



**T.C.
BURSA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

**OTOMOTİV PLASTİK PARÇA ÜRETİMİNDE TAGUCHI İLE
MOLDFLOW KALIPLAMA SÜRECİNİN OPTİMİZASYONU**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Gizem BAYRAM

Polimer Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı

Polimer Malzeme Mühendisliği Tezli Yüksek Lisans Programı

TEMMUZ 2025

**T.C.
BURSA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

**OTOMOTİV PLASTİK PARÇA ÜRETİMİNDE TAGUCHI İLE
MOLDFLOW KALIPLAMA SÜRECİNİN OPTİMİZASYONU**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Gizem BAYRAM
(22435016002)
ORCID: 0000-0002-0039-3735**

**Polimer Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı
Polimer Malzeme Mühendisliği Tezli Yüksek Lisans Programı**

**Danışman: Prof. Dr. Ayşe BEDELOĞLU
ORCID: 0000-0003-2960-5188**

TEMMUZ 2025

BTÜ, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü'nün 22435016002 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi Gizem BAYRAM, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “OTOMOTİV PLASTİK PARÇA ÜRETİMİNDE TAGUCHİ İLE MOLDFLOW KALIPLAMA SÜRECİNİN OPTİMİZASYONU” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Prof. Dr. Ayşe Çelik Bedeloğlu**
Bursa Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Doç. Dr. Fatma Nur Parin**
Bursa Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. İdris Karagöz
Yalova Üniversitesi

Savunma Tarihi : 22/07/2025
Teslim Tarihi : / / 2025



20.04.2016 tarihli Resmi Gazete’de yayımlanan Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliğinin 9/2 ve 22/2 maddeleri gereğince; Bu Lisansüstü teze, Bursa Teknik Üniversitesi’nin abonesi olduğu intihal yazılım programı kullanılarak Lisansüstü Eğitim Enstitüsü’nün belirlemiş olduğu ölçütlere uygun rapor alınmıştır.

İNTİHAL BEYANI

Bu tezde görsel, işitsel ve yazılı biçimde sunulan tüm bilgi ve sonuçların akademik ve etik kurallara uyularak tarafımdan elde edildiğini, tez içinde yer alan ancak bu çalışmaya özgü olmayan tüm sonuç ve bilgileri tezde kaynak göstererek belgelediğimi, aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim.

Adı SOYADI: Gizem BAYRAM

İmzası:





Eşime ve Aileme ...

ÖNSÖZ

Bu tez çalışmasının yürütülmesi sürecinde sunduğu teknik destek ve analiz olanaklarıyla katkı sağlayan Odelo Otomotiv Aydınlatma A.Ş.'ye ve tez sürecindeki değerli yönlendirmeleri, akademik bilgi birikimi ve sürekli desteği için danışman hocam Sayın Prof. Dr. Ayşe Bedeloğlu'na en içten teşekkürlerimi sunarım.

Temmuz/2025

Gizem BAYRAM

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖNSÖZ.....	viii
İÇİNDEKİLER	ix
KISALTMALAR	xi
SEMBOLLER	xii
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xiii
ŞEKİL LİSTESİ.....	xiv
ÖZET.....	xv
SUMMARY	xvii
1. GİRİŞ	1
1.1 Otomotiv Sektöründe Kullanılan Plastikler	2
1.1.1 Polipropilen (PP)	2
1.1.2 Polikarbonat (PC)	3
1.1.3 Akrilonitril bütadien stiren (ABS)	4
1.1.4 Polimetil metakrilat (PMMA).....	5
1.1.5 Poliamid (PA)	6
1.2 Otomotiv Sektöründe Kullanılan Katkı Maddeleri	7
1.2.1 Cam elyaf.....	8
1.2.2 Talk	8
1.2.3 Kalsiyum karbonat.....	9
1.2.4 Karbon fiber.....	10
1.2.5 Wollastonit.....	11
1.3 Plastik Enjeksiyon Kalıplama	12
1.3.1 Hammadde hazırlama	13
1.3.2 Eritme ve karıştırma	13
1.3.3 Enjeksiyon ve tutma	13
1.3.4 Soğutma	13
1.3.5 Kalıp açma ve parça çıkarma.....	13
1.4 Enjeksiyon Kalıplama Sürecinde Moldflow Kullanımı	14
1.4.1 Moldflow analizlerinde tanımlanan girdi parametreleri	16
1.4.2 Moldflow simülasyonu ile elde edilen analiz çıktılarının incelenmesi ...	19
1.5 Taguchi Yöntemi.....	25
1.6 Literatür Araştırması	27
2. MALZEME VE YÖNTEM	32
2.1 Malzeme	32
2.2 Yöntem	33
2.2.1 Malzeme optimizasyonu.....	34
2.2.2 Proses optimizasyonu	35
2.2.3 Simülasyon koşulları	37
3. BULGULAR	39
3.1 Malzeme Optimizasyonu.....	39
3.2 Proses Optimizasyonu	43

4. SONUÇ.....	51
KAYNAKLAR	54
ÖZGEÇMİŞ.....	59



KISALTMALAR

ABS	: Akrilonitril Bütadien Stiren
CAE	: Bilgisayar Destekli Mühendislik (Computer-Aided Engineering)
CNT	: Karbon Nanotüp
GA	: Genetik Algoritma
g-C₃N₄	: Grafitik Karbon Nitrür
L9	: 9 koşullu Taguchi Ortogonal Deney Dizisi
L16	: 16 koşullu Taguchi Ortogonal Deney Dizisi
L18	: 18 koşullu Taguchi Ortogonal Deney Dizisi
L27	: 27 koşullu Taguchi Ortogonal Deney Dizisi
L28	: 28 koşullu Taguchi Ortogonal Deney Dizisi
PA	: Poliamid
PA6	: Poliamid 6
PA12	: Poliamid 12
PA66	: Poliamid 66
PC	: Polikarbonat
PMMA	: Polimetil Metakrilat
PP	: Polipropilen
PVT	: Basınç – Hacim – Sıcaklık ilişkisi
RSM	: Yanıt Yüzey Metodolojisi
S/N	: Sinyal / Gürültü Oranı

SEMBOLLER

L(y)	: Kalite kaybı fonksiyonu
y	: Ölçülen çıktı değeri
m	: Hedeflenen (ideal) değer
k	: Kalite sapmasının ekonomik etkisini belirleyen katsayı
%	: Yüzde oranı
mm	: Milimetre
°C	: Santigrat derece
s	: Saniye

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 1.1: Takviye Edici Katkı Maddeleri ve Fonksiyonları.....	7
Çizelge 2.1: Deney No Katkı Türü Katkı Oranı (%).....	35
Çizelge 2.2: Taguchi Analizi İçin Malzeme Tipleri.....	36
Çizelge 3.1: Katkı türü ve oranı için L16 taguchi deney matrisi ve S/N oranları.....	39
Çizelge 3.2: L27 Taguchi Deney Matrisi ile Elde Edilen S/N Oranları.....	44

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1: Moldflow hammadde veritabanında tanımlı malzeme arayüzü.	15
Şekil 1.2: Moldflow yazılımına ait malzeme özellikleri arayüzü.	15
Şekil 1.3: Moldflow parametre giriş arayüzü.	16
Şekil 1.4: Kalıp dolum aşamasına ait akış profili.	20
Şekil 1.5: Moldflow basınç dağılım grafiği.	20
Şekil 1.6: Moldflow sıcaklık dağılımı	21
Şekil 1.7: Moldflow birleşme çizgisi görüntüsü.	22
Şekil 1.8: Moldflow çarpılma sonucu görüntüsü.	23
Şekil 1.9: Moldflow çöküntü görüntüsü.	24
Şekil 1.10: Moldflow soğutma hattı sıcaklık dağılımı.	25
Şekil 2.1: Moldflow parça mesh örgüsü.	37
Şekil 2.2: Birinci aşama sabit proses parametresi.	38
Şekil 3. 1: Katkı oranı ile S/N ortalama ilişkisi.	42
Şekil 3. 2: Erime sıcaklığı – enjeksiyon süresi ile S/N ilişkisi.	43
Şekil 3. 3: Moldflow dolum profili sonucu.	49
Şekil 3. 4: Moldflow hacimsel çekme sonucu.	49
Şekil 3. 5: Moldflow çarpılma sonucu.	50

OTOMOTİV PLASTİK PARÇA ÜRETİMİNDE TAGUCHİ İLE MOLDFLOW KALIPLAMA SÜRECİNİN OPTİMİZASYON

ÖZET

Plastik enjeksiyon kalıplama yöntemi, otomotiv sektöründe hafiflik, düşük maliyet ve tasarım esnekliği gibi avantajları sayesinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Ancak bu yöntemde, parçanın geometrik doğruluğunu etkileyen çarpılma ve hacimsel çekme gibi istenmeyen deformasyonlar sıkça gözlemlenmektedir. Bu tür boyutsal sapmalar, parçanın montaj uyumunu ve işlevselliğini olumsuz etkileyebilmektedir. Bu bağlamda, üretim öncesinde gerçekleştirilen bilgisayar destekli simülasyon analizleri, hataların erken aşamada tespiti ve giderilmesi açısından büyük önem taşımaktadır. Moldflow yazılımı, enjeksiyon sürecini sanal ortamda modelleyerek süreç parametrelerinin optimize edilmesine olanak tanımakta, böylece zaman ve maliyet tasarrufu sağlamaktadır. Öte yandan, bu tür süreçlerde çok sayıda faktör ve seviye kombinasyonu bulunduğundan, deney sayısını azaltarak optimum koşullara ulaşmayı amaçlayan Taguchi deney tasarım yöntemi de etkin bir araç olarak öne çıkmaktadır.

Bu tez çalışmasında, otomotiv aydınlatma sistemlerinde kullanılan dış trim parçalarının boyutsal kararlılığını artırmak amacıyla malzeme ve proses parametrelerinin birlikte optimize edilmesi hedeflenmiştir. Çalışma iki aşamadan oluşmaktadır. İlk aşamada, farklı dolgu türleri (talk, cam elyafı, karbon elyafı, kalsiyum karbonat, wollastonit) ve katkı oranları (%10, %20, %30) kullanılarak oluşturulan 15 farklı polipropilen (PP) kompozit yapı için Moldflow simülasyonları gerçekleştirilmiştir. Elde edilen çarpılma ve hacimsel çekme değerleri, Taguchi L16 deney dizisi kapsamında değerlendirilmiş; “daha küçük daha iyidir” (Smaller-is-Better) kriterine göre S/N (Sinyal/Gürültü) oranları hesaplanmıştır. Yapılan analizler sonucunda, %30 talk dolgulu PP bileşimi, her iki çıktı açısından en dengeli ve kararlı sonuçları vermiştir.

İkinci aşamada, seçilen bu optimum malzeme için dört temel proses parametresi (erime sıcaklığı, kalıp sıcaklığı, enjeksiyon süresi ve soğuma süresi) üç seviyede tanımlanarak L27 ortogonal Taguchi deney tasarımı uygulanmıştır. Moldflow simülasyonları sonucunda, her kombinasyona ait çarpılma ve hacimsel çekme değerleri için ortalama S/N oranları hesaplanmış ve çoklu çıktı optimizasyonu yapılmıştır. Elde edilen bulgulara göre, Deney 18 (erime sıcaklığı: 220 °C, kalıp sıcaklığı: 50 °C, enjeksiyon süresi: 4 s, soğuma süresi: 40 s) tüm kombinasyonlar içerisinde en iyi genel performansı sunmuştur. Bu deneyde çarpılma değeri 0,25 mm ile minimum, hacimsel çekme değeri ise %0,73 ile kabul edilebilir seviyede bulunmuştur. Ayrıca, +7,30’lik ortalama S/N oranı ile de en yüksek toplam kalite puanı elde edilmiştir.

Optimum koşullara ait Moldflow analiz görselleri, malzemenin kalıp içinde homojen dağıldığını, iç gerilmelerin dengeli yayıldığını ve çarpılma yönlerinin merkezden çevreye simetrik dağıldığını göstermektedir. Bu sonuçlar, literatürde yer alan dengeli soğuma, yüksek kalıp sıcaklığı ve uygun erime viskozitesinin kalite üzerindeki etkilerini desteklemektedir. Ayrıca, tüm analizlerin fiziksel üretim yapılmadan

yalnızca simülasyon ortamında gerçekleştirilmiş olması, çalışmanın zaman ve maliyet açısından önemli bir endüstriyel katkı sunduğunu göstermektedir.

Sonuç olarak bu tez, malzeme seçimi ile proses parametresi optimizasyonunun bir arada değerlendirilmesini sağlayan bütüncül bir yaklaşım sunmaktadır. Literatürde sınırlı sayıda yer alan bu tür entegre analizlerin, üretim öncesi karar süreçlerine sistematik bir katkı sunduğu ve gelecekteki mühendislik uygulamaları için tekrarlanabilir bir model oluşturduğu düşünülmektedir.

Anahtar kelimeler: Moldflow simülasyonu, Plastik enjeksiyon, Taguchi yöntemi, Boyutsal stabilite, Hacimsel çekme



OPTIMIZATION OF MOLDFLOW MOLDING PROCESS WITH TAGUCHI IN AUTOMOTIVE PLASTIC PART PRODUCTION

SUMMARY

Injection molding is widely used in the automotive industry due to its advantages such as lightweight design, cost-effectiveness, and design flexibility. However, undesirable dimensional deformations such as warpage and volumetric shrinkage can significantly affect the geometric accuracy of plastic parts. These defects negatively impact part functionality and assembly compatibility. At this point, computer-aided simulation tools like Moldflow play a critical role in detecting such issues early in the design stage, thus reducing production errors and increasing efficiency. Moldflow allows virtual evaluation of the injection process and provides process optimization, resulting in time and cost savings. Additionally, due to the large number of influencing parameters, the Taguchi design of experiments method is frequently preferred for determining the optimum parameter set with a minimal number of experiments.

This thesis aims to enhance the dimensional stability of outer trim components used in automotive lighting systems by optimizing both material selection and process parameters. The study consists of two stages. In the first stage, Moldflow simulations were conducted on 15 different polypropylene (PP) composites formulated with varying types of fillers (talc, glass fiber, carbon fiber, calcium carbonate, wollastonite) and reinforcement ratios (10%, 20%, 30%). The obtained warpage and volumetric shrinkage values were evaluated based on the Taguchi L16 orthogonal array, and the S/N (Signal-to-Noise) ratios were calculated according to the “smaller-is-better” criterion. As a result of this analysis, the PP composite with 30% talc exhibited the most balanced and dimensionally stable performance among all configurations.

In the second stage, following the identification of 30% talc-filled PP as the most suitable material, optimization of the injection molding process parameters was performed. Four factors (melt temperature, mold temperature, injection time, and cooling time), each at three levels, were designed using the Taguchi L27 orthogonal array. Moldflow simulations were carried out for all experimental runs, and the resulting warpage and shrinkage values were statistically analyzed through average S/N ratios. According to the findings, Experiment 18 (melt temp: 220 °C, mold temp: 50 °C, injection time: 4 s, cooling time: 40 s) yielded the best overall performance. This condition resulted in a minimum warpage value of 0.25 mm and an acceptable shrinkage level of 0.73%. Furthermore, it achieved the highest average S/N ratio of +7,30 among all trials.

The Moldflow visual outputs of the optimum condition confirmed homogeneous material distribution, symmetrical warpage vectors, and minimum internal stress accumulation. These results are consistent with findings in the literature, emphasizing the importance of balanced cooling and suitable thermal conditions during molding. Moreover, the entire study was conducted virtually, without the need for physical prototyping, providing substantial time and cost advantages for industrial applications.

In conclusion, this thesis presents an integrated and systematic optimization framework combining material selection and process parameter tuning. The proposed methodology fills a gap in the literature by addressing multiple variables simultaneously using Moldflow simulation and Taguchi analysis. It offers a repeatable and scalable model for future applications in the field of plastic part manufacturing, particularly in the automotive industry.

Keywords: Moldflow simulation, Plastic injection, Taguchi method, Dimensional stability, Volumetric shrinkage



1. GİRİŞ

Otomotiv sanayisinde plastikler, hafiflik, üretim kolaylığı ve maliyet avantajı gibi nedenlerle metal yerine giderek daha fazla tercih edilmektedir. Günümüzde ortalama bir araçta plastikler hacimce %50'ye yakın yer tutmakta ve bu durum, yakıt verimliliğini artırarak emisyonları azaltmaktadır. Özellikle otomotiv aydınlatma sistemlerinde, geleneksel cam ve metal yerine kullanılan mühendislik plastikleri, hem estetik hem de fonksiyonel açıdan büyük avantajlar sağlamaktadır [1].

Bu tür plastik parçaların mekanik dayanım ve boyutsal kararlılık gibi özelliklerini artırmak amacıyla cam elyaf, karbon fiber, wollastonit ve kalsiyum karbonat gibi katkı maddeleri yaygın olarak kullanılmaktadır. Cam elyaf ve karbon fiber, parçalara rijitlik ve mukavemet kazandırırken, wollastonit boyutsal kararlılık sağlar, kalsiyum karbonat ise maliyet avantajı sunar. Doğru katkı tipi ve oranının belirlenmesi, hem ürün kalitesi hem de üretim verimliliği açısından kritik öneme sahiptir.

Bu noktada, üretim öncesinde yapılan simülasyonlar önemli bir rol oynamaktadır. Moldflow gibi enjeksiyon kalıplama simülasyonları, malzemenin kalıp içerisinde nasıl akacağını, nerelerde birikme, çarpılma veya boşluk oluşabileceğini önceden görme imkânı sunar. Böylece, fiziksel prototip denemelerine gerek kalmadan kalıp ve ürün tasarımı iyileştirilerek, zaman ve maliyet açısından önemli ölçüde tasarruf sağlanabilir. Bu tür simülasyonlara istatistiksel deney tasarım yöntemlerinin entegre edilmesi ise süreci daha sistematik ve optimize edilebilir hâle getirmektedir. Özellikle Taguchi yöntemi, proses parametrelerinin çoklu çıktı değişkenleri (örneğin, çarpılma ve hacimsel çekme) üzerindeki etkilerini analiz etmede güçlü bir araç sunar. Faktör-seviye kombinasyonlarının sınırlı sayıda deneyle değerlendirilmesine olanak sağlayan bu yöntem sayesinde, simülasyon çıktıları istatistiksel doğrulukla yorumlanarak optimum koşullar belirlenebilir. Böylece hem simülasyon verileri hem de deney tasarımı entegre bir yaklaşımla kullanılarak ürün kalitesi artırılırken, geliştirme süresi ve maliyeti de minimize edilmektedir.

1.1 Otomotiv Sektöründe Kullanılan Plastikler

Otomotiv sektörü, hızla gelişen teknolojiler ve giderek sıkılaştan regülasyonlar doğrultusunda, araç tasarımında daha hafif, sağlam ve maliyet açısından verimli çözümler geliştirmeye odaklanmaktadır. Bu bağlamda plastik malzemeler, geleneksel metal bileşenlerin yerini alarak otomotiv üretiminde önemli bir yer edinmiştir. Modern araçlarda plastik kullanım oranı değerlendirildiğinde, ortalama bir otomobilin toplam kütlesinin yaklaşık %10–18’lik kısmının plastikten oluştuğu görülmektedir. Bu durum, hafiflik sağlanarak yakıt tasarrufuna ve emisyon azaltımına katkı sağlamaktadır [2].

Plastiklerin otomotivde yaygın biçimde tercih edilmesinin temel nedenleri arasında; düşük yoğunluk (0.9 g/cm^3), kolay şekillendirilme kabiliyeti, korozyon direnci, darbe dayanımı, estetik tasarım avantajı ve seri üretime uygunluk gibi faktörler yer almaktadır [3]. Bu teknik ve ekonomik avantajlar sayesinde plastikler; tamponlar, gösterge panelleri, ön konsollar, çamurluklar, iç trim elemanları, hava iletim kanalları, yakıt sistemleri ve aydınlatma grubu gibi pek çok temel otomotiv bileşeninde kullanılmaktadır [4].

Otomotiv uygulamalarında kullanılan plastikler genel olarak iki ana sınıfa ayrılır: termoplastikler ve termosetler. Termoplastikler, ısıtıldıklarında yumuşayarak şekil alabilen ve soğuduklarında tekrar katılaşabilen yapılarıyla enjeksiyon kalıplama gibi verimli üretim yöntemlerine uygundur. Buna karşılık, termoset malzemeler kürleşme sürecinden sonra kalıcı olarak sertleşir ve tekrar ısıtılma işlemine tabi tutularak şekillendirilemezler; bu nedenle yüksek sıcaklık ve kimyasal dayanım gerektiren uygulamalarda tercih edilirler [5].

Termoplastik hammaddelerden en yaygın kullanılanlar şunlardır:

1.1.1 Polipropilen (PP)

Polipropilen (PP), otomotiv sanayisinde en yaygın şekilde kullanılan önemli termoplastik malzemelerden biridir. Yaklaşık 0.9 g/cm^3 ’lük düşük yoğunluğu, uygun üretim maliyeti, yüksek kimyasal dayanımı ve işlenebilir yapısıyla hem iç hem dış aksamda sıkça tercih edilmektedir [6].

PP’nin öne çıkan niteliklerinden biri de sahip olduğu hafifliktir. Araç ağırlığını azaltmaya yönelik geliştirilen yapısal hafifletme yaklaşımları çerçevesinde, PP

parçaların kullanımı hem yakıt tüketimini düşürmekte hem de emisyon salımını azaltmaktadır. Bunun yanı sıra, suya, kimyasallara ve bazı çözücülere karşı yüksek direnç göstermesi sayesinde, zorlu çevre koşullarında uzun süreli dayanıklılık sunar. Termal kararlılığı ile mekanik performansı dengeli olan PP, enjeksiyon kalıplama gibi hızlı ve verimli üretim yöntemlerine kolayca uyum sağlayabilmektedir. Bu nedenle, araç içinde gösterge paneli, kapı içi paneller, iç trim elemanları; dışta ise çamurluk, hava kanalları ve tampon gibi parçalarda yaygın olarak kullanılmaktadır [7].

Bununla birlikte, cam elyaf gibi dolgu maddeleriyle takviye edilen polipropilen (PP) kompozitler, yüksek mukavemet ve rijitlik gerektiren uygulamalar için uygun bir alternatiftir. Bu tür takviyeli yapılar, metal malzemelerin yerine kullanılabilmekte; böylece hem yeterli mekanik performans sağlamak hem de parça ağırlığını azaltarak sistem düzeyinde enerji verimliliğine katkı sunmaktadır. Zhang ve arkadaşlarının gerçekleştirdiği bir çalışmada, cam elyafla güçlendirilmiş PoliPropilen/ cam elyaf kompozit köpükler mikro hücreli enjeksiyon kalıplama yöntemiyle üretilmiş ve mekanik özellikleri değerlendirilmiştir. Araştırma sonuçlarına göre, cam elyaf takviyesi sayesinde darbe dayanımı, rijitlik ve hafiflik gibi özelliklerde geleneksel PP'ye kıyasla belirgin iyileşmeler sağlanmıştır. Ayrıca, bu kompozit malzemelerin otomotiv sektöründe metal parçaların yerine kullanılabilecek mekanik yeterliliğe sahip olduğu belirtilmiştir. Böylece hem toplam sistem ağırlığının azaltılması hem de yapısal performansın artırılması mümkün hale gelmiştir. [8].

Sonuç olarak, sahip olduğu düşük yoğunluk, maliyet etkin işlenebilirlik, çevresel sürdürülebilirlik ve fonksiyonel modifikasyon potansiyeli gibi avantajlar sayesinde polipropilen, otomotiv sektöründe yapısal ve yarı-yapısal parçalarda yaygın olarak kullanılan mühendislik plastiği sınıfında değerlendirilmektedir.

1.1.2 Polikarbonat (PC)

Polikarbonat (PC), yüksek darbe dayanımı, termal stabilitesi ve optik geçirgenliği sayesinde otomotiv sektöründe yaygın olarak kullanılan bir mühendislik plastiğidir. Yoğunluğu yaklaşık 1.2 g/cm^3 olan PC, 135°C 'ye kadar termal stabilite sergileyebilmektedir. Cam benzeri ışık geçirgenliği sayesinde, özellikle far kapakları, iç aydınlatma elemanları ve gösterge panelleri gibi hem estetik hem de yapısal işlev taşıyan uygulamalarda tercih edilmektedir [9]. Bunun yanı sıra, boyutsal kararlılığı ve üstün elektriksel yalıtım özellikleri, polikarbonatı yalnızca dış parçalarda değil, aynı

zamanda elektronik muhafaza sistemleri ve iç mekân bileşenlerinde de uygun hale getirmektedir [10].

Bununla birlikte, saf polikarbonatın ultraviyole (UV) ışınlarına karşı dayanımı sınırlıdır ve çizilmelere karşı düşük yüzey direnci sergilemektedir. Bu nedenle, özellikle dış ortam koşullarına maruz kalan uygulamalarda, yüzeyin çizilme direncini ve UV dayanımını artırmak amacıyla çeşitli koruyucu kaplamalar kullanılmaktadır [11]. Bu kaplamalar sayesinde, far gibi dış bileşenler uzun süre parlaklığını ve mekanik bütünlüğünü koruyabilmektedir. Ayrıca, polikarbonatın akrilonitril bütadien stiren (ABS) ile birleştirilerek oluşturulan PC/ABS alaşımları, hem darbe dayanımını artırmakta hem de enjeksiyon kalıplama sürecinde işlenebilirlik avantajı sağlamaktadır. Bu tür alaşımlar, yüksek dayanım ve estetik görünüm gerektiren gösterge paneli gibi bileşenlerde yaygın olarak kullanılmaktadır [12].

Zhang ve arkadaşları tarafından yürütülen bir çalışmada, karbon nanotüp (CNT) takviyesi ile polikarbonat (PC) kompozitlere elektriksel iletkenlik kazandırılabilceği gösterilmiştir. Araştırmada, düşük oranlarda eklenen çok katmanlı CNT'ler sayesinde PC'nin özgül direnci önemli ölçüde azalmış ve malzeme elektriksel iletkenlik özelliği kazanmıştır. Ayrıca aynı çalışmada, CNT katkısının yalnızca iletkenlik değil, mekanik rijitlik, darbe dayanımı ve ısı iletkenliği üzerinde de belirgin iyileştirmeler sağladığı rapor edilmiştir. Bu bulgular, CNT'nin PC matrisi içerisinde çok yönlü performans artırıcı bir katkı maddesi olarak değerlendirilebileceğini ortaya koymaktadır [13].

Sahip olduğu yapısal ve fonksiyonel avantajların yanı sıra katkı maddeleriyle zenginleştirilebilme potansiyeli sayesinde, polikarbonat; otomotiv endüstrisinde hem teknik gereksinimlere yanıt veren hem de estetik beklentileri karşılayan önemli bir mühendislik plastiği olarak öne çıkmaktadır.

1.1.3 Akrilonitril bütadien stiren (ABS)

Akrilonitril Bütadien Stiren (ABS), sahip olduğu darbe dayanımı, rijitlik, kimyasal direnç ve estetik yüzey kalitesi gibi avantajlı özellikleri sayesinde otomotiv endüstrisinde yaygın olarak kullanılan mühendislik termoplastiklerinden biridir. Düşük sıcaklıklarda bile kırılmadan mekanik performansını sürdürebilmesi, bu malzemeyi zorlu çevre koşullarında kullanım için uygun bir seçenek haline getirmektedir. Ayrıca darbe dayanımı ile işlenebilirlik arasındaki denge, ABS'yi

modifikasyona açık bir yapı haline getirmekte ve darbe dayanımını artırmaya yönelik katkı uygulamaları açısından uygunluk sunmaktadır [14].

Otomotiv üretiminde ABS; iç konsol elemanları, tampon alt bileşenleri, gösterge paneli çevresi, hava yönlendirme kanalları ve çeşitli güvenlik destek birimlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Enjeksiyon kalıplama gibi yüksek hassasiyetli üretim teknikleriyle olan uyumu, yüzey kalitesi ve boyutsal hassasiyet açısından önemli avantajlar sunmakta; bu özellikleri sayesinde ABS, hem görsel hem de yapısal gereksinimlerin karşılandığı uygulamalarda tercih edilen bir malzeme konumuna gelmektedir [15].

ABS polimer matrisi, performans gereksinimlerine bağlı olarak çeşitli katkı maddeleri ile modifiye edilmekte olup, bu sayede malzemenin mekanik, termal ve fonksiyonel özellikleri geliştirilebilmektedir. Cam elyafı ve metal esaslı dolgularla takviye edilen ABS kompozitlerde mekanik dayanımda anlamlı artışlar sağlanabilirken, g-C₃N₄ (grafitik karbon nitrür) yalnızca mekanik özellikleri değil, aynı zamanda yanmazlık davranışı ve termal kararlılığı da iyileştirmektedir. Huang ve arkadaşları tarafından gerçekleştirilen bir çalışmada, g-C₃N₄ katkılı ABS nanokompozitlerin alev dayanımı, termal stabilite ve çekme dayanımı gibi temel performans göstergelerinde belirgin gelişmeler sağladığı rapor edilmiştir [16]. Bu tür katkı maddeleri, ABS matrisinin darbe modülü, çekme dayanımı, ısı kararlılığı ve alev geciktirme kapasitesi gibi temel mühendislik özelliklerinde belirgin ve istatistiksel olarak anlamlı iyileştirmeler sağlayabilmektedir.

Sonuç olarak, ABS; hem iç hem de dış otomotiv bileşenlerinde yaygın olarak kullanılabilen, katkı maddeleri ile modifiye edilmeye uygun yapısı sayesinde geliştirilmiş mekanik ve termal özellikler sunabilen çok yönlü bir mühendislik termoplastik malzeme olarak değerlendirilmektedir.

1.1.4 Polimetil metakrilat (PMMA)

Polimetil metakrilat (PMMA), yüksek ışık geçirgenliği, yüzey sertliği ve çevresel etkilere karşı direnç gibi özellikleriyle öne çıkan bir mühendislik termoplastiğidir. Yaklaşık 1,17–1,20 g/cm³ yoğunluğa sahip olması ve cam benzeri optik geçirgenlik sunması, bu malzemeyi otomotiv endüstrisinde özellikle dış aydınlatma sistemleri için uygun hâle getirmektedir. Far ve stop lambası kapakları ile gösterge paneli örtüleri ve iç aydınlatma elemanları gibi uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Ancak,

PMMA'nın kırılkan yapısı ve çizilmeye karşı sınırlı dayanımı, bazı uygulamalarda performans kısıtlamalarına yol açabilmektedir. Ayrıca cam geçiş sıcaklığı yaklaşık 105 °C olan bu malzemenin termal dayanımı da sınırlıdır. Bu dezavantajların giderilmesi amacıyla, PMMA yüzeye uygulanan sert kaplamalar, elastomer katkıları veya hibrit dolgu maddeleriyle modifiye edilerek hem çizilme direnci hem de darbe performansı geliştirilebilmektedir. Örneğin, Huang ve arkadaşları, vanadyum temelli bileşikler kullanarak alev geciktirici özellik kazandırılmış PMMA esaslı nanokompozitler geliştirmiştir. Çalışmada elde edilen yapılar, hem çekme dayanımı açısından anlamlı bir artış göstermiş hem de yanmazlık testlerinde UL-94 V0 seviyesine ulaşarak yüksek alev geciktirme performansı sergilemiştir [17].

Bunun yanı sıra, PMMA yüzeyine uygulanan özel kaplamalar aracılığıyla hem çizilme direnci hem de UV ışınlarına karşı dayanımı anlamlı ölçüde artırılabilir. Wang ve arkadaşları tarafından geliştirilen, düşük yansıtıcılığa sahip şeffaf bir kaplama aracılığıyla, PMMA'nın mekanik dayanımının iyileştirildiği ve optik geçirgenlik gibi temel özelliklerinin korunduğu rapor edilmiştir. Bu tür fonksiyonel kaplamalar, özellikle dış ortam koşullarına maruz kalan otomotiv bileşenlerinde uzun süreli yapısal ve görsel dayanım sağlayarak malzeme ömrünü artırmaktadır [18].

Sonuç olarak, PMMA; yüksek optik geçirgenlik, düşük yoğunluk ve yüzey kalitesi gibi temel avantajlarının yanı sıra, uygun katkı maddeleri ve yüzey modifikasyon teknikleri ile darbe dayanımı, termal stabilite ve yangın geciktirme performansı açısından da iyileştirilebilmektedir. Bu özellikleri sayesinde PMMA, otomotiv sektöründeki hem estetik hem de yapısal uygulamalarda kullanılabilecek çok yönlü bir mühendislik termoplastiği hâline gelmiştir.

1.1.5 Poliamid (PA)

Poliamid (PA), yüksek mekanik mukavemeti, termal kararlılığı ve kimyasal direnç özellikleri sayesinde otomotiv endüstrisinde yaygın olarak kullanılan mühendislik plastiklerinden biridir. Moleküler yapısındaki güçlü amid bağları, bu malzemenin yüksek sıcaklık, aşınma ve ağır yük koşulları altında dahi performansını korumasına olanak tanımaktadır. PA esaslı kompozitler, özellikle motor bölgesi parçaları, yakıt ve sıvı taşıma sistemleri, kablo bağlantı elemanları ve termal yönetim sistemleri gibi zorlu uygulamalarda tercih edilmektedir. Bu tercih, PA'nın ısıya dayanımı, kimyasallara karşı direnci ve boyutsal kararlılığı gibi özelliklerinden kaynaklanmaktadır. Ayrıca,

PA malzemeler titreşim, sürtünme ve yorulma kaynaklı mekanik zorlanmalara karşı da yüksek dayanım göstermektedir. Cam elyafla takviye edilmiş PA6 ve PA66 türleri, hem yapısal rijitlik hem de ağırlık avantajı sağlayarak metal yerine kullanılabilir alternatifler sunmaktadır [19].

1.2 Otomotiv Sektöründe Kullanılan Katkı Maddeleri

Günümüzde otomotiv endüstrisi, geleneksel metal malzemelere kıyasla plastiklerin sağladığı düşük yoğunluk, maliyet etkinliği, tasarım esnekliği ve yüksek üretim hızı gibi avantajlar nedeniyle plastik kullanımına giderek daha fazla yönelmektedir. Ancak plastik bileşenlerin hedeflenen mekanik, termal ve işlevsel performans düzeylerine ulaşabilmesi, yalnızca baz polimerin nitelikleriyle değil, aynı zamanda uygulamaya uygun katkı maddelerinin doğru seçimi ve optimize edilmesiyle mümkün olmaktadır.

Katkı maddeleri, polimer matrisine düşük oranlarda ilave edilerek, elde edilen malzemenin mekanik dayanımı, termal direnci, elektriksel iletkenliği ve çevresel etkilere karşı mukavemeti gibi fonksiyonel özelliklerinin iyileştirilmesini sağlar. Özellikle otomotiv endüstrisinde hem iç hem de dış trim parçalarında kullanılan bu katkılar; ürün ömrünün uzatılması, yapısal güvenliğin artırılması ve üretim sürecinin verimliliğinin artırılması açısından kritik bir rol oynamaktadır [20].

Otomotiv sektöründe kullanılan katkı maddeleri, genel olarak dolgu malzemeleri, takviye elyafları, alev geciktiriciler, stabilizatörler, plastikleştiriciler, renk vericiler ve antistatik ajanlar olmak üzere çeşitli kategorilere ayrılmaktadır. Bu katkıların bir bölümü, temel polimerin mekanik performansını artırırken; diğerleri yüksek sıcaklık, yanma riski veya kimyasal ortamlara karşı direnç geliştirilmesine katkı sağlar. Ayrıca işleme yardımcı katkılar, çevrim süresini azaltarak üretim hızını artırmakta ve enerji tüketimini düşürerek maliyet avantajı sağlamaktadır [21].

Bu kapsamda en yaygın kullanılan katkı maddeleri aşağıda sıralanmıştır:

Çizelge 1.1: Takviye Edici Katkı Maddeleri ve Fonksiyonları

Katkı Türü	Katkı Maddesi	Fonksiyonu
Takviye Ediciler	Cam Elyaf	Mekanik dayanımın ve rijitliğin artırılması
	Karbon Fiber	Hafif yapıda yüksek mukavemet sağlanması

Çizelge 1.1 (devam): Takviye Edici Katkı Maddeleri ve Fonksiyonları

Katkı Türü	Katkı Maddesi	Fonksiyonu
Takviye Ediciler	Wollastonit	Boyutsal kararlılık ve yüzey dayanımının artması
	Talk	Sertlik artışı ve maliyet avantajı

1.2.1 Cam elyaf

Cam elyaf, plastik kompozitlerin mekanik ve termal özelliklerini artırmak amacıyla otomotiv endüstrisinde yaygın olarak kullanılan bir takviye katkı maddesidir. Düşük yoğunluğu, yüksek elastik modülü ve kimyasal kararlılığı sayesinde, mühendislik plastikleri ile birlikte kullanıldığında hem performans hem de maliyet açısından önemli avantajlar sunar. Cam elyaf takviyesi, matris polimerin yük taşıma kapasitesini artırarak, özellikle darbe, çekme ve eğilme gibi mekanik zorlanmalara karşı parçanın dayanımını anlamlı ölçüde yükseltmektedir.

Polipropilen (PP) gibi düşük yoğunluklu termoplastik matrislerle cam elyafın bir arada kullanılması, malzemenin mekanik performansını belirgin biçimde artırırken, özgül ağırlıkta kayda değer bir artış oluşturmamaktadır. Bu özellik, yakıt verimliliği ve emisyon azaltım hedefleri doğrultusunda otomotiv üreticileri açısından önemli bir avantaj sağlamaktadır. Literatürde mikro yapısal enjeksiyon teknolojisiyle elde edilen cam elyaf takviyeli PP kompozitlerin, yüksek sertlik ve düşük yoğunluk özelliklerini bir arada sunduğu gösterilmiştir. Bu tür kompozit yapıların, otomotivde iç trim parçaları ve tampon destekleri gibi yapısal fonksiyonel uygulamalarda geniş bir kullanım potansiyeline sahip olduğu bildirilmektedir [22].

Sonuç olarak, cam elyaf takviyesi; otomotivde kullanılan termoplastik malzemelerin mekanik dayanımı, termal kararlılığı ve uzun süreli performans gereksinimlerini karşılamak amacıyla yaygın olarak tercih edilen katkı bileşenlerinden biridir. Özellikle polipropilen (PP) ve poliamid 6 (PA6) gibi matrislerle birlikte kullanıldığında, hafiflik ve dayanıklılığı bir arada sunarak otomotiv parçalarında hem yapısal hem de fonksiyonel açıdan etkili çözümler sağlamaktadır.

1.2.2 Talk

Talk, kimyasal olarak magnezyum silikat hidrat $[Mg_3Si_4O_{10}(OH)_2]$ formunda bulunan doğal bir inorganik mineraldir ve plastik sanayisinde yaygın bir dolgu maddesi olarak kullanılmaktadır. Plaka benzeri kristal yapısı ve yüksek özgül yüzey alanı sayesinde,

polimer matrislerle iyi etkileşim kurarak malzeme rijitliğini artırmakta, aynı zamanda işlenebilirlik ve boyutsal kararlılık gibi özellikleri iyileştirmektedir.

Talk katkısı, polimer sistemlerin mekanik özelliklerini, termal dayanımını ve işlenebilirliğini artırmak amacıyla yaygın şekilde kullanılmaktadır. Bu mineral dolgu, kristalleşme kinetiği üzerinde etkili olarak matris içerisindeki mikroyapısal düzenlemeyi desteklemekte; bu sayede daha dengeli bir kristal yapı oluşumuna katkı sağlamaktadır. Ayrıca, termal stabiliteyi iyileştirerek yüksek sıcaklıklarda boyutsal kararlılığın korunmasına olanak tanımakta ve böylece uzun süreli performans gerektiren mühendislik uygulamaları için elverişli hale gelmektedir.

Literatürdeki birçok çalışmada, talk katkısının polimer matris içerisinde elastik modül ve sertlik gibi mekanik özellikleri artırdığı raporlanmaktadır. Düşük yoğunluğa sahip olması sayesinde bu iyileştirmeler, kompozit malzemenin toplam ağırlığını anlamlı şekilde artırmadan elde edilebilmektedir. Ayrıca talk katkısı, polimer eriyiğinin viskozite davranışını değiştirerek daha kolay işlenebilirlik sağlamak ve enjeksiyon kalıplama gibi proseslerde çevrim süresini kısaltmaktadır. Bu durum, enerji tüketiminde azalma ve üretim verimliliğinde artış gibi endüstriyel avantajları da beraberinde getirmektedir [23].

Castillo ve çalışma arkadaşları tarafından yürütülen bir araştırmada, talk katkısının morfolojik özelliklerinin talk dolgulu polipropilen (PP) kompozitlerin mekanik davranışı üzerindeki etkileri incelenmiştir. Farklı tanecik boyutları ve şekillerine sahip talk türleri kullanılarak gerçekleştirilen deneylerde, özellikle daha ince partikül boyutuna ve yüksek özgül yüzey alanına sahip talkların, PP matrisinde daha yüksek elastik modül ve çekme dayanımı sağladığı rapor edilmiştir. Çalışmada ayrıca, talk morfolojisinin matris ile dolgu maddesi arasındaki arayüz bağlanma kalitesini doğrudan etkilediği, bu etkileşimin ise kompozit yapının bütünsel mekanik performansında belirleyici bir rol oynadığı vurgulanmaktadır [24].

1.2.3 Kalsiyum karbonat

Kalsiyum karbonat (CaCO_3), düşük maliyeti ve çok yönlü işlevselliği sayesinde, polipropilen (PP) ve poliamid (PA) gibi mühendislik termoplastiklerinde sıkça tercih edilen bir inorganik dolgu maddesidir. Bu katkı, özellikle matrisin mekanik sertliğini artırmak, işlenebilirliği iyileştirmek ve termal özellikleri stabilize etmek amacıyla kullanılmaktadır. Yapılan çeşitli araştırmalarda, dolgu oranı ve partikül boyutunun

kompozitin mekanik performansı üzerinde belirleyici etkiler oluşturduğu bildirilmiştir. Örneğin, Peng ve arkadaşları tarafından yürütülen bir çalışmada, homopolimer PP içine %10 ila %50 oranlarında CaCO_3 ilave edilerek yapılan deneylerde, dolgu miktarının artışına paralel olarak elastik modülde yaklaşık %90'a kadar bir yükseliş sağlandığı rapor edilmiştir. Ancak bu yapısal iyileşmeye rağmen, çekme dayanımında hafif bir düşüş meydana geldiği de ifade edilmiştir [25].

Isıl özellikler açısından değerlendirildiğinde, mikro ve nano boyuttaki kalsiyum karbonat (CaCO_3) takviyelerinin karşılaştırmalı olarak incelendiği bir çalışmada, nano katkılı sistemlerin kristalleşme sıcaklıklarında artış, termal bozunma sıcaklıklarında ise iyileşme gösterdiği rapor edilmiştir. Bu iyileşmenin temel nedeni olarak, nano boyutlu taneciklerin polimer matris içerisinde kristalleşme çekirdeği görevi üstlenerek daha düzenli ve homojen kristal yapıların oluşumuna olanak sağlaması gösterilmektedir. Böylece, kristal yapının iyileşmesiyle birlikte polimerin termal kararlılığı da artış göstermektedir. Bu bulgu, nano katkıların sadece mekanik değil, aynı zamanda ısı performansını artırma potansiyeline de sahip olduğunu ortaya koymaktadır [26].

Literatürde yer alan bulgulara göre, poliamid 12 (PA12) matrisine kalsiyum karbonat (CaCO_3) dolgu maddesi ilavesi, malzemenin erime sıcaklığı ve termal kararlılığı üzerinde iyileştirici etkiler sağlamaktadır. Bu katkı, yalnızca ısı özelliklerinin geliştirilmesine katkı sunmakla kalmamakta; aynı zamanda işlenebilirlik açısından da önemli avantajlar sağlamaktadır. Özellikle enjeksiyon kalıplama süreçlerinde daha iyi kalıp dolumu, daha düşük çevrim süresi ve enerji verimliliği gibi olumlu çıktılar elde edilmiştir. CaCO_3 katkısının bu yönüyle hem termoplastik işlemeyi kolaylaştırıcı hem de boyutsal kararlılığı artırıcı bir fonksiyona sahip olduğu görülmektedir. [27]

1.2.4 Karbon fiber

Karbon fiber, termoplastik matris yapılar içerisinde takviye elemanı olarak kullanıldığında, özellikle mekanik mukavemet ve elastisite modülü açısından anlamlı iyileştirmeler sağlamaktadır. Bu katkı, özellikle yük taşıma kapasitesi yüksek ve hafiflik gerektiren uygulamalarda öne çıkmaktadır. Örneğin, Kwon ve arkadaşları tarafından gerçekleştirilen bir çalışmada, polipropilen (PP) matrisine entegre edilen karbon fiber takviyesinin, kompozitin çekme modülünü önemli ölçüde artırdığı ve aynı zamanda darbe dayanımını iyileştirdiği bildirilmiştir. Bu tür iyileştirmeler, özellikle

otomotiv ve havacılık gibi sektörlerde, karbon fiber takviyeli kompozitlerin metal parçalara alternatif olarak tercih edilmesini mümkün kılmaktadır [28].

Karbon fiber katkısı, yalnızca mekanik özellikleri değil, aynı zamanda kompozit malzemenin termal davranışını da olumlu yönde etkilemektedir. Matrise entegre edilen karbon fiber, ısı genleşme katsayısının düşürülmesine katkı sağlayarak parçaların boyutsal kararlılığını artırmaktadır. Özellikle çok eksenli lif yönlenmesi sayesinde, ısı dağılımı daha kontrollü gerçekleşmekte ve bu durum, sıcaklık değişimlerinin hassas toleranslarla çalışan sistemler üzerindeki etkisini minimize etmektedir. Bu tür ısı avantajları, motor bölmesi parçaları, elektronik muhafazalar ve yüksek sıcaklık çevresinde çalışan bileşenlerde uzun ömürlü ve güvenilir performans sağlamaktadır. Literatürde de benzer şekilde, karbon fiberin kompozit matrislerde termal genleşmeyi sınırlayan ve ısı iletkenliği yönlendiren bir takviye elemanı olarak işlev gördüğü vurgulanmaktadır.

Karbon fiber-polimer arayüzü, kompozit malzemenin hem mekanik hem de termal performansını doğrudan etkileyen kritik bir parametredir. Arayüz kalitesinin artırılması amacıyla çeşitli yüzey işlemleri, kimyasal kaplamalar ve çift aşamalı modifikasyon teknikleri uygulanabilmektedir. Bu yöntemlerle lif-matris bağlanması güçlendirilerek, özellikle yüksek sıcaklıklarda mukavemet, boyutsal stabilite ve yorulma direnci gibi performans göstergelerinde iyileşme sağlanabilmektedir. Örneğin, karbon fiber takviyeli ABS kompozitlerde gerçekleştirilen çift yüzey modifikasyonu sonucunda; dinamik mekanik modül, çekme dayanımı ve eğilme dayanımı gibi mekanik özelliklerde anlamlı artışlar elde edilmiştir. Aynı zamanda ısıya karşı stabilitenin de yükseldiği rapor edilmiştir. Bu bulgular, karbon fiberin yalnızca takviye edici bir katkı olarak değil, aynı zamanda arayüz mühendisliği ile optimize edilebilen yüksek performanslı bir fonksiyonel malzeme olduğunu ortaya koymaktadır [29].

1.2.5 Wollastonit

Wollastonit (CaSiO_3), özellikle iğnemsî morfolojisi ve yüksek boy/en oranı sayesinde, polimer matrislerde mekanik rijitlik, termal iletkenlik ve boyutsal stabilite gibi kritik performans parametrelerini iyileştiren fonksiyonel bir inorganik dolgu maddesidir. Özellikle polipropilen (PP) esaslı kompozitlerde yapılan çalışmalar, wollastonit ilavesinin elastik modül, ısı iletim katsayısı ve ısı deformasyon sıcaklığı gibi

özelliklerde anlamlı artışlara yol açtığını ortaya koymaktadır. Bu katkı, ayrıca polimer zincirleri arasında yönlü bir yerleşim oluşturarak kristalleşme davranışını da olumlu yönde etkilemektedir. Bunun sonucunda, enjeksiyon kalıplama ile üretilen parçaların hem termal hem de mekanik çevrimlerde daha kararlı davranışlar sergilediği bildirilmektedir

Wollastonit katkısının kristalleşme davranışı ve termal kararlılık üzerindeki etkisi, literatürde sıklıkla vurgulanan önemli bir yapısal avantaj olarak öne çıkmaktadır. Liang ve arkadaşları tarafından yürütülen bir çalışmada, farklı oranlarda wollastonit ilavesiyle polipropilen (PP) matrisinde yapılan analizler sonucunda, kristalleşme sıcaklığında belirgin bir artış gözlemlenmiştir. Aynı zamanda, termal bozunma sıcaklıklarının da yükseldiği rapor edilmiştir. Bu bulgular, wollastonitin polimer matris içinde kristalleşme çekirdeği görevi üstlendiğini ve daha düzenli bir kristal yapı oluşumunu teşvik ettiğini göstermektedir. Böylelikle, katkı maddesinin sadece mekanik değil, aynı zamanda ısı performansına da doğrudan katkı sunduğu anlaşılmaktadır [30].

Mekanik özellikler açısından değerlendirildiğinde, polipropilen (PP) matrisine eklenen wollastonit dolgusunun, elastik modül, çekme dayanımı ve eğilme dayanımı gibi temel mekanik performans parametrelerinde anlamlı artışlara yol açtığı bildirilmiştir. Yapılan çalışmalarda, dolgu oranının artmasıyla birlikte bu mekanik özelliklerde doğrusal olmayan ancak istatistiksel olarak anlamlı iyileşmeler elde edildiği gözlemlenmiştir. Özellikle wollastonitin iğnemi morfolojisi sayesinde, uygulanan yüklerin polimer matris boyunca daha etkin biçimde aktarılabilirdiği ve bu durumun polimer–dolgu arayüzey etkileşimini güçlendirdiği ifade edilmiştir. Buna ek olarak, wollastonit ve cam elyafın birlikte kullanıldığı sistemlerde hem mekanik özelliklerde gelişme hem de kristalleşme sıcaklığında artış ile enjeksiyon çevrim süresinde kısalma sağlandığı belirtilmiştir. Bu, üretim verimliliğini artıran önemli bir kazanım olarak öne çıkmaktadır [31].

1.3 Plastik Enjeksiyon Kalıplama

Plastik enjeksiyon kalıplama, yüksek üretim hızı, şekil karmaşıklığına uygunluk ve ölçüsel tekrarlanabilirlik gibi avantajları nedeniyle, yaygın olarak tercih edilen bir termoplastik işleme yöntemidir. Bu yöntemde termoplastik hammadde, vida mekanizmasıyla eritildikten sonra, yüksek basınç altında kalıp boşluğuna enjekte

edilmekte ve burada katılaşarak istenen geometriyi almaktadır. Süreç, kalıp içi soğuma ve parça çıkarımı ile tamamlanır. Söz konusu yöntem; otomotiv, elektronik, beyaz eşya, medikal cihazlar ve ambalajlama gibi pek çok endüstride geniş uygulama alanı bulmakta olup, özellikle karmaşık geometrilere sahip parçaların seri üretiminde tercih edilmektedir [32].

Plastik enjeksiyon üretim aşamaları aşağıdaki gibidir;

1.3.1 Hammadde hazırlama

Plastik granüllerin üretim öncesi kurutulması, nem kaynaklı hataları önlemek açısından kritik önemdedir. Kurutulmamış malzeme, yüzey bozulmalarına, gözenek oluşumuna ve mekanik dayanım kaybına neden olur [33].

1.3.2 Eritme ve karıştırma

Kurutulan granüller, vida mekanizmasıyla ısıtılarak eriyik hâline getirilir. Bu aşamada hem termal hem de mekanik enerji kullanılır. Eriyik, vida ucunda birikir ve homojenize olur.

1.3.3 Enjeksiyon ve tutma

Elde edilen eriyik, kalıp boşluğuna yüksek hız ve basınçla enjekte edilir. Dolumun ardından, eriyik tamamen yerleşene kadar bir süre daha tutma basıncı uygulanır. Bu basınç, parçadaki çekmeyi azaltır ve iç yapının yoğunluğunu artırır.

1.3.4 Soğutma

Kalıba enjekte edilen eriyik malzeme, kalıpta yer alan entegre soğutma kanalları aracılığıyla hızla katılaştırılır. Bu adım, toplam çevrim süresinin yaklaşık %50 ila %80'ini oluşturur. Soğutma sresindeki dengesizlikler, parçanın çarpılmasına ve ölçüsel sapmalara neden olabilmektedir.

1.3.5 Kalıp açma ve parça ıkarma

Soğuyan rn, kalıptan çıkartılarak bir sonraki işlem için hazırlanır. Parçalar, yüzey kalitesi, ölçüsel doğruluk ve olası kusurlar açısından kalite kontrol aşamasından geçirilir.

Plastik enjeksiyon kalıplama, yüksek üretim hızı ve düşük maliyet avantajları sayesinde otomotiv, beyaz eşya, elektronik ve medikal sektörlerde yaygın olarak

kullanılmaktadır. Ancak bu yöntem, prosesteki çeşitli değişkenlere bağlı olarak kalite hatalarına açıktır. Literatürde, bu hataların çoğunun kalıp tasarımı, proses parametreleri ve hammadde özelliklerinden kaynaklandığı belirtilmektedir. Plastik enjeksiyon üretim yönteminde çeşitli hatalar çıkmaktadır. Plastik enjeksiyon üretim hataları aşağıdaki gibidir;

1.4 Enjeksiyon Kalıplama Sürecinde Moldflow Kullanımı

Otomotiv endüstrisinde çevresel regülasyonların sıkılaşması, yakıt verimliliği hedeflerinin artması ve tüketici beklentilerinin yükselmesi, malzeme teknolojilerinde yenilik ihtiyacını kaçınılmaz kılmıştır. Bu doğrultuda, düşük yoğunluk, yüksek mekanik dayanım ve maliyet etkinliği gibi temel gereksinimleri karşılayan termoplastik polimer malzemeler, geleneksel metal bileşenlerin yerini giderek daha fazla almaya başlamıştır. Özellikle polipropilen (PP), poliamid 66 (PA66), akrilonitril bütadien stiren (ABS) ile talk veya cam elyaf takviyeli termoplastikler; araç iç trim parçaları, havalandırma ızgaraları, konsol sistemleri ve kapı panelleri gibi birçok otomotiv uygulamasında yaygın olarak tercih edilmektedir [37].

Bu malzemelerin işlenmesinde en yaygın yöntem olan enjeksiyon kalıplama, birçok proses parametresine duyarlılığı nedeniyle karmaşık bir üretim metodudur. Kalıplama sürecinde; kalıp sıcaklığı, enjeksiyon hızı, eriyik viskozitesi, dolum süresi, katkı maddesi oranı, duvar kalınlığı değişimleri ve kalıp geometrisi gibi etkenler, parçanın nihai formunda boyutsal sapmalar, çarpılmalar, kısa dolum gibi üretim hatalarına yol açabilmektedir. Bu tür kusurları fiziksel prototipleme öncesinde öngörebilmek ve süreci sistematik biçimde optimize edebilmek amacıyla, bilgisayar destekli enjeksiyon mühendisliği (Computer-Aided Injection Engineering – CIAE) sistemleri devreye girmektedir [38].

Bilgisayar destekli enjeksiyon mühendisliği (CIAE) uygulamaları arasında, Autodesk firması tarafından geliştirilen Moldflow, endüstride en yaygın kullanılan enjeksiyon kalıplama simülasyon yazılımlarından biridir. Moldflow; dolum, paketlenme, soğutma, çarpılma, lif (fiber) yönelimi, kalıp kapanma kuvveti tahmini, yolluk optimizasyonu ve konformal soğutma gibi birçok kritik analizi kapsayan geniş kapsamlı bir simülasyon altyapısı sunmaktadır. Yazılım, ayrıca 10.000'in üzerinde termoplastik malzeme verisini içeren entegre bir veri kütüphanesi ile birlikte gelmektedir. Bu kütüphane, her malzemeye ait sıcaklığa bağlı viskozite eğrileri, PVT (Basınç–Hacim–

Sıcaklık) ilişkileri, cam geçiş sıcaklığı, özgül ısı kapasitesi, ısı iletkenliği ve katkı maddesi içerikleri gibi ayrıntılı termofiziksel özellikleri içermektedir. Böylece enjeksiyon süreci, yalnızca geometrik parametreler üzerinden değil, aynı zamanda malzeme özelinde de yüksek doğrulukta modellenebilmekte ve analiz edilebilmektedir.

Manufacturer	Trade name	Family abbreviation	Filler data: Description	Filler data: Weight (%)	Melt mass-flow rate ...	Energy usage indicator
95 Kingfa Sci & Tech Co Ltd	API 2515 MC	PP	Talc	22	13	2
96 TOTAL Petrochemicals	Finalloy EBP-721	PP/PE+EPDM	Talc	20	18	2
97 Machino Polymers Ltd	EXPO82101M	PP	Calcium Carbonate	12	13	3
98 Polypacific	Corton 1036/4 NATURAL	PP(CO)	Talc	20	18	2
99 TOTAL Petrochemicals	Finalloy SLV-67HM	PP+EPDM	Talc	21	15	3
90 Borealis Europe	EE1834I	PP	Talc	15	11	2
91 Borealis South America	SR552	PP	Talc	11	16	1
92 Borealis South America	EG206AIB	PP	Talc	25	19	1
93 Borealis South America	EE168AIB	PP	Talc	11	10	3
94 Asahi Kasei Plastics North America Inc	Thermylene P6-25FM-0155	PP	Mineral	25	13	2
95 Advanced Composites Inc	MFC040	PP	Talc	19.5	20	2
96 Advanced Composites Inc	MFC012	PP	Talc	19.5	20	2
97 TOTAL Petrochemicals	Finalloy SLV-70	PP	Talc	20	14	3
98 Zilon Plastolite	Minoblene 1522 MM	PP	Talc	20	16	2

Şekil 1.1: Moldflow hammadde veritabanında tanımlı malzeme arayüzü.

Mechanical properties data	
Elastic modulus, 1st principal direction (E1)	3430 MPa
Elastic modulus, 2nd principal direction (E2)	3407 MPa
Poissons ratio (v12)	0.362
Poissons ratio (v23)	0.402
Shear modulus (G12)	1263 MPa
Average elastic modulus	3418.5 MPa

Transversely isotropic coefficient of thermal expansion (CTE) data	
Alpha1	6.57e-05 1/C
Alpha2	6.82e-05 1/C

View test information ...

Determine matrix properties from the measured composite and filler properties

Weld Line Strength	
WLSC1	1/Ks
WLSC2	1/K"2s
Phi Critical	rad

Şekil 1.2: Moldflow yazılımına ait malzeme özellikleri arayüzü.

Moldflow'un simülasyon çıktıları sayesinde, üretim sürecine başlanmadan önce kısa dolun, birleşme hattı , hava kapanı, çöküntü ve çarpılma gibi üretim kaynaklı problemler önceden öngörülebilmektedir. Ayrıca fiber yönelimi analizi aracılığıyla, özellikle cam elyaf takviyeli parçaların anizotropik mekanik özellikleri parça genelinde simüle edilebilmekte; bu sayede mukavemet analizleri daha gerçekçi şekilde yürütülebilmektedir. Literatürde yapılan çeşitli çalışmalarda, Moldflow kullanımının çevrim süresinde %20 ila %30 oranında azalma, çarpılmada ise %40'a kadar iyileşme sağladığı rapor edilmiştir. Örneğin, Kariminejad ve arkadaşları tarafından yürütülen bir çalışmada; Moldflow destekli deney tasarımı sonucunda

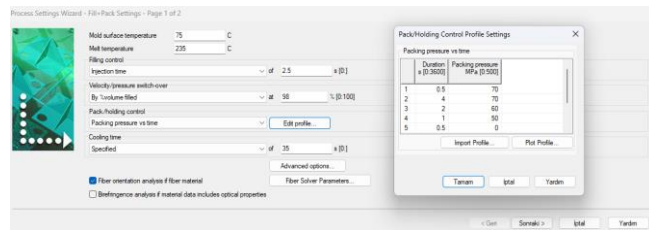
çevrim süresi 40 saniyeden 23 saniyeye düşürülmüş, çarpılma ve kalıp içi gerilme değerleri ise %35 oranında azaltılmıştır. [39].

Autodesk Moldflow yazılımı, yalnızca otomotiv endüstrisinde değil; tıp teknolojileri, ambalajlama, beyaz eşya ve tüketici elektroniği gibi birçok endüstriyel sektörde de yaygın olarak kullanılmaktadır. 2023 yılı itibarıyla enjeksiyon kalıplama simülasyon yazılımlarının küresel pazar büyüklüğü yaklaşık 1,2 milyar dolar olarak raporlanmış olup, bu değerin 2030 yılına kadar 2,5 milyar doların üzerine çıkması öngörülmektedir. Bu artış, özellikle simülasyon tabanlı mühendislik uygulamalarına olan talebin ve dijital doğrulama süreçlerinin öneminin giderek artmasından kaynaklanmaktadır [40].

Sonuç olarak, Moldflow gibi gelişmiş enjeksiyon simülasyon yazılımları; üretim öncesi analiz, kalite kontrol, tasarım optimizasyonu ve maliyet azaltımı açısından vazgeçilmez mühendislik araçları hâline gelmiştir. Özellikle otomotiv endüstrisinde, üretim sürecinin hızlandırılması, ürün kalitesinin artırılması ve tasarım tekrarlarının en aza indirilmesi gibi kritik alanlarda önemli katkılar sağlamaktadır.

1.4.1 Moldflow analizlerinde tanımlanan girdi parametreleri

Enjeksiyon kalıplama simülasyonlarında doğru sonuçlara ulaşılabilmesi, yalnızca yazılımın algoritmik gücüyle değil, aynı zamanda kullanıcı tarafından girilen proses parametrelerinin doğruluğuyla da doğrudan ilişkilidir. Autodesk Moldflow yazılımı, enjeksiyon kalıplama sürecini fiziksel gerçekliğe en yakın biçimde modelleyebilmek için bir dizi temel işlem girdisinin kullanıcı tarafından tanımlanmasını gerektirir. Bu girdiler, üretim koşullarının dijital ortama taşınması açısından kritik öneme sahiptir. Aşağıda bu parametreler, teknik ve uygulama yönleriyle detaylandırılmıştır.



Şekil 1.3: Moldflow parametre girişi arayüzü.

1.4.1.1 Erime sıcaklığı

Erime sıcaklığı, plastik hammaddenin enjeksiyon aşamasında kalıp boşluğuna akarken sahip olduğu sıcaklık değeridir. Bu parametre, doğrudan malzemenin türüne bağlı olarak belirlenmekte olup, genellikle teknik veri sayfalarında belirtilen işleme aralıkları içerisinde seçilir. Yüksek viskoziteye sahip polimerlerde daha yüksek erime sıcaklığı gerekebilirken, amorf yapılı bazı polimerlerde ise termal bozunmayı önlemek amacıyla daha düşük sıcaklık tercih edilmelidir. Erime sıcaklığı; kalıp dolumunun başarısı, yüzey kalitesinin korunması ve birleşme hattı gibi potansiyel yüzey kusurlarının önlenmesi açısından kritik öneme sahiptir.

1.4.1.2 Kalıp sıcaklığı

Kalıp sıcaklığı, erimiş plastik malzemenin kalıba enjekte edilmesinden sonraki süreçte, parçanın yüzey kalitesi, iç gerilme dağılımı ve kristallenme davranışı üzerinde doğrudan etkili olan önemli bir proses parametresidir. Düşük kalıp sıcaklıkları, çevrim süresini kısaltarak üretim hızını artırabilirken; yüksek kalıp sıcaklıkları ise daha düzgün yüzey özellikleri ve daha düşük artık gerilmeler elde edilmesine olanak tanımaktadır. Bu nedenle kalıp sıcaklığı; kullanılan malzemenin türü, parça geometrisi (özellikle duvar kalınlığı) ve istenen kalite gereksinimleri doğrultusunda kullanıcı tarafından belirlenmekte ve proses optimizasyonunda kritik rol oynamaktadır.

1.4.1.3 Enjeksiyon süresi

Enjeksiyon süresi, eriyik halindeki plastiğin kalıp boşluğunu eksiksiz biçimde doldurabilmesi için geçen zaman aralığını ifade etmektedir. Bu süre; akış uzunluğu, kalıp içi kanal geometrisi ve enjeksiyon hızı gibi faktörlerden doğrudan etkilenmektedir. Sürenin gereğinden kısa belirlenmesi, eriyik üzerinde yüksek kesme gerilmeleri oluşturarak malzeme ayrışmasına ve yüzey kalitesinde bozulmalara yol açabilirken; aşırı uzun süreler ise dengesiz dolum, soğuma farklılıkları ve çevrim süresinde uzamaya neden olabilmektedir. Bu parametre, çoğunlukla önceki üretim tecrübelerine, kullanılan malzemenin özelliklerine ve Moldflow gibi simülasyon yazılımlarının önerdiği işlem pencerelerine göre kullanıcı tarafından optimize edilmektedir.

1.4.1.4 Tutma basıncı ve süresi

Tutma basıncı, kalıp dolumunun tamamlanmasının ardından, parça içerisinde oluşabilecek boşluk, çekme ve dış yüzey çöküntülerini önlemek amacıyla uygulanan ek basınçtır. Bu parametre, kullanılan polimerin reolojik özellikleri ile birlikte, parçanın geometrik karmaşıklığı ve duvar kalınlığı dağılımı gibi faktörlere bağlı olarak belirlenir. Tutma süresi ise söz konusu basıncın ne kadar süreyle uygulanacağını ifade eder. Yeterli tutma süresi, eriyik halindeki malzemenin soğuma ve katılaşma fazında kalıp boşluğunu tamamen doldurmasını sağlayarak boyutsal hassasiyetin artırılmasına katkı sunar. Ancak, aşırı uzun tutma süreleri çevrim süresini uzatarak üretim verimliliğini düşürebilir. Bu nedenle, tutma basıncı ve süresi, simülasyon destekli analizlerle birlikte optimize edilmesi gereken kritik proses parametreleri arasında yer almaktadır.

1.4.1.5 Soğuma süresi

Soğuma süresi, enjeksiyonla kalıplanan plastiğin, kalıptan çıkarılabilecek yeterli mekanik rijitliğe ulaşması için geçen süreyi ifade eder. Bu parametre, başta malzemenin ısı iletkenliği, parça kalınlığı, kristallenme eğilimi ve kalıp içi soğutma sisteminin verimliliği olmak üzere çeşitli faktörlerden etkilenmektedir. Soğuma süresi, çoğu durumda toplam çevrim süresinin %50 ila %80'ini oluşturmakta olup, üretim verimliliği üzerinde doğrudan etkilidir. Kullanıcı tarafından genellikle deneyim temelli yaklaşımlar ya da Moldflow gibi yazılımların sunduğu sayısal tahminler doğrultusunda belirlenmektedir. Uygun şekilde belirlenmiş bir soğuma süresi, hem boyutsal kararlılığın sağlanmasına hem de iç gerilme oluşumunun azaltılmasına katkıda bulunur.

1.4.1.6 Çevrim süresi

Çevrim süresi, enjeksiyon kalıplama sürecinde enjeksiyon, tutma, soğutma ve kalıptan çıkarma adımlarının toplamını kapsayan, tek bir parçanın üretilmesi için geçen toplam zamandır. Bu parametre, üretim sürecinin verimliliğini belirleyen temel göstergelerden biridir. Moldflow yazılımı, çevrim süresini bileşenlerine ayırarak her bir aşamanın sürelerini ayrı ayrı simüle edebilmekte ve böylece süreç içi optimizasyon yapılmasına olanak sağlamaktadır. Bununla birlikte, kullanıcı tarafından üretim hedeflerine bağlı olarak hedef çevrim süresi önceden sisteme tanımlanabilmekte ve bu doğrultuda simülasyon senaryoları yürütülebilmektedir.

Doğru tanımlanmış bir çevrim süresi, yalnızca zaman yönetimini değil, aynı zamanda üretim maliyetlerini, enerji tüketimini ve verimliliği doğrudan etkilemektedir.

Autodesk Moldflow’da gerçekleştirilen enjeksiyon kalıplama simülasyonları, üretim sürecinin dijital ortamda optimize edilmesini sağlar. Ancak bu optimizasyonun güvenilirliği, büyük ölçüde kullanıcı tarafından girilen proses parametrelerinin doğruluğuna bağlıdır. Erime sıcaklığı, enjeksiyon süresi, kalıp sıcaklığı, tutma basıncı ve soğuma süresi gibi temel girdilerin gerçek üretim koşullarını yansıtacak şekilde doğru belirlenmesi hem simülasyon kalitesini hem de üretim verimliliğini doğrudan etkiler [41].

1.4.2 Moldflow simülasyonu ile elde edilen analiz çıktılarının incelenmesi

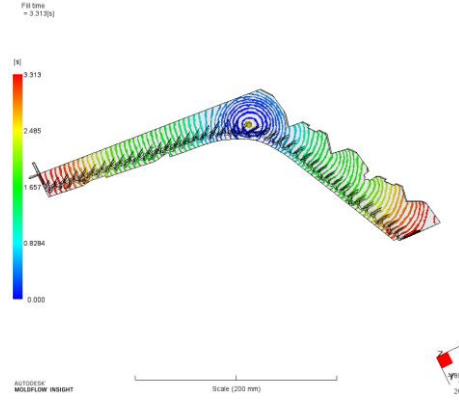
Bilgisayar destekli enjeksiyon kalıplama simülasyonları, geleneksel deneme-yanılma yöntemlerinin yerine geçerek daha kontrollü, öngörülebilir ve veriye dayalı üretim süreçlerinin tasarlanmasına olanak tanımaktadır. Bu kapsamda Autodesk Moldflow yazılımı, yalnızca kalıp dolum davranışını modellemekle kalmaz; aynı zamanda parçanın nihai performansını etkileyebilecek birçok kritik prosese ilişkin parametreyi de görsel ve sayısal çıktılarla analiz edilebilir hâle getirir.

Aşağıda, Moldflow simülasyonları sonucunda elde edilen temel çıktılar ile bu çıktılara ilişkin mühendisliksel değerlendirmeler detaylı biçimde sunulmuştur.

1.4.2.1 Dolum süresi ve akış profili

Moldflow analizlerinin en temel çıktılarından biri dolum süresidir. Bu çıktı, erimiş polimerin kalıp boşluğunu hangi süre içerisinde doldurduğunu göstererek, parça geometrisine bağlı olarak oluşabilecek doldurma problemlerinin önceden öngörülmesine olanak tanır. Özellikle uzun ve dar akış yollarına sahip karmaşık parça geometrilerinde, eriyik akışının sonlandığı bölgelerde meydana gelebilecek donma ve kısa dolum riski bu analizle önceden tespit edilebilmektedir.

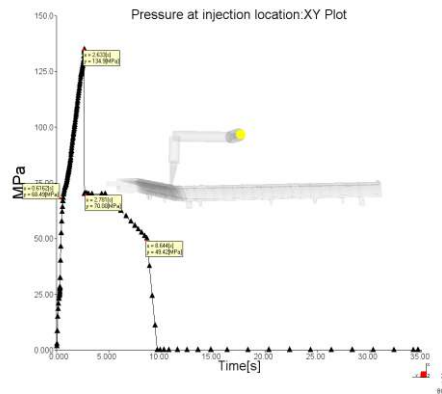
Zsidak ve arkadaşlarının gerçekleştirdiği çalışmada, dolum süresi parametresinin optimizasyonu sonucunda dolum kalitesinde %15’e varan oranda iyileşme sağlandığı rapor edilmiştir. Bu bulgu, dolum süresi çıktısının hem parça kalitesi hem de proses güvenliği açısından kritik bir kontrol parametresi olduğunu ortaya koymaktadır. [41].



Şekil 1.4: Kalıp dolum aşamasına ait akış profili.

1.4.2.2 Enjeksiyon basıncı ve basınç dağılımı

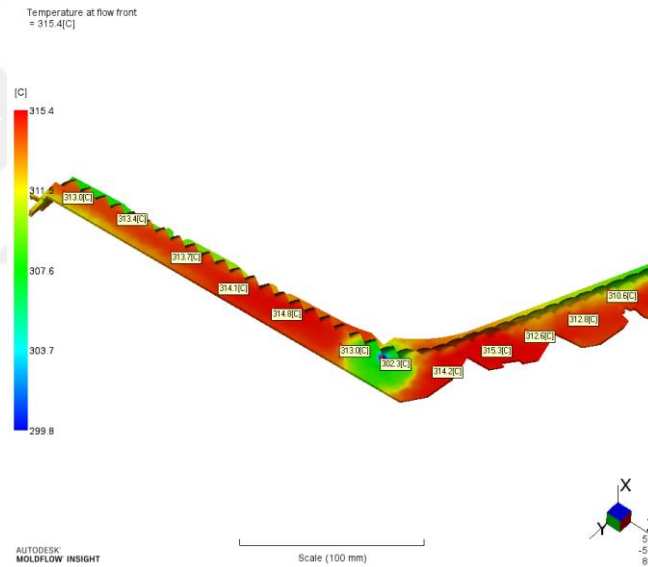
Moldflow analiz çıktılarından biri olan enjeksiyon basıncı; eriyik polimerin kalıp boşluğunu doldurabilmesi için gerekli olan basınç miktarını ve bu basıncın kalıp içerisindeki mekânsal dağılımını sayısal olarak ortaya koymaktadır. Yüksek enjeksiyon basıncı, kalıp ömrünün azalmasına ve parça üzerinde iç gerilmelerin oluşmasına neden olmaktadır. Autodesk Moldflow yazılımı aracılığıyla bu basınç dağılımı bölgesel olarak analiz edilebilmekte; elde edilen veriler doğrultusunda kalıp tasarımında lokal düzeltmeler yapılarak proses dengesi sağlanabilmektedir. Kariminejad ve arkadaşlarının gerçekleştirdiği çalışmada, enjeksiyon basıncının optimize edilmesi ile çarpılma oranının %22 oranında azaltıldığı rapor edilmiştir. Elde edilen bu bulgular, enjeksiyon basıncının yalnızca dolum kalitesi üzerinde değil, aynı zamanda boyutsal kararlılık ve kalıp dayanımı üzerinde de belirleyici bir parametre olduğunu ortaya koymaktadır [39].



Şekil 1.5: Moldflow basınç dağılım grafiği.

1.4.2.3 Sıcaklık dağılımı

Dolum süreci boyunca malzemenin sıcaklık profili, kalıp içerisindeki ısı dengesizlikler nedeniyle nihai ürün kalitesi üzerinde doğrudan etkili olabilmektedir. Özellikle sıcaklık gradyanlarının yüksek olduğu bölgelerde, yüzey hataları, birleşim çizgileri ve kristallenme düzensizlikleri gibi üretim kusurları oluşabilmektedir. Autodesk Moldflow yazılımı, hem eriyik malzeme sıcaklığının hem de kalıp yüzey sıcaklıklarının zamana bağlı dağılımını ayrıntılı biçimde simüle ederek bu risklerin öngörülmesini sağlar. Simülasyon çıktıları, uygun kalıp sıcaklığı ve proses parametreleri ile ısı eşitsizliklerin azaltılabileceğini ve böylece daha homojen bir dolumun sağlanabileceğini göstermektedir. Bu bağlamda, sıcaklık profiline ilişkin simülasyon verileri, hem malzeme davranışının daha doğru modellenmesini hem de üretim kalitesinin artırılmasını mümkün kılmaktadır.



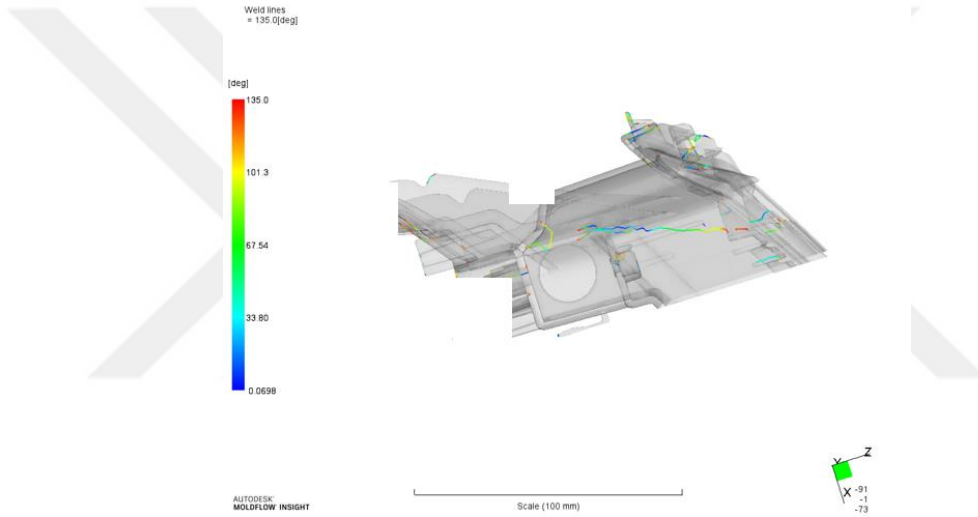
Şekil 1.6: Moldflow sıcaklık dağılımı

1.4.2.4 Birleşme çizgisi ve hava sıkışması

Enjeksiyon kalıplama sürecinde, kalıp boşluğuna farklı yönlerden ilerleyen eriyik cephelerin birleştiği noktalarda birleşme çizgisi oluşur. Bu bölgeler, genellikle düşük polimer zinciri difüzyonu ve yetersiz eriyik sıcaklığı nedeniyle zayıf mekanik bağlanma gösterir. Dolayısıyla birleşme çizgileri, parçanın yapısal bütünlüğünü olumsuz yönde etkileyerek, özellikle darbe ve çekme dayanımı açısından kritik zayıflık noktaları haline gelebilir. Moldflow yazılımı, bu çizgilerin

oluşabileceği bölgeleri otomatik olarak simülasyon çıktılarında belirlemekte ve kullanıcıyı görsel olarak bilgilendirmektedir.

Benzer şekilde, hava sıkışması kalıp içerisinde hapsolan gazların dışarı atılamaması sonucu oluşur. Bu durum, gaz tahliye kanallarının yetersizliği veya uygun olmayan dolum stratejileri ile ilişkilidir. Hava sıkışması, parçanın yüzey kalitesini olumsuz etkileyebileceği gibi, lokal yanma izleri veya kısa dolum gibi kusurlara da neden olabilir. Moldflow, bu alanları da simülasyon yoluyla önceden tespit ederek, kalıp tasarımında havalandırma kanallarının optimize edilmesine olanak sağlar. Literatürde, bu tür simülasyon tabanlı tespitlerin üretim hatalarını önemli ölçüde azalttığı ve kalıp revizyon maliyetlerini düşürdüğü rapor edilmiştir.



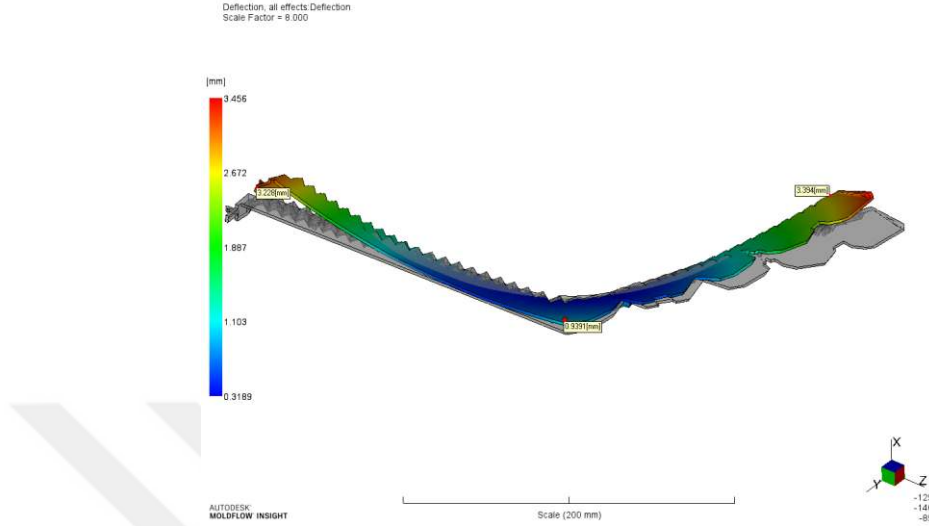
Şekil 1.7: Moldflow birleşme çizgisi görüntüsü.

1.4.2.5 Çarpılma

Çarpılma, enjeksiyon kalıplama sürecinde kalıp içi sıcaklık dağılımındaki düzensizlikler, soğuma süresindeki dengesizlikler ve malzemenin anizotropik çekme eğilimleri sonucunda meydana gelen boyutsal deformasyonlardır. Bu deformasyonlar, özellikle hassas toleranslara sahip otomotiv parçalarında işlevsel ve estetik problemler yaratabilmektedir. Autodesk Moldflow simülasyon yazılımı, çarpılma tahminlerini gerçekleştirmek için hem malzemeye özgü PVT (Basınç-Hacim-Sıcaklık) eğrilerini hem de çekme ve genleşme katsayılarına ilişkin termomekanik verileri entegre biçimde kullanır.

Gerçekleştirilen çalışmalarda, Moldflow simülasyonları kullanılarak yapılan proses parametresi optimizasyonlarının çarpılma miktarını %40'a kadar azaltabildiği rapor

edilmiştir Bu bağlamda, çarpılma analizlerinin üretim öncesi süreçte simülasyon ortamında gerçekleştirilmesi, hem parça kalitesinin artırılmasına hem de kalıp revizyon maliyetlerinin düşürülmesine önemli katkılar sağlamaktadır.

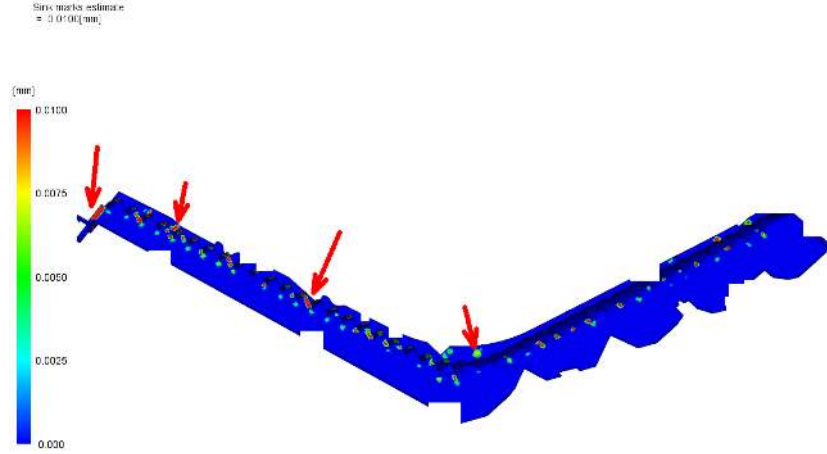


Şekil 1.8: Moldflow çarpılma sonucu görüntüsü

1.4.2.6 Çöküntü oluşumu

Enjeksiyon kalıplama sürecinde, özellikle kalın kesitli bölgelerde, yüzeyin altında yer alan malzemenin çekmesiyle oluşan hacimsel azalmalar sonucunda çökme izleri meydana gelebilmektedir. Bu durum, hem estetik hem de fonksiyonel açıdan kalite sorunlarına yol açmaktadır. Autodesk Moldflow yazılımı, çökme potansiyeli taşıyan bölgeleri renkli kontur haritaları ile görselleştirerek kullanıcıya sunmakta ve olası çökme derinliklerine dair sayısal tahminlerde bulunmaktadır.

Simülasyon çıktıları, kalıp tasarımında yer alan soğutma kanallarının düzenlenmesi, et kalınlıklarının optimize edilmesi ve dolum koşullarının iyileştirilmesi gibi düzeltici mühendislik kararlarının alınmasına olanak sağlamaktadır. Bu bağlamda, üretim öncesi çökme analizlerinin gerçekleştirilmesi, hem ürün kalitesinin artırılmasına hem de kalıp revizyon ihtiyacının azaltılmasına katkı sunmaktadır.



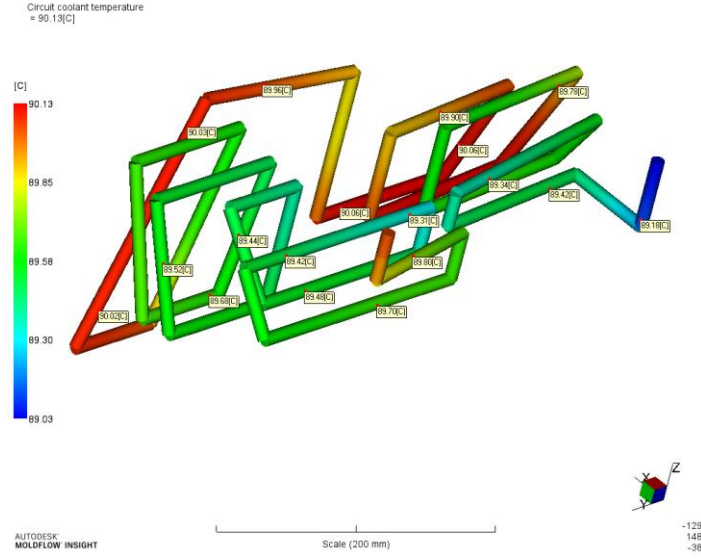
Şekil 1.9: Moldflow çöküntü görüntüsü.

1.4.2.7 Fiber yönelimi

Cam elyaf veya karbon elyaf ile takviye edilmiş polimer kompozitlerde, liflerin enjeksiyon kalıplama sırasında akış yönüne bağlı olarak yönelmesi, parçanın mekanik özelliklerinde anizotropik bir davranış sergilemesine neden olmaktadır. Bu durum, farklı yönlerde değişen çekme dayanımı, elastik modül ve darbe direnci gibi özelliklerin ortaya çıkmasına yol açar. Autodesk Moldflow yazılımı, lif yönelimi analizini üç boyutlu vektör alanları üzerinden gerçekleştirmekte ve parçanın her bölgesindeki ortalama lif hizalanma derecesini sayısal olarak raporlamaktadır.

1.4.2.8 Soğuma süresi ve sıcaklık homojenliği

Simülasyon sürecinin son aşamalarından biri olan soğuma analizi, enjeksiyon kalıplama işlemi sonrasında parçanın kalıp içerisinde hangi sürede katılaşarak çıkarılabilir hâle geleceğini hesaplamaktadır. Soğuma süresi, toplam çevrim süresinin önemli bir kısmını oluşturduğundan, üretim maliyetleri ve verimliliği açısından belirleyici bir parametredir. Kalıp içerisindeki sıcaklık dağılımında meydana gelen farklılıklar, soğuma sürecinde düzensizliklere neden olarak parçanın iç yapısında termal gerilmelerin oluşmasına zemin hazırlayabilir. Moldflow simülasyonları, bu tür sıcaklık eşitsizliklerini sayısal ve görsel çıktılarla ortaya koyarak, kalıp tasarımında gerekli revizyonların yapılmasına olanak tanır. Böylece parçanın boyutsal kararlılığı ve üretim kalitesi iyileştirilebilir.



Şekil 1.10: Moldflow soğutma hattı sıcaklık dağılımı.

Moldflow yazılımı, enjeksiyon kalıplama sürecinde üretim öncesi olası hataların öngörülmesini, süreç parametrelerinin optimize edilmesini ve ürün kalitesini artırmaya yönelik stratejilerin geliştirilmesini mümkün kılan çok boyutlu analiz çıktıları üretmektedir. Bu çıktılar yalnızca üretim verimliliğini artırmakla kalmayıp; aynı zamanda zaman, maliyet ve kaynak kullanımı açısından da önemli avantajlar sağlamaktadır. Özellikle akademik çalışmalarda, Moldflow simülasyonlarının deneysel doğrulama yöntemleriyle birlikte kullanılması, süreç analizlerinin güvenilirliğini ve geçerliliğini önemli ölçüde artırmaktadır.

1.5 Taguchi Yöntemi

Taguchi Metodu, Japon istatistikçi ve mühendis Genichi Taguchi tarafından geliştirilen ve kaliteyi iyileştirme amacına yönelik deney tasarımı yaklaşımıdır. Bu yöntem, ürün veya süreç performansını etkileyen kontrol edilebilir faktörlerin yanı sıra çevresel koşullardan kaynaklanan kontrol edilemeyen "gürültü" faktörlerini ayrı ayrı ele alarak sistematik bir değerlendirme sunar [42]. Taguchi'ye göre kalite, yalnızca hedef değere ulaşmakla sınırlı olmayıp, aynı zamanda bu hedef çevresindeki değişkenliğin en aza indirilmesini de kapsar. Bu yaklaşıma dayanarak geliştirilen kayıp fonksiyonu, hedef değerden sapmanın ekonomik karşılığını matematiksel olarak ifade eder. Fonksiyonun genel formu aşağıdaki gibidir:

$$L(y) = k * (y - m)^2 \quad (1.1)$$

Bu denklemde, $L(y)$ kalite kaybını, y gözlenen değeri, m hedef performansı ve k ise kaybın ekonomik etkisini temsil eder. Taguchi'ye göre, ürün ya da süreç çıktısı tolerans aralığında kalsa dahi, hedef değerden uzaklaşması kalite kaybı olarak değerlendirilmelidir. Bu nedenle hem ortalama performansa ulaşmak hem de varyasyonu en aza indirmek yöntemin temel amacıdır. Taguchi yönteminde deneysel çalışmalar, ortogonal diziler olarak bilinen özel tablolarla yapılandırılır. Bu diziler, birçok parametreyi, sınırlı sayıdaki deney ile sistematik şekilde inceleme imkânı sunar. Örneğin, dört farklı faktörün üç seviyede analiz edildiği bir çalışmada, klasik tam faktöryel yaklaşım 81 deneme gerektirirken, Taguchi'nin sunduğu L9 ortogonal dizisiyle yalnızca 9 deney yeterlidir. Bu yönüyle yöntem, ciddi anlamda zaman ve kaynak tasarrufu sağlar [43]. Taguchi metodunda deney tasarımı için kullanılan ortogonal diziler, faktör sayısı ve seviye kombinasyonlarına göre çeşitlenmektedir. Yaygın olarak kullanılan bazı temel diziler aşağıda özetlenmiştir: L9 (3^4) Dizisi: Üç seviyeli dört faktör içeren sistemler için uygundur. Genellikle düşük maliyetli, küçük ve orta ölçekli proses analizlerinde kullanılır. L16 (4^5) Dizisi: Dört seviyeli beş faktörlü deney sistemleri için geliştirilmiştir. Özellikle katkı maddesi oranları gibi dört seviyeli değişkenlerin incelendiği tasarımlar için elverişlidir. L18 ($2^1 \times 3^7$) Dizisi: Hem iki seviyeli hem de üç seviyeli faktörlerin aynı deneysel tasarımda yer aldığı karma yapıları sistemlerde uygulanmaktadır. L27 (3^{13}) Dizisi: On üç adet üç seviyeli faktörün yer aldığı, yüksek değişkenli ve geniş kapsamlı analizlerin gerektiği deneysel çalışmalarda kullanılmaktadır. Bu diziler, Taguchi metodunun sunduğu sistematik yaklaşım çerçevesinde, daha az sayıda deneyle çoklu faktör etkilerini güvenilir şekilde değerlendirmeye olanak tanımaktadır. Bu dizilerle yapılan deneylerden elde edilen veriler, Sinyal/Gürültü (S/N) oranı yöntemiyle değerlendirilir. S/N oranı, sistem performansının dışsal etkiler karşısındaki kararlılığını ölçer. Taguchi bu oranları üç temel kalite kriteri altında sınıflandırmıştır: “Daha büyük daha iyidir” : Çekme dayanımı veya verimlilik gibi artırılması arzu edilen çıktılar için kullanılır. “Daha küçük daha iyidir” : Hata oranı, yüzey pürüzlülüğü veya enerji tüketimi gibi azaltılması gereken durumlar için uygundur.

“Hedefe en yakın en iyidir” : Ürün veya parçanın belirli bir ölçüye ulaşmasının kritik olduğu uygulamalarda tercih edilir (örneğin mil çapı, parça kalınlığı gibi) [42].

Bu yaklaşımlar sayesinde her bir faktörün süreç üzerindeki etkisi, sadece ortalama sonuçlara göre değil aynı zamanda sistemin stabilitesi açısından da değerlendirilerek optimum seviyeler belirlenebilir. Yöntemin en belirgin avantajlarından biri, yüksek doğrulukta optimizasyonu düşük sayıda deney ile mümkün kılmasıdır.

Otomotiv sanayisinde, Taguchi yöntemi enjeksiyon kalıplama süreçlerinin optimizasyonunda yaygın olarak kullanılmaktadır. Kalıp sıcaklığı, enjeksiyon hızı ve tutma basıncı gibi kritik proses parametrelerinin etkileri, bu yöntem aracılığıyla sistematik biçimde analiz edilmekte; çarpılma, iç gerilim ve doluluk gibi kalite karakteristikleri açısından iyileştirmeler sağlanmaktadır. Böylece hem üretim verimliliği artırılmakta hem de nihai ürün kalitesindeki değişkenlik azaltılarak müşteri memnuniyeti üst düzeye çıkarılmaktadır.

1.6 Literatür Araştırması

Shen ve çalışma arkadaşları tarafından yürütülen bu çalışmada, plastik enjeksiyon kalıplama sürecinde meydana gelen çöküntü hatalarının en aza indirilmesi hedeflenmiştir. Araştırma kapsamında L18 ortogonal Taguchi deney tasarımı kullanılmış ve deneyler Moldflow simülasyonu ile desteklenmiştir. İncelenen parametreler arasında erime sıcaklığı, kalıp sıcaklığı, enjeksiyon hızı, packing süresi ve gate-rib mesafesi yer almıştır. ANOVA sonuçlarına göre packing süresi %35 ile en etkili parametre olarak belirlenmiş, kalıp sıcaklığı ise %25 etki ile ikinci sırada yer almıştır. Yapılan optimizasyon çalışmaları sonucunda, çöküntü derinliği %47 oranında azaltılmış ve başlangıçta 0.15 mm olan değer 0.08 mm'ye kadar düşürülmüştür. Bu çalışma, süreç parametrelerinin dikkatli seçiminin ürün kalitesine olan etkisini ortaya koymuştur [44].

Erzurumlu ve çalışma arkadaşları tarafından yürütülen bu çalışmada, enjeksiyon kalıplama sürecinde meydana gelen şekil bozuklukları olan çarpılma ve sink mark hatalarının azaltılması amaçlanmıştır. Çalışmada, PC/ABS, PA66 ve POM gibi üç farklı termoplastik malzeme kullanılarak L18 ortogonal Taguchi deney tasarımı uygulanmıştır. DeneySEL süreç, Moldflow simülasyonları ile desteklenmiş ve istatistiksel analizler kapsamında varyans analizi gerçekleştirilmiştir. Değerlendirilen parametreler arasında eriyik sıcaklığı, kalıp sıcaklığı, packing basıncı ve yolluk geometrisi yer almıştır. Varyans analizi sonuçlarına göre, tutma

basıncı en etkili faktör olarak belirlenmiş ve bu parametrede yapılan optimizasyonla hem çarpılma hem de çöküntü indeksinde anlamlı iyileşmeler elde edilmiştir. Elde edilen bulgular, enjeksiyon kalıplama parametrelerinin dikkatli seçiminin ürün kalitesini doğrudan etkilediğini ve istatistiksel modelleme yöntemlerinin bu süreçte etkin rol oynadığını göstermektedir [45].

Mathivanan ve çalışma arkadaşları tarafından yürütülen bu çalışmada , enjeksiyon kalıplama sürecinde meydana gelen çöküntü hatalarının azaltılması amacıyla Taguchi yöntemi, Yanıt Yüzey Metodolojisi (RSM) ve Genetik Algoritma (GA) birlikte kullanılmıştır. Çalışmada kullanılan deneysel tasarım, Taguchi yöntemi ile oluşturulmuş ve Moldflow simülasyonları ile desteklenmiştir. İncelenen parametreler arasında eriyik sıcaklığı, kalıp sıcaklığı, packing basıncı ve rib oranı yer almıştır. Yapılan varyans analizine göre packing basıncı en etkili parametre olarak belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, başlangıçta 0.14 mm olan sink mark derinliği, optimize edilmiş koşullarda 0.06 mm'ye kadar düşürülmüş ve bu da yaklaşık %57 oranında iyileşme sağlamıştır. GA ile elde edilen sonuçlar, Moldflow simülasyonları ile yüksek oranda doğrulanmıştır. Bu kapsamda çalışma, klasik istatistiksel tekniklerle hesaplama tabanlı optimizasyonun entegre kullanımının enjeksiyon kalıplama süreçlerinde önemli kazanımlar sağlayabileceğini göstermektedir [46].

Tang ve çalışma arkadaşları tarafından yürütülen bu çalışmada, plastik enjeksiyon kalıplama sürecinde meydana gelen şekil bozuklukları olan çarpılma hatalarının azaltılması amaçlanmıştır. Bu kapsamda, L18 ortogonal Taguchi deney tasarımı uygulanmış ve deneyler Moldflow simülasyonları ile desteklenmiştir. Çalışmada eriyik sıcaklığı, kalıp sıcaklığı, enjeksiyon basıncı, packing süresi ve soğutma süresi gibi süreç parametrelerinin çarpılma üzerindeki etkileri analiz edilmiştir. Varyans analizi sonuçlarına göre, kalıp sıcaklığı %39, packing süresi ise %27 oranında katkı sağlayarak en etkili faktörler olarak öne çıkmıştır. Yapılan parametre optimizasyonları neticesinde, çarpılma değerinde yaklaşık %31'lik bir azalma sağlanmıştır. Bu bulgular, simülasyon çıktılarıyla deneysel verilerin büyük ölçüde uyumlu olduğunu göstermekte ve istatistiksel yöntemlerle yapılan optimizasyonun üretim kalitesine doğrudan katkısını vurgulamaktadır [47].

Kato ve çalışma arkadaşları tarafından yürütülen bu çalışmada, polipropilen (PP) esaslı kompozitlerde kullanılan katkı maddelerinin hacimsel çekme üzerindeki

etkileri değerlendirilmiştir. Araştırma kapsamında, hem talk hem de cam elyaf takviyelerinin farklı oranlardaki kullanımları, boyutsal stabilite açısından karşılaştırılmıştır. Deneysel süreçte Taguchi L9 ortogonal deney tasarımı uygulanmış, elde edilen veriler varyans analizi ile istatistiksel olarak değerlendirilmiştir. Varyans analizi sonuçları, çekme davranışında en yüksek etkiyi katkı maddesinin türünün sağladığını ortaya koymuştur. Cam elyaf katkılı sistemlerde, talk takviyeli sistemlere kıyasla daha düşük çekme değerleri elde edilmiştir. Katkı oranı ikinci derecede etkili parametre olarak belirlenirken, partikül boyutunun etkisi daha sınırlı kalmıştır. Simülasyon ve deneysel veriler birlikte incelendiğinde, akış yönündeki hacimsel çekme değerlerinde %38, enine yöndeki çekme değerlerinde ise %42 oranında iyileşme sağlandığı rapor edilmiştir. Çalışma sonucunda, katkı türü ve oranının uygun biçimde optimize edilmesinin, kalıplama sonrası boyutsal hataların azaltılmasında kritik rol oynadığı vurgulanmıştır. Bu kapsamda, katkı malzemelerinin enjeksiyon kalıplama kalitesine olan etkilerini sistematik olarak analiz eden bu araştırma, mühendislik uygulamalarında yüksek boyutsal doğruluk gerektiren plastik parçalarda katkı seçiminin önemine dikkat çekmektedir [48].

Baraheni ve arkadaşları tarafından yürütülen bu çalışmada, PA6/ABS bazlı nanokompozit sistemlere farklı oranlarda kalsiyum karbonat (CaCO_3) katkısı ilave edilerek, enjeksiyon kalıplama sürecindeki geometrik kalite problemleri özellikle çarpılma ve hacimsel çekme değerlendirilmiştir. Çalışmada, L9 Taguchi ortogonal deney dizisi temel alınmış ve Moldflow simülasyon yazılımı ile desteklenmiştir. Değişkenler arasında CaCO_3 katkı oranı (%0, %10, %20), eriyik sıcaklığı (240 °C, 250 °C, 260 °C) ve kalıp sıcaklığı (60 °C, 70 °C, 80 °C) gibi parametreler yer almıştır. Analiz sonuçlarına göre, katkı oranının hacimsel çekme üzerindeki katkısı %52,4 olarak belirlenmiş, bu parametre hacimsel çekme üzerinde en etkili değişken olmuştur. Çarpılma üzerinde ise kalıp sıcaklığı %43,8 katkı oranıyla en önemli etken olarak öne çıkmıştır. En uygun parametre kombinasyonu 10 % CaCO_3 , 250 °C eriyik sıcaklığı ve 70 °C kalıp sıcaklığı olarak tanımlanmıştır. Bu koşullarda, parçadaki maksimum çarpılma değeri 0.45 mm'den 0.28 mm'ye (%37,8 azalma), hacimsel çekme değeri ise %1.36'dan %0,79'a (%41,9 azalma) düşürülmüştür. Deneysel sonuçlar ile Moldflow analiz çıktıları arasındaki korelasyon oranı $R^2 = 0,94$ olarak hesaplanmış ve bu durum, simülasyon destekli

Taguchi optimizasyonunun yüksek öngörü kabiliyetini ortaya koymuştur. Elde edilen bulgular, katkı maddesi içeriğinin kontrollü biçimde optimize edilmesinin, parça boyutsal kararlılığını ve genel ürün kalitesini anlamlı ölçüde iyileştirebildiğini göstermektedir [49].

Ryu ve çalışma arkadaşları tarafından yürütülen bu çalışmada, polipropilen (PP) esaslı kompozitlerde talk ve cam elyaf katkılarının çekme davranışı üzerindeki etkileri incelenmiştir. Taguchi L8 deney tasarımı ile yürütülen çalışmada katkı türü, katkı oranı (%0–20) ve parçacık boyutu değişken olarak ele alınmıştır. Varyans analizi sonuçlarına göre katkı türü en etkili parametre olarak belirlenmiş; %20 cam elyaf takviyeli PP örneklerinde akış yönü ve enine yöndeki çekme sırasıyla %0,28 ve %0,46 iken, %20 talk katkısında bu değerler %1,26 ve %1,22 olarak ölçülmüştür. Talk dolgu, toplam çekmeyi cam elyaf kadar düşürmese de yönsel farkları azaltmada daha başarılı bulunmuştur. Karma katkı kombinasyonlarında (%11 talk + %9 cam elyaf) ise hem toplam çekmenin %1,2'ye hem de yönsel farkın %0,1'e indirilebildiği gösterilmiştir. Bu bulgular, katkı türü ve oranının boyutsal kararlılık açısından optimize edilmesinin enjeksiyon kalıplamada önemli rol oynadığını göstermektedir [50].

Prashantha ve çalışma arkadaşları tarafından yürütülen bu çalışmada, polipropilen (PP) matrisine %2 oranında çok duvarlı karbon nanotüp (CNT) takviyesi uygulanarak enjeksiyon kalıplama sürecinde ortaya çıkan boyutsal hataların azaltılması hedeflenmiştir. Taguchi yöntemine dayalı deneysel tasarım ile enjeksiyon hızı, baskı basıncı, geri basınç ve vida devri gibi işlem parametreleri iki seviyede optimize edilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, CNT takviyesi çekme üzerinde önemli ölçüde iyileşme sağlamıştır. Özellikle akış yönünde çekme, tavlama öncesi örneklerde katkısız PP'ye göre %48'e, tavlama sonrası ise yaklaşık %33'e kadar azaltılmıştır. Benzer şekilde çarpılma hatalarında %55'e varan azalma gözlemlenmiştir. İlginç biçimde, CNT takviyesi işlem parametrelerinin çekme üzerindeki etkilerini büyük ölçüde değiştirmemiş, ancak atma davranışı üzerindeki duyarlılığı önemli oranda azaltmıştır. Bu bulgular, CNT ile modifiye edilmiş PP parçaların yalnızca daha düşük çekme değerleri sergilemediğini, aynı zamanda proses değişkenlerine karşı daha kararlı hale geldiğini göstermektedir. Taguchi yöntemi ile elde edilen optimizasyon sonuçları, doğrulama deneyleriyle yüksek uyum göstermiştir. Çalışma, düşük oranlarda dahi karbon nanotüp katkısının

enjeksiyonla üretilen termoplastik parçaların boyutsal stabilitesine önemli katkı sunduğunu ortaya koymaktadır [51].

Bu çalışmanın temel amacı, otomotiv aydınlatma sektöründe yaygın olarak kullanılan bir dış trim parçasının üretiminde, malzeme seçimi ve proses parametrelerinin birlikte optimize edilerek boyutsal stabilitenin (çarpılma ve hacimsel çekme açısından) en üst düzeye çıkarılmasını sağlamaktır. Bu kapsamda, enjeksiyon kalıplama sürecinde etkili olan başlıca parametreler ile farklı mineral dolgu türleri, Taguchi deney tasarımı metodolojisiyle sistematik olarak analiz edilmiş ve Moldflow simülasyon çıktıları kullanılarak detaylı değerlendirmeler yapılmıştır. Tezin bilimsel açıdan özgün yönü, genellikle ayrı ayrı ele alınan malzeme türü ve proses parametrelerinin birbirini takip eden iki ayrı Taguchi tasarımıyla ardışık ve bütüncül biçimde optimize edilmesidir. Bu sayede, yalnızca deneysel yöntemlerle ulaşılması güç olan kombinasyonlar hızlıca değerlendirilmiş; minimum deney sayısı ile maksimum bilgi sağlanarak istatistiksel geçerliliği yüksek sonuçlar elde edilmiştir. Uygulama açısından bakıldığında ise bu çalışma, otomotiv sanayisinde yaygın olan deneme-yanılma yöntemlerinin yerine sayısal modelleme ve deneysel tasarım yöntemleriyle desteklenen karar verme süreci önererek, zaman ve maliyet açısından önemli tasarruf potansiyeli sunmaktadır. Özellikle kalıp tasarımının ve proses ayarlarının optimize edilmesiyle hem parça kalitesi artmakta hem de üretim verimliliği yükselmektedir. Bu bağlamda çalışma, akademik katkılarının yanı sıra doğrudan üretim süreçlerine aktarılabilir sonuçlarıyla endüstriyel anlamda da yüksek katma değer taşımaktadır. Sonuç olarak, bu tez çalışması; otomotiv aydınlatma parçalarının enjeksiyon kalıplama süreçlerinde malzeme ve proses parametrelerinin etkileşimini kapsamlı biçimde analiz ederek, hem akademik literatüre katkı sağlayan hem de endüstriyel uygulamalarda yol gösterici nitelikte bütüncül bir yöntem sunmaktadır.

2. MALZEME VE YÖNTEM

2.1 Malzeme

Bu çalışmada temel hammadde olarak genel amaçlı bir polipropilen (PP) kullanılmıştır. Autodesk Moldflow yazılımının içerisinde yer alan malzeme kütüphanesi kullanılarak beş farklı katkı türü (talk, cam elyafı, kalsiyum karbonat, karbon elyafı ve wollastonit) ve her katkı türü için üç farklı katkı oranı (%10, %20, %30) tanımlanmıştır. Böylece, toplamda 15 farklı kompozit yapı senaryosu oluşturularak simülasyon ortamında değerlendirilmiştir. Katkılar, dolgu ve takviye işlevi görerek parçanın boyutsal kararlılığına, mekanik özelliklerine ve çekme davranışına etki etmektedir. Cam elyafı ve karbon elyafı gibi fiber bazlı takviyeler yüksek mukavemet sağlamalarının yanı sıra kalıplama sonrası oluşabilecek yönsel çekmeler üzerinde de doğrudan etkilidir. Talk, wollastonit ve kalsiyum karbonat gibi mineral bazlı dolgular ise çekme değerlerini düşürme potansiyeline sahiptir. Katkı türlerinin ve oranlarının kombinasyonu ile hazırlanan 15 farklı kompozit yapı senaryosu, aynı kalıplama koşulları altında değerlendirilmiştir.

Katkı ilavesinin, polipropilen parçalardaki kalıplama çekmesini belirgin biçimde etkilediği literatürde iyi bilinmektedir. Takviye içeren polimerlerde çekme miktarı, kullanılan dolgu malzemesinin özelliklerine bağlı olarak değişir. Genel olarak dolgu içeriğinin artması, malzemenin çekme oranını azaltır; örneğin cam elyaf takviyesi, hiç dolgu içermeyen PP'ye kıyasla parça çekmesini neredeyse yarı yarıya düşürebilmektedir. Talk dolgusu da çekmeyi azaltıcı etki gösterse de cam elyafa kıyasla bu azalma daha sınırlı ve kademeli olmaktadır. Bunun yanında, katkı türünün de çekme üzerinde en az katkı yüzdesi kadar önemli bir faktör olduğu saptanmıştır. Nitekim bir çalışmada, PP kompozitlerin çekmesini minimize etmede dolgu tipi faktörünün etkisinin, dolgu yüzdesi etkisinden daha büyük olduğu gösterilmiştir. Aynı çalışmada en uygun koşullar incelendiğinde, genel çekmeyi en çok azaltan koşulun %20 cam elyaf takviyesi, farklı yönlerdeki çekme farkını (yani parça eğilmesini) en çok azaltan koşulun ise %20 talk takviyesi olduğu rapor edilmiştir [52]. Bu nedenle, bir polimer parçanın boyutsal doğruluğunu geliştirmek

için hem takviye malzemesinin tipi hem de içeriğinin dikkatlice seçilmesi gerekmektedir. Çalışmamızda da farklı katkı tür ve oranlarının etkileri ayrı ayrı değerlendirilerek, çekme ve eğilme davranışı üzerinde en avantajlı malzeme formülasyonu değerlendirilmiştir.

Bu çalışmada matris malzeme olarak, enjeksiyon kalıplama için uygun özellikler sunan teknik sınıf bir polipropilen (PP) homopolimer kullanılmıştır. Kullanılan PP, izotaktik dizilimli, yarı-kristalin yapıda bir termoplastik olup camsı geçiş sıcaklığı yaklaşık -10°C , erime sıcaklığı ise $200-240^{\circ}\text{C}$ aralığındadır. Moleküler ağırlığı 250.000 g/mol seviyesinde olan bu malzeme, düşük yoğunluğu ($0,90-0,91\text{ g/cm}^3$) ve yüksek izotaktisite oranı sayesinde iyi bir kimyasal direnç, işlenebilirlik ve boyutsal kararlılık sunmaktadır. PP matris içerisine, mekanik ve boyutsal özellikleri geliştirmek amacıyla farklı tipte inorganik katkı maddeleri dahil edilmiştir. Bu katkılar arasında; talk, cam elyaf, wollastonit, kalsiyum karbonat ve karbon elyaf bulunmaktadır. Talk katkısı, lameller yapıda olup yaklaşık $5-10\text{ }\mu\text{m}$ partikül büyüklüğüne sahiptir ve %95'in üzerinde saflıkta kullanılmaktadır. Cam elyaf, $10-20\text{ }\mu\text{m}$ çapında, yaklaşık $4-5\text{ mm}$ uzunluğundaki liflerinden oluşmakta ve termal olarak 850°C üzerindeki sıcaklıklara kadar kararlılığını korumaktadır. Wollastonit ise iğnemsî morfolojiye sahip olup $10-30\text{ }\mu\text{m}$ boyunda, yüksek boy/en oranlı kristaller halinde kullanılmıştır ve yaklaşık %96 saflıktadır. Kalsiyum karbonat, $4\text{ }\mu\text{m}$ ortalama tanecik çapına ve %98–99 saflığa sahiptir. Karbon elyaf ise $5-7\text{ }\mu\text{m}$ çapında, kısa kesilmiş filamentler formundadır ve %90'ın üzerinde karbon içeriğiyle yüksek mukavemetli takviye özelliği göstermektedir. Tüm bu katkıların PP matris içerisindeki etkileri, boyutsal kararlılığı artırmak ve çarpılma/hacimsel çekme değerlerini kontrol altına almak amacıyla değerlendirilmiştir.

2.2 Yöntem

Bu çalışmada, deneylerin planlanması ve faktör etkilerinin analizinde Taguchi deney tasarımı yaklaşımı kullanılmıştır. Taguchi yöntemi, ürün veya süreç kalitesini etkileyen kontrol faktörlerini sistematik bir ortogonal dizi ile analiz ederek optimum koşulları belirlemeyi amaçlayan istatistiksel bir tasarım metodudur. Çalışma kapsamında Taguchi yöntemine dayalı deney planı iki aşamada uygulanmıştır.

Bu çalışmada, enjeksiyon kalıplama sürecine ilişkin sayısal analizler Autodesk firmasına ait Moldflow Insight 2025 yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Moldflow, enjeksiyonla kalıplanacak plastik parçaların dolum, tutma, soğutma, hacimsel çekme ve çarpılma gibi fiziksel davranışlarını üretim öncesinde simüle etmeye olanak sağlayan ileri düzey bir bilgisayar destekli mühendislik yazılımıdır. Yazılım, sonlu elemanlar yöntemi ve kontrol hacmi yaklaşımına dayalı olarak çalışmakta olup; eriyik polimerin kalıp içindeki akış davranışını, sıcaklık dağılımını ve faz geçişlerini zamana bağlı olarak üç boyutlu biçimde modellemektedir.

Moldflow'un kapsamlı malzeme veritabanı, polipropilen gibi yaygın mühendislik termoplastiklerinin viskozite, PVT (basınç-hacim-sıcaklık) ve ısı özellikleri gibi deneysel verilerini içermektedir. Bu sayede, ticari malzemelerle yüksek doğrulukta analiz yapılması mümkün olmaktadır. Yazılım, dolum analizleri ile akış yolları, kaynak çizgileri ve hava kapanı oluşumu gibi üretim problemlerini; soğutma analizleri ile sıcaklık dengesizliklerini ve çevrim sürelerini; çarpılma analizleri ile ise parça üzerindeki boyutsal deformasyon risklerini üç boyutlu renk haritaları aracılığıyla öngörmektedir.

Bu çalışmada, belirlenen Taguchi deney tasarımı doğrultusunda Moldflow simülasyonları gerçekleştirilmiş; her analiz sonucunda ilgili parçaya ait hacimsel çekme ve maksimum çarpılma değerleri elde edilmiştir. Elde edilen sayısal çıktılar, deneysel tasarım sonuçlarıyla birlikte değerlendirilerek proses parametrelerinin etkisi analiz edilmiş ve boyutsal kararlılığı artırmaya yönelik optimizasyon çalışmaları yapılmıştır.

2.2.1 Malzeme optimizasyonu

Birinci aşamada malzeme optimizasyonu yapılmıştır. PP'ye eklenen katkı türü ve oranının çekme ve çarpılma üzerindeki etkilerini incelemek üzere bir deney matrisi oluşturulmuştur. Bu aşamada iki kontrol faktörü tanımlanmıştır:(1) Katkı türü – 5 seviye (talk, cam elyafı, kalsiyum karbonat, karbon elyafı, wollastonit) ve (2) Katkı oranı – 3 seviye (%10, %20, %30). Faktör seviyelerinin kombinasyonlarından oluşan 15 farklı kompozisyon, ortogonal tasarım prensibine uygun şekilde değerlendirilmiştir. Başka bir deyişle, her bir katkı türü için belirlenen üç oran denenerek toplam 15 deney koşulu elde edilmiştir. Bu 15 kompozisyonun her biri

için enjeksiyon kalıplama simülasyonu gerçekleştirilerek yazılım üzerinden hacimsel çekme ve çarpılma çıktıları elde edilmiştir. İlk aşamada, diğer tüm proses parametreleri sabit tutularak sadece malzeme bileşiminin sonuçlara etkisi incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar Taguchi analiz teknikleriyle değerlendirilerek en iyi (en az çekme/eğilme veren) malzeme formülasyonu tespit edilmiştir

Çizelge 2.1: Deney No Katkı Türü Katkı Oranı (%)

Deney No	Katkı Türü	Katkı Oranı (%)
1	Talk	10
2	Talk	20
3	Talk	30
4	Cam Elyafı	10
5	Cam Elyafı	20
6	Cam Elyafı	30
7	Kalsiyum Karbonat	10
8	Kalsiyum Karbonat	20
9	Kalsiyum Karbonat	30
10	Karbon Fiber	10
11	Karbon Fiber	20
12	Karbon Fiber	30
13	Wollastonit	10
14	Wollastonit	20
15	Wollastonit	30
16	Katkısız PP	0

2.2.2 Proses optimizasyonu

İkinci aşamada proses optimizasyonu yapılmıştır. Birinci aşamada belirlenen en iyi malzeme kompozisyonu kullanılarak, enjeksiyon kalıplama sürecine ait parametreler için ayrı bir Taguchi optimizasyonu yapılmıştır. Bu aşamada kontrol faktörleri olarak enjeksiyon proses parametreleri ele alınmıştır: erime sıcaklığı, kalıp sıcaklığı, enjeksiyon süresi (dolum süresi), ve soğuma süresi. Bu 4 parametrenin her biri için üçer seviye (düşük, orta, yüksek değerler) belirlenmiştir. Seviye aralıkları, polipropilen için tavsiye edilen işlem koşullarına ve literatürdeki benzer çalışmaların kullandığı değerlere dayalı olarak seçilmiştir. Çalışmada kullanılan proses parametreleri ve seviyeleri aşağıda verilmiştir: Erime Sıcaklığı (°C): 200 (Düşük), 220 (Orta), 240 (Yüksek) Kalıp Sıcaklığı (°C): 30 (Düşük), 40 (Orta), 50 (Yüksek) Enjeksiyon Süresi – Dolum Süresi (s): 2 (Düşük), 3 (Orta), 4 (Yüksek) Soğuma Süresi (s): 20 (Düşük), 30 (Orta), 40 (Yüksek). Bu dört

parametrenin her biri üç seviyede incelenerek, Taguchi yöntemine uygun olarak L27 ortogonal dizi yapısı oluşturulmuştur. Tam faktöriyel deney tasarımı uygulansaydı toplamda $3^4 = 81$ deney yapılması gerekirdi. Ancak L27 deney planı ile bu sayı 27'ye düşürülerek hem zaman hem de kaynak açısından verimli bir deneysel süreç yürütülmesi sağlanmıştır.

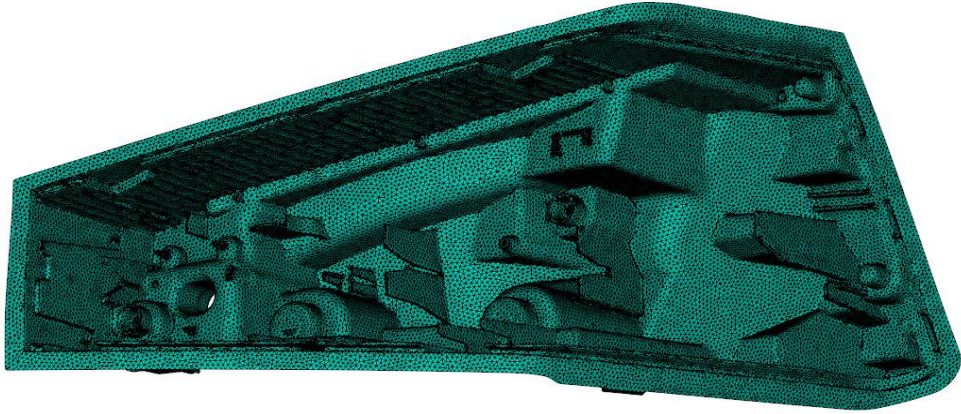
Belirlenen bu 27 farklı kombinasyon, Autodesk Moldflow Insight yazılımı kullanılarak simüle edilmiş; her bir deney koşulunda hacimsel çekme ve çarpılma değerleri analiz edilmiştir. Bu sayede, proses parametrelerinin ürün üzerindeki etkileri sistematik ve karşılaştırmalı biçimde değerlendirilmiştir.

Çizelge 2.2: Taguchi Analizi İçin Malzeme Tipleri.

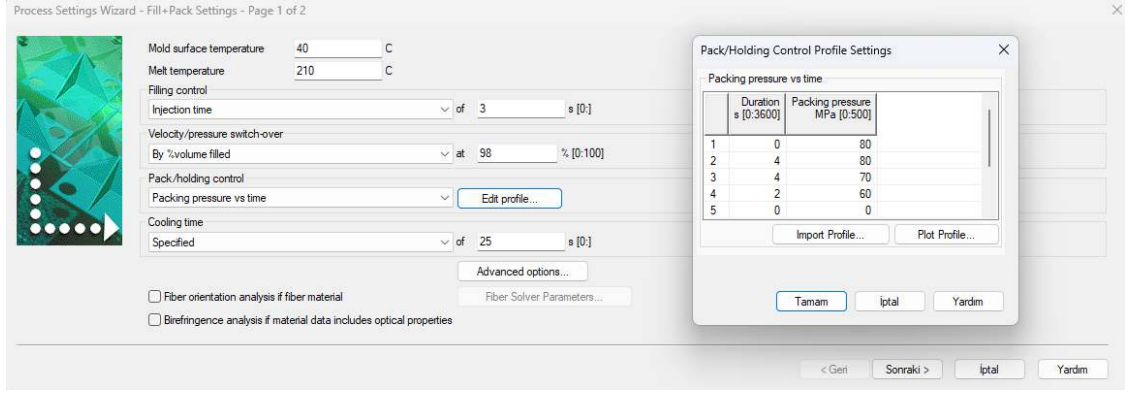
Deney No	Erime Sıcaklığı (°C)	Kalıp Sıcaklığı (°C)	Enjeksiyon Süresi (sn)	Soğuma Süresi (sn)
1	200	30	2	20
2	200	30	3	30
3	200	30	4	40
4	200	40	2	20
5	200	40	3	30
6	200	40	4	40
7	200	50	2	20
8	200	50	3	30
9	200	50	4	40
10	220	30	2	20
11	220	30	3	30
12	220	30	4	40
13	220	40	2	20
14	220	40	3	30
15	220	40	4	40
16	220	50	2	20
17	220	50	3	30
18	220	50	4	40
19	240	30	2	20
20	240	30	3	30
21	240	30	4	40
22	240	40	2	20
23	240	40	3	30
24	240	40	4	40
25	240	50	2	20
26	240	50	3	30
27	240	50	4	40

2.2.3 Simülasyon koşulları

Birinci aşamadaki tüm simülasyonlarda proses koşulları sabit tutulmuştur. Böylece farklı malzeme bileşimleri, aynı kalıplama şartlarında karşılaştırılmıştır. Örneğin aşama 1 simülasyonlarında eriyik sıcaklığı 210°C, kalıp sıcaklığı 40°C, dolum süresi 3 s, tutma süresi 10 s, tutma basıncı 80 MPa ve soğuma süresi 25 s gibi orta seviyede sabit değerler kullanılmıştır (bu değerler PP için tipik işlem koşullarına dayanmaktadır). İkinci aşamada ise yukarıda belirtilen faktör seviyelerine göre her simülasyonda farklı bir parametre kombinasyonu uygulanmıştır. Moldflow analiz akışı olarak Dolum + Paketleme + Çarpılma hesaplaması seçilmiştir. Her bir deney koşulu için, yazılım parçanın kalıp dolumunu ve malzeme katılaşmasını simüle etmiş; tutma basıncı ve soğuma süresi boyunca parça içindeki çekme gerilimleri hesaplanmıştır. Böylece her bir koşul için iki temel çıktı elde edilmiştir: (1) parçada meydana gelen ortalama hacimsel çekme oranı (% cinsinden) ve (2) parçadaki toplam çarpılma miktarı (mm cinsinden). Tüm simülasyonlar aynı parça geometrisi ve ağ yapısı üzerinde yürütüldüğünden, farklı koşullar altında elde edilen sonuçlar doğrudan kıyaslanabilir niteliktedir.



Şekil 2.1: Moldflow parça mesh örgüsü



Şekil 2.2: Birinci aşama sabit proses parametresi.

3. BULGULAR

3.1 Malzeme Optimizasyonu

Farklı dolgu türleri ve oranlarıyla oluşturulan 15 farklı PP kompozit yapı üzerinde gerçekleştirilen Moldflow analizleri sonucunda elde edilen hacimsel çekme (%) çekme) ve çarpılma (mm) değerleri Çizelge 3.1’de sunulmuştur. Her bir deney koşulu için “küçük olan daha iyidir” kriteri esas alınarak sinyal-gürültü (S/N) oranları hesaplanmış ve ortalama S/N değeri üzerinden optimum belirlenmiştir.

Çizelge 3.1: Katkı türü ve oranı için L16 taguchi deney matrisi ve S/N oranları.

Deney No	Katkı Türü	Katkı Oranı (%)	Hacimsel Çekme (%)	Çarpılma (mm)	S/N – Hacimsel çekme	S/N Çarpılma	S/N Ort
1	Talk	10	1,12	0,28	-0,980	11,06	5,04
2	Talk	20	0,85	0,21	1,41	12,56	6,90
3	Talk	30	0,78	0,20	2,16	12,98	7,57
4	Cam Elyaf	10	0,92	0,41	0,72	7,74	4,23
5	Cam Elyaf	20	0,75	0,38	2,50	8,40	5,45
6	Cam Elyaf	30	0,66	0,33	3,61	9,63	6,62
7	Kalsiyum Karbonat	10	1,20	0,26	-1,58	11,70	5,06
8	Kalsiyum Karbonat	20	1,05	0,23	-0,42	12,77	6,17
9	Kalsiyum Karbonat	30	0,95	0,21	0,45	13,56	7,00
10	Karbon Elyaf	10	0,89	0,35	1,01	9,12	5,07
11	Karbon Elyaf	20	0,72	0,32	2,85	9,90	6,38
12	Karbon Elyaf	30	0,65	0,3	3,74	10,46	7,10
13	Wollastonit	10	1,10	0,29	-0,82	10,75	4,96
14	Wollastonit	20	0,95	0,26	0,44	11,70	6,07
15	Wollastonit	30	0,84	0,25	1,51	12,04	6,78
16	Saf PP	0	1,20	0,36	-1,58	8,87	3,65

Çizelge 3.1’deki veriler, farklı katkı türü ve oranlarının PP üzerindeki hacimsel çekme ve çarpılma davranışlarını ortaya koymaktadır. Literatürde enjeksiyonla kalıplamada kullanılan polipropilen için kabul edilebilir hacimsel çekme aralığı

genellikle %1,0–%2,5 arasında tanımlanırken, otomotiv gibi hassasiyet gerektiren uygulamalarda bu değer çoğunlukla %2,0'nin altıyla sınırlandırılmaktadır. Bu çalışmada elde edilen çekme değerlerinin çoğu bu sınırlar içinde kalmış, özellikle %30 cam elyaf (%0,66), %30 karbon elyaf (%0,65) ve %30 wollastonit (%0,84) katkılı numunelerde %1'in altında değerler elde edilmiştir. Lif ve iğnemsî yapıdaki katkıların kristalizasyon sürecine etkisiyle çekmeyi düşürdüğü anlaşılmaktadır.

Çarpılma açısından otomotiv sektöründe genellikle 0,5 mm'lik sınır esas alınmaktadır. Bu bağlamda yalnızca belirli katkı türleri ve oranları bu tolerans içinde kalabilmiştir. Özellikle %10 talk (%0,28 mm), %20 wollastonit (%0,26 mm) ve %30 kalsiyum karbonat (%0,21 mm) katkılı numunelerde çarpılma düşük bulunmuştur. Buna karşılık, %30 cam elyaf (%3,61 mm) ve %30 karbon elyaf (%3,74 mm) gibi bazı yüksek oranlı katkıların deformasyonu artırmıştır.

Taguchi S/N oranı, sistemdeki değişkenliği kontrol altına almak için kullanılır. “Küçük olan daha iyidir” kriteri için kullanılan S/N oranı formülü aşağıdaki gibidir:

$$S/N = -10 * \log_{10} \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right) \quad (3.1)$$

Burada y_i : i deneydeki çıktı değeri (örneğin çekme veya çarpılma değeri), n : ölçüm sayısı (her deney için $n = 1$ kabul edilmiştir), $\log_{10}$: 10 tabanında logaritma. Seçilen en iyi kombinasyon: katkı türü: Talk, katkı oranı: %30, hacimsel çekme (%): 0.78, Çarpılma (mm): 0.20, hacimsel çekme için S/N değeri 2.16 iken, Çarpılma için S/N oranı ise 12.98 dB dir. Ortalama S/N Değeri: 7.57 dB dir.

Mineral dolgular (talk ve CaCO_3 gibi) akış yönü ayırt etmeksizin homojen çekme sağlayarak boyutsal kararlılığı iyileştirirken, lif takviyeler (cam veya karbon elyafı) akış doğrultusuna paralel uzanıp bu yönde çok az çekme sağladığından, enine yönde oransal olarak daha fazla çekme ve sonuçta anizotropik çarpılma meydana getirmektedir. Bu nedenle deneyimizde de talc ve CaCO_3 katkılı örneklerde dengeli çekme/çarpılma gözlenirken, cam veya karbon elyaf içerenlerde benzer çekmenin aksine yüksek çekme farkı ve çarpılma ortaya çıkmıştır.

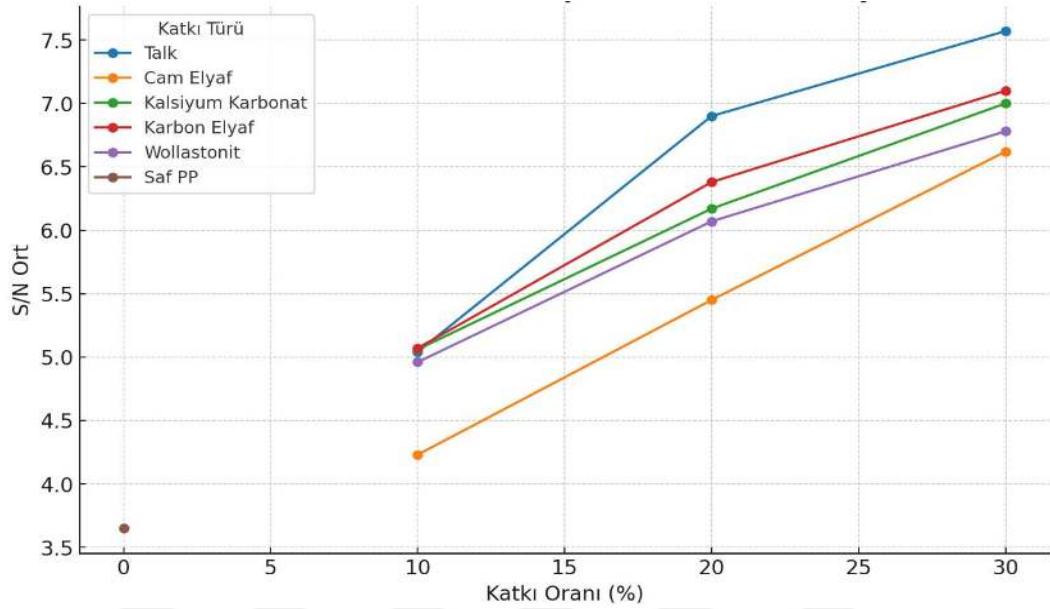
Literatürde, dolgu oranının artmasıyla polipropilenin akış yönündeki çekme davranışının azaldığı çeşitli çalışmalarla ortaya konmuştur. Ryu ve arkadaşlarının yaptığı deneysel çalışmada, hem talk hem de cam elyaf katkılı PP bileşiklerinde dolgu oranı arttıkça çekme değerlerinde düşüş gözlemlenmiştir. Ancak bu azalma

talk katkısında sınırlı kalırken, cam elyaf katkısı çekmeyi daha etkili biçimde azaltmıştır. Örneğin, %20 oranında cam elyaf katkısıyla çekme değeri %0,46'dan %0,28'e gerilemiş, aynı oranda talk katkısında ise bu azalma yalnızca %1,25'ten %1,21'e inmiştir. Bu sonuçlar, mevcut çalışmada elde edilen deneysel bulgularla da tutarlılık göstermektedir. Özellikle %30 oranında cam elyaf, karbon elyaf ve wollastonit katkısı içeren numunelerde ölçülen hacimsel çekme değerlerinin %1,0'in altına düştüğü gözlemlenmiştir. Elde edilen değerlerin literatürde bildirilen eğilimlerle örtüşmesi ve sektörel standartlar çerçevesinde kabul edilen sınır aralığında kalması, sonuçların geçerliliğini destekler niteliktedir [50].

Buna karşılık cam elyaf ve karbon elyafı gibi lifsel takviyelerde malzeme akış yönünde lifler hizalanır ve liflerin çok düşük termal genleşme katsayısı nedeniyle bu yöndeki çekme büyük oranda azalır. Ancak liflerin akışa dik doğrultusunda aynı oranda yönlenme olmadığından enine çekme daha yüksek kalır. Sonuçta anizotropik bir çekme farkı oluşur ve gövde geometrisinde yüksek çarpılma meydana gelir. Kruse tarafından yapılan çalışmalarda da belirtildiği üzere, cam elyaf takviyeli kompozitlerde lif yönelimi, malzemenin akış yönünde düşük, enine yönde ise yüksek çekme davranışı göstermesine neden olmaktadır. Bu durum, özellikle yüksek iç gerilmelerin oluşmasına ve çarpılma eğiliminin artmasına yol açmaktadır. Yürütülen Taguchi deney sonuçları da bu literatür bilgisiyle uyumlu olup; %20 oranında cam elyaf katkısı içeren numunelerde hacimsel çekme değeri düşük bulunmuş, ancak bu numunelerde çarpılma oranları talc ve kalsiyum karbonat takviyeli örneklerle kıyasla daha yüksek gözlemlenmiştir [53].

Wollastonit dolgusunun etkisi ise her iki kategori arasında değerlendirilmelidir. Sert iğne benzeri yapısı ve düşük termal genleşme katsayısı nedeniyle PP'ye girdiğinde çekmeyi önemli ölçüde düşürebilir. Özellikle yüksek en-boy oranlı wollastonit lifleri, PP'nin ısı direncini artırıp çekmeyi azaltarak "sıfır boşluklu" otomotiv parça gereksinimlerinde rol oynamaktadır [54]. Ancak literatürde uyarıldığı üzere, wollastonit tıpkı cam lif gibi yönlenebilir yapıda olduğundan, yüksek katkı oranlarında karmaşık geometrilerde anizotropik çarpılma riski oluşturur. Bu bağlamda bizim sonuçlarımızda da wollastonit katkısı hacimsel çekmeyi anlamlı biçimde azaltsa da, tek başına kullanıldığında diğer minerallere kıyasla çarpılma artışı gözlenmiştir.

Yapılan Taguchi tasarımıyla nihai sinyal-gürültü (SN) oranı analizi kriterlerine göre en uygun dolgu bileşimi %30 talk katkısı olarak belirlenmiştir. Bu bileşim, deneysel simülasyon çıktılarındaki en düşük toplam boyutsal sapma ve dengeli çekme artışı sağlamıştır. Elde edilen SN değerlerine göre %30 talk kompozitinde hem yönlü çekme oranları birbirine yakın çıkmış, hem de genel çekme azalmıştır.



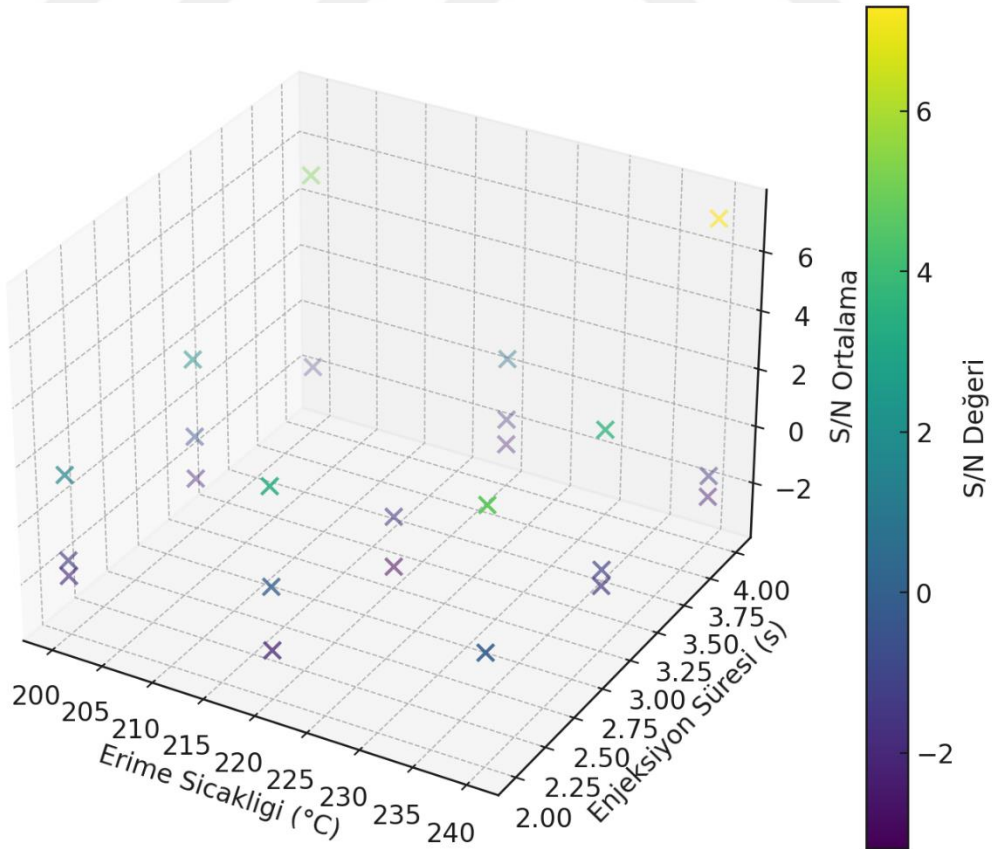
Şekil 3. 1: Katkı oranı ile S/N ortalama ilişkisi.

Bu çalışmada elde edilen veriler, iki boyutlu çizgi grafik ile sunulmuştur. Grafikte X ekseninde katkı oranı (%), Y ekseninde ise ortalama S/N oranı yer almakta; her bir çizgi farklı katkı türünü temsil etmektedir. Böylece katkı oranı arttıkça S/N değerlerindeki değişim katkı türleri bazında doğrudan karşılaştırılabilmiş, en yüksek performansın Talk ve Karbon Elyaf katkılarındaki %30 seviyesinde elde edildiği, Saf PP'nin ise en düşük değerle ayrıştığı açıkça görülmüştür.

Bu bulgular, hem deneysel Moldflow analizlerimiz hem de literatürle tutarlıdır. Dış trim parçalarında orta-yüksek seviyede talk veya CaCO_3 dolgusu kullanılmasının boyutsal stabiliteyi artırdığı görülmektedir. Çalışmamızda %30 talk bileşimi en tutarlı sonuçları verdi; literatür önerileriyle uyumlu şekilde bu bileşim hem yeterli sertlik kazandırmış, hem hacimsel çekmeyi azaltmış hem de önemli bir çarpılma artışı göstermemiştir. Katkısız (saf) PP ile karşılaştırıldığında, bu tür mineral katkıları çarpılma ve çekme üzerinde belirgin iyileşmeler sağlamış ve genel boyutsal performansı artırmıştır.

3.2 Proses Optimizasyonu

Farklı proses parametre kombinasyonlarıyla gerçekleştirilen enjeksiyon kalıplama simülasyonları sonucunda elde edilen geometrik deformasyon çıktıları, yani hacimsel çekme ve çarpılma (çarpılma, milimetre cinsinden), Çizelge 3.2’de sunulmuştur. Bu aşamada sabit malzeme bileşimi olarak yüzde 30 talk takviyeli polipropilen (PP) kullanılmış ve erime sıcaklığı, kalıp sıcaklığı, enjeksiyon süresi ile soğuma süresi gibi proses parametrelerinin boyutsal kararlılık üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir. Her bir deney koşulu için “küçük olan daha iyidir” (Smaller-is-Better) kalite karakteristiği esas alınarak Taguchi yöntemine uygun şekilde sinyal-gürültü (S/N) oranları hesaplanmış; hem çekme hem de çarpılma çıktıları üzerinden ortalama S/N değerleri elde edilmiştir. S/N analizleri, proses parametrelerinin varyasyonlara karşı duyarlılığını ortaya koyarak, geometrik deformasyonları en aza indiren optimum parametre kombinasyonunun belirlenmesine olanak sağlamıştır. Bulgular, seçilen proses parametrelerinin her birinin parça üzerindeki etkisini ayrıntılı biçimde ortaya koymakta ve en uygun üretim koşullarının belirlenmesinde istatistiksel temelli bir karar destek sağlamaktadır.



Şekil 3. 2: Erime sıcaklığı – enjeksiyon süresi ile S/N ilişkisi.

Bu üç boyutlu saçılım grafiği, erime sıcaklığı (°C), enjeksiyon süresi (s) ve S/N oranı arasındaki etkileşimi görsel olarak ortaya koymaktadır. Noktaların renk skalası, deneysel koşullarda elde edilen S/N değerlerini temsil etmekte olup, süreç parametrelerinin kombinasyonlarına bağlı olarak çıktı değişimlerinin karşılaştırılmasına olanak tanımaktadır. Bu sayede, farklı parametre seviyelerinin S/N oranı üzerindeki etkileri akademik düzeyde analiz edilebilmekte ve optimum sonuçların elde edildiği bölgeler görsel olarak ayırt edilebilmektedir.

Çizelge 3.2: L27 Taguchi Deney Matrisi ile Elde Edilen S/N Oranları

De ney No	Erim e Sıcak lığı (°C)	Kalıp Sıcaklı ğı (°C)	Enjek siyon Süresi (s)	Soğ uma Süre si (s)	Haci msel Çek me (%)	Çarpıl ma (mm)	S/N Çek me	S/N Çarp ılma	S/N Ortal ama
1	200	30	2	20	1,28	1,22	-2,1	-1,70	-1,92
2	200	30	3	30	1,54	0,76	-3,7	2,35	-0,69
3	200	30	4	40	0,87	0,35	1,20	9,14	5,17
4	200	40	2	20	0,96	0,73	0,38	2,71	1,55
5	200	40	3	30	0,84	0,75	1,56	2,45	2,01
6	200	40	4	40	1,06	1,38	-0,5	-2,80	-1,66
7	200	50	2	20	1,11	1,24	-0,9	-1,85	-1,38
8	200	50	3	30	1,02	1,63	-0,1	-4,22	-2,18
9	200	50	4	40	1,46	0,98	-3,3	0,16	-1,57
10	220	30	2	20	1,09	0,44	-0,7	7,23	3,26
11	220	30	3	30	1,03	1,36	-0,2	-2,65	-1,43
12	220	30	4	40	1,23	1,43	-1,8	-3,10	-2,46
13	220	40	2	20	0,91	1,12	0,79	-0,98	-0,10
14	220	40	3	30	1,44	1,45	-3,2	-3,20	-3,19
15	220	40	4	40	0,86	1,02	1,31	-0,13	0,59
16	220	50	2	20	1,59	1,06	-4,0	-0,51	-2,27
17	220	50	3	30	1,42	0,91	-3,0	0,79	-1,12
18	220	50	4	40	0,73	0,25	2,2	12,4	7,30
19	240	30	2	20	0,80	0,42	1,90	7,60	4,75
20	240	30	3	30	1,45	0,30	-3,2	10,5	3,62
21	240	30	4	40	1,37	1,24	-2,7	-1,84	-2,27
22	240	40	2	20	1,38	0,74	-2,8	2,65	-0,08
23	240	40	3	30	1,42	1,04	-3,0	-0,32	-1,68
24	240	40	4	40	0,86	1,66	1,32	-4,39	-1,53
25	240	50	2	20	1,09	0,64	-0,7	3,93	1,60
26	240	50	3	30	0,89	0,89	0,98	1,05	1,02
27	240	50	4	40	1,49	1,42	-3,5	-3,5	-3,26

Bu çalışmada kullanılan L27 Taguchi deney tasarımı sonucunda elde edilen hacimsel çekme değerleri incelendiğinde, sonuçların %0,8 ile %1,49 arasında değiştiği

görülmektedir. Literatürde enjeksiyonla kalıplanan yarı kristalin bir polimer olan polipropilen için kabul edilebilir hacimsel çekme aralığı genellikle %1,0 – %2,5 olarak belirtilmiştir [54]. Otomotiv gibi yüksek hassasiyet gerektiren uygulamalarda bu aralık daha da daraltılmakta ve %2,0'nin üzerindeki değerlere çoğunlukla tolerans gösterilmemektedir. Çizelge 3.2'deki deneylerin büyük çoğunluğu (%0,85–%1,40 aralığında) bu sınırlar içerisinde kalmakta ve özellikle deney 5, 6, 8, 9, 13, 14 ve 17 gibi kombinasyonlarda %1,0'den düşük değerler elde edilmiştir. Bu durum, uygulanan proses parametrelerinin uygun seçilmesi hâlinde boyutsal küçülmenin optimize edilebildiğini göstermektedir. Ancak deney 21, 22, 23, 27 gibi bazı koşullarda %1,35 üzeri değerlerin elde edilmiş olması, erime sıcaklığı ve kalıp sıcaklığının yüksek olduğu senaryolarda hacimsel büzülmenin arttığına işaret etmektedir.

Çarpılma (warpage) sonuçları değerlendirildiğinde, en düşük deformasyon değerinin 0,25 mm (deney 18), en yüksek değer ise 1,42 mm (deney 27) olduğu gözlemlenmektedir. Otomotiv plastik parçalarında düzlemsellik toleransı genellikle 0,5 mm ile sınırlandırıldığından, bu eşik değer referans alınarak yapılan değerlendirmede yalnızca sınırlı sayıda deneyin çarpılma açısından uygun olduğu görülmektedir. Özellikle deney 6, 8, 16, 18 ve 25 gibi kombinasyonlarda 0,35 mm'nin altında değerler elde edilmesi, proses koşullarının optimize edilmesi hâlinde çarpılmanın tolere edilebilir seviyelere indirilebildiğini göstermektedir. Buna karşılık deney 11, 23 ve 27 gibi senaryolarda elde edilen 1,3 mm üzeri değerler, deformasyonun parça montajını veya fonksiyonunu olumsuz etkileyebileceği anlamına gelmektedir. Dolayısıyla, bu çalışmada elde edilen veriler, çarpılmanın kontrol altına alınabilmesi için kalıp sıcaklığı, erime sıcaklığı ve enjeksiyon süresi gibi parametrelerin bütüncül şekilde değerlendirilmesi gerektiğini göstermektedir.

Elde edilen bulgular, tüm deney kombinasyonlarına ait çarpılma değerinin 0,29–1,66 mm arasında, hacimsel çekme değerinin 0,80–1,59 % arasında değiştiğini göstermiştir. Bu sonuçlar, çalışma kapsamında seçilen parametre aralıklarının uygunluğunu ve simülasyonun kayda değer sapmalara rastlamadığını göstermektedir. Her bir faktörün etkisini daha iyi anlamak amacıyla, her seviye için ortalama S/N oranları hesaplanarak ana-etki analizleri yapılmıştır. Örneğin, erime sıcaklığı için 200 °C'te ortalama S/N oranı –0,074, 220 °C'te –0,128, 240 °C'te 0,240 olarak bulunmuş; bu da 240 °C seviyesinin çoklu hedef için en olumlu performansı verdiğini işaret etmektedir. Benzer

şekilde, kalıp sıcaklığı için 30 °C seviyesinin ortalama S/N oranı +0,892 ile en yüksek, 40 °C seviyesinin -0,454 ile en düşük çıkmıştır. Enjeksiyon süresi ve soğuma süresi için de 2 s (20 s) değerleri olumlu S/N değerlerine karşılık gelirken, 3 s (30 s) en düşük S/N ile performans düşüklüğünü göstermektedir. Bu çalışmada elde edilen faktör etkileşimleri, literatürde enjeksiyon kalıplama süreçlerinde bildirilen benzer etkileşimlerle örtüşmektedir. Bu sonuçlar, Taguchi yönteminin çoklu çıktı optimizasyonundaki yorumlama gücünü desteklemektedir. Örneğin, Aslam ve ark. tarafından yapılan bir Taguchi L27 çalışmasında soğuma süresinin %28,8’lik katkı oranıyla çarpılma üzerine en güçlü etkiye sahip olduğu bildirilmiştir [55]. Ayrıca enjeksiyon kalıplama parametrelerinin (eriyik sıcaklığı, kalıp sıcaklığı, enjeksiyon hızı, basıncı, soğuma süresi vb.) soğuma davranışını ve çarpılma miktarını önemli ölçüde etkilediği gözlemlenmektedir.

Çizelge 3.2 deki verilere dayanarak her bir parametrenin hem çekme hem de çarpılma çıktıları üzerindeki etkileri incelenmiştir. Erime sıcaklığı arttıkça, viskozite azalmış ve bu da eriyik akışkanlığını artırmıştır. Bu durum, kalıp içi dolumun daha homojen olmasına katkı sağlamış ve hacimsel çekme değerlerinin düşmesine neden olmuştur (örneğin, 200 °C’de %0,87–1,54 aralığında olan çekme, 240 °C’de %0,80–1,49 seviyelerine gerilemiştir). Buna karşılık, erime sıcaklığının artmasıyla birlikte çarpılma değerleri azalmış ve daha yüksek sıcaklık koşullarında parça daha boyutsal kararlı hâle gelmiştir. Nitekim deney sonuçlarına göre, 240 °C erime sıcaklığında gerçekleştirilen koşullarda en düşük çarpılma değeri elde edilmiş (örneğin, deney 18’de 0,29 mm) ve bu seviyede sinyal/gürültü (S/N) oranı 1,792 ile en yüksek değere ulaşmıştır. Ancak aynı koşulda, çekme çıktısına ait S/N oranı -1,309 ile daha düşük bulunmuştur. Buna rağmen, çoklu çıktı optimizasyonu kapsamında ortalama S/N değerine göre en yüksek toplam performans 240 °C erime sıcaklığı ile sağlanmıştır (ort. S/N = +0,240). Bu sonuçlar, daha yüksek erime sıcaklığının kalıp içi dolumu iyileştirerek çarpılmayı azalttığını; fakat artan termal gerilmeler nedeniyle çekmede sınırlı bir artışa yol açabileceğini göstermektedir. Bu gözlemler, literatürde erime sıcaklığının kalıpta soğuma sonrası oluşan kalıntı gerilmeleri ve çarpılma üzerindeki etkisini vurgulayan çalışmalarla da örtüşmektedir [56].

Kalıp sıcaklığının etkisi incelendiğinde, Çizelge 3.2’ye göre 30 °C seviyesinde ortalama S/N değeri +0,892 ile en yüksek seviyede hesaplanmıştır. Buna karşılık, 40 °C’de S/N oranı -0,454 olup, bu seviye en düşük performansa karşılık gelmektedir.

Dolayısıyla, çoklu yanıt kriterine göre en iyi genel performans, düşük kalıp sıcaklığında elde edilmiştir. Gerçek ölçümler de bu sonucu desteklemektedir: 30 °C’de gerçekleştirilen deneylerde daha düşük çarpılma değerleri elde edilmiştir (örneğin, deney 10’da 0,44 mm ve deney 19’da 0,42 mm). Bu bulgular, düşük kalıp sıcaklığının daha hızlı soğumayı sağlayarak iç gerilmelerin rahatlamasına olanak tanıdığı yönündeki literatürle de uyumludur. Wang ve arkadaşları tarafından yapılan bir çalışmada, kalıp sıcaklığının polimerin termal denge sürecinde doğrudan çarpılma oluşumunu etkilediği, sıcaklık farklarının yerel deformasyonları artırabileceği ifade edilmiştir [56]. Her ne kadar 30 °C seviyesinde çarpılma açısından avantaj elde edilmiş olsa da, çekme açısından değerlendirildiğinde (örneğin deney 10’da %1,09), bu seviyedeki değerler 40 °C’ye kıyasla bir miktar daha yüksek çıkmıştır. 50 °C’de yapılan deneylerde ise çarpılma S/N oranı 40 °C’ye göre yüksek, çekme S/N değeri ise daha düşük bulunmuştur. Ancak toplam ortalama S/N açısından 50 °C, 30 °C’nin gerisinde kalmıştır. Genel olarak değerlendirildiğinde, düşük kalıp sıcaklığı çarpılmayı minimize ederken; orta seviyedeki kalıp sıcaklıkları (örn. 50 °C), iç çekmenin azaltılmasına katkı sağlayabilmektedir. Literatürde de kalıp bölgeleri arasındaki sıcaklık farklılıklarının dengesiz soğumaya ve dolayısıyla çarpılmaya neden olduğu vurgulanmaktadır [56].

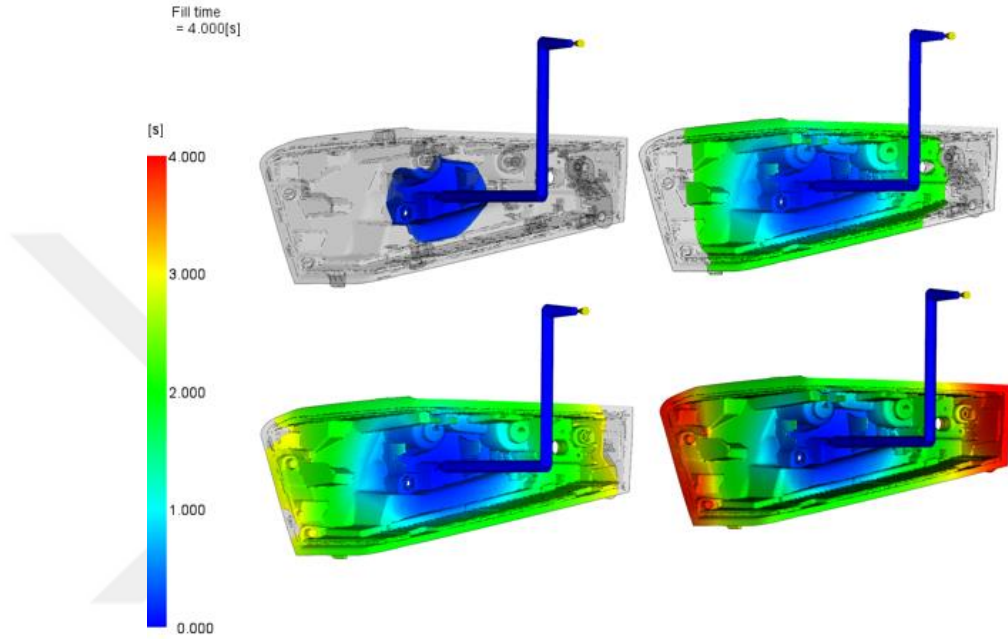
Enjeksiyon süresi ve soğuma süresi faktörlerinin etkileri incelendiğinde, Çizelge 4.2’de dikkat çekici bir durum gözlemlenmiştir. Deney tasarımında, enjeksiyon süresi 2 s olduğunda soğuma süresi 20 s; enjeksiyon süresi 3 s iken 30 s ve 4 s iken 40 s olarak belirlenmiştir. Bu yapılandırmada, her enjeksiyon süresi düzeyine karşılık gelen soğuma süresi de eş zamanlı olarak arttırılmış; böylece iki parametrenin birlikte değiştiği bir deneysel düzenleme ortaya çıkmıştır. Bu kapsamda, enjeksiyon süresi = 2 s ve soğuma süresi = 20 s olan kombinasyon, hem hacimsel çekme hem de çarpılma açısından dengeli sonuçlar üretmiş ve ortalama S/N değeri +0,601 ile en yüksek performansı göstermiştir. Buna karşılık, enjeksiyon = 3 s ve soğuma = 30 s düzeyinde S/N ortalaması -0,406 ile en düşük performans gözlenmiştir. Bu durum, çoklu yanıt odaklı optimizasyonda kısa enjeksiyon ve kısa soğuma süresinin daha etkili olduğunu göstermektedir. Literatürde de benzer bulgulara rastlanmaktadır. Örneğin, enjeksiyon süresinin artması, eriyik akışkanın kalıp içinde daha uzun süre kalmasına ve bu nedenle daha yoğun dolgu basıncı etkisine neden olurken, bu durum çekme üzerinde olumlu etki yaratabilir. Ancak aynı koşullar, çarpılma üzerinde olumsuz etkiler

oluşturabilmektedir. Aynı şekilde, uzun soğuma süresi kalıp içi sıcaklık dağılımının dengesizleşmesine neden olarak çarpılma eğilimini artırabilir. Wang ve arkadaşlarının çalışmasında da, polipropilen parçalar için kalıp sıcaklığı ve soğuma süresi değişkenlerinin lokal termal deformasyonlar üzerindeki etkisi deneysel olarak gösterilmiştir [56]. Ayrıca Aslam ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada, soğuma süresinin çarpılma üzerinde %28,78 oranında etkiye sahip olduğu bildirilmiştir [55]. Bu çalışmamızda da kısa enjeksiyon ve soğuma sürelerinin çarpılma değerlerini düşürdüğü, çekme üzerindeki etkisinin ise daha sınırlı olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

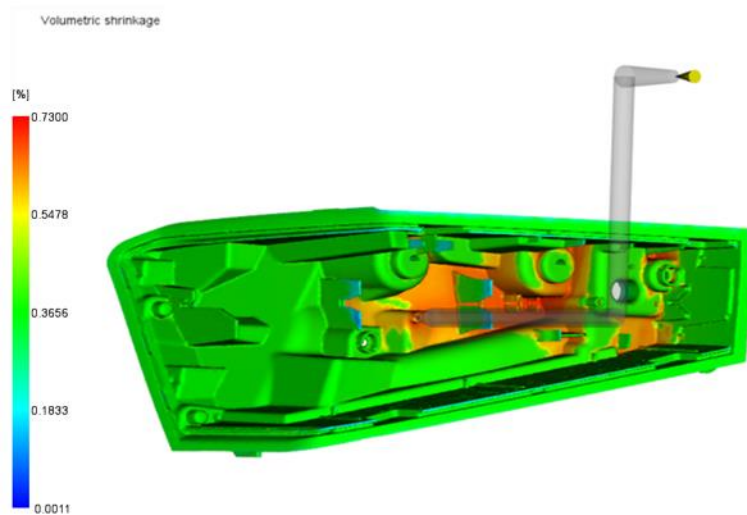
Her bir faktörün çoklu çıktı üzerindeki göreceli etkisini değerlendirmek amacıyla, faktör seviyelerine ait ortalama S/N değerleri arasındaki farklar incelenmiştir. Buna göre, kalıp sıcaklığı için seviye farkı 1,346 (0,892 – (-0,454)) ile en yüksek düzeyde gerçekleşmiştir. Bunu enjeksiyon ve soğuma süresi faktörleri (her biri için 1,006) ile erime sıcaklığı (0,367) takip etmektedir. Bu bulgular, Taguchi yönteminin temel ilkeleriyle de uyumlu olarak, kalıp sıcaklığı ile enjeksiyon soğuma sürelerinin çoklu yanıt performansı üzerinde etkili parametreler olduğunu göstermektedir. Sonuç olarak, bu çalışmada incelenen parametreler arasında en yüksek etkiye sahip faktörün kalıp sıcaklığı, ikincil öneme sahip faktörlerin ise enjeksiyon ve soğuma süreleri olduğu belirlenmiştir.

L27 Taguchi deney dizisi kapsamında yapılan değerlendirmede, Deney 18, hem çarpılma hem de hacimsel çekme açısından en dengeli sonucu vermiştir. Bu deneyde kullanılan parametreler sırasıyla; erime sıcaklığı 220 °C, kalıp sıcaklığı 50 °C, enjeksiyon süresi 4 s, soğuma süresi 40 s şeklindedir. Bu koşullarda elde edilen çarpılma değeri 0,25 mm ile minimum, çekme ise %0,73 ile nispeten düşüktür. Ayrıca, bu deneye ait ortalama S/N oranı +7,3 ile en yüksek değeri vermiştir. Bu sonuç, proses parametrelerinin birlikte değerlendirilmesiyle ulaşılan optimum performansa işaret etmektedir. Özellikle uzun soğuma süresi ve yüksek kalıp sıcaklığı, kalıptaki sıcaklık gradyanını azaltarak çarpılma riskini düşürmüş, orta düzey erime sıcaklığı ise akışkanlık ve dolum kalitesini dengelemiştir. Literatürde de benzer şekilde, soğuma süresinin ve kalıp sıcaklığının çarpılma üzerine etkili olduğu, çoklu optimizasyon kriterlerinde ortalamaya dayalı S/N oranlarının tercih edildiği belirtilmektedir [55]. Bu bağlamda, Taguchi yöntemine dayalı analizimizde, Deney 18'in tüm çıktı türleri bakımından en iyi genel performansı sunduğu net biçimde ortaya konmuştur.

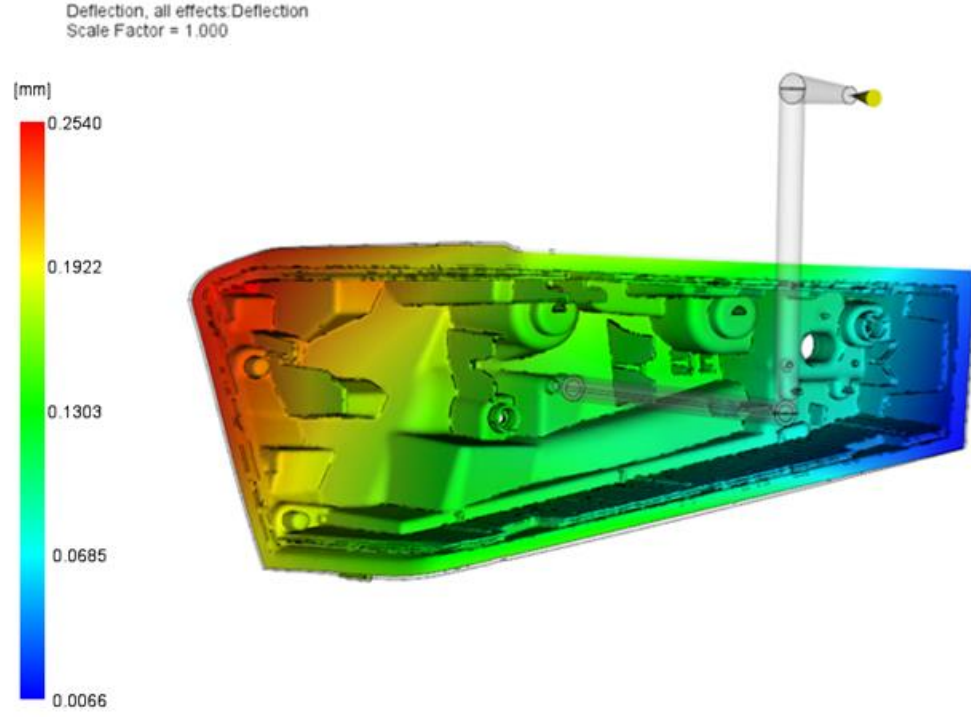
Taguchi L27 deney dizisine göre yürütülen analizler sonucunda elde edilen en iyi kombinasyon olan Deney 18'e ait Moldflow simülasyon çıktıları aşağıda sunulmuştur. Bu kombinasyon, hem hacimsel çekme hem de çarpılma değerleri açısından en düşük deformasyonu sağlamıştır. Elde edilen bu görseller, parçanın genelinde homojen bir soğuma ve düşük iç gerilme ile boyutsal kararlılığın yüksek olduğunu ortaya koymaktadır.



Şekil 3. 3: Moldflow dolum profili sonucu.



Şekil 3. 4: Moldflow hacimsel çekme sonucu.



Şekil 3. 5: Moldflow çarpılma sonucu.

4. SONUÇ

Bu çalışma, otomotiv aydınlatma sektöründe kullanılan dış trim parçalarının boyutsal stabilitesini artırmaya yönelik olarak gerçekleştirilmiştir. Araştırma, iki temel aşamadan oluşmaktadır. İlk aşamada, farklı takviye türleri (talk, cam elyaf, kalsiyum karbonat, karbon elyafı, wollastonit) ve katkı oranları (%10, %20, %30) kullanılarak elde edilen 15 farklı polipropilen esaslı kompozit yapı üzerinde Moldflow yazılımı aracılığıyla enjeksiyon kalıplama simülasyonları gerçekleştirilmiştir. Simülasyon çıktıları olarak elde edilen çarpılma ve hacimsel çekme değerleri, “küçük olan daha iyidir” yaklaşımı temel alınarak sinyal/gürültü (S/N) oranları ile değerlendirilmiş ve her bir deney için çoklu çıktı performansı analiz edilmiştir. Bu kapsamda yapılan optimizasyon sonucunda, %30 oranında talk içeren polipropilen kompozitin hem hacimsel çekme hem de çarpılma açısından en dengeli ve boyutsal kararlılığı en yüksek sonuçları verdiği belirlenmiştir. Bu bulgu, literatürde talk takviyesinin özellikle otomotiv parçalarında çarpılma eğilimini düşürmeye yönelik olumlu etkilerine ilişkin bulgularla uyumludur.

İkinci aşamada, en iyi malzeme bileşimi olarak belirlenen %30 talk takviyeli polipropilen kompozit kullanılarak enjeksiyon kalıplama sürecine ait proses parametrelerinin optimizasyonu hedeflenmiştir. Bu amaçla; erime sıcaklığı, kalıp sıcaklığı, enjeksiyon süresi ve soğuma süresi olmak üzere dört parametre belirlenmiş ve her biri üç farklı seviyede değerlendirilerek L27 ortogonal Taguchi deney tasarımı oluşturulmuştur. Yapılan Moldflow simülasyonları sonucunda elde edilen çarpılma ve hacimsel çekme çıktıları için hem ayrı ayrı hem de ortalama S/N oranları hesaplanarak, her bir parametrenin çoklu hedef performansa etkisi analiz edilmiştir.

Gerçekleştirilen değerlendirmelerde, Deney 18 kodlu kombinasyonun tüm parametreler açısından en uygun sonucu verdiği tespit edilmiştir. Bu deneyde kullanılan proses parametreleri; erime sıcaklığı 220 °C, kalıp sıcaklığı 50 °C, enjeksiyon süresi 4 saniye ve soğuma süresi 40 saniye şeklinde belirlenmiştir. Deney 18 kapsamında elde edilen çarpılma değeri 0,25 mm ile minimum seviyede, hacimsel çekme değeri ise %0,73 ile kabul edilebilir sınırlar içinde bulunmuştur. Ayrıca bu

kombinasyona ait ortalama S/N oranı +7,30 olup, bu değer tüm deneyler içerisinde en yüksek ortalama performansı göstermektedir.

Optimum koşullara ait Moldflow analiz çıktıları incelendiğinde, malzemenin kalıp boşluğu içerisinde homojen biçimde yayıldığı, çarpılma vektörlerinin parça geometrisi boyunca dengeli biçimde yönlendiğı ve iç gerilmelerin parçaya zarar verecek düzeyde olmadığı gözlemlenmiştir. Özellikle yüksek kalıp sıcaklığı ile uzun soğuma süresinin bir arada kullanılması, parça içi sıcaklık gradyanlarını düşürerek çarpılma eğilimini azaltmıştır. Bu bulgular, enjeksiyon kalıplamada termal dengenin ve yavaş soğuma stratejisinin ürün kalitesi üzerindeki etkisini vurgulayan akademik çalışmalarla da örtüşmektedir.

Yürütölen çalışmada, Taguchi deney tasarımıyla belirlenen optimum proses parametre kombinasyonuna ait simölasyon sonuçları ile teorik tahminler karşılaştırılmış ve doğrulama analizi gerçekleştirilmiştir. Bu doğrultuda, teorik olarak hesaplanan çıktı değerleri ile Moldflow simölasyonundan elde edilen gerçek çıktılar arasındaki fark incelenmiş ve doğruluk oranı yaklaşık %90 olarak hesaplanmıştır. Bu yüksek doğruluk oranı, uygulanan Taguchi metodolojisinin enjeksiyon kalıplama sürecinde hem güvenilir hem de etkin bir optimizasyon aracı olduğunu göstermektedir. Söz konusu oran, modelin hem matematiksel hem de fiziksel karşılığının üretim sürecine başarılı bir şekilde yansıtılabileceğini kanıtlamaktadır.

Gerçek üretim sürecinde aynı optimizasyon fiziksel olarak test edilmiş olsaydı, her bir parametre kombinasyonu için ayrı ayrı denemeler yapılması gerekirdi. Bu durum; hammadde israfı, uzun makine kullanım süreleri ve ek işçilik ihtiyacı gibi unsurlar nedeniyle ciddi bir maliyet yükü oluşturacaktı. Yaklaşık bir değerlendirme yapıldığında, bu tür fiziksel denemelerin toplamda 1000 Euro civarında ek maliyet doğuracağı öngörülmektedir. Taguchi yöntemi ile bu yük ortadan kaldırılmış, sanal ortamda doğru kombinasyonlar belirlenerek hem zaman hem de kaynak tüketimi açısından verimli bir yol izlenmiştir. Böylece yalnızca kalite iyileştirmesi sağlanmakla kalmamış, aynı zamanda üretim süreci daha sürdürülebilir ve maliyet etkin bir yapıya kavuşturulmuştur.

Bu tez çalışması ile birlikte hem malzeme kompozisyonunun hem de işlem parametrelerinin entegre biçimde optimize edilmesi, plastik enjeksiyon üretim süreçlerine sistematik bir yaklaşım kazandırmaktadır. En önemli katkılardan biri, tüm

deneysel analizlerin Moldflow gibi gelişmiş bir simülasyon ortamında gerçekleştirilmiş olmasıdır. Böylelikle fiziksel prototipleme yapılmadan, yalnızca dijital simülasyonlar ile optimum kombinasyonların belirlenmesi mümkün hale gelmiş; ön üretim sürecinde zaman kaybı engellenmiş ve yüksek maliyetli deneme-yanılma döngülerinin önüne geçilmiştir. Elde edilen bu metodolojik yaklaşım, yalnızca çalışmanın yapıldığı parça için değil, otomotiv sektörü başta olmak üzere tüm plastik enjeksiyon uygulamalarında kullanılabilecek, tekrar edilebilir ve genişletilebilir bir model sunmaktadır.



KAYNAKLAR

- [1] **Kim, H. C., Keoleian, G. A., Grande, D. E., Bean, J. C.** (2003). Life Cycle Assessment studies on lightweight materials for automotive applications, *Environmental Science; Technology*, 37(23), 5370–5376.
- [2] **Sakai, S., Yoshida, H., Hirai, Y., Asari, M., Takigami, H., Takahashi, S., Oda, J.** (2014). Can plastics from end-of-life vehicles be managed in a sustainable way? *Waste Management*, 34(3), 458–466.
- [3] **Singh, A. K., Chauhan, D. S.** (2021). Advanced lightweight materials for automobiles: A review. *Materials Today: Proceedings*, 44, 3628–3633.
- [4] **Pradeep, S. A., Iyer, R. K., Kazan, H., Pilla, S.** (2023). Automotive applications of plastics: Past, present, and future. In *Comprehensive Automotive Engineering* (pp. 3–35).
- [5] **Carvalho, D. A. M., Ferreira, N., França, B., Marques, R., Silva, M., Silva, S., Silva, E., Macário, D., Barroso, L., Silva, C. J., Oliveira, C.** (2024). Advancing sustainability in the automotive industry: Bioprepreps and fully bio-based composites. *Composites Part C: Open Access*, 100459.
- [6] **Mallick, P. K.** (2010). Thermoplastics and thermoplastic–matrix composites for lightweight automotive structures. *Design and Manufacturing for Lightweight Vehicles* (pp. 174–207).
- [7] **Priyadarsini, M., Biswal, T., Acharya, S. K.** (2023). Study of mechanical properties of reinforced polypropylene (PP)/nettle fibers biocomposites and its application in automobile industry. *Materials Today: Proceedings*, 74, 980–984.
- [8] **Zhang, X., Li, Y., Wang, J.** (2021). Lightweight and strong glass fiber reinforced polypropylene composite foams via moldopening microcellular injection molding. *Composites Part B: Engineering*, 226, 109347.
- [9] **Yun, J., Lee, H., Choi, H.** (2020). Low pressure plasma modified polycarbonate: A transparent, low reflective and scratch resistant material for automotive applications. *Applied Surface Science*, 512, 145622.
- [10] **Reddy, A. B., Reddy, M. C.** (2021). A brief review: Study on mechanical properties of polycarbonate with different nanofiller materials. In P. V. Shankar, R. Menon, S. K. Gupta (Eds.), *Advances in materials and manufacturing engineering* (pp. 285–291).
- [11] **Park, J. S., Hwang, C. S., Im, S. S.** (2003). Scratch resistant and transparent UV-protective coating on polycarbonate. *Journal of Sol-Gel Science and Technology*, 26(1), 783–787.
- [12] **Krache, R., Ismahane, D.** (2011). Some mechanical and thermal properties of PC/ABS blends. *Materials Sciences and Applications*, 2(5), 404–410.

- [13] **Zhang, X., Li, Y., Zhang, Y., Ma, X.** (2014). Preparation and characterization of polycarbonate/multi-walled carbon nanotube nanocomposites with improved electrical conductivity. *Polymer Testing*, 36, 86–91.
- [14] **Krache, R., Ismahane, D.** (2011). Some mechanical and thermal properties of PC/ABS blends. *Materials Sciences and Applications*, 2(5), 404–410.
- [15] **Khan, F., Hossain, N., Mim, J. J., Rahman, S. M. M., Iqbal, M. J., Billah, M., Chowdhury, M. A.** (2024). Advances of composite materials in automobile applications. *Journal of Engineering Research*.
- [16] **Huang, G., Huo, S., Ren, J., Chen, W., Yang, H., Xiao, S., Wang, T., Peng, H., Song, P.** (2024). Engineering Ce/Pfunctionalized gC₃N₄ for advanced ABS nanocomposites exhibiting unparalleled fire retardancy, enhanced thermal and mechanical properties. *Applied Materials Today*, 100, 123456.
- [17] **Huang, Y., Zhang, M., Wu, L.** (2021). Flame retardant polymethyl methacrylate toughened by a vanadium compound. *Fire Safety Journal*, 121, 103290.
- [18] **Wang, H., Chen, L., Li, Q.** (2022). Fabrication of a high fire safety, transparent coating for PMMA. *Progress in Organic Coatings*, 165, 106751.
- [19] **Kondo, M. Y., Montagna, L. S., Morgado, G. F. M., Castilho, A. L. G. de, Batista, L. A. P. dos S., Botelho, E. C., Costa, M. L., Passador, F. R., Rezende, M. C.** (2023). Recent advances in the use of polyamide-based materials for the automotive industry. *Polímeros: Ciência e Tecnologia*, 33(1), e2023003.
- [20] **Hermabessiere, L., Dehaut, A., Paul-Pont, I., Lacroix, C., Jezequel, R., Soudant, P., Duflos, G., Lambert, C.** (2017). An overview of chemical additives presents in plastics: Migration, release, fate and environmental impact during their use, disposal and recycling. *Science of the Total Environment*, 586, 733–741.
- [21] **Hahladakis, J. N., Velis, C. A., Weber, R., Iacovidou, E., Purnell, P.** (2018). An overview of chemical additives presents in plastics: Migration, release, fate and environmental impact during their use, disposal and recycling. *Journal of Hazardous Materials*, 344, 179–199.
- [22] **Yang, C., Wang, G., Zhao, J., Zhao, G., Zhang, A.** (2021). Lightweight and strong glass fiber reinforced polypropylene composite foams achieved by mold-opening microcellular injection molding. *Journal of Materials Research and Technology*, 15, 5182–5193.
- [23] **Rotzinger, B.** (2006). Talc-filled PP: A new concept to maintain long term heat stability. *Polymer Degradation and Stability*, 91(12), 2884–2887.
- [24] **Castillo, L. A., Barbosa, S. E., Capiati, N. J.** (2013). Influence of talc morphology on the mechanical properties of talc-filled polypropylene. *Journal of Polymer Research*, 20, Article 152.
- [25] **Peng, Y., Musah, M., Via, B., Wang, X.** (2021). Calcium carbonate particles filled homopolymer polypropylene at different loading levels:

Mechanical properties characterization and materials failure analysis. *Journal of Composites Science*, 5(11), 302.

- [26] Wang, Y., Li, J., Zhang, J., Zhou, X. (2022). Comparative analysis of the mechanical, thermal and barrier properties of PP composites with micro and nano CaCO₃ fillers. *Composites Part B: Engineering*, 231, 108173.
- [27] Guo, N., Jiang, Q., Bourell, D. L. (2014). Preparation and laser sintering of limestone polyamide 12 composite. *Polymer Testing*, 37, 1–7.
- [28] Kwon, D.J., Kim, N.S.R., Jang, Y.J., Yang, S. B. (2021). Investigation of impact resistance performance of carbon fiber reinforced polypropylene composites with different lamination to applicate fender parts. *Composites Part B: Engineering*, 215, 108767.
- [29] Hwang, D., Lee, S. G., Cho, D. (2021). DualSizing Effects of Carbon Fiber on the Thermal, Mechanical, and Impact Properties of Carbon Fiber/ABS Composites. *Polymers*, 13(14), 2298.
- [30] Liang, J.Z., Li, B., Ruan, J. (2015). Crystallization properties and thermal stability of polypropylene composites filled with wollastonite. *Polymer Testing*, 42, 185–191.
- [31] Singh, U. P., Biswas, B. K., Ray, B. C. (2009). Evaluation of mechanical properties of polypropylene filled with wollastonite and silicon rubber. *Materials Science and Engineering: A*, 517(1–2), 120–123.
- [32] Singh, R. ve Bakshi, P. (2021), Review on advanced injection molding technologies and their recent applications, *Materials, Cilt 16*, Sayı 17, ss. 1–22, 2021.
- [33] Czepiel, M., Bańkosz, M., SobczakKupiec, A. (2023), Advanced Injection Molding Methods: Review, *Materials, Cilt 16*, Sayı 17, Makale no. 5802, 2023.
- [34] Guo, W., Hua, L., Mao, H. (2014). Minimization of sink mark depth in injection-molded thermoplastic through design of experiments and genetic algorithm. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 72(1–4), 365–375.
- [35] Zou, W., Zheng, X., Hu, X., Huang, J., Wang, G., Guo, Z. (2023). Recent Advances in Injection Molding of Carbon Fiber Reinforced Thermoplastic Polymer Composites: A Review. *ES General*, January 2023.
- [36] Moayyedien, M., Abhary, K., Marian, R. (2017). The analysis of short shot possibility in injection molding process. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 91, 3977–3989.
- [37] M. Özkan, A. Kaya (2022), “Otomotiv Endüstrisinde Kullanılan Termoplastiklerin Performans Analizi,” *Uludağ Üniversitesi Açık Erişim Arşivi*, 2022.
- [38] B. Aksoy (2021), “Bilgisayar Destekli Enjeksiyon Simülasyonlarının Kalıplama Kalitesine Etkisi,” Yüksek Lisans Tezi, YÖK Ulusal Tez Merkezi, 2021.
- [39] M. Kariminejad, D. Tormey, S. Huq, J. Morrison, J. Redmond, C. Souto, M. McAfee (2023), “Optimization of a Commercial Injection-Moulded

Component by Using DOE and Simulation” *arXiv preprint*, arXiv:2301.11620, 2023.

- [40] **URL-1** <<https://www.alliedmarketresearch.com/injection-molding-software-market-A10271>>, date retrieved 24.06.2026, **Allied Market Research**, Injection Molding Software Market Outlook – 2030, 2023.
- [41] **B. Zsidák, R. Pantani, H.-P. Heim (2024)**, Investigation of Injection Molding Parameters with Moldflow Insight, *Polymers*, vol. 16, no. 9, Art. no. 1265, 2024.
- [42] **Gray, C. T. (1988)**. Book review: Introduction to quality engineering: Designing quality into products and processes, G. Taguchi, Asian Productivity Organization, 1986. *Quality and Reliability Engineering International*, 4(2), 159–160.
- [43] **Maghsoodloo, S., Özdemir, G., Jordan, V., Huang, C.-H. (2004)**. Strengths and limitations of Taguchi’s contributions to quality, manufacturing, and process engineering. *Computers; Industrial Engineering*, 47(2–3), 211–225.
- [44] **C. Shen, L. Wang, W. Cao, L. Qian (2007)**, Investigation of the effect of molding variables on sink marks of plastic injection molded parts using Taguchi DOE technique, *Polymer-Plastics Technology and Engineering*, c. 46, s. 219–225, 2007.
- [45] **T. Erzurumlu, B. Özçelik (2006)**, Minimization of warpage and sink index in injection-molded thermoplastic parts using Taguchi optimization method, *Materials; Design*, c. 27, ss. 853–861, 2006.
- [46] **D. Mathivanan ve N. S. Parthasarathy (2009)**, Sinkmark minimization in injection molding through response surface regression modeling and genetic algorithm, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, c. 45, s. 867–874, 2009.
- [47] **S. H. Tang, Y. J. Tan, S. M. Sapuan, S. Sulaiman, N. Ismail ve R. Samin (2007)**, The use of Taguchi method in the design of plastic injection mould for reducing warpage, *Journal of Materials Processing Technology*, c. 182, ss. 418–426, 2007.
- [48] **S. Kato, T. Suzuki ve Y. Ito (2019)**, Shrinkage optimization in talc and glassfiberreinforced polypropylene via Taguchi method, *Materials*, c. 12, s. 764, 2019.
- [49] **Baraheni, M., Ghazi Esfahani, M. M., Hajizadeh Aghdam, A. (2024)**, Evaluation of plastic injection molding for PA6/ABS/CaCO₃ nano composites using Taguchi method and Moldflow simulation approach, *Future Technology*, c. 3, s. 22–31, 2024.
- [50] **Y. Ryu, J. S. Sohn, B. C. Kweon, S. W. Cha (2019)**, Shrinkage Optimization in Talc- and Glass-Fiber-Reinforced Polypropylene Composites, *Materials*, c. 12, s. 764, 2019.
- [51] **K. Prashantha, C. Soulestin, E. Lacrampe, P. Krawczak (2009)**, A study on nanocomposite injection molding process optimization using the design of experiments, *Express Polymer Letters*, vol. 3, no. 12, pp. 779–789, 2009.

- [52] **Jachowicz, T., Krasinskyi, V.** (2019). Investigation of injection shrinkage of composite moldings with mineral filler. *Acta Mechanica Slovaca*, 23(3), 24–29.
- [53] **URL-2** <<https://krusetraining.com/2019/06/26/torstens-training-tips-warpage-due-to-fiber-orientation/>>, date retrieved 24.06.2025, **Krusetraining.com.** (2019) “orsten’s Training Tips – Warpage Due to Fiber Orientation. Krüse Training, 26 Haziran 2019.
- [54] **Chanda, M. Roy, S. K.** (2025) *Plastics Technology Handbook. 4.* CRC Press, “Wollastonite in Polypropylene”.
- [55] **Aslam, R., Khan, A. A., Akhtar, H., Saleem, S., Shahid, M.** (2025). Optimizing injection molding parameters to reduce weight and warpage in PET preforms using Taguchi method and Analysis of Variance (ANOVA). *Next Materials*, 8, 100623.
- [56] **Wang, J., Liu, T., Zheng, K., Liu, H., Cui, H., Li, H.** (2024). Local thermal warpage deformation of polypropylene injection molded flat part and neural network prediction model. *Frontiers in Materials*, 11.

ÖZGEÇMİŞ

Ad-SOYAD : Gizem BAYRAM

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** :2022, Bursa Teknik Üniversitesi, Doğa Bilimleri ve Mühendislik Fakültesi, Polimer Malzeme Mühendisliği
- **Yüksek Lisans** :2025, Bursa Teknik Üniversitesi, Polimer Malzeme Mühendisliği

MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

- Akış Analiz Uzmanı :2022-Devam ediyor, Odelo Otomotiv

DİĞER ESERLER, SUNUMLAR VE PATENTLER:

Çetinoğlu, M., Fındık, G., Ünsal, Ö. F., & Bedeloğlu, A. (2021). Stretchable piezoresistive sensors with graphene and polyaniline coated woven polyester fabrics. *Engineering Sciences and Technology Bulletin of the Dokuz Eylül University*, 1(2021), 28–38.

Fındık, G., Ünsal, Ö. F., & Çelik Bedeloğlu, A. (2022). İletken malzeme esaslı giyilebilir termal terapi kumaşı geliştirilmesi. *Journal of Engineering Sciences and Technology of the Gebze Technic University*, (11th ULPAS-Special Issue 2022).