ayarlandığında hangi faktörün X yönü uzunluk değerlerini en çok etkilediğini gösteren tornado grafikleri Şekil 4.51'de gösterilmiştir. Gözler arasında inceleme yapıldığında, göz 1 için enjeksiyon hızı ve tutma basıncı, göz 2 için enjeksiyon hızı, göz 3 için enjeksiyon hızı ve tutma basıncı, göz 4 için enjeksiyon hızı, X yönü uzunluk ölçüsünde en fazla değişikliğe neden olan parametrelerdir. Şekil 4.51'de gösterildiği gibi X yönü uzunluk ölçüsünde en fazla değişikliğe neden olan parametre enjeksiyon hızıdır.



Şekil 4.51. X yönü uzunluk ölçüsü tornado grafiği (KP)

Bir diğer sonuç olarak bütün faktörler merkez değere ayarlandığında hangi faktörün Y yönü genişlik değerlerini en çok etkilediğini gösteren tornado grafikleri Şekil 4.52'de gösterilmiştir. Şekil 4.52'de gösterildiği gibi Y yönü genişlik ölçüsünde en fazla değişikliğe neden olan parametre, kalıp sıcaklığıdır.

Gözler arasında inceleme yapıldığında, göz 1 için kalıp sıcaklığı, göz 2 için kalıp sıcaklığı ve enjeksiyon hızı, göz 3 için kalıp sıcaklığı, göz 4 için tutma basıncı ve enjeksiyon hızı, Y yönü genişlik ölçüsünde en fazla değişikliğe neden olan parametrelerdir. Grafiklerden de görüldüğü gibi Y yönü genişlik ölçüsünde en fazla değişikliğe neden olan parametre kalıp sıcaklığıdır. Kalıp sıcaklığı parametresi değişiminden en fazla etkilenen %38,89 ile 1 numaralı göz, ardından %31,82 ile 3 numaralı gözdür.

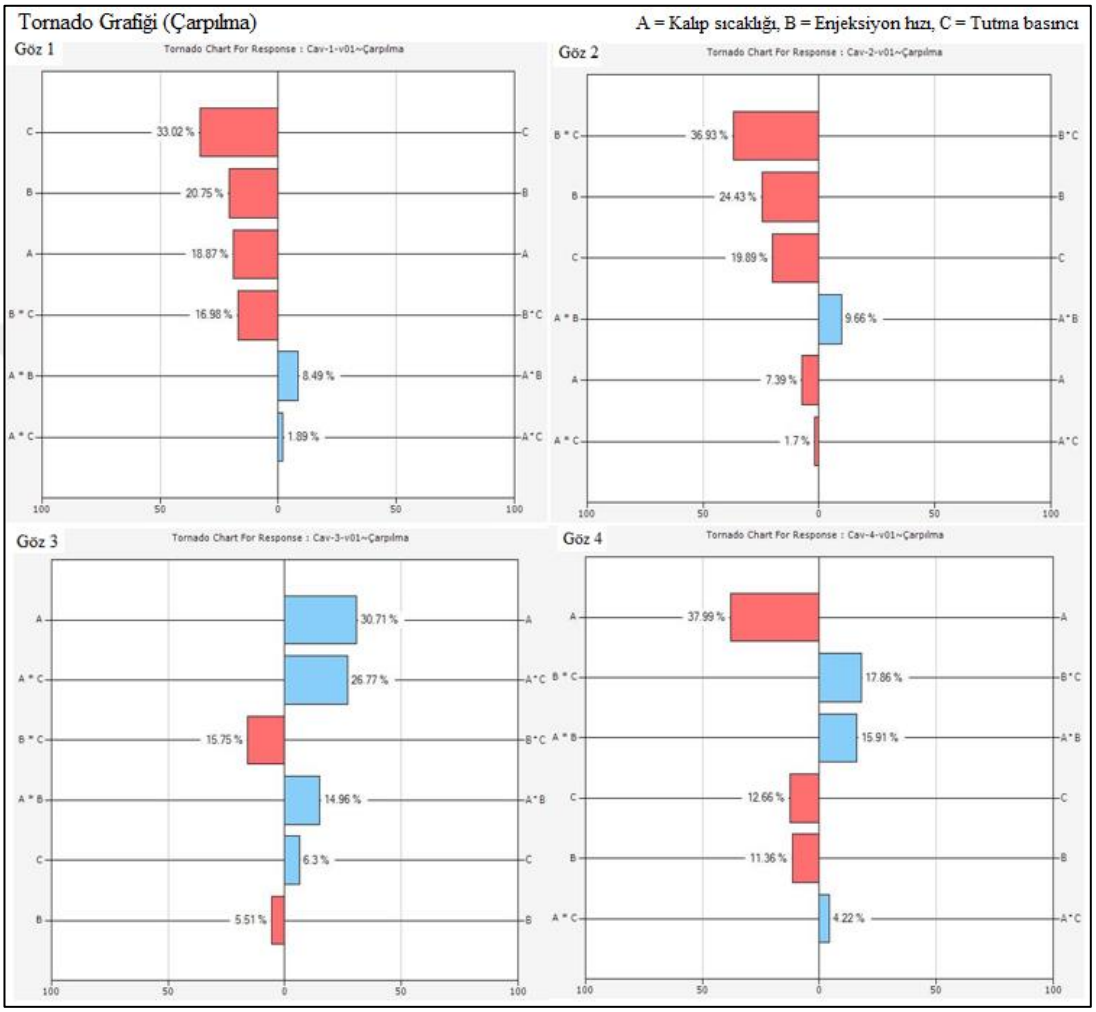


Şekil 4.52. Y yönü genişlik ölçüsü tornado grafiği (KP)

Tornado grafiklerinin son sonucu olarak bütün faktörler merkez değere ayarlandığında hangi faktörün Z yönü çarpılma değerlerini en çok hangi etkilediğini gösteren tornado grafikleri Şekil 4.53'te gösterilmiştir.

Gözler arasında inceleme yapıldığında, göz 1 için tutma basıncı, göz 2 için tutma basıncı ve enjeksiyon hızı, göz 3 için kalıp sıcaklığı, göz 4 için kalıp sıcaklığı, Z yönü

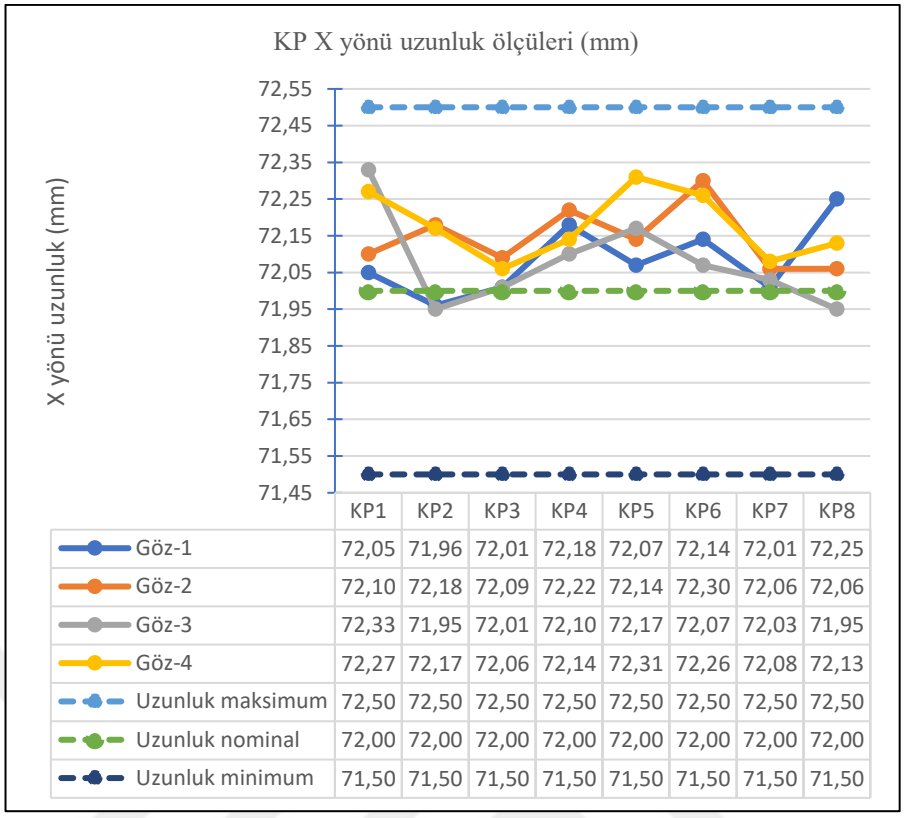
çarpılma ölçüsünde en fazla değişikliğe neden olan parametrelerdir. Grafiklerden de görüldüğü gibi Z yönü çarpılma ölçüsünde en fazla değişikliğe neden olan parametre kalıp sıcaklığıdır. Kalıp sıcaklığı parametresi değişiminden en fazla etkilenen %37,99 ile 4 numaralı göz, ardından %30,71 ile 3 numaralı gözdür.



Şekil 4.53. Z yönü çarpılma ölçüsü tornado grafiği (KP)

Konvansiyonel proseslerin tümünün parça X yönü uzunluk ölçüleri hem kendi içinde hem de gözler arası dağılım olarak Şekil 4.54'te gösterilmiştir.

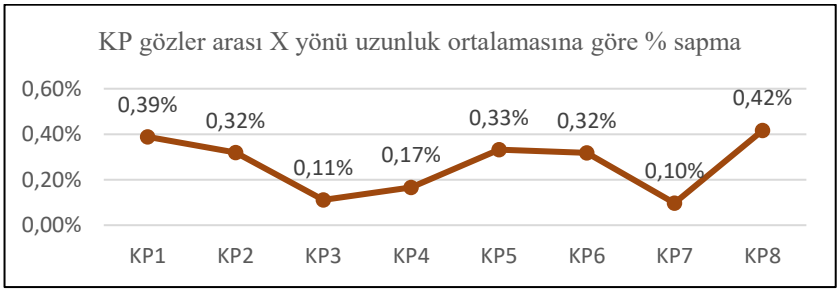
KP1'den KP8'e kadar olan proseslerde nominal X yönü uzunluğa en yakın proses KP7'dir. Göz 1 X yönü uzunluk ölçüsü, KP8 prosesinde nominale en uzak değerine ulaşmıştır. Göz 2 X yönü uzunluk ölçüsü, KP6 prosesinde nominale en uzak değerine ulaşmıştır. Göz 3 X yönü uzunluk ölçüsü, KP1 prosesinde nominale en uzak değerine ulaşmıştır. Göz 4 X yönü uzunluk ölçüsü, KP5 prosesinde nominale en uzak değerine ulaşmıştır.



	KP1	KP2	KP3	KP4	KP5	KP6	KP7	KP8
Göz-1	72,05	71,96	72,01	72,18	72,07	72,14	72,01	72,25
Göz-2	72,10	72,18	72,09	72,22	72,14	72,30	72,06	72,06
Göz-3	72,33	71,95	72,01	72,10	72,17	72,07	72,03	71,95
Göz-4	72,27	72,17	72,06	72,14	72,31	72,26	72,08	72,13
Uzunluk maksimum	72,50	72,50	72,50	72,50	72,50	72,50	72,50	72,50
Uzunluk nominal	72,00	72,00	72,00	72,00	72,00	72,00	72,00	72,00
Uzunluk minimum	71,50	71,50	71,50	71,50	71,50	71,50	71,50	71,50

Şekil 4.54. X yönü uzunluk ölçüleri (KP)

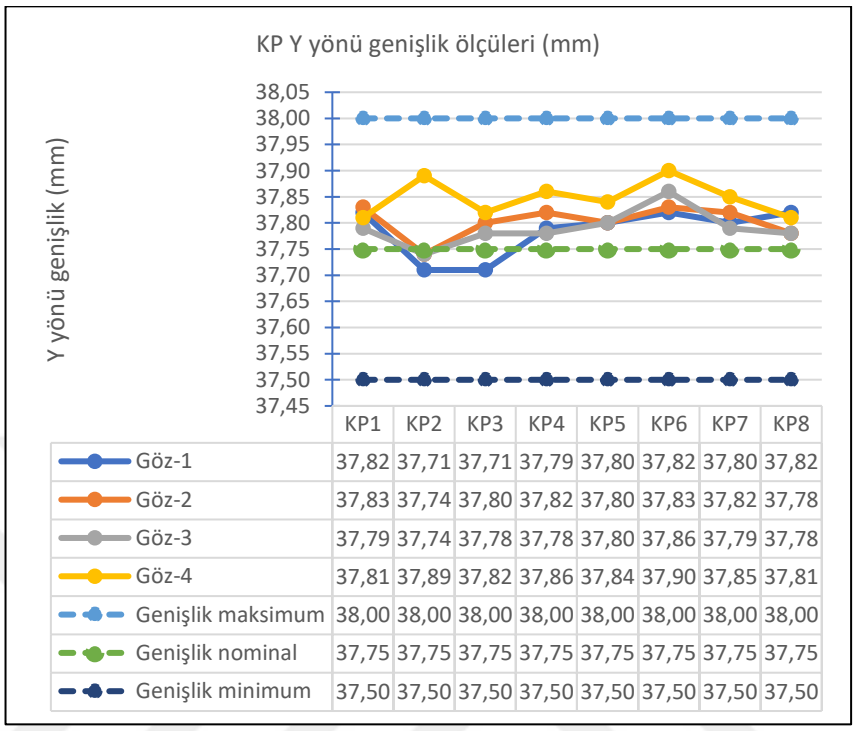
Gözler arası % sapmalar parçanın X yönü uzunluk ölçüsü ortalamasına göre Şekil 4.55'te gösterilmiştir. X yönü uzunluk ölçülerinde, en düşük gözler arası değişim KP7 prosesinde görülmüştür.



Şekil 4.55. X yönü uzunluk ortalamasına göre % sapma (KP)

Konvansiyonel proseslerin tümünün parça Y yönü genişlik ölçüleri hem kendi içinde hem de gözler arası dağılım olarak Şekil 4.56'da gösterilmiştir. KP1'den KP8'e kadar olan proseslerde nominal Y yönü genişlik ölçüsüne en yakın proses KP2'dir. Göz 1 Y yönü genişlik ölçüsü, KP6 ve KP8 prosesinde nominale en uzak değerine ulaşmıştır. Göz 2 Y yönü genişlik ölçüsü, KP1 ve KP6 prosesinde nominale en uzak değerine ulaşmıştır. Göz 3 Y yönü genişlik ölçüsü, KP6 prosesinde nominale en uzak değerine

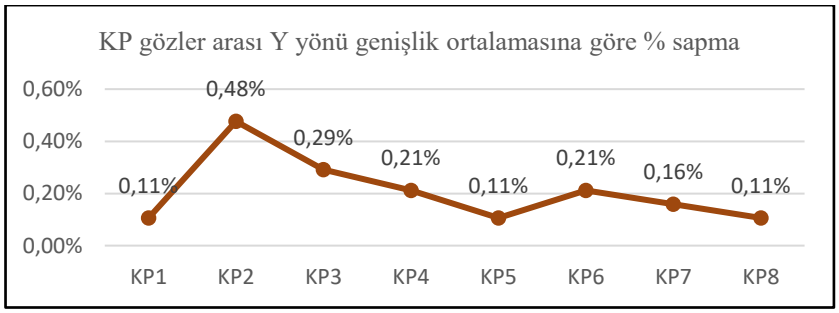
ulaşmıştır. Göz 4 Y yönü genişlik ölçüsü, KP6 prosesinde nominale en uzak değerine ulaşmıştır. KP6 prosesi elde edilen nominale en uzak değerler de öne çıkmıştır.



	KP1	KP2	KP3	KP4	KP5	KP6	KP7	KP8
Göz-1	37,82	37,71	37,71	37,79	37,80	37,82	37,80	37,82
Göz-2	37,83	37,74	37,80	37,82	37,80	37,83	37,82	37,78
Göz-3	37,79	37,74	37,78	37,78	37,80	37,86	37,79	37,78
Göz-4	37,81	37,89	37,82	37,86	37,84	37,90	37,85	37,81
Genişlik maksimum	38,00	38,00	38,00	38,00	38,00	38,00	38,00	38,00
Genişlik nominal	37,75	37,75	37,75	37,75	37,75	37,75	37,75	37,75
Genişlik minimum	37,50	37,50	37,50	37,50	37,50	37,50	37,50	37,50

Şekil 4.56. Y yönü genişlik ölçüleri (KP)

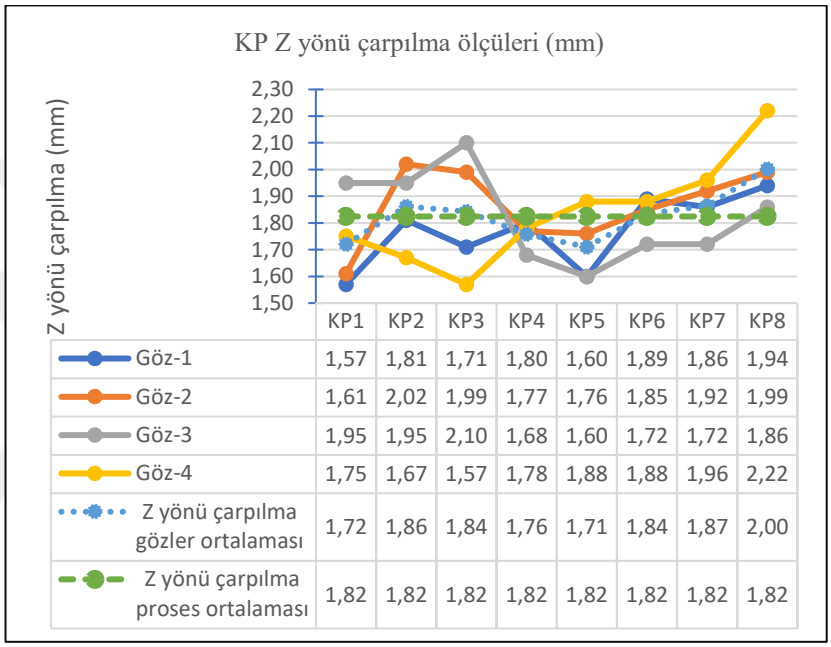
Gözler arası % sapmalar parçanın genişlik ölçüsü ortalamasına göre Şekil 4.57'de gösterilmiştir. Genişlik ölçülerinde, en düşük gözler arası değişim KP1, KP5, KP8 prosesinde görülmüştür.



Şekil 4.57. Y yönü genişlik ortalamasına göre % sapma (KP)

Konvansiyonel proses deney tasarımında parçanın Z yönünde çarpılması ile ilgili bütün veriler, Şekil 4.58'de gösterilmiştir. En düşük Z yönü çarpılma KP5 prosesinde gözlemlenmiştir. Gözler bazında elde edilen en düşük değer ise KP1 prosesindeki 1 numaralı göz ve KP3 prosesindeki 4 numaralı gözde elde edilen 1,57 mm değeridir. Tüm konvansiyonel proseslerin Z yönü çarpılma ortalaması 1,82 mm'dir.

Göz 1 Z yönü çarpılma ölçüsü, KP1 prosesinde tüm proseslerin Z yönü çarpılma ortalama ölçüsüne en uzak değerine ulaşmıştır. Göz 2 Z yönü çarpılma ölçüsü, KP1 prosesinde tüm proseslerin Z yönü çarpılma ortalama ölçüsüne en uzak değerine ulaşmıştır. Göz 3 Z yönü çarpılma ölçüsü, KP3 prosesinde tüm proseslerin Z yönü çarpılma ortalama ölçüsüne en uzak değerine ulaşmıştır. Göz 4 Z yönü çarpılma ölçüsü, KP8 prosesinde tüm proseslerin Z yönü çarpılma ortalama ölçüsüne en uzak değerine ulaşmıştır.



	KP1	KP2	KP3	KP4	KP5	KP6	KP7	KP8
Göz-1	1,57	1,81	1,71	1,80	1,60	1,89	1,86	1,94
Göz-2	1,61	2,02	1,99	1,77	1,76	1,85	1,92	1,99
Göz-3	1,95	1,95	2,10	1,68	1,60	1,72	1,72	1,86
Göz-4	1,75	1,67	1,57	1,78	1,88	1,88	1,96	2,22
Z yönü çarpılma gözler ortalaması	1,72	1,86	1,84	1,76	1,71	1,84	1,87	2,00
Z yönü çarpılma proses ortalaması	1,82	1,82	1,82	1,82	1,82	1,82	1,82	1,82

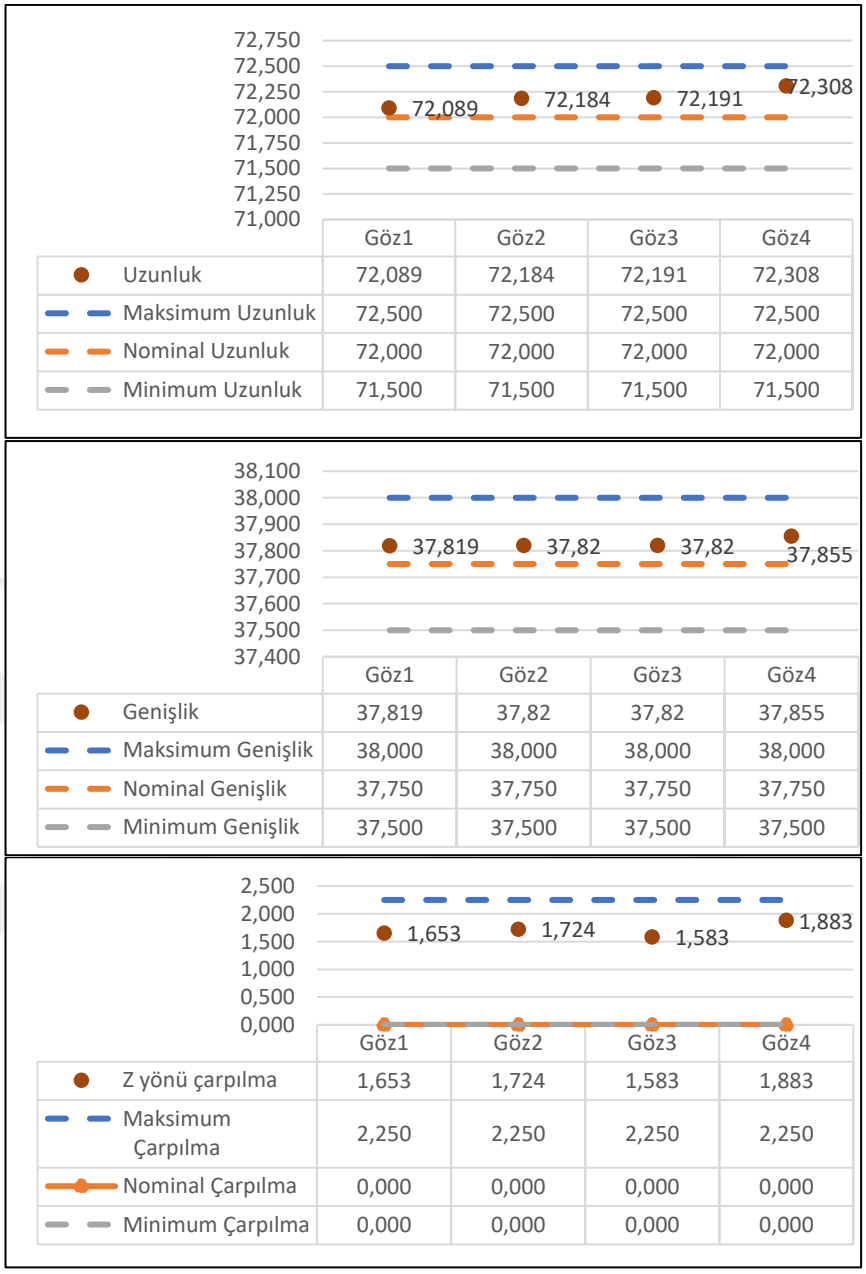
Şekil 4.58. Z yönü çarpılma ölçüleri (KP)

Yapılan deneysel tasarım sonucu Nautilus programı ile 3 farklı ölçümün (uzunluk, genişlik, çarpılma) nominal değerlerine en yakın prosesin parametreleri kalıp sıcaklığı 30 °C, enjeksiyon hızının 110 mm/s ve tutma basıncı 45 bar olarak bulunmuştur.

Deneysel parametrik veri analizi yapan Nautilus programıyla yapılan optimizasyon sonucu nominal değerlere en yakın optimum parametre değerleri Tablo 4.2'de, her bir göze ait uzunluk, genişlik ve Z yönü çarpılma değerleri Şekil 4.59'da gösterilmiştir.

Tablo 4.2. Optimum proses değerleri (KP)

Optimum Proses Değerleri	
Parametreler	Değerler
Kalıp sıcaklığı (°C)	30
Enjeksiyon hızı (mm/s)	110
Tutma basıncı (bar)	45



Şekil 4.59. Optimum proses ölçüleri (KP)

4.2.2. Kimyasal köpürtme prosesi deney tasarım sonuçları (TH)

TH ajanı ile kimyasal köpürtme prosesi için 3 farklı proses parametresinin farklı değerlerinde parçanın ölçü, ağırlık ve proses kazanımlarını gösterebilmek için 8 farklı üretim yapılarak sonuçlar elde edilmiştir.

Sonuç olarak bütün parçaların X yönü uzunluk, Y yönü genişlik, Z yönü çarpılma ölçüleri, gözler arası ortalamaya göre % sapma değerleri, parça ağırlıkları hem toplam hem de göz göz ayrılarak Tablo 4.3'te verilmiştir.

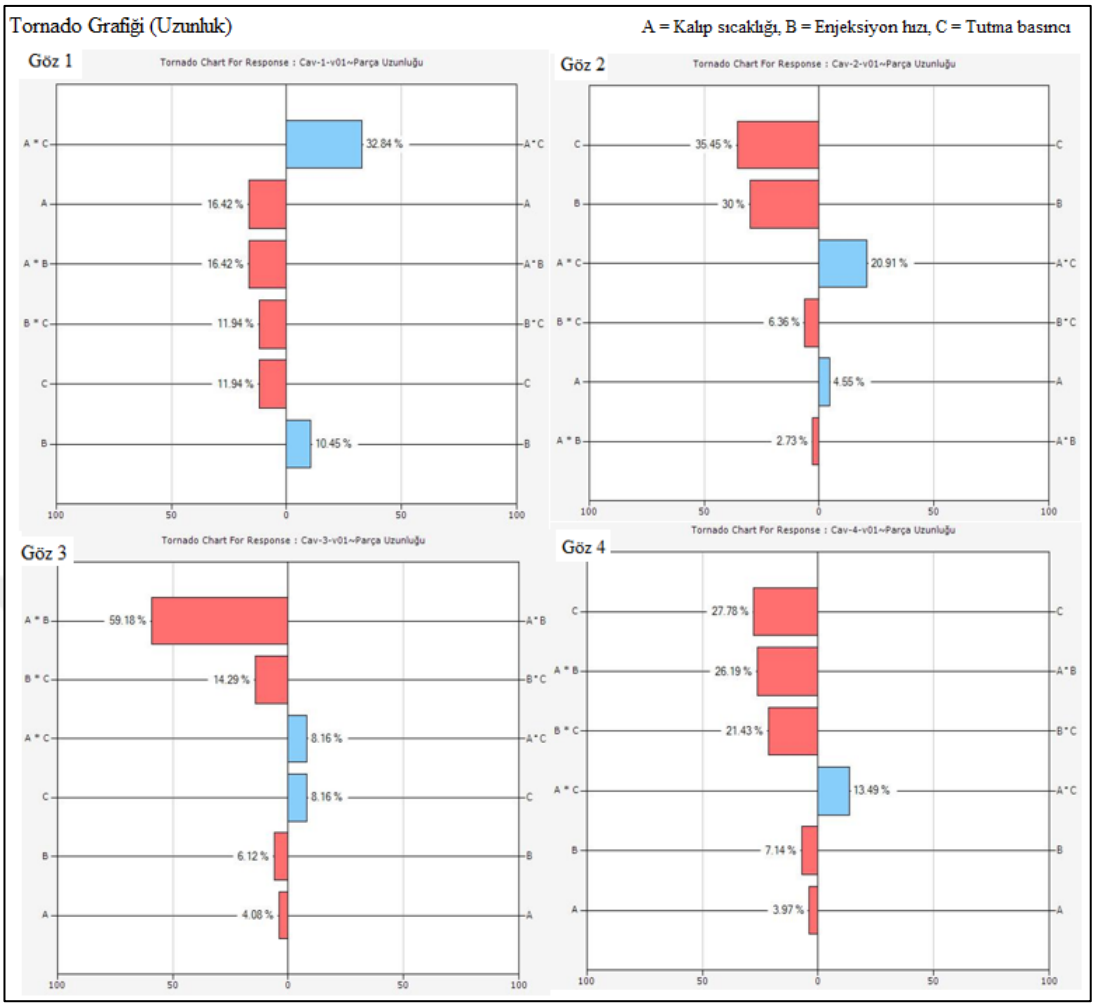
Tablo 4.3. Kimyasal köpürtme prosesi deney tasarım seti sonuçları (TH)

Proses Parametreleri	Proses	Kimyasal Köpürtme (TH- %1 ağırlıkça katkı)							
	No	TH1	TH2	TH3	TH4	TH5	TH6	TH7	TH8
Ağırlık (gr)	Göz-1	3,72	3,69	3,73	3,69	3,73	3,69	3,73	3,73
	Göz-2	3,66	3,64	3,66	3,64	3,65	3,67	3,70	3,68
	Göz-3	3,67	3,67	3,69	3,65	3,68	3,66	3,69	3,70
	Göz-4	3,70	3,66	3,70	3,66	3,70	3,70	3,71	3,70
	Ortalama	3,69	3,67	3,70	3,66	3,69	3,68	3,71	3,70
X yönü uzunluk (mm)	Göz-1	71,92	71,87	71,96	71,87	71,90	72,11	71,87	71,96
	Göz-2	71,81	71,91	71,96	71,94	71,79	71,92	71,84	72,02
	Göz-3	71,75	71,79	71,99	71,87	71,93	71,92	71,79	71,80
	Göz-4	71,82	71,91	71,97	71,97	71,85	72,07	71,88	71,92
	Ortalama	71,83	71,87	71,97	71,91	71,87	72,01	71,85	71,93
Y yönü genişlik (mm)	Göz-1	37,78	37,70	37,72	37,67	37,70	37,69	37,78	37,77
	Göz-2	37,74	37,75	37,76	37,68	37,73	37,71	37,74	37,75
	Göz-3	37,70	37,72	37,72	37,71	37,70	37,69	37,78	37,79
	Göz-4	37,73	37,73	37,76	37,75	37,80	37,80	37,78	37,84
	Ortalama	37,74	37,73	37,74	37,70	37,73	37,72	37,77	37,79
Z yönü çarpılma (mm)	Göz-1	1,34	0,90	1,10	1,21	1,23	1,58	1,12	1,22
	Göz-2	1,31	0,99	1,34	1,42	1,06	1,28	0,76	0,79
	Göz-3	1,38	1,18	1,07	1,27	0,89	1,11	1,36	0,98
	Göz-4	1,48	1,19	0,98	1,22	1,23	1,25	1,57	1,39
	Ortalama	1,38	1,07	1,12	1,28	1,10	1,31	1,20	1,10
Kapama kuvveti (ton)	Değer	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00
Çevrim süresi(s)	Değer	14,81	14,81	15,09	15,09	14,82	14,82	15,14	15,14

Elde edilen sonuçlar, deneysel parametrik analiz programında analiz edilmiştir. Analizin ilk sonucu olarak diğer bütün faktörler merkez değere ayarlandığında hangi faktörün X yönü uzunluk değerlerini en çok etkilediğini gösteren tornado grafikleri Şekil 4.60'ta gösterilmiştir.

Gözler arasında inceleme yapıldığında, göz 1 için kalıp sıcaklığı, göz 2 için tutma basıncı, göz 3 için enjeksiyon hızı ve kalıp sıcaklığı, göz 4 için tutma basıncı, X yönü uzunluk ölçüsünde en fazla değişikliğe neden olan parametrelerdir.

Grafiklerden de görüldüğü gibi X yönü uzunluk ölçüsünde en fazla değişikliğe neden olan parametre tutma basıncıdır. Tutma basıncı değişimi ile parçanın kozmetik ve ölçüsel kriterleri etkilenecektir. Ardından X yönü uzunluk ölçüsünde en fazla değişikliğe neden olan parametre kalıp sıcaklığıdır.

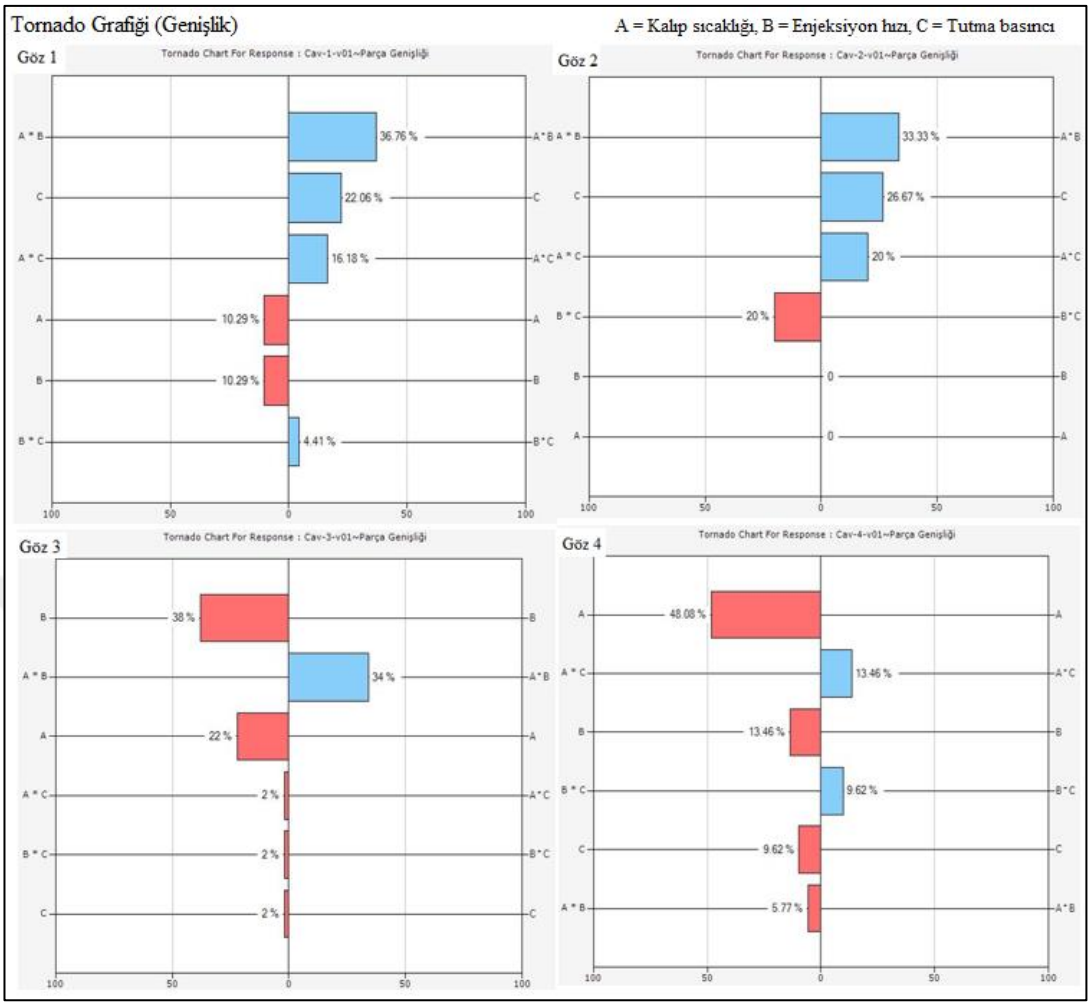


Şekil 4.60. X yönü uzunluk ölçüsü tornado grafiği (TH)

Bir diğer sonuç olarak bütün faktörler merkez değere ayarlandığında hangi faktörün Y yönü genişlik değerlerini en çok etkilediğini gösteren tornado grafikleri Şekil 4.61'de gösterilmiştir.

Gözler arasında inceleme yapıldığında, göz 1 için kalıp sıcaklığı ve enjeksiyon hızı, göz 2 için kalıp sıcaklığı ve enjeksiyon hızı, göz 3 için enjeksiyon hızı, göz 4 için kalıp sıcaklığı, Y yönü genişlik ölçüsünde en fazla değişikliğe neden olan parametrelerdir.

Grafiklerden de görüldüğü gibi Y yönü genişlik ölçüsünde en fazla değişikliğe neden olan parametre kalıp sıcaklığıdır. Kalıp sıcaklığı parametresi değişiminden en fazla etkilenen %48,08 ile 4 numaralı gözdür. Kalıp sıcaklığı değişimi ile parçanın kozmetik ve ölçüsel kriterleri etkilenecektir. Özellikle de köpürtme prosesinde ajan kullanımı sonucu elde edilen kazanımları ve ölçütleri en çok etkileyen parametre kalıp sıcaklığı olmuştur.

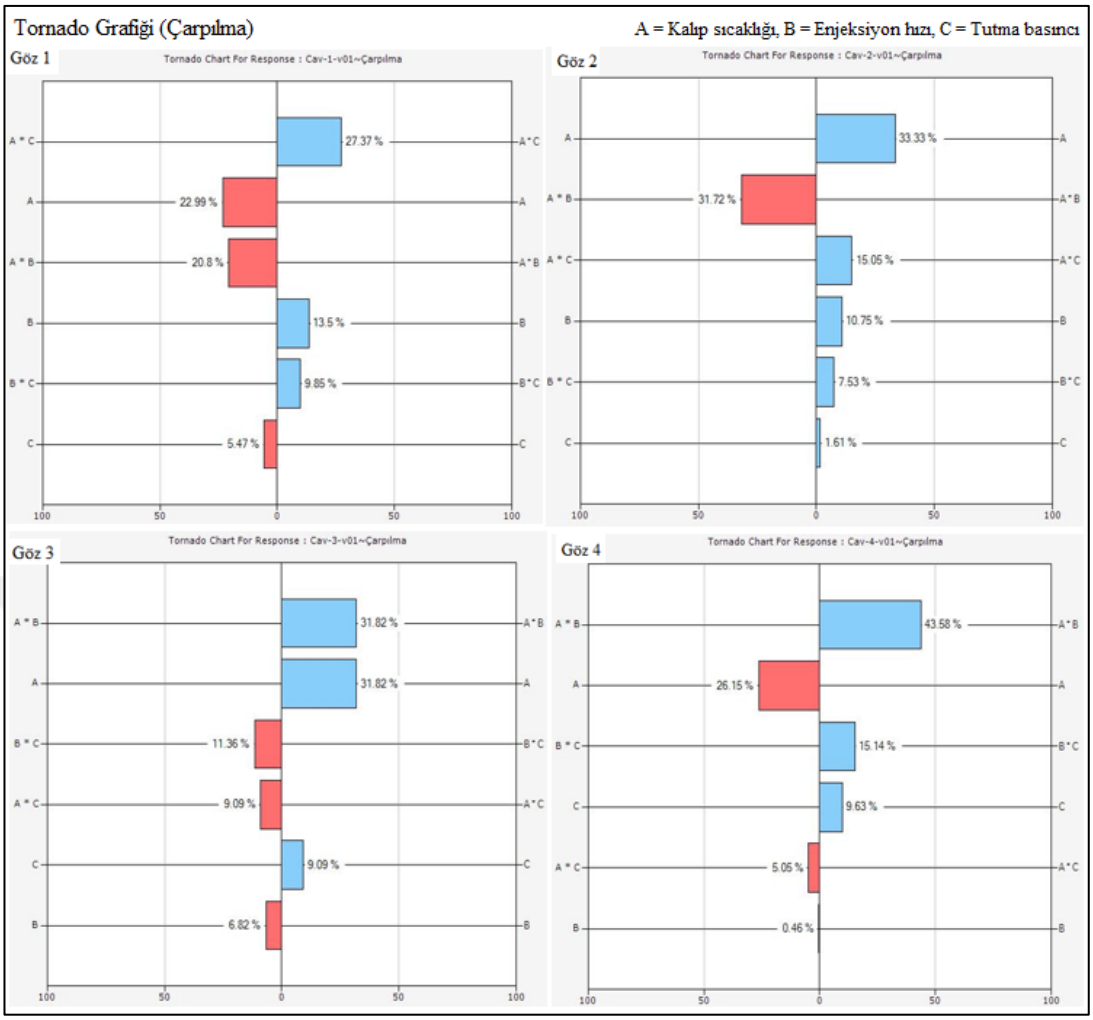


Şekil 4.61. Y yönü genişlik ölçüsü tornado grafiği (TH)

Tornado grafiklerinin son sonucu olarak bütün faktörler merkez değere ayarlandığında hangi faktörün Z yönü çarpılma değerlerini en çok hangi etkilediğini gösteren tornado grafikleri Şekil 4.62'de gösterilmiştir.

Gözler arasında inceleme yapıldığında, göz 1 için kalıp sıcaklığı ve tutma basıncı, göz 2 için kalıp sıcaklığı, göz 3 için kalıp sıcaklığı, göz 4 için kalıp sıcaklığı ve enjeksiyon hızı, Z yönü çarpılma ölçüsünde en fazla değişikliğe neden olan parametrelerdir.

Grafiklerden de görüldüğü gibi Z yönü çarpılma ölçüsünde en fazla değişikliğe neden olan parametre kalıp sıcaklığıdır. Kalıp sıcaklığı parametresi değişiminden en fazla etkilenen %33,33 ile 2 numaralı gözdür. Kalıp sıcaklığı değişimi ile parçanın kozmetik ve ölçüsel kriterleri etkilenmiştir. Özellikle köpürtme prosesinde ajan kullanımı sonucu elde edilen kazanımları en çok etkileyen parametre kalıp sıcaklığı olmuştur. Ardından gelen en etkili parametre enjeksiyon hızı olmuştur.

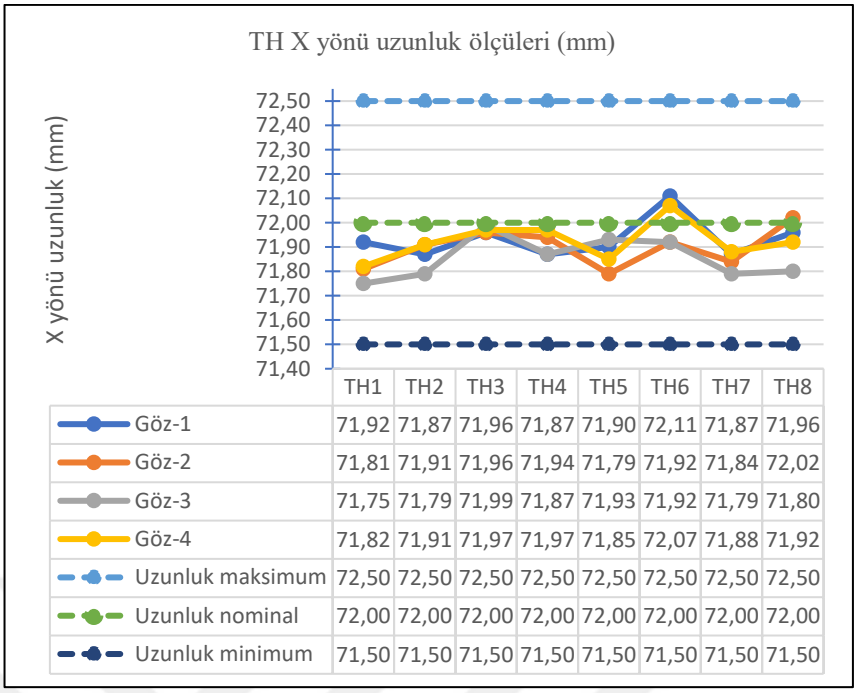


Şekil 4.62. Z yönü çarpılma ölçüsü tornado grafiği (TH)

TH ajanı ile kimyasal köpürtme proseslerin tümünün parça uzunluk ölçüleri hem kendi içinde hem de gözler arası dağılım olarak Şekil 4.63'te gösterilmiştir.

TH1'den TH8'e kadar olan proseslerde nominal X yönü uzunluğa en yakın proses TH3'tür. Göz 1 X yönü uzunluk ölçüsü, TH2, TH4 ve TH7 prosesinde nominale en uzak değerine ulaşmıştır. Göz 2 X yönü uzunluk ölçüsü, TH1 prosesinde nominale en uzak değerine ulaşmıştır. Göz 3 X yönü uzunluk ölçüsü, TH1 prosesinde nominale en uzak değerine ulaşmıştır. Göz 4 X yönü uzunluk ölçüsü, TH1 prosesinde nominale en uzak değerine ulaşmıştır.

En düşük X yönü uzunluk ölçüsü, 71,75 mm değeri ile TH1 prosesi göz 1 ürününde, en yüksek X yönü uzunluk ölçüsü ise 72,11 mm değeri ile TH6 prosesi göz 1 ürününde gözlemlenmiştir. Parçanın toplam 1 mm toleransı olmasına rağmen, tüm deneme sonucu üretilen parçalar toplamda 0,36 mm tolerans içerisinde yer almıştır.



	TH1	TH2	TH3	TH4	TH5	TH6	TH7	TH8
Göz-1	71,92	71,87	71,96	71,87	71,90	72,11	71,87	71,96
Göz-2	71,81	71,91	71,96	71,94	71,79	71,92	71,84	72,02
Göz-3	71,75	71,79	71,99	71,87	71,93	71,92	71,79	71,80
Göz-4	71,82	71,91	71,97	71,97	71,85	72,07	71,88	71,92
Uzunluk maksimum	72,50	72,50	72,50	72,50	72,50	72,50	72,50	72,50
Uzunluk nominal	72,00	72,00	72,00	72,00	72,00	72,00	72,00	72,00
Uzunluk minimum	71,50	71,50	71,50	71,50	71,50	71,50	71,50	71,50

Şekil 4.63. X yönü uzunluk ölçüleri (TH)

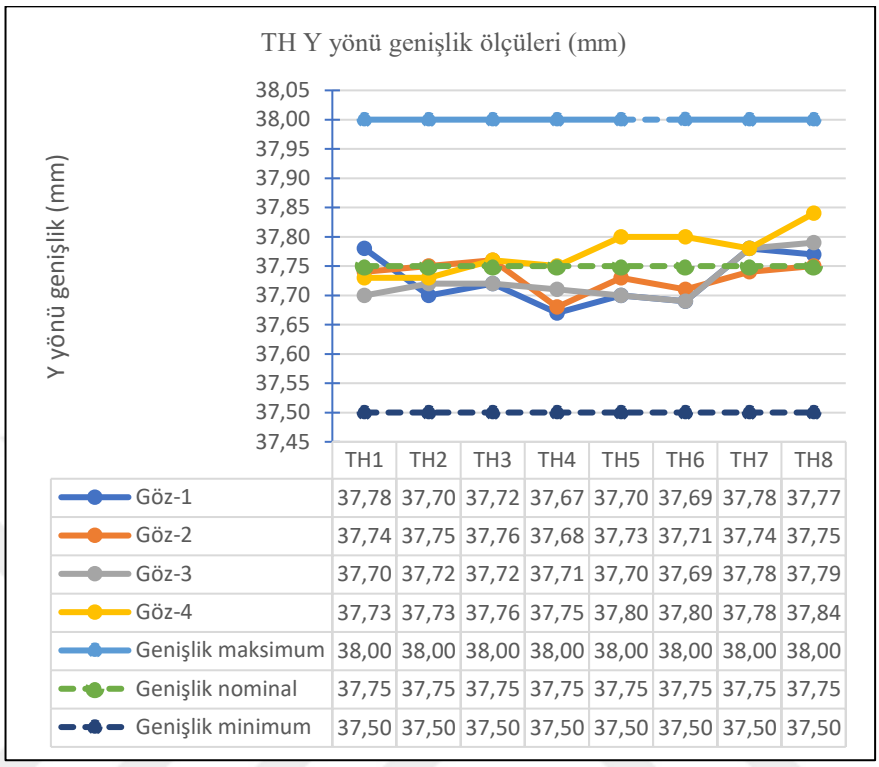
Gözler arası % sapmalar parçanın o prosesteki gözler arası X yönü uzunluk ölçüsü ortalamasına göre Şekil 4.64'te gösterilmiştir. Uzunluk ölçülerinde gözler arası değişim en düşük TH3 prosesinde görülmüştür.



Şekil 4.64. X uzunluk ortalamasına göre % sapma (TH)

TH ajanı katkılı kimyasal köpürtme proseslerin tümünün parça genişlik ölçüleri hem kendi içinde hem de gözler arası dağılım olarak Şekil 4.65'te gösterilmiştir. TH1'den TH8'e kadar olan proseslerde nominal Y yönü genişlik ölçüsüne en yakın proses TH3'dir. Göz 1 Y yönü genişlik ölçüsü, TH4 prosesinde nominale en uzak değerine ulaşmıştır. Göz 2 Y yönü genişlik ölçüsü, TH4 prosesinde nominale en uzak değerine ulaşmıştır. Göz 3 Y yönü genişlik ölçüsü, TH6 prosesinde nominale en uzak değerine

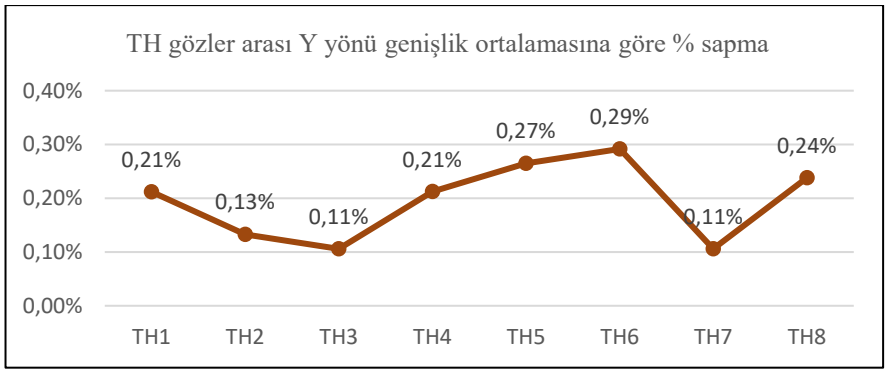
ulaşmıştır. Göz 4 Y yönü genişlik ölçüsü, TH8 prosesinde nominale en uzak değerine ulaşmıştır. TH4 prosesi nominale uzak Y yönü genişlik ölçüsünde öne çıkmıştır.



	TH1	TH2	TH3	TH4	TH5	TH6	TH7	TH8
Göz-1	37,78	37,70	37,72	37,67	37,70	37,69	37,78	37,77
Göz-2	37,74	37,75	37,76	37,68	37,73	37,71	37,74	37,75
Göz-3	37,70	37,72	37,72	37,71	37,70	37,69	37,78	37,79
Göz-4	37,73	37,73	37,76	37,75	37,80	37,80	37,78	37,84
Genişlik maksimum	38,00	38,00	38,00	38,00	38,00	38,00	38,00	38,00
Genişlik nominal	37,75	37,75	37,75	37,75	37,75	37,75	37,75	37,75
Genişlik minimum	37,50	37,50	37,50	37,50	37,50	37,50	37,50	37,50

Şekil 4.65. Y yönü genişlik ölçüleri (TH)

Gözler arası % sapmalar parçanın genişlik ölçüsü ortalamasına göre Şekil 4.66'da gösterilmiştir. Y yönü genişlik ölçülerinde en düşük gözler arası değişim TH3 ve TH7 prosesinde görülmüştür.

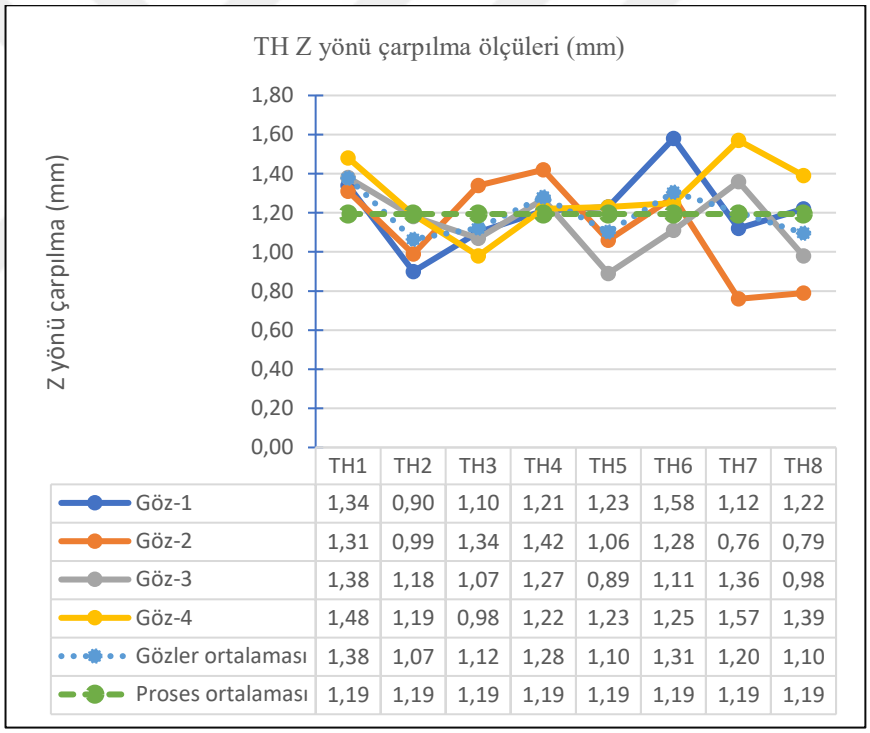


Şekil 4.66. Y yönü genişlik ortalamasına göre % sapma (TH)

TH ajan katkılı kimyasal köpürtme proses deney tasarımında parçanın Z yönünde çarpılması ile ilgili bütün veriler Şekil 4.67'de gösterilmiştir.

En düşük Z yönü çarpılma TH2 prosesinde gözlemlenmiştir. Gözler bazında elde edilen en düşük değer ise TH7 prosesindeki 2 numaralı gözde elde edilen 0,72 mm değeridir. Tüm TH ajanlı kimyasal köpürtme proseslerinin Z yönü çarpılma ortalaması 1,19 mm'dir.

Göz 1 Z yönü çarpılma ölçüsü, TH6 prosesinde tüm proseslerin Z yönü çarpılma ortalama ölçüsüne en uzak değerine ulaşmıştır. Göz 2 Z yönü çarpılma ölçüsü, TH4 prosesinde tüm proseslerin Z yönü çarpılma ortalama ölçüsüne en uzak değerine ulaşmıştır. Göz 3 Z yönü çarpılma ölçüsü, TH5 prosesinde tüm proseslerin Z yönü çarpılma ortalama ölçüsüne en uzak değerine ulaşmıştır. Göz 4 Z yönü çarpılma ölçüsü, TH7 prosesinde tüm proseslerin Z yönü çarpılma ortalama ölçüsüne en uzak değerine ulaşmıştır.



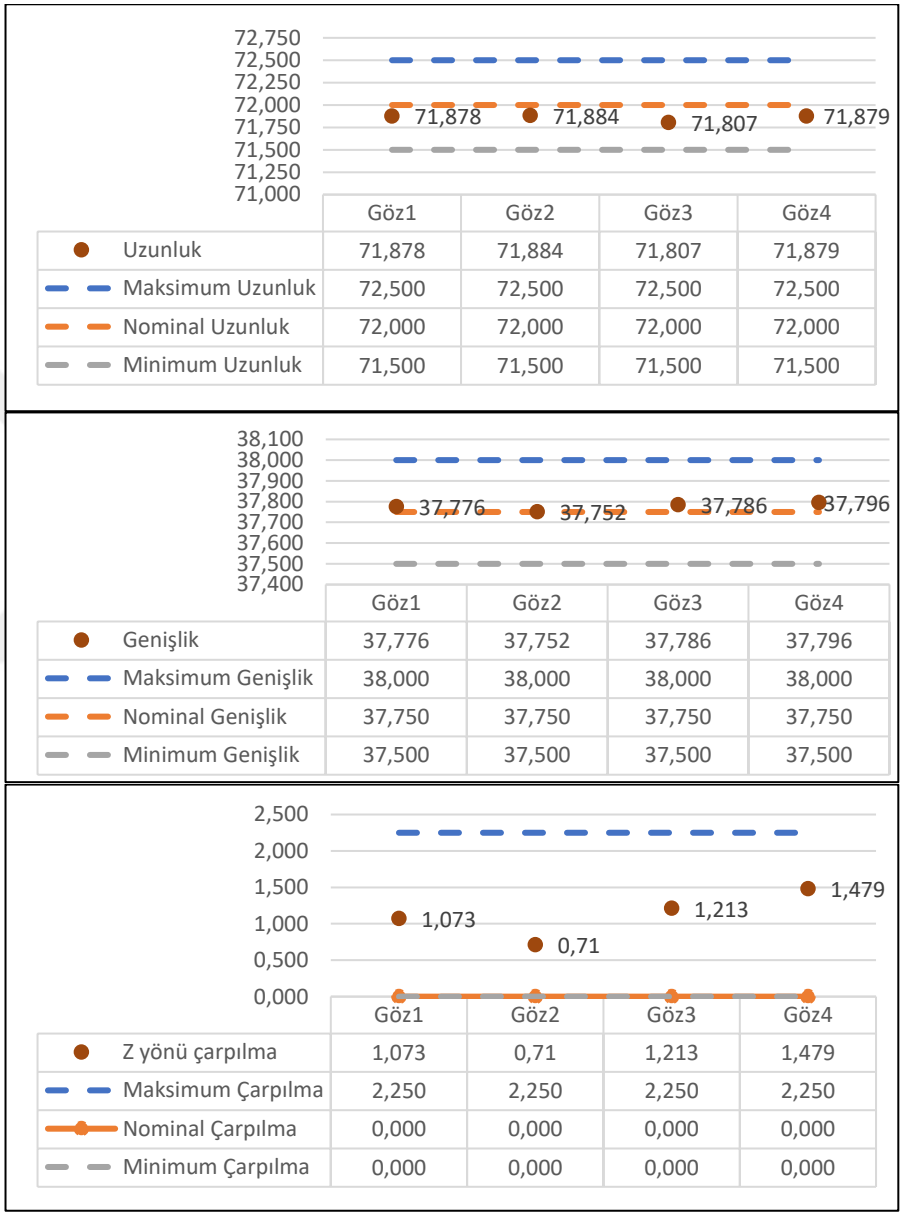
	TH1	TH2	TH3	TH4	TH5	TH6	TH7	TH8
Göz-1	1,34	0,90	1,10	1,21	1,23	1,58	1,12	1,22
Göz-2	1,31	0,99	1,34	1,42	1,06	1,28	0,76	0,79
Göz-3	1,38	1,18	1,07	1,27	0,89	1,11	1,36	0,98
Göz-4	1,48	1,19	0,98	1,22	1,23	1,25	1,57	1,39
Gözler ortalaması	1,38	1,07	1,12	1,28	1,10	1,31	1,20	1,10
Proses ortalaması	1,19	1,19	1,19	1,19	1,19	1,19	1,19	1,19

Şekil 4.67. Z yönü çarpılma ölçüleri (TH)

Yapılan deneysel tasarım sonucu Nautilus programı ile 3 farklı ölçünün (uzunluk, genişlik, çarpılma) nominal değerlerine en yakın proses parametreleri kalıp sıcaklığı 30°C, enjeksiyon hızı 55 mm/s ve tutma basıncı 45 bar olarak bulunmuştur. Deneysel parametrik veri analizi yapan Nautilus programıyla yapılan optimizasyon sonucu nominal değerlere en yakın optimum parametre değerleri Tablo 4.4'de, her bir göze ait uzunluk, genişlik ve Z yönü çarpılma değerleri de Şekil 4.68'de gösterilmiştir.

Tablo 4.4. Optimum proses değerleri (TH)

Optimum Proses Değerleri	
Parametreler	Değerler
Kalıp sıcaklığı (°C)	30
Enjeksiyon hızı (mm/s)	55
Tutma basıncı (bar)	45



Şekil 4.68. Optimum proses ölçüleri (TH)

4.2.3. Kimyasal köpürtme prosesi deney tasarım sonuçları (TCS)

TCS ajanı ile kimyasal köpürtme prosesi için 3 farklı proses parametresinin farklı değerlerinde parçanın ölçülerinde, ağırlığında ve proses tarafındaki kazanımları gösterebilmek için 8 farklı üretim yapılarak sonuçlar elde edilmiştir. Sonuç olarak,

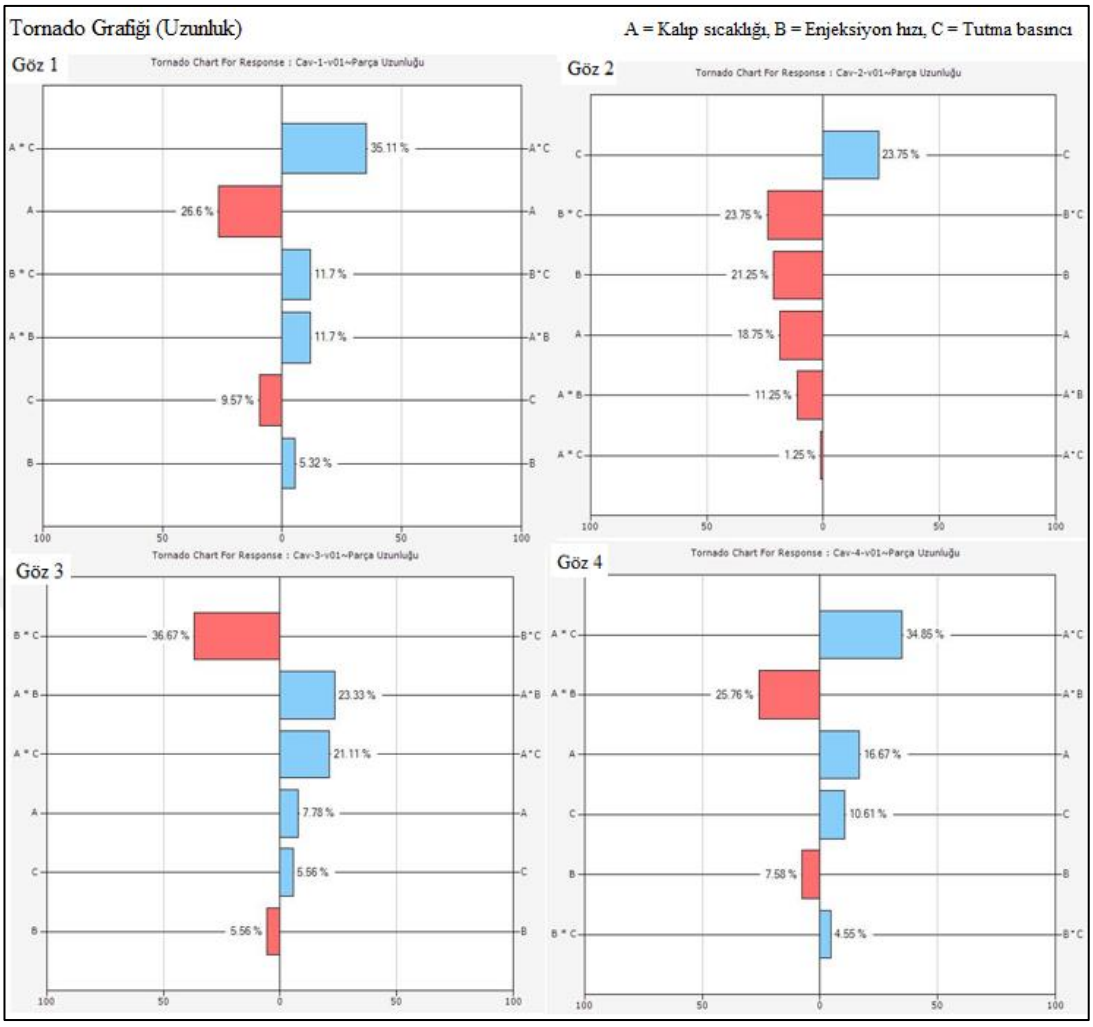
bütün parçaların X yönü uzunluk, Y yönü genişlik, Z yönü çarpılma ölçüleri, gözler arası ortalamaya göre % sapma değerleri, parça ağırlıkları hem toplam hem de göz göz ayrılarak Tablo 4.5'de verilmiştir.

Tablo 4.5. Kimyasal köpürtme prosesi deney tasarım seti sonuçları (TCS)

Proses Parametreleri	Proses	Kimyasal Köpürtme (TCS- %1 ağırlıkça katkı)							
	No	TCS1	TCS2	TCS3	TCS4	TCS5	TCS6	TCS7	TCS8
Ağırlık (gr)	Göz-1	3,81	3,75	3,81	3,76	3,80	3,75	3,82	3,75
	Göz-2	3,75	3,72	3,82	3,73	3,77	3,72	3,78	3,73
	Göz-3	3,76	3,69	3,79	3,70	3,71	3,69	3,77	3,71
	Göz-4	3,81	3,76	3,86	3,77	3,78	3,76	3,85	3,76
	Ortalama	3,78	3,73	3,82	3,74	3,77	3,73	3,81	3,74
X yönü uzunluk (mm)	Göz-1	71,87	71,83	71,85	71,77	71,87	71,90	71,81	71,99
	Göz-2	71,86	71,81	71,92	71,88	71,87	71,92	71,99	71,84
	Göz-3	71,92	71,87	71,89	71,82	71,73	71,92	71,95	71,83
	Göz-4	71,93	71,82	71,95	71,91	71,86	71,92	71,85	71,87
	Ortalama	71,90	71,83	71,90	71,85	71,83	71,92	71,90	71,88
Y yönü genişlik (mm)	Göz-1	37,70	37,73	37,76	37,74	37,72	37,76	37,70	37,75
	Göz-2	37,75	37,72	37,76	37,75	37,79	37,73	37,75	37,78
	Göz-3	37,73	37,73	37,75	37,74	37,71	37,66	37,76	37,78
	Göz-4	37,75	37,76	37,81	37,78	37,83	37,84	37,79	37,80
	Ortalama	37,73	37,74	37,77	37,75	37,76	37,75	37,75	37,78
Z yönü çarpılma (mm)	Göz-1	1,15	1,27	1,22	1,16	1,22	1,07	1,17	1,18
	Göz-2	1,27	1,33	1,26	1,23	1,27	1,16	1,10	1,17
	Göz-3	1,11	1,14	1,29	0,99	1,05	0,91	1,24	1,36
	Göz-4	1,21	1,36	1,21	1,30	1,38	1,31	0,96	1,13
	Ortalama	1,19	1,28	1,25	1,17	1,23	1,11	1,12	1,21
Kapama kuvveti (ton)	Değer	21,00	21,00	21,00	21,00	21,00	21,00	21,00	21,00
Çevrim süresi(s)	Değer	14,82	14,82	15,10	15,10	14,83	14,83	15,15	15,15

Analizin ilk sonucu olarak diğer bütün faktörler merkez değere ayarlandığında hangi faktörün X yönü uzunluk değerlerini en çok etkilediğini gösteren tornado grafikleri Şekil 4.69'da gösterilmiştir.

Gözler arasında inceleme yapıldığında, göz 1 için kalıp sıcaklığı ve tutma basıncı, göz 2 için tutma basıncı, göz 3 için enjeksiyon hızı ve tutma basıncı, göz 4 için kalıp sıcaklığı ve tutma basıncı, X yönü uzunluk ölçüsünde en fazla değişikliğe neden olan parametrelerdir. Grafiklerden de görüldüğü gibi X yönü uzunluk ölçüsünde en fazla değişikliğe neden olan parametre kalıp sıcaklığıdır.

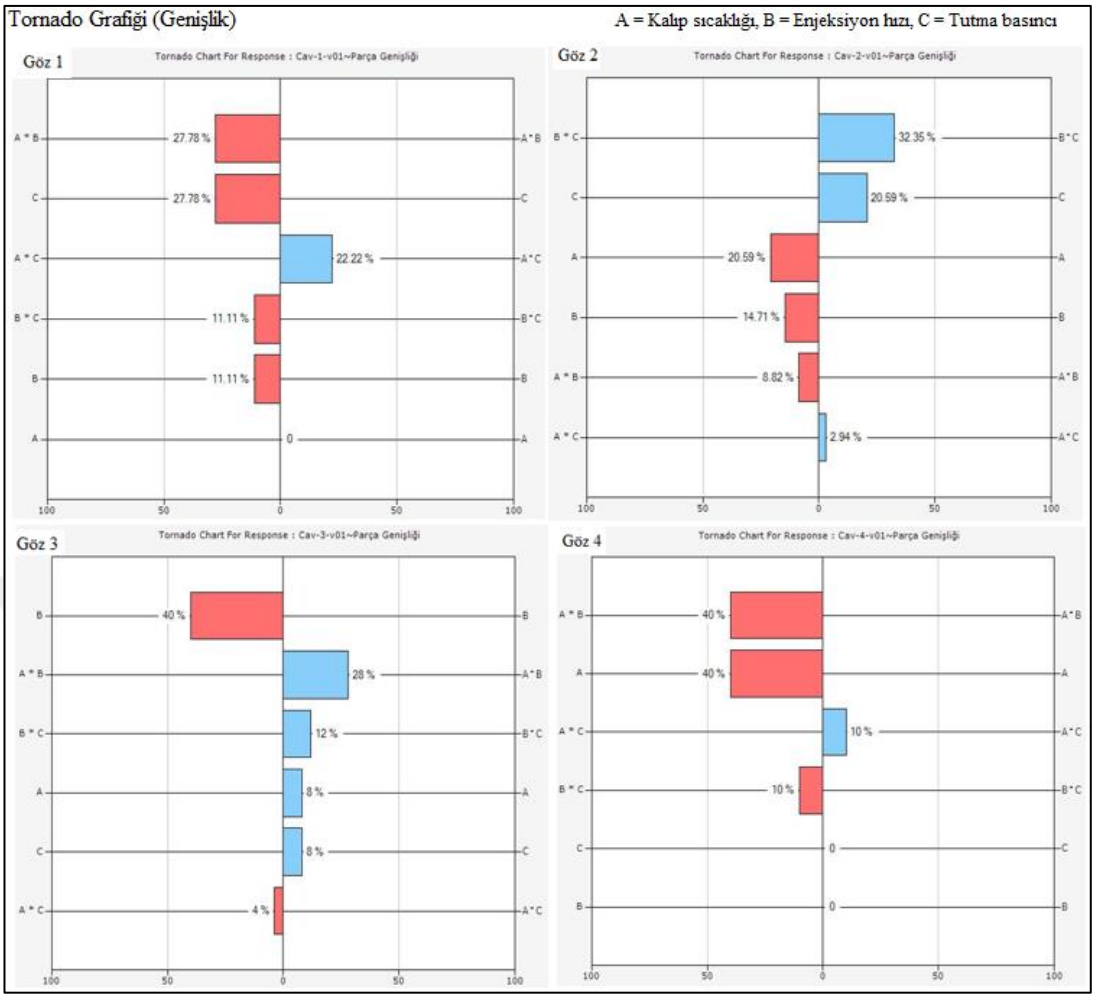


Şekil 4.69. X yönü uzunluk ölçüsü tornado grafiği (TCS)

Bir diğer sonuç olarak bütün faktörler merkez değere ayarlandığında hangi faktörün Y yönü genişlik değerlerini en çok etkilediğini gösteren tornado grafikleri Şekil 4.70'te gösterilmiştir.

Gözler arasında inceleme yapıldığında, göz 1 için kalıp sıcaklığı ve enjeksiyon hızı, göz 2 için tutma basıncı ve enjeksiyon hızı, göz 3 için enjeksiyon hızı, göz 4 için kalıp sıcaklığı ve enjeksiyon hızı, Y yönü genişlik ölçüsünde en fazla değişikliğe neden olan parametrelerdir.

Grafiklerden de görüldüğü gibi Y yönü genişlik ölçüsünde en fazla değişikliğe neden olan parametre kalıp sıcaklığıdır. Kalıp sıcaklığı parametresi değişiminden en fazla etkilenen %40 ile 4 numaralı gözdür. Kalıp sıcaklığı değişimi ile parçanın kozmetik ve ölçüsel kriterleri etkilenecektir. Özellikle köpürtme prosesinde ajan kullanımı sonucu elde edilen kazanımları en çok etkileyen parametre kalıp sıcaklığı olmuştur.

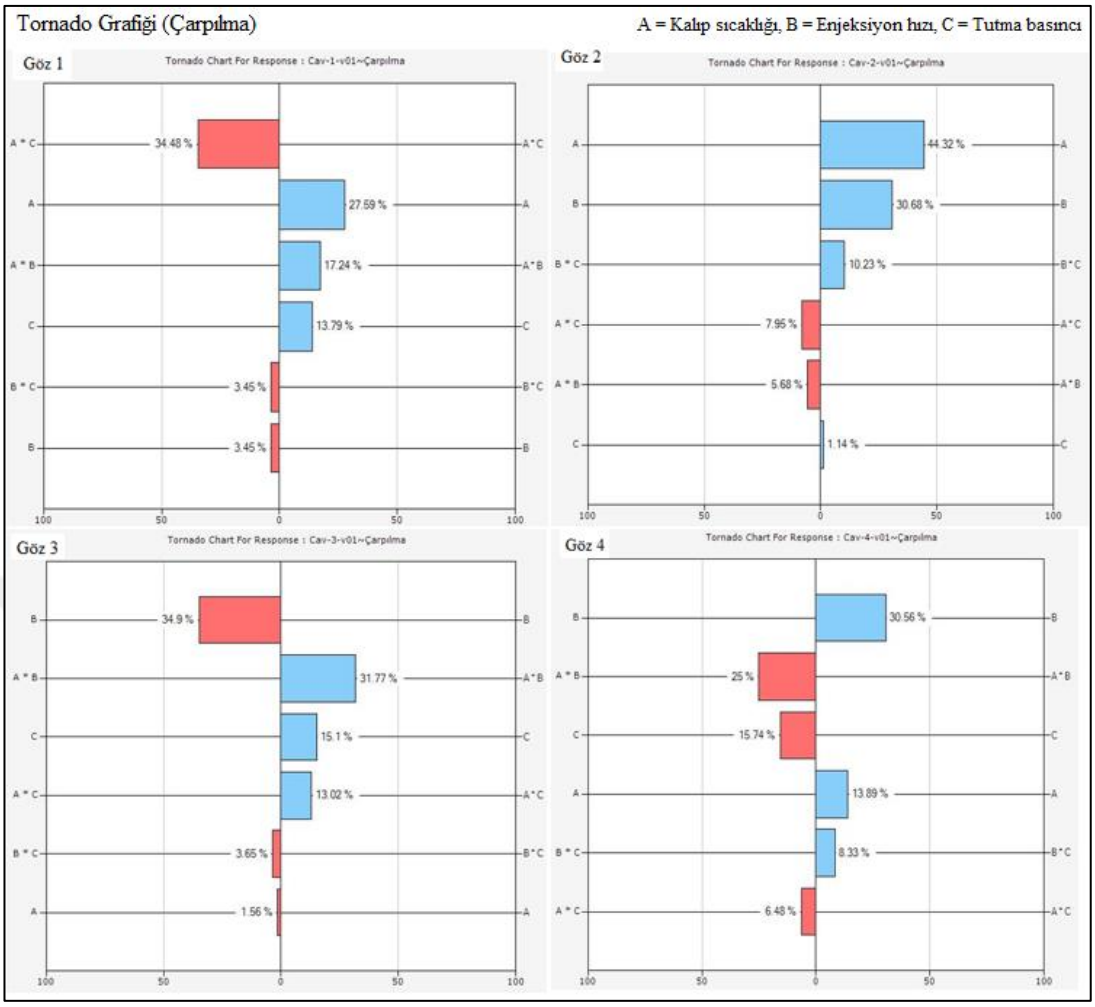


Şekil 4.70. Y yönü genişlik ölçüsü tornado grafiği (TCS)

Tornado grafiklerinin son sonucu olarak bütün faktörler merkez değere ayarlandığında hangi faktörün Z yönü çarpılma değerlerini en çok hangi etkilediğini gösteren tornado grafikleri Şekil 4.71'de gösterilmiştir.

Gözler arasında inceleme yapıldığında, göz 1 için kalıp sıcaklığı ve tutma basıncı, göz 2 için kalıp sıcaklığı, göz 3 için enjeksiyon hızı, göz 4 için enjeksiyon hızı, Z yönü çarpılma ölçüsünde en fazla değişikliğe neden olan parametrelerdir.

Grafiklerden de görüldüğü gibi Z yönü çarpılma ölçüsünde en fazla değişikliğe neden olan parametre enjeksiyon hızı ve kalıp sıcaklığıdır. Kalıp sıcaklığı parametresi değişiminden en fazla etkilenen %44,32 ile 2 numaralı göz, enjeksiyon hızı parametresi değişiminden en fazla etkilenen ise %34,90 ile 3 numaralı gözdür. Kalıp sıcaklığı ve enjeksiyon hızı değişimi ile parçanın kozmetik ve ölçüsel kriterleri etkilenecektir.

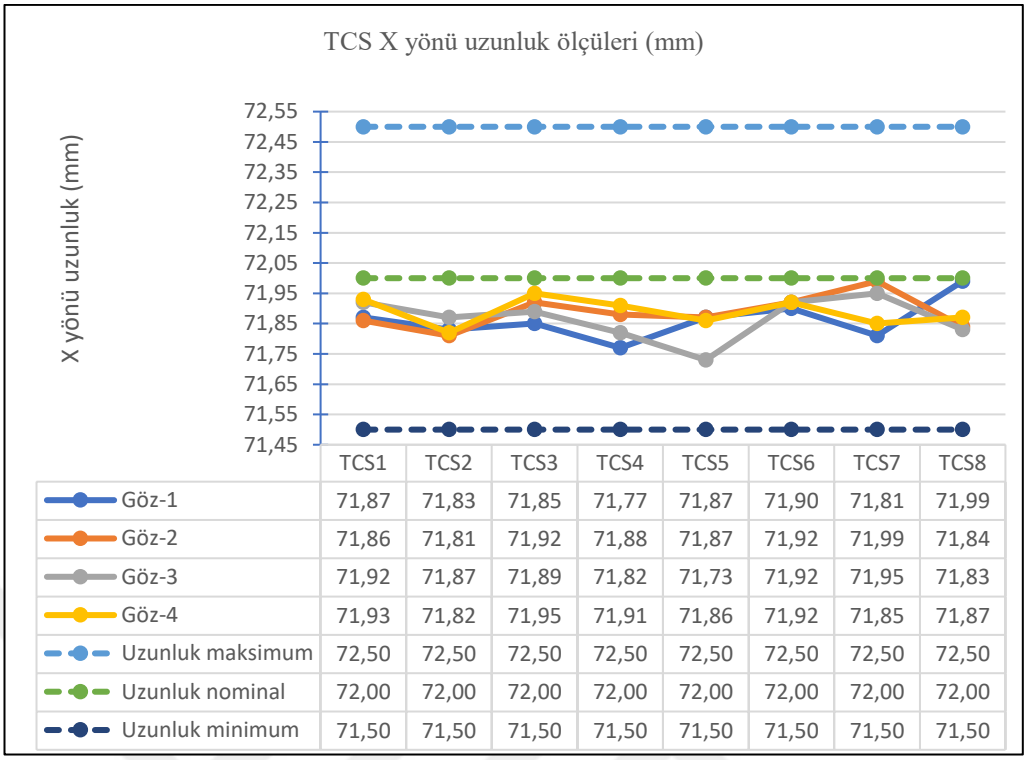


Şekil 4.71. Z yönü çarpılma ölçüsü tornado grafiği (TCS)

TCS ajanı ile kimyasal köpürtme proseslerin tümünün parça uzunluk ölçüleri hem kendi içinde hem de gözler arası dağılım olarak Şekil 4.72'de gösterilmiştir.

TCS1'den TCS8'e kadar olan proseslerde nominal X yönü uzunluğa en yakın proses TCS3'tür. Göz 1 X yönü uzunluk ölçüsü, TCS4 prosesinde nominale en uzak değerine ulaşmıştır. Göz 2 X yönü uzunluk ölçüsü, TCS2 prosesinde nominale en uzak değerine ulaşmıştır. Göz 3 X yönü uzunluk ölçüsü, TCS5 prosesinde nominale en uzak değerine ulaşmıştır. Göz 4 X yönü uzunluk ölçüsü, TCS2 prosesinde nominale en uzak değerine ulaşmıştır.

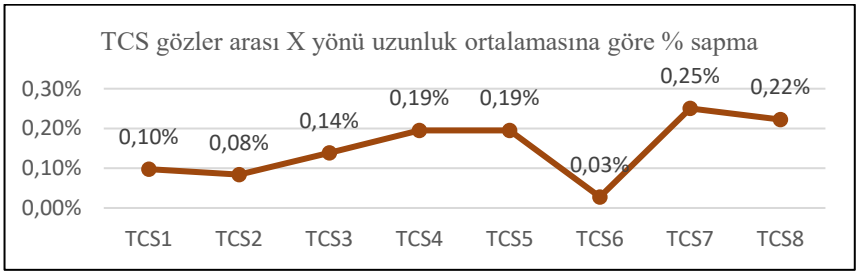
En düşük X yönü uzunluk ölçüsü, 71,73 mm ile TCS5 prosesi göz 3 ürününde, en yüksek X yönü uzunluk ölçüsü ise 71,99 mm değeri ile TCS7 prosesi göz 2 ve TCS8 göz 1 ürününde gözlemlenmiştir. Parçanın toplam 1 mm toleransı olmasına rağmen, deneme sonucu üretilen parçalar toplamda 0,18 mm tolerans içerisinde yer almıştır.



	TCS1	TCS2	TCS3	TCS4	TCS5	TCS6	TCS7	TCS8
Göz-1	71,87	71,83	71,85	71,77	71,87	71,90	71,81	71,99
Göz-2	71,86	71,81	71,92	71,88	71,87	71,92	71,99	71,84
Göz-3	71,92	71,87	71,89	71,82	71,73	71,92	71,95	71,83
Göz-4	71,93	71,82	71,95	71,91	71,86	71,92	71,85	71,87
Uzunluk maksimum	72,50	72,50	72,50	72,50	72,50	72,50	72,50	72,50
Uzunluk nominal	72,00	72,00	72,00	72,00	72,00	72,00	72,00	72,00
Uzunluk minimum	71,50	71,50	71,50	71,50	71,50	71,50	71,50	71,50

Şekil 4.72. X yönü uzunluk ölçüleri (TCS)

Gözler arası % sapmalar parçanın o prosesteki gözler arası X yönü uzunluk ölçüsü ortalamasına göre Şekil 4.73'te gösterilmiştir. Uzunluk ölçülerinde gözler arası en düşük değişim TCS6 prosesinde görülmüştür.

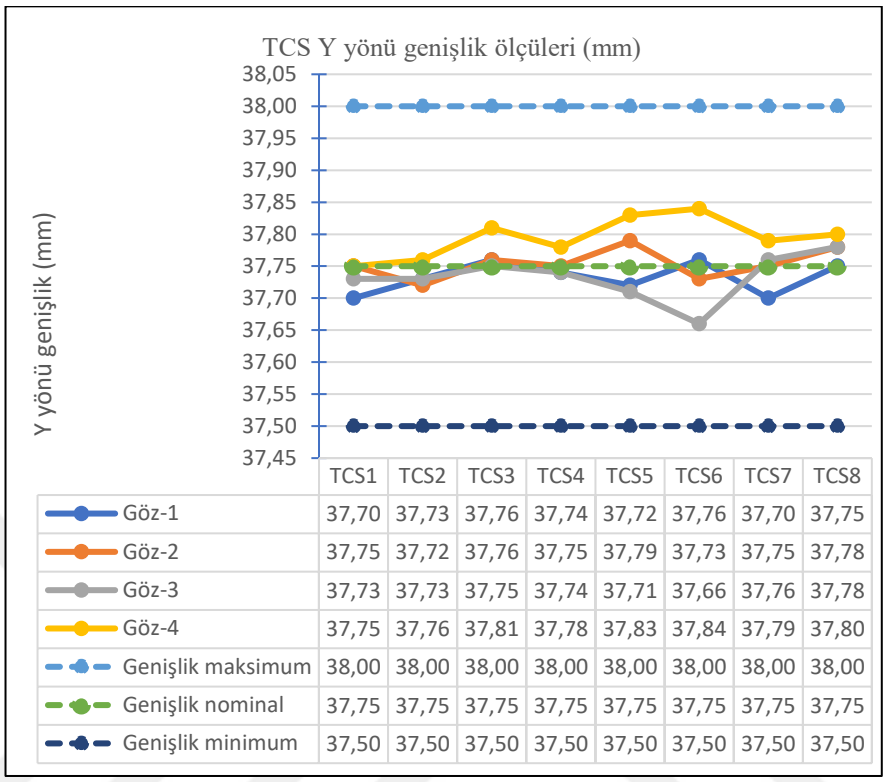


Şekil 4.73. X yönü uzunluk ortalamasına göre % sapma (TCS)

TH ajanı katkılı kimyasal köpürtme proseslerin tümünün parça genişlik ölçüleri hem kendi içinde hem de gözler arası dağılım olarak Şekil 4.74'te gösterilmiştir.

TCS1'den TCS8'e kadar olan proseslerde nominal Y yönü genişlik ölçüsüne en yakın proses TCS4'dir. Göz 1 Y yönü genişlik ölçüsü, TCS1 ve TCS7 prosesinde nominale en uzak değerine ulaşmıştır. Göz 2 Y yönü genişlik ölçüsü, TCS5 prosesinde nominale en uzak değerine ulaşmıştır. Göz 3 Y yönü genişlik ölçüsü, TCS6 prosesinde nominale

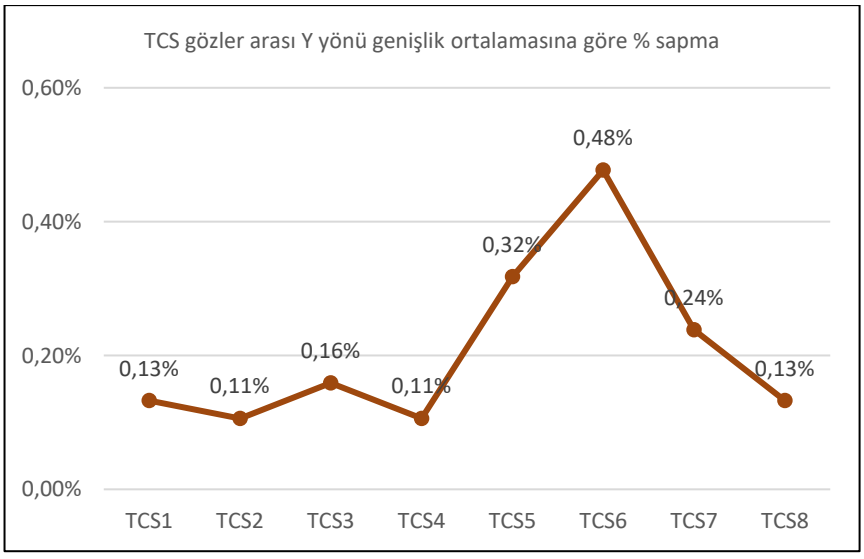
en uzak değerine ulaşmıştır. Göz 4 Y yönü genişlik ölçüsü, TCS6 prosesinde nominale en uzak değerine ulaşmıştır.



	TCS1	TCS2	TCS3	TCS4	TCS5	TCS6	TCS7	TCS8
Göz-1	37,70	37,73	37,76	37,74	37,72	37,76	37,70	37,75
Göz-2	37,75	37,72	37,76	37,75	37,79	37,73	37,75	37,78
Göz-3	37,73	37,73	37,75	37,74	37,71	37,66	37,76	37,78
Göz-4	37,75	37,76	37,81	37,78	37,83	37,84	37,79	37,80
Genişlik maksimum	38,00	38,00	38,00	38,00	38,00	38,00	38,00	38,00
Genişlik nominal	37,75	37,75	37,75	37,75	37,75	37,75	37,75	37,75
Genişlik minimum	37,50	37,50	37,50	37,50	37,50	37,50	37,50	37,50

Şekil 4.74. Y yönü genişlik ölçüleri (TCS)

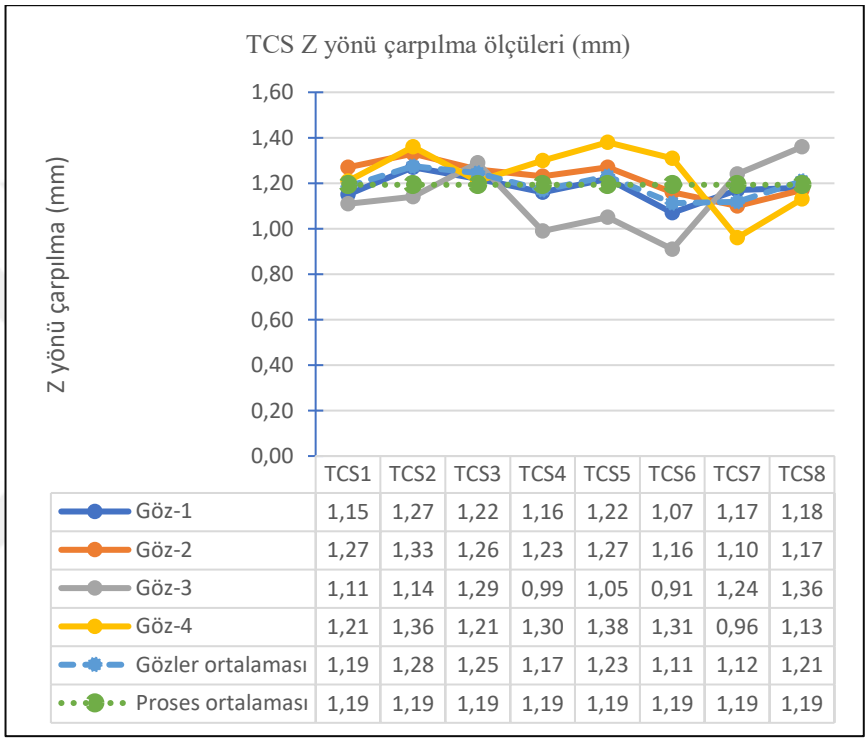
Gözler arası % sapmalar parçanın genişlik ölçüsü ortalamasına göre Şekil 4.75'te gösterilmiştir. Y yönü genişlik ölçülerinde gözler arası en düşük değişim TCS2 ve TCS4 prosesinde görülmüştür.



Şekil 4.75. Y yönü genişlik ortalamasına göre % sapma (TCS)

TCS ajan katkılı kimyasal köpürtme proses deney tasarımında parçanın Z yönünde çarpılması ile ilgili bütün veriler, Şekil 4.76'da gösterilmiştir. En düşük Z yönü çarpılma TCS6 prosesinde gözlemlenmiştir.

Gözler bazında elde edilen en düşük değer ise TCS6 prosesindeki 3 numaralı gözde elde edilen 0,91 mm değeridir. Tüm TCS ajanlı kimyasal köpürtme proseslerinin Z yönü çarpılma ortalaması 1,19 mm'dir.



	TCS1	TCS2	TCS3	TCS4	TCS5	TCS6	TCS7	TCS8
Göz-1	1,15	1,27	1,22	1,16	1,22	1,07	1,17	1,18
Göz-2	1,27	1,33	1,26	1,23	1,27	1,16	1,10	1,17
Göz-3	1,11	1,14	1,29	0,99	1,05	0,91	1,24	1,36
Göz-4	1,21	1,36	1,21	1,30	1,38	1,31	0,96	1,13
Gözler ortalaması	1,19	1,28	1,25	1,17	1,23	1,11	1,12	1,21
Proses ortalaması	1,19	1,19	1,19	1,19	1,19	1,19	1,19	1,19

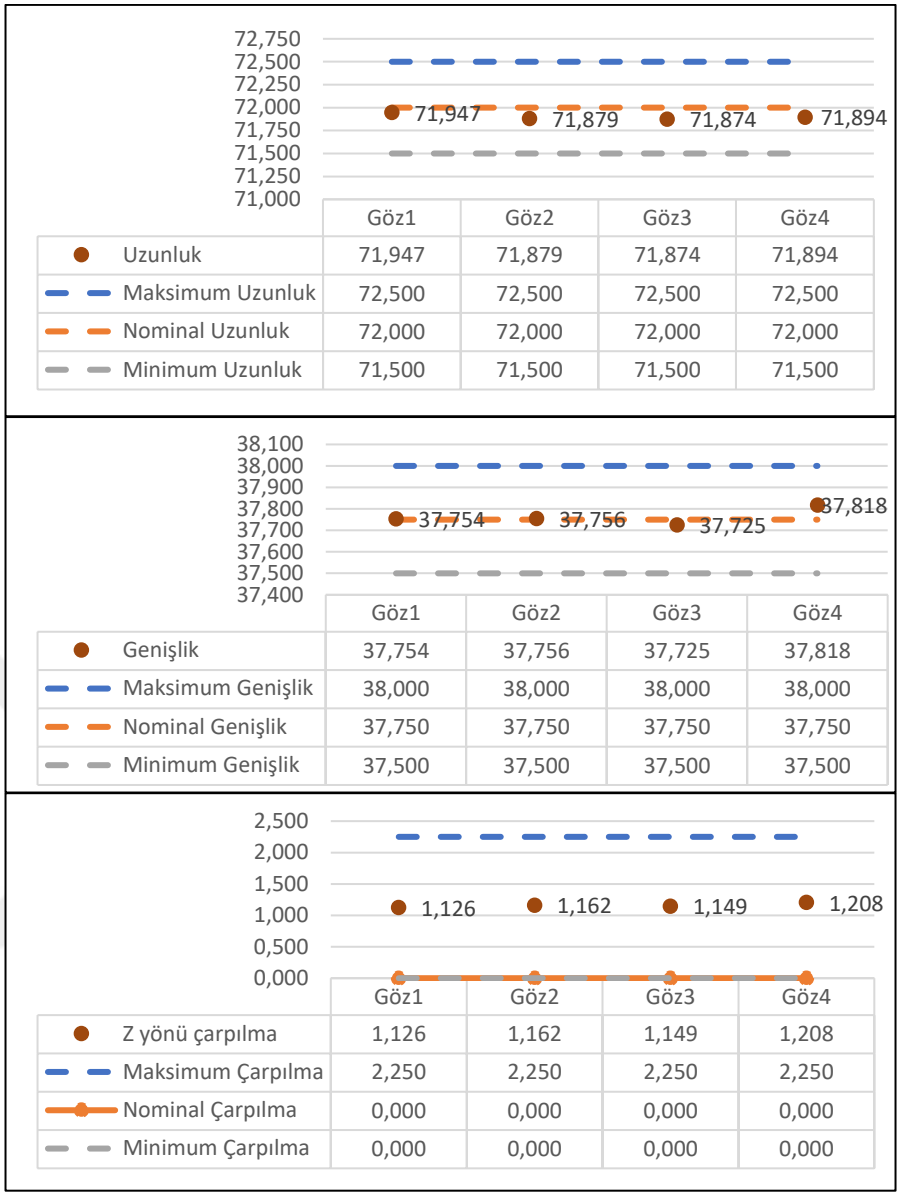
Şekil 4.76. Z yönü çarpılma ölçüleri (TCS)

Yapılan deneysel tasarım sonucu, 3 farklı ölçünün gözler arası ve toleranslarına göre en optimum değerini, kalıp sıcaklığı 30°C, enjeksiyon hızı 80 mm/s ve tutma basıncı 30 bar olarak bulunmuştur.

Optimum parametre değerleri, Tablo 4.6'da her bir göze ait X yönü uzunluk, Y yönü genişlik ve Z yönü çarpılma değerleri de Şekil 4.77'de gösterilmiştir.

Tablo 4.6. Optimum proses değerleri (TCS)

Optimum Proses Değerleri	
Parametreler	Değerler
Kalıp sıcaklığı (°C)	30
Enjeksiyon hızı (mm/s)	80
Tutma basıncı (bar)	30



Şekil 4.77. Optimum proses ölçüleri (TCS)

4.2.4. Deney tasarım sonuçlarının karşılaştırılması (KP, TH, TCS)

Konvansiyonel proses, H1 ajan katkılı kimyasal köpürtme prosesi ve CS ajanı katkılı kimyasal köpürtme prosesleri için yapılan deney seti tasarımları ve optimizasyon çalışmaları Nautilus programında yapılmıştır.

Elde edilen sonuçların karşılaştırılmasına göre, kalıp sıcaklığının parça kritik ölçülerini belirleme de en önemli faktör olduğu Tablo 4.7'den görülmektedir. Ayrıca, enjeksiyon hızının da parçanın kritik ölçütlerini etkileyen diğer önemli faktör olduğu söylenebilir.

Tablo 4.7. En etkili parametreler (KP, TH, TCS)

Proses	Parametre	Faktör	% En Fazla Değişim Gözler ortalaması	En etkili parametre
KP	X yönü uzunluk	Kalıp sıcaklığı	10,02%	Enjeksiyon Hızı
		Enjeksiyon hızı	28,29%	
		Tutma basıncı	20,61%	
	Y yönü genişlik	Kalıp sıcaklığı	21,70%	Kalıp sıcaklığı
		Enjeksiyon hızı	10,83%	
		Tutma basıncı	12,96%	
	Z yönü çarpılma	Kalıp sıcaklığı	23,74%	Kalıp sıcaklığı
		Enjeksiyon hızı	15,51%	
		Tutma basıncı	17,97%	
TH	X yönü uzunluk	Kalıp sıcaklığı	7,26%	Tutma basıncı
		Enjeksiyon hızı	13,43%	
		Tutma basıncı	20,83%	
	Y yönü genişlik	Kalıp sıcaklığı	20,09%	Kalıp sıcaklığı
		Enjeksiyon hızı	15,44%	
		Tutma basıncı	15,09%	
	Z yönü çarpılma	Kalıp sıcaklığı	28,57%	Kalıp sıcaklığı
		Enjeksiyon hızı	7,88%	
		Tutma basıncı	6,45%	
TCS	X yönü uzunluk	Kalıp sıcaklığı	17,45%	Kalıp sıcaklığı
		Enjeksiyon hızı	9,93%	
		Tutma basıncı	12,37%	
	Y yönü genişlik	Kalıp sıcaklığı	17,15%	Kalıp sıcaklığı
		Enjeksiyon hızı	16,46%	
		Tutma basıncı	14,09%	
	Z yönü çarpılma	Kalıp sıcaklığı	21,84%	Enjeksiyon Hızı
		Enjeksiyon hızı	24,90%	
		Tutma basıncı	11,44%	

Bir diğer deneysel tasarım sonucu olarak, her prosese ait ağırlık, çarpılma, çekme düşüşleri açısından en iyi değerler, Tablo 4.8'de verilmiştir. Kapama kuvveti ve çevrim süresi açısından tüm proseslerde benzer bir düşüş oranı elde edilmiştir.

Tablo 4.8. TH ve TCS en başarılı prosesler

En İyiler	TH	% Değer	TCS	% Değer
Sıralama	1.ve 2.	1.	1. ve 2.	1.
En fazla ağırlık düşüşü (%)	TH6-TH4	7,19%	TCS6-TCS4	5,93%
En az X yönü çekme (%)	TH3-TH8	0,10%	TCS3-TCS7	0,19%
En az Y yönü çekme (%)	TH8-TH3	0,03%	TCS3-TCS8	0,02%
En fazla Z yönü çarpılma düşüşü (%)	TH8-TH2	45,32%	TCS7-TCS8	40,08%

Ağırlık düşüşü için 6 numaralı, hacimsel çekmeler için 3 ve 8 numaralı, çarpılma iyileşmesi açısından 8 numaralı proses en iyi olarak öne çıkmıştır.

4.3. Akış Analizi ve Üretim Sonuçlarının Karşılaştırılması

Öncelikle konvansiyonel olarak deney seti tasarımından gelen KP1'den KP8'e kadar olan 8 adet deneysel gerçek üretim proseslerinin içerisinden seçilen KP6, TH1'den TH8'e kadar olan 8 adet deneysel gerçek üretim proseslerinden TH6, TCS1'den TCS8'e kadar olan 8 adet deneysel gerçek üretim proseslerinden TCS6 proseslerinin akış simülasyonları ve gerçek üretim sonuçları karşılaştırmalı olarak incelenip Tablo 4.30'da verilmiştir. KP6 gerçek üretimde 30 ton kapama kuvveti kullanılırken, KP6 akış simülasyon sonucunda ortaya çıkan kapama kuvveti ortalama 25,83 ton civarındadır. KP6 gerçek üretim çevrim süresi 16,33 s iken, KP6 akış simülasyonu çevrim süresi yaklaşık 17,69 s olarak bulunmuştur. KP6 gerçek üretim prosesi gözlerinin ağırlık ortalaması 3,97 gr, akış simülasyonu sonucunda ise sadece 0,03 gr fark ile 4 gr olarak bulunmuştur. KP6 gerçek üretim X yönü uzunluk ölçüsü 72,19 mm, akış simülasyon sonucu olarak aynı uzunluk 0,11 mm farkla 72,30 mm olarak ölçülmüştür. KP6 gerçek üretim Y yönü genişlik ölçüsü ve akış simülasyon sonucu 37,85 mm olarak ölçülmüştür. Z yönü çarpılma değerleri gerçek üretimde 1,84 mm iken, simülasyon sonucu 0,43 mm olarak ortaya çıkmıştır. Akış simülasyonu sonucunda hem TH hem de TCS ajanlı proseste konvansiyonel prosese göre yaklaşık %16 oranında kapama kuvveti düşüşü öngörülmesine rağmen gerçek üretim sonucu olarak sırasıyla yaklaşık %33,33 ve %30 kapama kuvveti düşüşü gözlemlenmiştir. Akış simülasyonu sonucunda tutma süresinin ortadan kaldırılması ve köpürtme malzemesinin daha kısa sürede soğuması ile TH için yaklaşık %11,81, TCS6 için %11,31 oranında çevrim zamanından kazanç öngörülmüşken üretimde TH6 için %9,25, TCS6 için %9,22 oranında çevrim süresi kazancı elde edilmiştir. Kimyasal köpürtme prosesinin en iddialı olduğu ağırlık azaltma açısından incelediğinde, simülasyonda TH6 ile %7,32, TCS6 ile %7,07 iken gerçek üretim sonucunda TH6 için çok yakın bir değer olan %7,19, TCS6 için %5,93 oranında ağırlık düşüşü yakalanmıştır. Akış simülasyonunda X yönü çekme TH6 için %0,53, TCS6 için %0,49 oranında iken, gerçek üretim sonucu olarak TH6'da X yönü çekme %0,26, TCS6 da ise %0,38 olarak gözlemlenmiştir. Akış simülasyonunda Y yönü çekme TH6 için %0,48, TCS6 için %0,44 oranında iken, gerçek üretim sonucu olarak TH6'da Y yönü çekme %0,34, TCS6 da ise %0,28 olarak gözlemlenmiştir. Akış simülasyonunda Z yönü çarpılma düşüşü TH6 için %69,68, TCS6 için %74,73 oranında oldukça fazla

oranda bir iyileştirme gösterir iken, gerçek üretim sonucu olarak TH6'da Z yönü çekme %28,8, TCS6 da ise %39,37 olarak gözlemlenmiştir. TH ajanı, TCS ajanına göre ağırlık düşüşü olarak avantajlı çıkmışken, TCS ajanı ise çekme ve çarpılma iyileşmesi konusunda öne geçmiştir. İki ajanda göz görülecek seviyede kapama kuvveti ve çevrim süresi iyileşmesi sağlamıştır. Sonuç olarak konvansiyonel proses ile üretilen parçanın, kimyasal köpürtme prosesi sayesinde yaklaşık %7,5 oranında daha hafif, %33 oranında daha az kapama kuvveti, %10'a yakın çevrim süresinden kazanç ve %40 çarpılma iyileşmesi sağlayabileceği hem akış simülasyonu hem de gerçek üretim deneyleri sonucunda kanıtlanmıştır. Ayrıca, akış simülasyonu sonuçlarının özellikle de ağırlık düşüşü konusunda gerçek sonuçlara yakın olması, akış simülasyonun hem modelleme hem de parametreler açısından doğruluğunu kanıtlamıştır.

Tablo 4.9. Karşılaştırmalı gerçek ve akış simülasyon sonuçları

Proses Parametreleri (Gerçek/Simülasyon)		Konvansiyonel Proses	Kimyasal Köpürtme (Ajan TH- %1 ağırlıkça)	Kimyasal Köpürtme (Ajan TCS- %1 ağırlıkça)
		KP6	TH6	TCS6
Kapama kuvveti (ton)	G	30,00	20,00	21,00
KP6'ya göre düşüş (%)			33,33%	30%
	S	25,83	21,76	21,85
			15,76%	15,41%
Çevrim süresi (s)	G	16,33	14,82	14,83
KP6'ya göre düşüş (%)			9,25%	9,22%
	S	17,43	15,26	15,33
			12,44%	12,04%
Parça ağırlık (gr)	G	3,97	3,68	3,73
KP6'ya göre düşüş (%)			7,19%	5,93%
	S	4,00	3,71	3,72
			7,32%	7,07%
X yönü uzunluk (mm)	G	72,19	72,01	71,92
KP6'ya göre düşüş (%)			0,26%	0,38%
	S	72,30	71,92	71,94
			0,53%	0,49%
Y yönü genişlik (mm)	G	37,85	37,72	37,75
KP6'ya göre düşüş (%)			0,34%	0,28%
	S	37,85	37,67	37,69
			0,48%	0,44%
Z yönü çarpılma (mm)	G	1,84	1,31	1,11
KP6'ya göre düşüş (%)			28,88%	39,37%
	S	0,43	0,13	0,11
			69,68%	74,73%

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Konvansiyonel prosese göre farklı iki kimyasal ajan katkısının ve proses parametrelerindeki değişimin parça ağırlığı, çarpılma, çekme, kapama kuvveti ve çevrim zamanına olan etkileri deneysel parametre setleri ile üretim ve simülasyon sonuçları karşılaştırmalı olarak ortaya konulmuştur. Yapılan çalışmalar neticesinde elde edilen sonuçlar ve kazanımlar aşağıda sıralanmıştır:

- Konvansiyonel plastik enjeksiyon prosesi ile üretilen parça, kimyasal köpürtme prosesleri ile yaklaşık %7,5 ağırlık düşüşü ile üretilmiştir.
- Konvansiyonel plastik enjeksiyon prosesi ile üretilen parça, kimyasal köpürtme prosesleri ile yaklaşık %30 kapama kuvveti düşüşü ile üretilmiştir.
- Konvansiyonel plastik enjeksiyon prosesi ile üretilen parça, kimyasal köpürtme prosesleri ile yaklaşık %9,5 çevrim süresi düşüşü ile üretilmiştir.
- Konvansiyonel plastik enjeksiyon prosesi ile üretilen parça, kimyasal köpürtme prosesleri ile daha fazla hacimsel çekme oluşmasına rağmen parça üzerinde daha düzenli ve eşit hacimsel çekme dağılımı elde edilmiştir. Parça üzerindeki daha düzenli çekme dağılımı, çarpılma iyileşmesi olarak ortaya çıkmıştır.
- Konvansiyonel plastik enjeksiyon prosesi ile üretilen parça, kimyasal köpürtme prosesleri ile yaklaşık %40 oranında +Z yönü çarpılma ölçüsünde iyileşme sağlamıştır.
- Aynı kimyasal köpürtme proses şartlarında, %50 reaktif madde içeren kimyasal ajana göre (TecoCell® H1), %25 reaktif madde içeren kimyasal ajan (TecoCell® CS), konvansiyonel plastik enjeksiyon ile üretilen parçanın ağırlık düşüşünde daha başarılı olduğu ortaya çıkmıştır.
- Aynı kimyasal köpürtme proses şartlarında, %50 reaktif madde içeren (TecoCell® H1) ve %25 reaktif madde içeren (TecoCell® CS) kimyasal köpürtme ajanlarının, konvansiyonel plastik enjeksiyon ile üretilen parçaya sağladıkları çevrim süresi kazançları arasında gözle görülür bir fark oluşmamıştır.
- Aynı kimyasal köpürtme proses şartlarında, %50 reaktif madde içeren (TecoCell® H1) ve %25 reaktif madde içeren (TecoCell® CS) kimyasal köpürtme ajanlarının,

konvansiyonel plastik enjeksiyon ile üretilen parçaya sağladıkları kapama kuvveti kazanımları arasında gözle görülür bir fark oluşmamıştır.

- Aynı kimyasal köpürtme proses şartlarında, %50 reaktif madde içeren (TecoCell® H1) ve %25 reaktif madde içeren (TecoCell® CS) kimyasal köpürtme ajanlarının, konvansiyonel plastik enjeksiyon ile üretilen parçaya göre X yönü uzunluk ölçüsünde en yüksek %0,38 ve Y yönü genişlik ölçüsünde en yüksek %0,34 daha fazla çekme değerleri ile parçanın ölçü toleransları içerisinde kalabildiği hem akış analizi hem de üretim sonuçlarıyla kanıtlanmıştır.
- Aynı kimyasal köpürtme proses şartlarında, %25 reaktif madde içeren kimyasal ajan (TecoCell® CS), %50 reaktif madde içeren kimyasal ajana (TecoCell® H1) göre, konvansiyonel plastik enjeksiyon ile üretilen parçanın +Z yönü çarpılma iyileşmesinde daha başarılı olduğu ortaya çıkmıştır.
- Akış simülasyonu ile üretim sonuçlarına en yakın değerler, ağırlık düşüşü sonucunda elde edilmiştir.
- Akış simülasyon çevrim süresi düşmesi sonucunda, üretim sonuçlarına göre yaklaşık %3 farkla oldukça yakın değerler elde edilmiştir.
- Üretimde, akış simülasyon sonuçlarından daha çok kapama kuvveti düşüşü elde edilmiştir.
- Sayısal olarak + Z yönü çarpılma iyileşmesi, akış simülasyonunda %70, üretim sonuçlarında ise %40 ile en uzak yaklaşım elde edilen sonuçtur.
- Hem konvansiyonel hem de kimyasal köpürtme proseslerinde, parçanın uzunluk, genişlik ve çarpılma kriterlerinin en optimum değerini elde etmek için parametrik deney tasarım seti ile ulaşılan en uygun kalıp sıcaklığı 30°C olarak bulunmuştur.
- Parametrik deney tasarımın sonucuna göre; tüm proseslerde parçanın Y yönü genişlik ölçüsünü en çok etkileyen faktör kalıp sıcaklığıdır.
- Kimyasal köpürtme prosesi için doğru modellenmiş Moldflow akış simülasyonunun özellikle ağırlık, kapama kuvveti ve çevrim süresi kazanım verilerinin, üretim sonuçları ile çok yakın olduğu ortaya çıkmıştır.

KAYNAKLAR

[1] Bryce D. M., *Plastic Injection Molding Manufacturing Process Fundamentals*, 1st ed., Society of Manufacturing Engineers, Dearborn Michigan, 1996.

[2] Szych P., Kürten A., *The New Process for Lightweight Foaming*, 1st ed., Germany, 2017.

[3] Bryce D. M., *Plastic Injection Molding Material Selection and Product Design Fundamentals*, 2nd ed., Society of Manufacturing Engineers, Dearborn Michigan, 1997.

[4] Vadivelu M. A., Kumar C R., Joshi, G. M., Polymer Composites for Thermal Management, *Composite Interfaces*, 2016, **23**(9), 847-872.

[5] Nathalie Fischer, Packing Pressure Profiles (Amorphous and Semi-Crystalline Materials), https://krusetraining.com/2018/12/05/torstens-training-tips-packing-profiles/, (Ziyaret tarihi: 15 Nisan 2020).

[6] Wang M., Chang R., Hsu C., *Molding Simulation:Theory and Practice*, 1st ed., Springer, Munich, 2018.

[7] Menges G., Michaeli W., Mohren P., *How to Make Injection Molds*, 3rd ed., Hanser, Munich, 2000.

[8] Amberg, J., *Konstruktion von Spritzgießwerkzeugen im Baukastensystem (Variantenkonstruktion)*, Unpublished report, Aachen, 1977.

[9] https://www.rodongroup.com/blog/injection-molds-101-cold-runner-vs-hot-runner-molds, (Ziyaret tarihi: 15 Mayıs 2020).

[10] https://www.maenner-group.com/, (Ziyaret tarihi: 10 Nisan 2020).

[11] Dominick V. Rosato, Donald V. Rosato, MarIene G., *Injection Molding Handbook / Rosato*, 3rd ed., Kluwer Academic, United States, 2000.

[12] Li D., Liu T., Zhao L., Yuan W., Foaming of Poly(lactic acid) Based on Its Nonisothermal Crystallization Behavior Under Compressed Carbon Dioxide , *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 2011, **50**(4), 1997-2007.

[13] Hasan M., Li Y.G., Li G., Park C.B., and Chen P. J., Effect of Unexpected CO_2's Phase Transition on the High-Pressure Differential Scanning

[14] Calorimetry Performance of Various Polymers, *Chemistry and Engineering Data*., 2016, **4**(3), 1810-1818.

[15] Lei Z., Ohyabu H., Sato Y., Inomata H., and Smith R., Solubility, Swelling Degree and Crystallinity of Carbon Dioxide–Polypropylene System, *The Journal of Supercritical Fluids*, 2007, **45**(2) 452-461.

[16] Han J.H., Han C.D., A Study of Bubble Nucleation in a Mixture of Molten Polymer and Volatile Liquid in a Shear Flow Field, *Polymer Engineering and Science*, 1988, **47**, 1616-1627.

[17] Zhai W., Yu J., Wu L., Ma W., He J., *Design and Applications of Nanostructured Polymer Blends and Nanocomposite Systems*, 1st ed., Elsevier, United States, 2006.

[18] Areerat S., Funami E., Hayata Y., Nakagawa D., Ohshima M., Measurement and Prediction of Diffusion Coefficients of Supercritical CO_2 in Molten Polymers, *Polymer Engineering and Science*, 2004, **44**(2), 1915-1924.

[19] Arefmanesh A., Advani S.G., Michaelides E.E., *Inter. J. Heat Mass Transf.*, 1st ed, Elsevier, United Kingdom, 2004.

[20] Venerus D.C., Doi Edwards Theory Evaluation in Double Step Strain Flows, *Polymer Engineering and Science*, 1994, **32**(8), 1531-1542.

[21] Venerus D.C., Modeling Diffusion-Induced Bubble Growth in Polymer Liquids, *Cellular Polymers*., 2003, **22**, 89-101.

[22] Baldwin D.F., Suh N.P., Shimbo M., Novel Approach to Fabricate Porous Sponges of Poly (d,l-lactic-co-glycolic acid) without the Use of Organic Solvents, *Cellular Polymers*., 1996, **17**(14), 1417-1422.

[23] Park C.B., Suh N.P., An Extrusion System for the Processing of Microcellular Polymer Sheets: Shaping and Cell Growth Control, *Polymer Engineering and Science*, 1996, **36**(10), 1996, 1425-1435.

[24] Park C.B., Baldwin D.F., Suh N.P., Effect of the Pressure Drop Rate on Cell Nucleation in Continuous Processing of Microcellular Polymers, *Polymer Engineering and Science*., 1995, **35**(5), 432-440.

[25] Han X., Koelling K.W., Tomasko D.L., Lee L.J., Continuous Microcellular Polystyrene Foam Extrusion with Supercritical CO_2, *Polymer Engineering and Science*, 2002, **42**(11), 2094-2106.

[26] Wong S., Lee J.W.S., Naguib H.E., and Park C.B., Effect of Processing Parameters on the Mechanical Properties of Injection Molded Thermoplastic Polyolefin (TPO) Cellular Foams, *Macromolecular Materials and Engineering*, 2008, **293**(7), 605-613.

[27] Chen S. C., Liao W. H., Chien R-D, Structure and Mechanical Properties of Polystyrene Foams Made Through Microcellular Injection Molding via Control Mechanisms of Gas Counter Pressure and Mold Temperature, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, DOI: 10.1016/j.icheatmasstransfer.2012.06.015.

[28] Nema A.K., Deshmukh A.V., Palanivelu K., Sharma S.K., and Malik T. J., Starch- Based Biodegradable Packing Filler and Method of Preparing Same, *Cellular Plastics*, 2008, **44**(10), 277-292.

[29] Nakai S., Taki K., and Tsujimura J., Numerical Simulation of a Polypropylene Foam Bead Expansion Process, *Polymer Engineering and Science*, 2008, **48**(1), 107-115.

[30] Qin X., Thompson M.R., and Hrymak A.N., Rheology Studies of Foam Flow During Injection Mold Filling, *Polymer Engineering and Science*, 2007, **47**(4), 522-529.

[31] Eaves D., *Handbook of Polymer Foams*, 1st ed., Rapra Technology Limited, United Kingdom, 2004.

[32] Villamizar C.A. and Han C.F., Studies on Structural Foam Processing I. the Rheology of Foam Extrusion, *Polymer Engineering and Science*, 1978, **18**(9), 687-698.

[33] Jacobi M., Trexel Marketing Presentation, *Lunch and Learn Conference*, 2019.

[34] Altstädt, V., Mantey, A., *Thermoplast-Schaumspritzgießen*, 2nd ed., Carl Hanser Verlag, München, 2010.

[35] Jingyi X., *Microcellular Injection Molding*,1st ed., John Wiley & Sons, Incorporated, 2010.

[36] Heda P.K., Dollimore D., Alexander K.S., Chen D., Law E., Bicknell P., A Method of Assessing Solid State Reactivity Illustrated by Thermal Decomposition Experiments on Sodium Bicarbonate, *Thermochimica Acta*, 1995, **30**(9), 255–272.

[37] Wyrzykowski D., Hebanowska E., Nowak-Wiczk G., Makowski M., Chmurzyński L., Thermal Behaviour of Citric Acid and Isomeric Aconitic Acids, *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 2011,**104**(2) 731–735.

[38] Gendron R., *Thermoplastic Foam Processing: Principles and Development*, 3rd ed., CRC Press, 2004.

[39] Shefter E., Lo A., Ramalingam S., A Kinetic Study of the Solid State Transformation of Sodium Bicarbonate to Sodium Carbonate, *Drug Developmment and Industrial Pharmacy*, 1974, **1**(1), 29–38.

[40] Subramanian K., Radhakrishnan T., Sundaram A., Thermal Decomposition Kinetics of Sodium Bicarbonate by Differential Thermal Analysis, *Journal of Thermal Analysis*, 1972, **4**, 89–93.

[41] Keener T.C., Frazier G.C., Davis W.T., Thermal Decomposition of Sodium Bicarbonate, *Chemical Engineering Communication*, 1985, **33**, 93–105.

[42] Wu Y.L., Shih S.M., Intrinsic Kinetics of the Thermal Decomposition of Sodium Bicarbonate, *Thermochim Acta*, 1993, **223**, 177–186.

[43] Ball C.M., Snelling A.N., Strachan R.M., Thermal Decomposition of Solid Sodium Bicarbonate, *Journal of the Chemical Society, Faraday Transactions 1: Physical Chemistry in Condensed Phases*, 1986, **82**, 3709–3715.

[44] Barall E.M., Rogers L.B., Differential Thermal Analysis of the Decomposition of Sodium Bicarbonate and It's Simple Double Salts, *Journal of Inorganic and Nuclear Chemistry*, 1966, **28**(1), 41–51.

[45] Barbooti M.M., Al-Sammerrai D.A., Thermal Decomposition of Citric Acid, *Thermochim Acta*, 1986, **98**, 119–126.

[46] Lee S.T., Park C.B., Ramesh N.S., Dsc Studies on the Decomposition of Chemical Blowing Agents Based on Citric Acid and Sodium Bicarbonate, *Thermochim Acta*, 2018, **659,** 74–81.

[47] Behravesh A.H., Park C.B., Cheung L.K., Venter R.D., Extrusion of Polypropylene Foams with Hydrocerol and Isopentane, *Journal of Vinyl Additive Technol*ogy, 1996, **2**(4), 349–357.

[48] Soares F.A., Nachtigall S.M.B., Effect of Chemical and Physical Foaming Additives on the Properties of PP/wood Flour Composites, *Polymer Testing*, 2013, **32**(4), 640–646.

[49] Dixon D., Martin P.J., Harkin-Jones E., Predicting the Performance of Chemical Blowing Agents Using Thermal Analysis Techniques, *Journal of Cellular Plastics*, 2000, **36**(4), 310–326.

[50] Qin X., Thompson M.R., Hrymak A.N., Torres A., Rheological Comparison of Chemical and Physical Blowing Agents in a Thermoplastic Polyolefin, *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2006, **45**(8), 2734–2740.

[51] Reglero Ruiz J.A., Vincent M., Agassant J.F., Sadik T., Pillon C., Carrot C., Polymer Foaming with Chemical Blowing Agents: Experiment and Modeling, *Polymer Engineering Science*, 2015, **55**, 2018–2029.

[52] Fasihi M., Targhi A.A., Bayat H., The Simultaneous Effect of Nucleating and Blowing Agents on the Cellular Structure of Polypropylene Foamed via the Extrusion Process, *E-Polymers*, 2016, **16**(3), 235–241.

[53] Ruiz J.R., Vincent M., Agassant J.F., Numerical Modeling of Bubble Growth in Microcellular Polypropylene Produced in a Core-Back Injection Process Using Chemical Blowing Agents, *International Polymer Processing*, 2016, **31**(1), 26–36.

[54] https://www.autodesk.com/products/moldflow/overview, (Ziyaret tarihi: 16 Aralık 2019)

[55] https://knowledge.autodesk.com/support/moldflow-insight/troubleshooting, (Ziyaret tarihi: 3 Ocak 2020)

[56] Kishbaugh L., Yang A., Shiu L., Chang D., A Mould Fillig Simulation and Validation Data for Microcellular Foam Molding Processes, *Blowing Agents and Foaming Processes 2013 Conference Proceedings*, Smithers Rafra, 2013.

[57] Kamber O.S., The Effects of Injection Parameters and Foaming Agent on Dimensional Accuracy of Produced Parts in Plastic Injection Molding, *Acta Physica Polonica A*, 2019, **135**(5), 1028-1032.

[58] Hyun K., Sohn J., Ryu Y., Kim S., Cha S., Warpage Reduction of Glass Fiber Reinforced Plastic Using Microcellular Foaming Process Applied Injection Molding, *Polymers*, 2019, **11**(36), 1-12.

[59] Thompson M., Hrymak R., Torres N., Rheology Studies of Polyethylene/Chemical Blowing Agent Solutions Within an Injection Molding Machine, *Polymer Engineering and Science*, 2005, **45**(8), 1108-1118.

[60] Ruiz J., Vincent M., Agassant J., Claverie A., Huck S., Morphological Analysis of Microcellular PP Produced in a Core-Back Injection Process Using Chemical Blowing Agents and Gas Counter Pressure, *Polymer Engineering and Science*, 2015, **55**(11), 2465-2473.

[61] Arroyo C., Antonio J., Ignacio J., Pe´rez M., Moulded Polypropylene Foams Produced Using Chemical or Physical Blowing Agents: Structure–Properties Relationship, *Journal of Material Science*, DOI: 10.1007/s10853-012-6357-7.

[62] Ruiz J., Vincent M., Agassant J., Sadik T., Pillon C.,Carrot C., Polymer Foaming with Chemical Blowing Agents: Experiment and Modeling, *Polymer Engineering and Science*, 2014, **55**(9), 2018-2029.

[63] Kim H., Sohn J.,Ryu Y., Kim S., Cha S., Warpage Reduction of Glass Fiber Reinforced Plastic Using Microcellular Foaming Process Applied Injection Molding, *Polymers*, DOI:10.3390/polym11020360.

[64] Chang E., Mayesha B., Li X., Mohebbi A., Park C., Optimizing Chemical Blowing Agent Content in Foam Injection Molding Process of Polypropylene, *SPE Antec*, 2017, **30**(10)1571-1574.

[65] Sun B., Jiang C., Wang H., Optimization Design of Injection Mold for Rolling Comb Based on Mold Flow, *Material Science and Engineering*, DOI: 10.12783/dtcse/icmsie2017/18697.

[66] Guang-hong Hu & Zhen-shan Cui, Effect of Packing Parameters and Gate Size on Shrinkage of Aspheric Lens Parts, *Journal of Shanghai Jiaotong University (Science)*, 2010, **15**, 84–87.

[67] Koszkul J., Nabialek J., Viscosity Models in Simulation of The Filling Stage of The Injection Molding Process, *Journal of Materials Processing Technology*, DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2004.09.027.

[68] Colmenero J., Paramio M., Karlinger P., Doñate1 C., A New Procedure for Calculating Cycle Time in Injection Molding Based on Plastic Part Geometry Recognition, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, DOI: 10.1007/s00170-018-2080-0.

[69] Oktem H., Erzurumlu T., Uzman I., Application of Taguchi Optimization Technique in Determining Plastic Injection Molding Process Parameters for a Thin-Shell Part, *Materials & Design*, DOI: 10.1016/j.matdes.2005.12.013.

[70] Özçelik B., Erzurumlu T., Comparison of the Warpage Optimization in the Plastic Injection Molding Using Anova, Neural Network Model and Genetic Algorithm, *Journal of Materials Processing Technology*, 2006, **171**(3), 437-445.

[71] Unal H., Yetgin S. H., Polipropilen Köpük Malzemenin Mekanik Özelliklerine ve Hücre Morfolojisine Proses Şartlarının Etkisinin İncelenmesi, *6th International Advanced Technologies Symposium (IATS'11),* 2011.

[72] Zhang S., Dubay R., Charest M., A Principal Component Analysis Model-Based Predictive Controller for Controlling Part Warpage in Plastic Injection Molding, *Expert Systems with Applications*, DOI: 10.1016/j.eswa.2014.11.030.

KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER

[1] **Bozkurt B.**, Öktem H., Kimyasal Ajan Katkılı Köpürtme Proseslerinin Karşılaştırmalı Akış Analizi ve Gerçek Üretimi, *4. Uluslararası Marmara Fen Bilimleri Kongresi (Imascon)*, Kocaeli, 2020.

ÖZGEÇMİŞ

Barış Bozkurt 20 Şubat 1991'de Hatay'da doğdu. İlk, orta ve lise öğrenimini İskenderun'da tamamlayıp, İstiklal Makzume Anadolu Lisesi'nden mezun olmuştur. 2009 yılında Yıldız Teknik Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümünü kazandı. Üniversite hayatı boyunca plastik enjeksiyon alanında çalışan Brightworks firmasında yarı zamanlı çalışmıştır. Toyota Motor Türkiye fabrikasında Toyoda Gosei UK firmasının proje mühendisi olarak çalışmaya başlamıştır. Çalışma hayatının yanında Kocaeli Üniversitesi Polimer Bilimi ve Teknolojisi Bölümü'nde yüksek lisans eğitimine 2017 yılında başlamıştır. Kariyerine Brightworks çatısı altında Şirket Müdürü olarak devam etmektedir.