



YAKLAŞIK ÇÖZÜM TEKNİKLERİNİ KULLANARAK PLASTİK ENJEKSİYON İŞLEMLERİNİN TASARIM METODOLOJİSİ

Oğuz KAYABAŞI^{1*}, Hüseyin ÇAKMAK²

¹ Düzce Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Biyomedikal Mühendisliği Bölümü, Düzce, Türkiye

² Düzce Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Bölümü, Düzce, Türkiye

Anahtar Kelimeler

*Enjeksiyon parametreleri,
Taguchi deney tasarımı,
Plastik akış simülasyonu,
Monte Carlo simülasyonu.*

Öz

Bu çalışmada, istatistiksel deney tasarım yöntemleri kullanılarak hazırlanan deney setine uygun olarak yapılan akış analizleri ile enjeksiyon parametreleri optimize edilmiştir. Elde edilen sonuçları değerlendirmek için, ilk olarak istatistiksel deney yazılımı olan MiniTab vasıtası ile uygun bir regresyon modeli oluşturulmuştur, model katsayılarının doğruluğunu saptamak için F testi, parametrelerin sonuçlar üzerindeki etkisini saptamak için ANOVA testi uygulanmıştır. İkinci olarak süreç, bir hipoteze dayanan değişken yaratılarak, Monte Carlo simülasyonu ile optimize edilmiştir. Monte Carlo simülasyonu, analitik olarak belirsiz durumlarda varsayımlara dayanan hesaplamaları yapmak için kullanılır. Kalıp sıcaklığı, soğutma suyu sıcaklığı, enjeksiyon basıncı gibi işlem parametreleri sabit değildir. Bu belirsizliği gidermek için süreç hipoteze dayalı değişken üretmek suretiyle optimize edilmiştir. Son aşamada farklı optimizasyon yöntemleri kullanılarak elde edilen sonuçlar karşılaştırılarak, hangi yöntemin daha doğru sonuç verdiği değerlendirilmiştir. Sonuç olarak Monte Carlo simülasyonu ile minimum çarpılma değeri elde edilmiştir. Sonuç bölümünde yer alan Tablo 7 ve Grafik 1 üzerinden bu sonuç daha net anlaşılmaktadır. Plastik enjeksiyon işlemi gibi birçok parametrenin sonuç üzerinde etkin olduğu üretim yöntemleri için yapılacak optimizasyon çalışmalarında, belirsizlikleri gidermek için hipoteze dayalı rastsal parametre değerleri ile çalışmak avantaj sağlamaktadır.

DESIGN METHODOLOGY OF PLASTIC INJECTION PROCESS USING APPROXIMATE SOLUTION TECHNIQUES

Keywords

*Injection parameters,
Taguchi DOE,
Plastic flow simulation,
Monte Carlo simulation.*

Abstract

In this study, Moldflow analysis performed in accordance with the set of design of experiment by using statistical experimental design methods for optimization of injection parameters. In order to evaluate the results, firstly a proper regression model created by making statistical analysis by means of Mini Tab software. Variance analysis (Anova) performed to determine the F test of the accuracy of the model coefficients and the effects of the parameters. Secondly, the process optimized by creating variable based on a hypothesis by means of Monte Carlo simulation. Monte Carlo simulation is used to make calculations based on assumption in case of indeterminating propagation in traditional analytical models and analytical techniques do not work properly. In this study, the process parameters such as mould temperature, cooling water temperature, injection pressure are never constant value. To remove this uncertainty, the process optimized by generating the variable based on hypothesis. Evaluated which method gives more accurate results by comparing to results being obtained by different optimization method in the final phase. As a result, minimum warpage value was provided by Monte Carlo simulation method. This result more clearly understood with Table 7 and Graph1 in Result Section. Optimization studies to be performed for production methods where many parameters such as plastic injection process are effective on the result, it is advantageous to work with random parameters value based on hypothesis to eliminate uncertainties.

* İlgili yazar / Corresponding author: oguzkayabasi@duzce.edu.tr, +90-380-542-1036

Alıntı / Cite

Kayabaşı, O., Çakmak, H., (2019). Yaklaşık Çözüm Tekniklerini Kullanarak Plastik Enjeksiyon İşlemlerinin Tasarım Metodolojisi, Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 7(3), 627-638.

Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)

O. Kayabaşı, 0000-0003-0129-1113

H. Çakmak, 0000-0002-0294-609X

Makale Süreci / Article Process

Başvuru Tarihi / Submission Date 14.02.2019

Revizyon Tarihi / Revision Date 05.04.2019

Kabul Tarihi / Accepted Date 14.04.2019

Yayın Tarihi / Published Date 15.09.2019

1. Giriş

Plastik enjeksiyon kalıplama işlemi, hızlı üretim ve düşük maliyet avantajlarından dolayı endüstride yoğun olarak kullanılan bir imalat yöntemidir. Yüksek üretim oranı, nispeten kısa kalıplama döngüsü, düşük atık oranı, pürüzsüz yüzey ve karmaşık geometrileri üretebilme imkanı sayesinde diğer üretim yöntemleri ile karşılaştırılmaz bir üstünlüğe sahiptir. Öte yandan sıklıkla karşılaşılan eksik dolun, çarpılma, büzülme, kalıntı gerilim gibi hatalar, elde edilen ürün kalitesine oldukça fazla etki etmektedir İyi bir kalıp tasarımı ve optimum işlem parametre değeri üretkenliğe, kaliteye ve ürün maliyetini belirlemede etkindir. Ürün formlarının karmaşıklaşması, müşteri kalite algısının artması sebebi ile işlem parametrelerini belirlemek için, deneme yanılma yöntemi yerine matematiksel model kullanımına ihtiyaç doğmuştur.

2. Bilimsel Yazın Taraması

Tejendra Sing vd (2014) çalışmalarında, polipropilen malzemede(PP), enjeksiyon kalıplama parametreleri çekme miktarı üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Sürecin girdileri ve çıktıları arasındaki ilişkiyi incelemede Taguchi yöntemi ve Varyans Analiz (ANOVA) tekniğini kullanmışlardır. Seçilen giriş parametreleri eriyik sıcaklığı, enjeksiyon basıncı, ütüleme basıncı ve ütüleme süresidir.

S.Kamurdin vd (2010) çalışmalarında, polimer karışımlarından imal edilen bir kabın, minimum çekme miktarını işlem parametre optimizasyonu ile Sağlamaya çalışmışlardır. Bunun için Taguchi Deney Tasarım metodu ve varyans analizini (ANOVA) kullanmışlardır. Parametrelerin çekme üzerindeki etkilerini sinyal/gürültü oranı ile belirlemişlerdir.

H.Öktem ve F.Erzincanlı [2012]çalışmalarında, bir DVD-ROM ön kapağının plastik enjeksiyonla basılması sonucunda oluşan boyutsal çekmeye etki eden en uygun işlem parametrelerini belirlemeye çalışmışlardır. Bunu gerçekleştirmek için, bir dizi moldflow akış analizi, L27 ortogonal deneysel tasarımına göre planlanan enjeksiyon parametreleri ile yapılmıştır. Daha sonra, çekmeyi etkileyen en uygun parametre aralıklarını belirlemek için, sinyal/gürültü oranını kullanmışlardır. Varyans analizi (ANOVA) ile her bir parametrenin çekme üzerindeki etkisini tespit etmişlerdir. Taguchi yöntemi ile bulunan en uygun parametre değerlerini

doğrulamak için enjeksiyon presi ile deney seti kullanmışlardır.

Kingsun Lee vd (2013) çalışmalarında, Led Lambası gövdesinin seçtikleri enjeksiyon parametrelerinin çekme miktarına etkilerini araştırmışlardır. Bunun için, Taguchi deney tasarım metodunu kullanmışlardır. Sonuçta seçtikleri parametrelerin, çekme miktarını etkili bir şekilde azalttığı anlaşılmıştır. Optimum tahmini değer ve doğrulanmış değer arasında %3.82 fark vardır.

Mohammad Saleh vd (2013) çalışmalarında parametre çokluğu ve birbirleri ile etkileşimleri nedeni ile analitik olarak modellenmesi zor olan enjeksiyon işlemi, yapay sinir ağları yardımı ile modellediler (YSA). YSA ile yapılan modellemeden sonra, hedef fonksiyonuna dönüştürülen işlem modelini, Genetik Algoritma ile optimize etmişlerdir.

A.Cellere ve G.Lucchetta (2008) çalışmalarında geri dönüştürülmüş Polipropilen hammaddesinin reolojik özelliklerinin çarpılma üzerine etkisini araştırmak için sayısal simülasyonlar kullanmışlardır. Karışımların yüksek ve düşük kayma hızında reolojik eğrilerini elde etmek için kılcal ve dönme reometre kullanılmıştır. Deneysel sonuçları ile Cross WLF modeli ve Moldflow akış simülasyonunda çarpılma tahmini yapıldı.Monte Carlo simülasyonu ile çarpılma değerleri ve robust(sağlam) tasarım için tolerans değerleri belirlendi.

Özek C. ve Çelik Y.H. (2011) çalışmalarında parametrelerin enjeksiyon işlemi üzerindeki etkilerini bulmak için YSA (Yapay Sinir Ağları) kullanmışlardır. Bunun için ilk olarak enjeksiyon makinesi, kalıp malzemesi,ürün şekli ve malzemesi gibi girdi çıktı parametrelerini düzenleyen YSA(Yapay Sinir Ağ) modeli oluşturmuşlardır. Daha sonra modeli eğtirmek için teorik ve deneysel çalışmalar yapmışlardır. YSA(Yapay Sinir Ağ) modelinden elde edilen sonuçlar hem Moldflow analizleri hem de deneysel çalışmalar sonucunda elde edilen enjeksiyon süresi ile karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak enjeksiyon süresi açısından deneysel çalışmalarla model arasında %14,2, Moldflow analizi ve model arasında %51,6 fark olduğu gözlemlenmiştir.

Özek C. ve Çelik Y.H. (2009) çalışmalarında plastik enjeksiyon kalıp imalat maliyetini hesaplayan bir program geliştirmişlerdir. Bunun için ilk olarak kalıp

malzemesi, üretilecek plastik malzeme tipi, enjeksiyon makine özellikleri, standart kalıp elemanları, üretilecek parçanın geometrik özelliklerinin girildiği bir ara yüz oluşturmuşlardır. Program bu parametrelere göre optimum kalıp maliyetini hammadde maliyeti, tasarım maliyeti, işçilik maliyeti ve işleme maliyetinin toplamı olarak hesaplamaktadır. Program etkinliğini test etmek amacıyla plastik dirsek parçası üzerinde deneysel çalışma yapılmıştır.

Rishi Pareek ve Jaiprakash Bhamniya (2013) çalışmalarında ergiyik sıcaklığı, enjeksiyon basıncı ve soğuma süresi parametrelerini optimize etmek için Taguchi deney tasarım yöntemi ve ANOVA (Varyans analizi) kullanmışlardır. Bu amaçla ilk olarak Polikarbonat hammaddeden çay tepsisini farklı eriye sıcaklığı, soğuma süresi ve enjeksiyon basıncı değerleri ile üretmişlerdir. Elde edilen her bir iş parçasının çekme dayanım testini gerçekleştirmişlerdir. Elde edilen sonuçları varyans analizi ile değerlendirerek optimum işlem parametrelerini belirlemişlerdir.

Özek C. ve Çelik Y.H (2011) çalışmalarında plastik T dirsek enjeksiyon imalatı için farklı enjeksiyon basınç, ergiyik sıcaklık ve kalıp sıcaklık değerlerini denemişlerdir. Her bir parametre değişikliği için elde edilen hacimsel büzülme, enjeksiyon süresi ve soğutma süresi değerlerini deneysel olarak incelemişlerdir. Elde edilen veriler Bulanık Mantık modeline tanımlanmıştır. Bulanık mantığın ürettiği sonuçlara göre, basınç ve ergiyik sıcaklığının artması ile enjeksiyon süresinin azaldığı, diğer taraftan hacimsel büzülme ve soğuma süresinin arttığı görülmüştür.

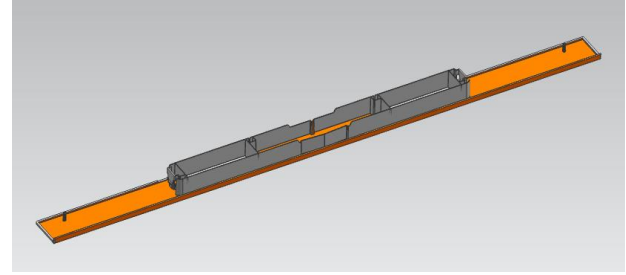
Bu çalışmada, buzdolabında kullanılan üst panel kaplama (top panel cover) parçasının plastik enjeksiyon işlemi için bir tasarım metodolojisi geliştirilmiştir. Bu amaçla Taguchi metodu kullanarak deney seti oluşturulmuştur. Bu deney setine uygun olarak akış simülasyonları yapılmıştır. ANOVA ile parametrelerin çarpılma miktarına etkileri belirlenmiştir. Elde edilen deterministik sonuçlar kullanılarak işlemin Monte Carlo simülasyonu yardımı ile olasılıksal analizi yapılmıştır. Birden fazla mühendislik ve istatistik tekniğinin birlikte kullanımı sonucunda deneme-yanılma yönteminin yerini alabilecek bir metodoloji ortaya konulmuştur.

3. Materyal ve Yöntem

3.1. Problemin Tanımlanması

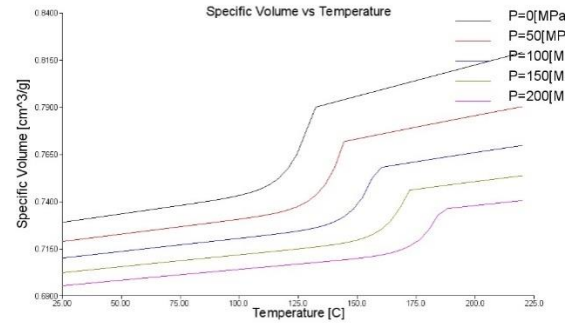
Çalışmaya konu olan parça buzdolabında ürünün kalitesini belirleyen görsel parçalardan biridir. Bu sebeple çöküntü, çarpılma, birleşme izi gibi kalite kusurları kesinlikle istenmemektedir. Ayrıca montaj olacağı bölgeye tam uyumlu olmaması, müşteri tarafından algılanan kalite problemlerine sebebiyet verecektir. Şekil 1 de parçanın CAD modeli görülmektedir. Orta kısmında mukavemet arttırmak

için kaburga (feder) yapısı eklenmiştir. Tipik ince cidarlı parça tasarımına örnektir.



Şekil 1. Siemens NX programında tasarlanmış 3D model

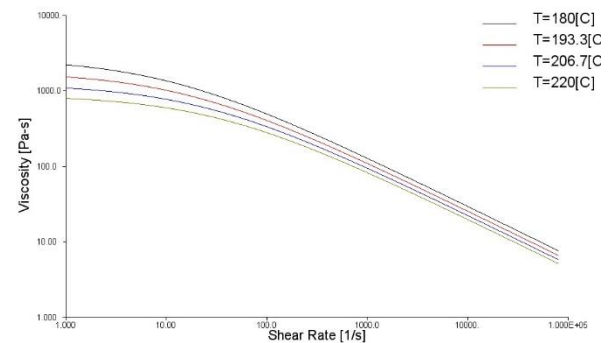
Parça PP malzeme grubundan A Shulman GMBH firması tarafından üretilen, POLYFLAM RIPP 3625 CS1 malzemesinden basılmaktadır. Bu malzemeye ait PVT grafiği, viskozite-kayma oranı grafiği ve malzeme işlem özellikleri Şekil 2 de görülmektedir.



a)

Mold surface temperature	60	C
Melt temperature	200	C
Mold temperature range (recommended)		
Minimum	40	C
Maximum	80	C
Melt temperature range (recommended)		
Minimum	180	C
Maximum	220	C
Absolute maximum melt temperature	230	C
Ejection temperature	110	C
View test information for ejection temperature...		
Maximum shear stress	0.25	MPa
Maximum shear rate	100000	1/s

b)



c)

Şekil 2. a) PVT grafiği b) Malzeme işlem özellikleri c) Viskozite-kayma oranı grafiği

Seri üretimi devam eden parça için müşteri tarafından çarpılma problemi geri bildirim yapılmıştır. Şekil 3 de çarpılma sebebiyle uç bölgesinde açıklık kalmış parça montajı görülmektedir. Ayrıca CMM (Koordinat ölçme cihazı) ile hazırlanan ölçüm raporlarına göre parça, teknik resimde yazan ölçülere uygun değildir. Uç bölgelerde görülen çarpılma nedeni ile paralellik ve doğrusalık ölçüleri tolerans dışıdır. Bu hali ile parça, kalite birimi tarafından onaylanmamaktadır. Şekil 4 de CMM (koordinat ölçüm cihazı) ve Şekil 5 te parça teknik resminde ilgili ölçüler görülmektedir. 0.7mm tolerans içinde olması gereken paralellik değeri 4mm ye kadar çıkmaktadır. 1mm olarak öngörülen doğrusalık değeri 3,9 mm olarak ölçülmüştür. 1.5mm olarak belirlenen doğrusalık değeri 3.89mm olarak ölçülmüştür. Parça uç bölgelerinde meydana gelen çarpılma, tolerans dışı ölçülere sebebiyet vermektedir.



Şekil 3. Dolap üzerine takılan parçada çarpılma sebebi ile meydana gelen açıklık.

Kalıp 1.Göz

Test results				Cavity	1 of	Part weight (measured):	Actual value (Supplier)		
Item-No	Nominal value	Upper allowed deviation	Lower allowed deviation	Additional Information			1. NUMUNE	2. NUMUNE	3. NUMUNE
Drawing Field:									
7.1010	0	0,7	0				4,085	3,914	2,387
8.822	0	1	0				3,359	3,868	2,845
9.H2	39,4	0,3	-0,3				38,842	38,835	38,787
10.A16	0	1,5	0				3,859	3,616	3,145

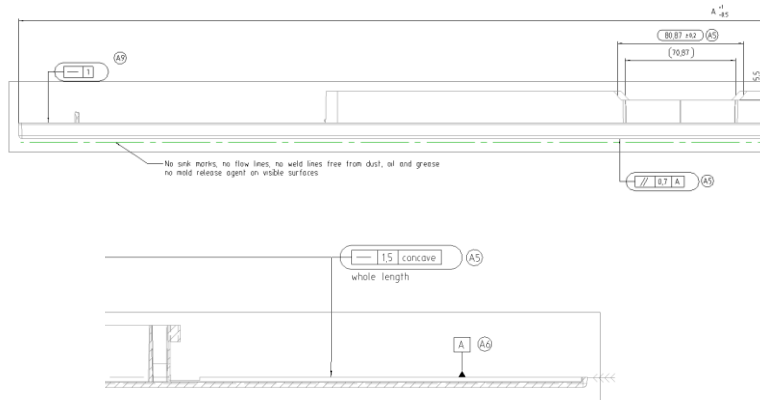
Kalıp 2.Göz

Test results				Cavity	1 of	Part weight (measured):	Actual value (Supplier)		
Item-No	Nominal value	Upper allowed deviation	Lower allowed deviation	Additional Information			1. NUMUNE	2. NUMUNE	3. NUMUNE
Drawing Field:									
7.1010	0	0,7	0	[Parallelism (0,7) A]			2,458	1,272	2,388
8.822	0	1	0	[Straightness (1)]			2,347	1,718	1,915
9.H2	39,4	0,3	-0,3				38,769	38,714	38,879
10.A16	0	1,5	0	[Straightness (1,5) (overall)]			2,523	1,785	2,384

Şekil 4. CMM ölçü raporu

3.2. Taguchi Deney Setinin Oluşturulması

Akış simülasyonunda kullanılacak deney tasarımının oluşturulması için ilk olarak tedarikçi tarafından sağlanan ve hali hazırda üretimde kullanılan, parametre değerlerinin bulunduğu işlem sayfası incelenmiştir (Şekil 6). İşlem sayfası incelendiğinde çevrim süresi 65sn, ütüleme basınç ve süreleri 45Bar-5sn,35Bar-3sn,35Bar-3sn şeklinde bir ütüleme profili uygulandığı görülmektedir. Ergiyik sıcaklığı nozzle bölgelerine göre 235-240-235-230-220 C° dir. Enjeksiyon basınçları yine bar cinsinden vida pozisyonuna göre 95Bar-10,95Bar-20,95Bar-75 şeklinde ayarlanmıştır. Soğutma suyu sıcaklıkları erkek kalıp için 55C° ve dişi kalıp için 40° olarak belirlendiği görülmektedir.

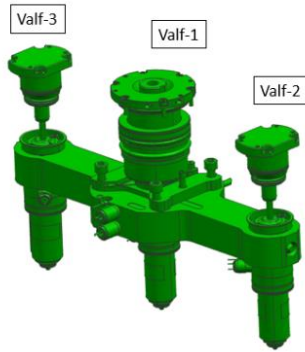


Şekil 5. Parça teknik resmi

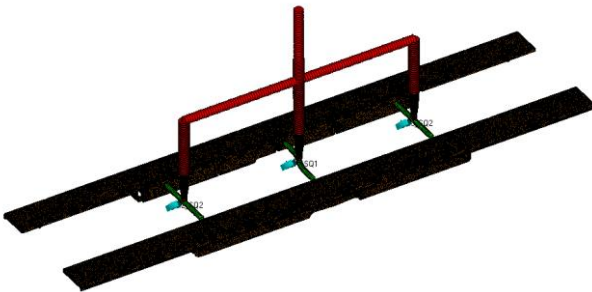
BARREL TEMP (C)								WATER TEMP (C)			
Nozzle	Cylinder 1	Cylinder 2	Cylinder 3	Cylinder 4	Cylinder 5	Cylinder 6	Cylinder 7	Cylinder 8	Dipi / cavity	Erkekçone	
9,35	240	9,35	9,30	240					Su	3,3	
									Kalıp	40	
Sekansiyel Valf								Açma (sn)		Kapanma (sn)	
1								1			
2								2			
3								3			
4								4			
5								5			
Enjeksiyon Basınçları / Inj. Pres.								Enjeksiyon Hızları / Inj. Vel.		Enjeksiyon Pozisyonları / Inj. Pos.	
1								9,5	9,5	9,5	
2								9,5	9,5	9,5	
3								10	20	7,5	
Ölülme Basınçları / Packing Pres.								Ölülme Hızları / Packing vel.		Ölülme Zamanları / Packing time	
4								4,5	3,5	3,5	
5								40	10	10	
6								5	3	3	
Enjeksiyon Zamanları (Injection times)											
Kalıp Kapanma/Açma(sn)	Mecha-fıçıl zam.(sn)	Enjeksiyon(Inj. Time)	Ölülme Packing(Pre)	Soğutma (Cooling t)	Çevrim(Cycle t)						
		1,1		3,5	6,5						

Şekil 6. İşlem sayfası

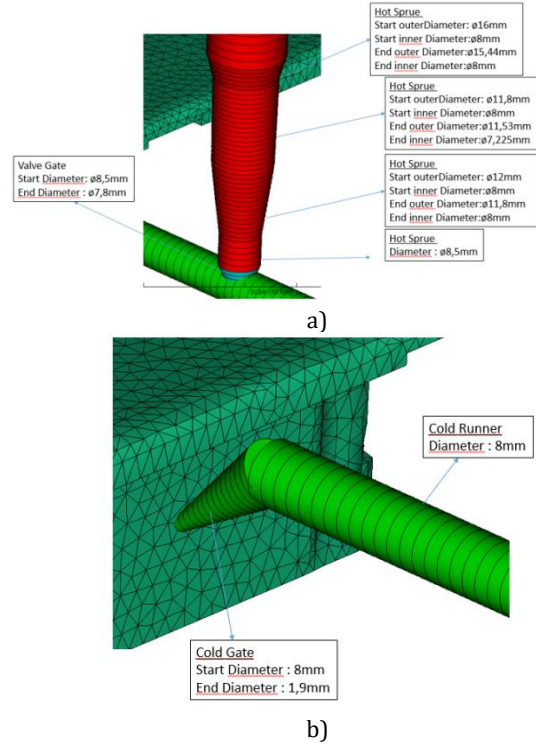
Moldflow Synergy simülasyon yazılımında kalıp tasarımına uygun olarak sonlu elemanlar modeli oluşturulmuştur. Sekansiyel valfler ve soğuk yolluklar beam tekniği ile modellenmiştir. Dual domain mesh tekniği ile oluşturulmuş model, yaklaşık 127 bin üçgensel eleman (triangle), 63479 adet bağlantı düğüm elemanı (connected nodes) tan oluşmaktadır. Şekil 7 de kalıp tasarımından referans alınan yolluk sistemi ve Şekil 8 de oluşturulan sonlu eleman modeli görülmektedir. Sekansiyel valfler ve soğuk yolluk sistemine ait detay ölçüler Şekil 9 da görülmektedir.



Şekil 7. Sekansiyel Valfler



Şekil 8. Sonlu Elemanlar Modeli



Şekil 9. a) Sekansiyel valf ölçüleri b) soğuk yolluk ölçüleri

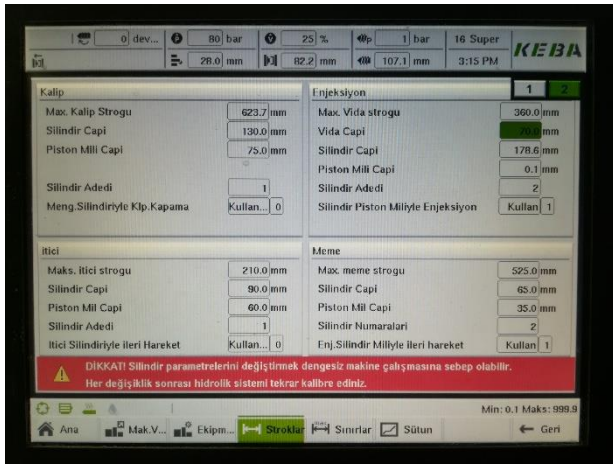
İlk olarak işlem sayfasındaki parametre değerleri referans alınarak dolun simülasyonu yapılması düşünülmüştür. İşlem sayfasında basınç değerleri Bar cinsinden hidrolik basınç değerleridir. Bu değerlerin Moldflow yazılımı ile korelasyonunu sağlayabilmek için basınç kayıplarını hesaplamak gerekir. Bu amaçla itensification ratio (basınç katlama oranı) hesaplandı. Bu oranı kullanarak işlem sayfasındaki hidrolik basınç değerlerinden Moldflow yazılımında kullanacağımız enjeksiyon ve ütleme basınç değerleri bulundu. Basınç katlama oranını hesaplayabilmek için ilk olarak Şekil 10 da makine bilgi sayfasından vida çap değerine bakıldı ve Denklem 1 de toplam vida alanı hesaplandı. Daha sonra Şekil 11 de enjeksiyon makine kataloğundan silindir alanı hesaplamak için gerekli değerlere bakılarak Denklem 2 de hesaplandı. Burada piston ve ortasından geçen mil olduğu için her ikisinin çaplarından alanları hesaplandı ve birbirinden çıkartıldı. Ayrıca 2 adet silindir olduğu için çıkan sonuç 2 ile çarpıldı. Son olarak Denklem 3 te bulunan değerler yerine koyularak basınç katlama oranı hesaplandı. Basınç katlama oranının daha detaylı tanımı Şekil 12 de yer almaktadır.

$$Vida Alanı = \frac{Vida \text{ çapı}^2 \times \pi}{4} = \frac{70^2 \times 3,14}{4} = 3846,5 \quad (1)$$

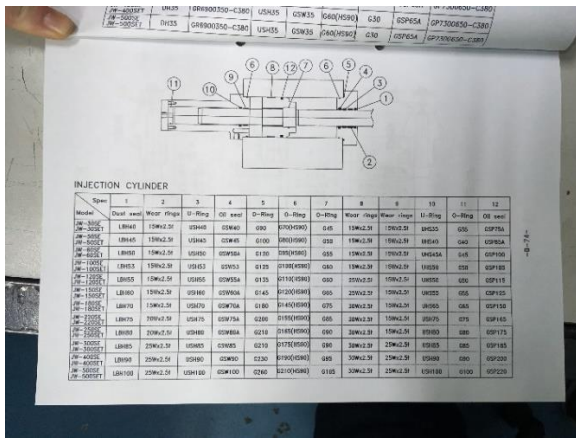
$$Silindir alanı = 2x \left(\frac{piston \text{ çapı}^2 \times \pi}{4} - \frac{Mil \text{ çapı}^2 \times \pi}{4} \right) \quad (2)$$

$$= 2x \left(\frac{190^2 \times 3,14}{4} - \frac{90^2 \times 3,14}{4} \right) = 2x21980 = 43960 \text{ mm}^2$$

$$Basınç Katlama Oranı = \frac{Silindir Alanı}{Vida alanı} = \frac{43960}{3846,5} = 11,4 \quad (3)$$

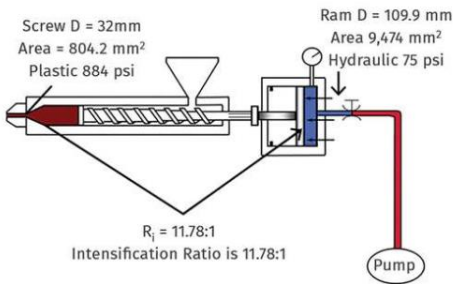


Şekil 10. Enjeksiyon makinesi bilgi sayfası



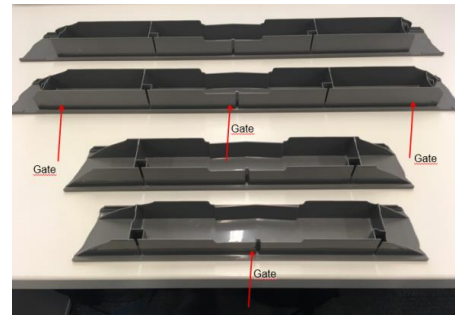
Şekil 11. Makine kataloğu

Hydraulic vs. Plastic Pressure



Şekil 12. Basıç katlama oranı

Moldflowda yapılan dolum analizi sonucu elde edilen dolum süresinin doğrulanması için eksik dolum çalışması yapıldı. Bu amaçla sekansiyel valflerin açıldığı anda (2.sn sonu) parçanın ne kadarının dolduğu gözlemlendi. Şekil 13 te yapılan eksik dolum çalışması ve Şekil 14 te Moldflow dolum analiz sonuçları görülmektedir. Fiziksel parçada elde edilen sonuç ile Moldflow analiz sonucu paralellik göstermektedir. Böylece optimizasyon çalışmalarında kullanacağımız dolum süresi belirlenmiş oldu.



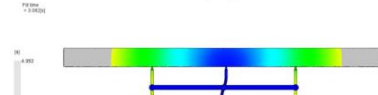
a)



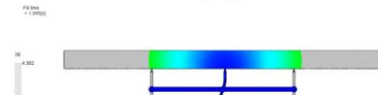
b)

Şekil 13. a) Parça üzerinde işaretlenen yolluk noktası b) Her iki kalıp gözünde 2sn ve 3sn sonunda dolum miktarı

3sn sonunda parça dolm miktarı

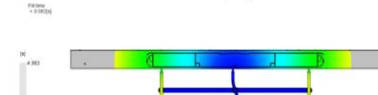


2sn sonunda parça dolm miktarı

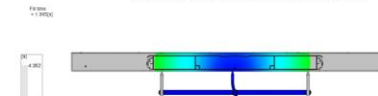


a)

3sn sonunda parça dolm miktarı



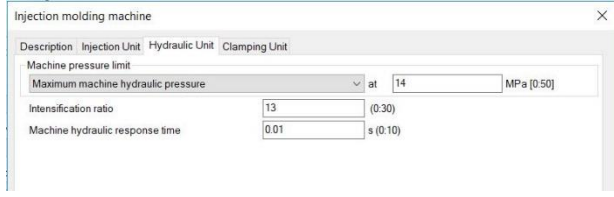
2sn sonunda parça dolm miktarı



b)

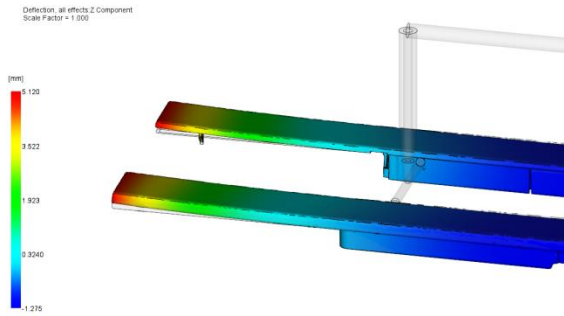
Şekil 14. a)Parça dolumu ön görünüm b)Parça dolumu arka görünüm

İşlem sayfasındaki basınç değerleri, basınç katlama oranı ile birlikte kullanılarak Moldflow programında fiziksel şartlar simüle edildi. Şekil15 te basınç katlama oranının ve basınç değerinin girildiği program ara yüzü yer almaktadır.



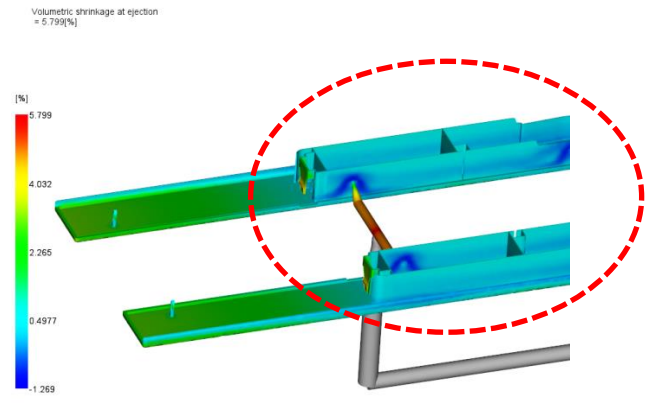
Şekil 15. Basınç katlama oranının (intensification ratio) programa tanıtıldığı arayüz.

Fiziksel şartların, yapılan korelasyon çalışması ile Moldflow aktarılması sonucunda fiziksel parçaya benzer çarpılma değerinin elde edildiği dolmuş ve çarpılma analizi yapıldı. Şekil 16 da çarpılma analizi sonucu elde edilen çarpılma değerleri görülmektedir.

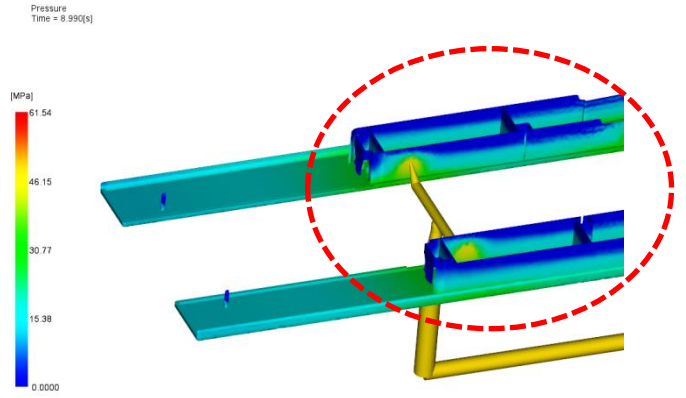


Şekil 16. Fiziksel şartlara benzer Çarpılma Analiz Sonucu

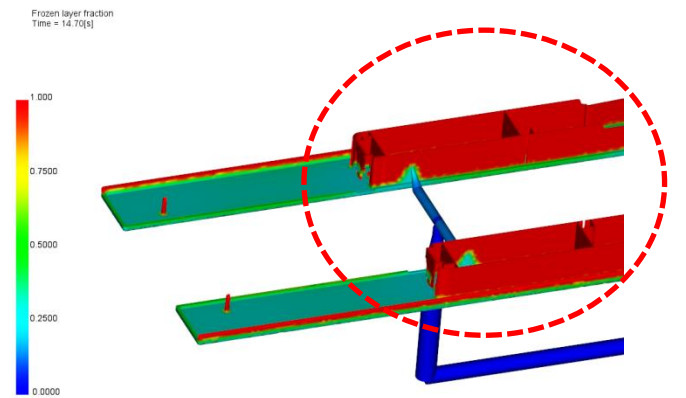
Simülasyonda çekme, basınç ve donma yüzdesi sonuçları incelendi. Şekil17 de çekme değerleri incelendiğinde feder bölgesinin çekme oranının yüzeye göre çok düşük olduğu görülmektedir. Basınç sonuçları feder bölgesindeki basınç değerinin zamanla düştüğünü göstererek bunu doğrular niteliktedir. Bu durumun daha iyi anlaşılabilmesi için donma oranı sonucu incelendi.



a)



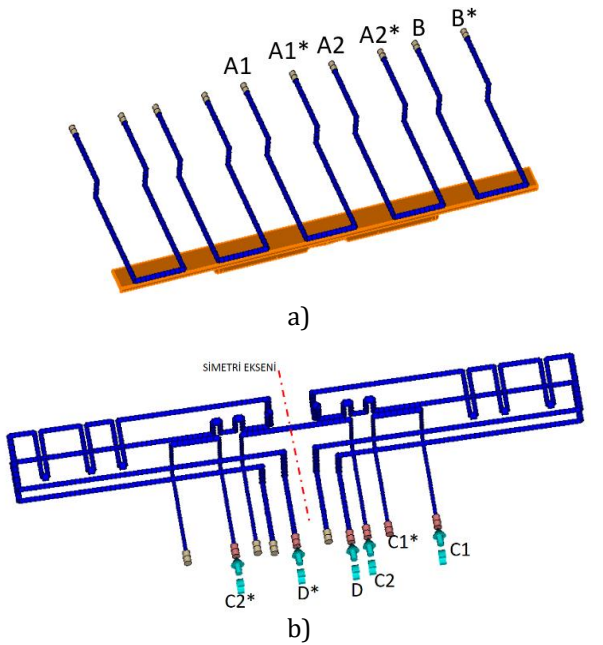
b)



c)

Şekil 17. a)Çekme oranı sonucu b)Basınç sonucu c)Donma oranı sonucu

Yapılan bu çalışmalardan sonucunda feder bölgesinin daha geç donmasını sağlamak, bu sayede basınç iletimini iyileştirmek ve sonuçta bölgesel çekme farkları sebebiyle oluşan çarpılmayı azaltmanın mümkün olduğu anlaşıldı. Kalıp soğutma kanallarının su sıcaklıklarının çarpılmayı optimize etmek için, değişken parametreler olarak kullanılmasına karar verildi. Şekil 18 de kalıp soğutma kanalları ve Tablo 1 de soğutma kanalı çap değerleri görülmektedir.

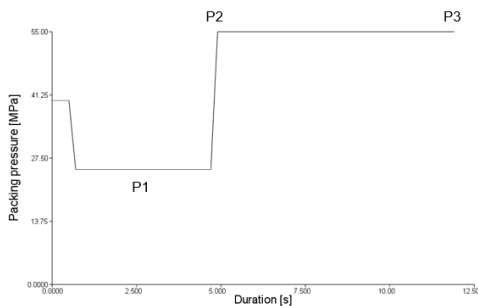


Şekil 18. a) Dişi Kalıp soğutma kanalları b) Erkek kalıp soğutma kanalları

Tablo 1. Soğutma kanalı çap ölçüleri

Tanım	Tip	Parametre	Çap
A1	Giriş	Dişi kalıp_Soğutma_kanalı_1	10mm
A2	Giriş	Dişi kalıp_Soğutma_kanalı_1	10mm
B	Giriş	Dişi kalıp_Soğutma_kanalı_2	10mm
C1	Giriş	Erkek kalıp_Soğutma_kanalı_1	6mm
C2	Giriş	Erkek kalıp_Soğutma_kanalı_1	6mm
D	Giriş	Erkek kalıp_Soğutma_kanalı_2	8mm
A1*	Çıkış	-	10mm
A2*	Çıkış	-	10mm
B*	Çıkış	-	10mm
C1*	Çıkış	-	6mm
C2*	Çıkış	-	6mm
D*	Çıkış	-	8mm

Programda ütleme fazının tanımlanması için kullanılan yöntemlerden biri ütleme basınç ve sürelerinin verildiği ütleme profilinin oluşturulmasıdır. Profil oluşturulurken Enjeksiyon makinesinden farklı olarak vida konumu yerine süre kullanılmaktadır. İşlem sayfasındaki hidrolik basınç değerlerinin basınç katlama oranı ile korele edilmesi sonucu elde edilen ütleme basınç değerleri, değişken parametreler için aralık değerleri olarak kullanılmıştır. Şekil 19 da oluşturulan ütleme profili ve tanımlanan değişken parametreler görülmektedir.



Şekil 19. P1,P2,P3 ütleme basınç parametreleri ve programa tanıtılan ütleme profili

Profilden anlaşılacağı üzere, lineer bir ütleme basıncında (P1) bir süre tutma yapıldıktan sonra, basınç değeri artırılarak oluşan yeni basınç değerinde (P2) yeniden tutma işlemi yapılması öngörülmüştür.

Sonuç olarak ütleme basınç değerleri ve soğutma suyu sıcaklık parametrelerinden 7 değişken ve üç seviyeli L27 Ortogonal Taguchi deney seti oluşturulmuştur. Tablo.2'de Akış analizlerinde kullanılacak parametreler ve seviyeleri mevcuttur.

Tablo 2. Taguchi Deney seti oluşturulurken kullanılan parametreler ve seviyeleri

PARAMETRELER	SEVİYE-1	SEVİYE-2	SEVİYE-3
Dişi kalıp_Soğutma_kanalı_1 (°C) cav1	35	40	45
Dişi kalıp_Soğutma_kanalı_2 (°C) cav2	25	35	40
Erkek kalıp_Soğutma_kanalı_1 (°C) core1	35	40	45
Erkek kalıp_Soğutma_kanalı_2 (°C) core2	60	65	70
Ütleme Profil Basıncı 1 (Mpa) P1	20	25	30
Ütleme Profil Basıncı 2 (Mpa) P2	45	55	65
Ütleme Profil Basıncı 3 (Mpa) P3	45	55	65

Tablo 3. Taguchi Deney Seti

DENE Y NO	Cav. 1	Cav. 2	Core. 1	Core. 2	Pres. 1	Pres. 2	Pres. 3
1	35	25	35	60	20	45	45
2	35	25	35	60	25	55	55
3	35	25	35	60	30	65	65
4	35	35	40	65	20	45	45
5	35	35	40	65	25	55	55
6	35	35	40	65	30	65	65
7	35	40	45	70	20	45	45
8	35	40	45	70	25	55	55
9	35	40	45	70	30	65	65
10	40	25	40	70	20	55	65
11	40	25	40	70	25	65	45
12	40	25	40	70	30	45	55
13	40	35	45	60	20	55	65
14	40	35	45	60	25	65	45
15	40	35	45	60	30	45	55
16	40	40	35	65	20	55	65
17	40	40	35	65	25	65	45
18	40	40	35	65	30	45	55
19	45	25	45	65	20	65	55
20	45	25	45	65	25	45	65
21	45	25	45	65	30	55	45
22	45	35	35	70	20	65	55
23	45	35	35	70	25	45	65
24	45	35	35	70	30	55	45
25	45	40	40	60	20	65	55
26	45	40	40	60	25	45	65
27	45	40	40	60	30	55	45

Minitab programında, Tablo.2'deki parametre ve seviyeler kullanılarak oluşturulan deney seti Tablo 3 de görülmektedir. Deney setinde görüleceği üzere, her bir değişken parametre için üç seviye deney yapılması öngörülmüştür. Toplamda 27 adet moldflow analizi ile işlem parametreleri optimize edilmiştir.

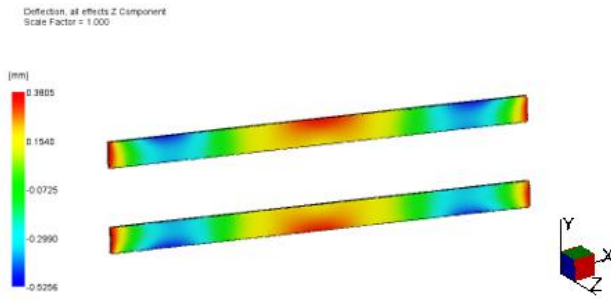
3.3. Plastik Akış Simülasyonu

Değişken olarak belirlenen parametreler dışında her akış simülasyonunda kullanılan sabit parametre değerleri Tablo 4'te gösterilmiştir.

Tablo 4. Sabit parametre değerleri

Ergiyik Sıcaklığı	260C°
Kalıp açılma Süresi	5sn
Enjeksiyon+ütüleme+soğutma süresi	45sn
Akış Oranı	100 cm ³ /sn
Enjeksiyon-ütüleme geçiş şartı	97%
Ütüleme-Tutma kontrol türü	ütüleme basıncı-zaman

Yapılan akış analizleri sonucunda, min. çarpılma değeri Z eksenini için + yönde 0,38 mm ve - yönde 0,53 mm bulunmuştur. Parça geometrisi ve montaj şartları düşünüldüğünde, diğer yönlerde oluşabilecek çarpılma değerlerinin herhangi bir kalite problemine yol açmayacağı öngörülmüş, bu nedenle diğer eksenlerdeki çarpılma değerleri ihmal edilmiştir. Şekil.20'de min. çarpılma sonucu görülmektedir. Çarpılma miktarı, belirtilen limit değerlerin içinde kalmıştır.



Şekil 20. Akış analizleri sonucu elde edilen Z yönünde min. çarpılma değeri

3.4. Sayısal Analiz

Tüm sayısal analiz işlemleri Minitab17 paket programında gerçekleştirilmiştir. Ortogonal deneysel tasarıma göre planlanmış akış analizlerinden elde edilen sonuçlar, S/N oranı içine taşınarak analiz edilmiştir. S/N oranı, istenen değerlerden çıkarılan performans karakteristiklerinin ölçülmesi için kullanılır. S/N oranı, "(S/N)SB, daha küçük-daha iyisi", "(S/N)LB, daha büyük-daha iyisi" ve "(S/N)NB, nominal-en iyisi" gibi üç temel performans karakteristiğine göre saptanır. Bahsedilen bu üç temel performans karakteristiği aşağıdaki denklemler ile ifade edilebilir (Hasan ÖKTEM, Fehmi ERZİNCANLI, 2012).

$$\frac{S}{N}SB = -10 \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right) \quad (4)$$

$$\frac{S}{N}LB = -10 \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \right) \quad (5)$$

$$\frac{S}{N}NB = 10 \log \left(\frac{1}{s^2 y} \right) \quad (6)$$

Bu çalışmada, performans karakteristiği olarak, enjeksiyon sonrasında plastik üründe oluşan çarpılma değeri kabul edilmiştir. Çarpılma değerinin olabildiğince küçük olması, kalite problemini ortadan kaldırarak, plastik ürün kalitesinin daha iyi olmasını sağlayacağından kalite karakteristiği olarak "S/N" daha küçük-daha iyisi" seçilmiştir. 7 enjeksiyon parametresi için Moldflow da elde edilen çarpılma değerlerine ait S/N oranlarının her biri Denklem (4) e göre hesaplanarak Tablo.5'te gösterilmiştir.

Tablo 5. Çarpılma değerleri S/N oranları

Deney No	Çarpılma	S/N
1	2,945	-9,382
2	1,240	-1,868
3	0,575	4,807
4	2,660	-8,498
5	1,150	-1,214
6	0,650	3,742
7	2,420	-7,676
8	1,025	-0,214
9	0,700	3,098
10	0,550	5,193
11	0,680	3,350
12	2,170	-6,729
13	0,775	2,214
14	0,785	2,103
15	2,245	-7,024
16	0,69	3,223
17	0,835	1,566
18	2,375	-7,513
19	0,455	6,840
20	1,245	-1,903
21	1,54	-3,750
22	0,57	4,883
23	1,43	-3,107
24	1,665	-4,428
25	0,595	4,510
26	1,565	-3,890
27	1,775	-4,984

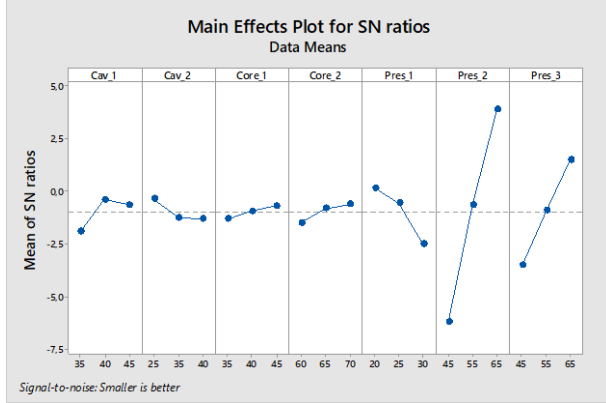
Çarpılma değerlerini veren enjeksiyon işlem parametrelerinin en etkin parametreyi bulmak için S/N oranlarına göre hazırlanmış cevap tablosu kullanılmıştır. Tablo.6 ya göre S/N oranı en büyük olan P2 parametresi, çarpılma değerini en küçük en iyi kabulüne göre en çok etki eden parametredir.

Tablo 6. S/N oranları cevap tablosu.

Level	Cav_1	Cav_2	Core_1	Core_2	P1	P2	P3
1	-1,91	-0,38	-1,31	-1,50	0,14	-6,19	-3,52
2	-0,40	-1,25	-0,94	-0,83	-0,57	-0,64	-0,92
3	-0,64	-1,32	-0,70	-0,62	-2,53	3,87	1,48
Delta	1,51	0,93	0,61	0,87	2,67	10,06	5,00
Rank	4	5	7	6	3	1	2

Hangi parametrenin, amaç fonksiyonu olan çarpılmayı ne kadar etkilediğini anlamının bir başka yolu da, her faktörün her seviyedeki etkisinin ayrıştırılmasıdır. Bunun için hesaplanan sinyal/gürültü oranlarının ortalaması, her faktörün her bir seviyesi için ayrı ayrı alınmıştır. Ek olarak, yapılan 27 deneyin ortalama gürültü oranı hesaplanmıştır.

Bu değerleri Şekil 21'de görülmektedir. Bu grafik incelendiğinde, en yüksek sinyal/gürültü oranına sahip olan Ütuleme basıncı_2 (P2) değerinin, sonuç üzerinde en etkili parametre olduğu görülmüştür. İkinci en etkili parametre ise Ütuleme basıncı_3(P3) değeri olmuştur. Grafikte her bir parametrenin çarpılmaya olan etkisi ayrı ayrı görülmektedir.



Şekil 21. S/N oranlarına göre parametre etki grafiği.

3.5. Varyans Analizi ve Regresyon Denklemi

ANOVA (Varyans analizi), enjeksiyon parametrelerinin çarpılma üzerindeki etkisini sayısal olarak belirlemek için kullanılan bir araçtır. Bu çalışmada, enjeksiyon parametrelerinin çarpılma üzerindeki etkisi ve her işlem parametresinin etki oranı Tablo 7'de verilmiştir. Parametrelerin çekme üzerindeki sayısal etkisi, Tablo 7'de yer alan F-ratio ile değerlendirilmiştir. % 95'lik ($\alpha=0.05$) güvenilirlik aralığında enjeksiyon işlem parametrelerini kontrol etmek amacıyla, F-değeri (hesaplanmış) kullanılmıştır. Tablo incelendiğinde; P2 (469,785) ve P3 (132,479) F testi değerlerinin, diğer parametrelere göre büyük olduğu görülmüştür.

Bu durum, enjeksiyon parametreleri arasında ütuleme basınç değerlerinin, min. çarpılma miktarı için en önemli iki parametre olduğu anlamına gelir. Diğer taraftan; her enjeksiyon işlem parametresinin çekme üzerindeki etkisinin yüzdesel oranları aşağıdaki gibi hesaplanmıştır.

Tablo 7. Çarpılma değeri için ANOVA tablosu

Factors	F	S	V	F-ratio	P%	Rank
Cav_1	2	0,428	0,214	20,096	2,981834	4
Cav_2	2	0,023	0,011	1,078	0,159964	7
Core_1	2	0,072	0,036	3,366	0,499443	6
Core_2	2	0,097	0,049	4,568	0,677797	5
P1	2	0,779	0,390	36,590	5,429149	3
P2	2	10,003	5,001	469,785	69,70487	1
P3	2	2,821	1,410	132,479	19,65669	2
Error	12	0,128	0,011		0,890257	
Total	26	14,350	7,122		100	

Regresyon analizi, aralarında sebep-sonuç ilişkisi bulunan iki veya daha fazla değişken arasındaki ilişkiyi belirlemek ve bu ilişkiyi kullanarak o konu ile ilgili tahminler (estimation) ya da kestirimler (prediction) yapabilmek amacıyla kullanılır. Bu analiz tekniğinde iki (basit regresyon) veya daha fazla değişken (çoklu regresyon) arasındaki ilişkiyi açıklamak için matematiksel bir model kullanılır ve bu modele regresyon modeli denir. Burada çoklu regresyon modeli oluştururken enter metodunu kullanılmıştır.

$$\text{Warp mean} = 9,36 - 0,0281 \text{ Cav}_1 + 0,00452 \text{ Cav}_2 - 0,0126 \text{ Core}_1 - 0,014 \text{ Core}_2 + 0,022 \text{ P1} - 0,07339 \text{ P2} - 0,03958 \text{ P3}$$

3.6. Monte Carlo Simülasyonu

Monte Carlo metodu, araştırılan değeri belirlemek için birçok rastgele denemenin oluşturulması esasına dayanmaktadır. Model girdilerindeki değişkenleri model çıktısına yaymak için spesifik olarak kullanımına örnektir. Simülasyon, girdileri tanımlayarak belirsizlikleri açıkça temsil etme sürecine dayanmaktadır. Monte Carlo simülasyonu, kolayca uygulanabilecek beş basit adımda gerçekleştirilir. [A.Cellere, G.Lucchetta,2008].

1-Çarpılma modelinin oluşturulması

$$y=f(X_1,X_2,\dots,X_n)$$

Burada X_1, X_2, \dots, X_7 sırasıyla değişken parametreleri ifade eder.

(Cavity_1, Cavity_2, Core_1, Core_2, P1, P2, P3)

2-Bir dizi rastgele girdinin üretilmesi

$$X_{i1}, X_{i2}, \dots, X_{i1000}$$

Burada $X_{i1}, X_{i2}, \dots, X_{i1000}$ adet üretilen rastgele parametre değerlerini ifade eder.

3-Problemin her bir deterministik giriş için değerlendirilmesi.

4- $i=1-n$ için 2. ve 3.adımların tekrarlanması

5- Sonuçların analiz edilmesi. (A.Cellere, G.Lucchetta,2008).

Sayısal modelin olasılıksal olarak değerlendirilmesi için simülasyon yapılması gerekmektedir. Enjeksiyon kalıplama işleminde simülasyon sayısının düşük tutulması, işlem parametrelerinin ana sistem üzerindeki etkisini tanımlamak için uygulanabilecek bir yöntemdir (A.Cellere ve G.Lucchetta 2008).

İlk olarak, Minitab yazılımında gerekli ara yüzde, alt ve üst limitler girilerek, her bir değişken parametre için 1000'er adet rastsal sayı oluşturulmuştur. Program

verdiğimiz alt ve üst limitler içinde, hiçbir kurala bağlı olmaksızın rastsal sayılar üretmektedir. Bu sayılar, daha önce elde edilen regresyon modeli için tahmini (estimated) çarpılma değeri hesaplamamızı sağlar.

Minitab yazılımı vasıtasıyla, daha önce elde ettiğimiz denklem (4) rastsal parametreler kullanılarak tahmini çarpılma değerleri hesaplandı. Bunun için, ilgili program ara yüzüne regresyon modeli girildi ve tüm rastsal sayılar için programa çarpılma değerleri hesaplatıldı. Tablo 8'de Monte Carlo Simülasyonu sonucu elde edilen minimum çarpılma değerini sağlayan parametreler görülmektedir. Minimum Çarpılma = 0,08229 mm olarak hesaplanmıştır.

Tablo 8. Min. Çarpılma sağlayan rastsal parametre değerleri

Cav_1 (C°)	Cav_2 (C°)	Core_1 (C°)	Core_2 (C°)	P1 (MPa)	P2 (MPa)	P3 (MPa)
43	35	44	63	20	65	62

4. Araştırma Bulguları

Tablo 9'da kullanılan tüm yöntemler ile elde edilen min. Çarpılma değeri ve optimum işlem parametreleri karşılaştırma amaçlı toplu olarak gösterilmiştir.

Tablo 9. Çarpılma değeri için ANOVA tablosu

YÖNTE M	CAV_1 C°	CAV_2 C°	CORE_1 C°	CORE_2 C°	P1 MP a	P2 MP a	P3 MP a	WAR P mm
MF	45	25	45	65	20	65	55	0,455
Taguchi	40	25	45	65	20	65	65	0,14
Monte.C	43	35	44	63	20	65	62	0,08

Üretici firma ile paylaşılan parametre değerleri neticesinde üretilen parçalarda Çarpılma değerinin tolerans içinde kaldığı saptanmıştır. Şekil 22 de yeni numuneler ile tekrar hazırlanan CMM (koordinat ölçme cihazı) raporu görülmektedir.

Geliştirdiğimiz işlem tasarım metodolojisine göre sonuca en fazla etki eden parametrenin ütleme basıncı olduğu görülmüştür. Tasarım metodolojisine eklediğimiz Monte Carlo simülasyonu ile optimum sonuçlar elde edilmiştir. Şekil 23 de tüm yöntemler ile elde edilen çarpılma değerleri ile ütleme basınçları arasındaki ilişki görülmektedir.

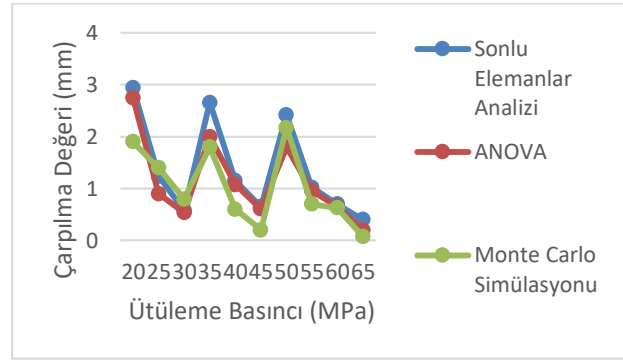
Kalıp 1.Göz

Item-No	Nominal value	Upper allowed deviation	Lower allowed deviation	Additional Information	Actual value (Supplier)
7.010	0	0,7	0		0,6
8.02	0	1	0		0,9
9.02	39,4	0,3	-0,3		39,2
10.010	0	1,5	0		1,2

Kalıp 2.Göz

Item-No	Nominal value	Upper allowed deviation	Lower allowed deviation	Additional Information	Actual value (Supplier)
7.010	0	0,7	0	[Parallelism (0,714)]	0,24
8.02	0	1	0	[Straightness (1)]	0,69
9.02	39,4	0,3	-0,3		39,12
10.010	0	1,5	0	[Straightness (1,5) (overall)]	1,36

Şekil 22. Yeni numuneler ile hazırlanan CMM (koordinat ölçme cihazı) raporu



Şekil 23. Ütleme Basıncı-Çarpılma Değeri

5. Sonuç ve Tartışma

Bu çalışmada, seri üretimde olan bir buzdolabında kullanılan görsel bir plastik parçanın minimum çarpılma değerini optimize etmek için tasarım metodolojisi oluşturulmuştur. Plastik enjeksiyon işleminin optimizasyonu için Ortogonal (L27) deneysel tasarım tekniği, S/N oranı, ANOVA ve Monte Carlo Simülasyonu birlikte entegre edilmiştir. Optimizasyon sonucundan aşağıdaki bulgular elde edilmiştir.

1. Moldflow simülasyon sonucu elde edilen enjeksiyon ve ütleme basınç değerlerinin enjeksiyon makinesinde kullanılabilmesi için korele edilmesi gerekmektedir. Bunun tersi için de aynı durum geçerlidir.
2. Bu korelasyon işlemi için vida çapı/silindir çapı oranı (basınç katlama oranı-intensification ratio) kullanımı basınç kayıplarının hesaplanması için doğru sonuçlar vermiştir.
3. Taguchi deney çalışması kullanılarak yapılacak optimizasyon çalışmaları öncesinde kullanılacak değişken parametrelerin ve aralıklarının doğru belirlenmesi çalışmanın başarılı olabilmesi için çok önemlidir.

4. Proses optimizasyonu için deneme yanılma yönteminin kullanılması tekrar sayısı sebebi ile oldukça pahalıdır. Bu nedenle deneme yanılma yönteminin yerine simülasyon ve sayısal yöntemler gibi mühendislik araçları kullanılmalıdır.
5. Ütuleme basınç değerlerinin (P2 (%69) ve P1(%19)) ,çarpılmayı etkileyen en önemli parametreler olduğu varyans (ANOVA) analizi ile görülmüştür.
6. Hesaplanan değerler ile doğrulama testinden elde edilen değerler arasındaki farkların % 95 güvenilirlik aralığı içinde olduğu görülmüştür. Bunun anlamı, çarpılma için oluşturulan sayısal modeller yeterlidir ve Taguchi yöntemi çarpılma problemi için başarılı bir biçimde uygulanabilir.
7. Akış simülasyonlarında, doğru sonuçlar elde edebilmek için sonlu elemanlar modelinin elverişli olması, sıcak ve soğuk yolluk, taşıyıcı ve soğutma kanallarının doğru modellenmesi gerekmektedir.
8. Bu örnekte olduğu gibi, sadece işlem parametrelerini optimize ederek, kalıp ve ürün tasarımında değişiklik yapmadan, kalite problemlerini gidermek mümkündür. Bu sayede kalıp ve dolayısı ile parça maliyetine gelecek ekstra fiyat farkları önlenmiş olur.
9. Plastik enjeksiyon işlemi gibi analitik olarak belirsiz mühendislik problemlerinde, optimizasyon için deterministik yerine olasılıksal simülasyon modelleri kullanmak doğru sonuçlar elde etmemizi sağlayabilir. Bunun için Monte Carlo simülasyonu oldukça önemli bir araçtır.

Teşekkür

Bu çalışmada Proses denemelerinde destek aldığım parça tedarikçisi ALPLAS firmasına teşekkür ederim.

Conflict of Interest / Çıkar Çatışması

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir.

No conflict of interest was declared by the authors.

Kaynaklar

Cellere, A., Lucchetta, G.,2008. Determination of Robust Conditions for Injection Moulding of Recycled Polypropylene, International Journal of Material Forming,1,691-694.

Kamuriddin, S., Zahid A., Khan, S.H., 2010. Application of Taguchi Method in the Optimization of Injection Moulding Parameters for Manufacturing Products from Plastic Blend. IACSIT International Journal of Engineering and Technology,2,574-580.

Kingsun, L., Chang L.,, 2013. Optimization of Injection Molding Parameters for Lampshade, Transactions of the Canadian Society for Mechanical Engineering, 37,313-323.

Mohammed, S. M., Fatemeh S., 2013. Optimization of Plastic Injection Molding Process by Combination of Artificial Neural Network and Genetic Algorithm, Journal of Optimization in Industrial Engineering,13,49-54.

Öktem, H., Erzincanlı, F., 2012. DVD-Room Ön Kapağının Plastik Enjeksiyonla Basılması Sonucunda Oluşan Çekmeye Etki Eden En Uygun İşlem Parametrelerinin Taguchi Yöntemiyle Belirlenmesi, 3. Ulusal Tasarım İmalat ve Analiz Kongresi, Balıkesir, Türkiye, 431-441.

Özek, C, Çelik, Y. H., 2009. Developing A New Package Program For Manufacturing Plastic Injection Moldings And Cost Calculation, Journal of Applied Sciences Research, 5(12), 2375-2382

Özek, C, Çelik, Y. H., 2011. Plastik enjeksiyon kalıplarında enjeksiyon sürelerinin yapay sinir ağları ile modellenmesi, Fırat Üniv. Mühendislik Bilimleri Dergisi, 23(1), 35-42

Özek, C, Çelik, Y. H., 2011. Plastik Enjeksiyon Kalıplarında Kalıplama Parametrelerinin Bulanık Mantık İle Modellenmesi, Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu (IATS'11)

Rishi, P., Jaiprakash B., 2013. Optimization of Injection Moulding Process using Taguchi and ANOVA, International Journal of Scientific & Engineering Research, Volume4, Issue1

Tejendra S., Mahendra P. S. Mohd M. A., 2014. Taguchi and ANOVA Analysis of Shrinkage of Injection Moulded Polypropylene Component. International Journal of Scientific & Engineering Research, 5,750-756.