

T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

KÖPÜK ENJEKSİYON PROSESİNDE GRİ TAGUCHİ VE YAPAY
SİNİR AĞLARI YÖNTEMLERİ İLE PARAMETRE
OPTİMİZASYONU

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Nilay ERKAN

Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı

ARALIK 2024

T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

KÖPÜK ENJEKSİYON PROSESİNDE GRİ TAGUCHİ VE YAPAY
SİNİR AĞLARI YÖNTEMLERİ İLE PARAMETRE
OPTİMİZASYONU

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Nilay ERKAN

Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Merve CENGİZ TOKLU

ARALIK 2024

Nilay ERKAN tarafından hazırlanan “Köpük Enjeksiyon Prosesinde Gri Taguchi ve Yapay Sinir Ağları Yöntemleri ile Parametre Optimizasyonu” adlı tez çalışması 13.12.2024 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı’nda Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Tez Jürisi

Jüri Başkanı : **Unvan Adı SOYADI**
..... Üniversitesi

Jüri Üyesi : **Unvan Adı SOYADI (Danışman)**
Sakarya Üniversitesi

Jüri Üyesi : **Unvan Adı SOYADI**
Sakarya Üniversitesi



ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ

Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Lisansüstü Eğitim-Öğretim Yönetmeliğine ve Yükseköğretim Kurumları Bilimsel Araştırma ve Yayın Etiği Yönergesine uygun olarak hazırlamış olduğum “KÖPÜK ENJEKSİYON PROSESİNDE GRİ TAGUCHİ VE YAPAY SİNİR AĞLARI YÖNTEMLERİ İLE PARAMETRE OPTİMİZASYONU” başlıklı tezin bana ait, özgün bir çalışma olduğunu; çalışmamın tüm aşamalarında yukarıda belirtilen yönetmelik ve yönergeye uygun davrandığımı, tezin içerdiği yenilik ve sonuçları başka bir yerden almadığımı, tezde kullandığım eserleri usulüne göre kaynak olarak gösterdiğimi, bu tezi başka bir bilim kuruluna akademik amaç ve unvan almak amacıyla vermediğimi ve 20.04.2016 tarihli Resmi Gazete’de yayımlanan Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliğinin 9/2 ve 22/2 maddeleri gereğince Sakarya Üniversitesi’nin abonesi olduğu intihal yazılım programı kullanılarak Enstitü tarafından belirlenmiş ölçütlere uygun rapor alındığını, çalışmamla ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun ortaya çıkması halinde doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi beyan ederim.

(19/11/2024)

Nilay Erkan





Çok Değerli Eşime ve Aileme



TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitimim boyunca bana yol gösteren, güler yüzü ile her konuda desteklerini esirgemeyen danışmanım Doç. Dr. Merve Cengiz Toklu'ya, hayatımın her anında yanımda olan ve bugünlere gelmemi sağlayan çok değerli anne, babama ve tez sürecimin her aşamasında tüm bilgi birikimiyle bana ışık tutan, her an yanımda olmasının verdiği huzur ile sürecimi kolaylaştıran çok değerli eşim Dr. Öğr. Üyesi Enes Furkan Erkan'a teşekkür ederim.

Nilay Erkan



İÇİNDEKİLER

Sayfa

ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ	v
TEŞEKKÜR	ix
İÇİNDEKİLER.....	xi
KISALTMALAR.....	xiii
SİMGELER.....	xv
TABLO LİSTESİ	xvii
ŞEKİL LİSTESİ	xix
ÖZET	xxi
SUMMARY	xxiii
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Geniştirilmiş Polipropilenin Kalıplama Sürecine Genel Bakış	1
1.2. Tezin Amacı.....	3
1.3. Tezin Gerekçesi	3
1.4. Tezin Yeniliği.....	4
1.5. Çalışmanın Sınırları	4
1.6. Tezin Akışı	5
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	7
3. METODOLOJİ	13
3.1. Deney Tasarımı.....	13
3.2. Taguchi Metodu	14
3.3. Taguchi'nin Kalite Felsefesi ve Kayıp Fonksiyonu.....	14
3.4. Taguchi Deney Tasarımı Aşamaları	16
3.4.1. Faktör ve etkileşimlerin belirlenmesi	16
3.4.2. Faktör seviyelerinin belirlenmesi	16
3.4.3. Uygun ortogonal dizinin belirlenmesi	17
3.4.4. Faktörlerin ve etkileşimlerinin yerleştirilmesi	17
3.4.5. Performans testlerinin yapılması	17
3.4.6. Sonuçların analizi ve doğrulama deneylerinin gerçekleştirilmesi	17
3.5. Gri İlişkisel Analiz Yöntemi	18
3.6. Yapay Sinir Ağları.....	20
4. UYGULAMA	23
4.1. Sistem ve Problemin Tanımı	23
4.2. Deney Tasarımı.....	25
4.3. Yapay Sinir Ağları.....	41
5. SONUÇLAR VE TARTIŞMA	47
KAYNAKLAR.....	51
ÖZGEÇMİŞ.....	55



KISALTMALAR

ANOVA	: Analysis of Variance
DVM	: Destek Vektör Makinesi
EPP	: Expanded Polypropylene
GA	: Genetic Algorithm
GİA	: Gri İlişkisel Analiz
HVAC	: Heating, Ventilation, and Air Conditioning
LR	: Logistic Regression
MAE	: Mean Absolute Error
MSE	: Mean Square Error
PE	: Polyethylene
PP	: Polypropylene
PS	: Polystyrene
PSO	: Particle Swarm Optimization
SD	: Serbestlik Derecesi
S/N	: Signal to Noise
YSA	: Yapay Sinir Ağları



SİMGELER

bar	: Basınç [Birim]
°C	: Sıcaklık [Birim]
g	: Gram [Birim]
l	: Litre [Birim]
L	: Ortogonal Dizi
mm	: Milimetre
mPA	: Basınç [Birim]
ms	: Milisaniye
sn	: Saniye



TABLO LİSTESİ

Sayfa

Tablo 2.1. Enjeksiyon kalıplama prosesinde optimizasyon çalışmaları.....	10
Tablo 3.1. Aktivasyon fonksiyonları ve formülleri.....	22
Tablo 4.1. Proses parametreleri ve açıklamaları.	26
Tablo 4.2. Parametrelerin seviyeleri.....	27
Tablo 4.3. Deneyde kullanılan L27 ortogonal dizisi.	27
Tablo 4.4. Taguchi deney tasarımına göre çıktı sonuçları.	29
Tablo 4.5. Taguchi kontrol faktörleri için S/N oranları.....	30
Tablo 4.6. SN oranlarına ilişkin yanıt tablosu ve faktörlerin sıralaması (“en düşük en iyi”).	31
Tablo 4.7. SN oranlarına ilişkin yanıt tablosu ve faktörlerin sıralaması (“en düşük en iyi”).	32
Tablo 4.8. Gri ilişki derecesi.	33
Tablo 4.9. Taguchi kontrol faktörleri için SN oranları.	34
Tablo 4.10. Gri ilişki derecesine göre ANOVA sonuçları.	35
Tablo 4.11. Taguchi kontrol faktörleri için S/N oranları.	37
Tablo 4.12. SN oranlarına ilişkin yanıt tablosu ve faktörlerin sıralaması (“en düşük en iyi”).	37
Tablo 4.13. SN oranlarına ilişkin yanıt tablosu ve faktörlerin sıralaması (“en düşük en iyi”).	37
Tablo 4.14. Gri ilişki derecesi.	38
Tablo 4.15. Taguchi kontrol faktörleri için SN oranları.	39
Tablo 4.16. SN oranlarına ilişkin yanıt tablosu ve faktörlerin sıralaması (“en yüksek en iyi”).....	40
Tablo 4.17. Gri ilişki derecesine göre ANOVA sonuçları.	40
Tablo 4.18. Optimum parametreler ve sonuçları.....	40
Tablo 4.19. Girdi ve çıktı parametreleri.	41
Tablo 4.20. En iyi sonucu veren ilk 10 model.....	43
Tablo 4.21. Eğitim ve test seti için MSE, MAE ve R2 değerleri.	44



ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 3.1. Taguchi kayıp fonksiyonu.	16
Şekil 3.2. Biyolojik bir nöron örneği.	21
Şekil 3.3. Yapay sinir ağlarının temel bileşenleri.	21
Şekil 4.1. Teubert Enjeksiyon makinesi.	23
Şekil 4.2. Parça görseli.	24
Şekil 4.3. Kullanılan hammadde görseli.	24
Şekil 4.4. Deney tasarımı aşamaları.	25
Şekil 4.5. CF üzerinde parçanın çarpıklık seviyesinin ölçümü.	28
Şekil 4.6. S/N oranları için ana etki grafiği.	30
Şekil 4.7. S/N oranları için ana etki grafiği.	31
Şekil 4.8. S/N oranları için ana etki grafiği.	34
Şekil 4.9. Girdi parametrelerine ait verilerin dağılımı.	42
Şekil 4.10. Girdi parametrelerinin çıktılar üzerindeki etkileri.	42
Şekil 4.11. Çevrim süresi çıktısı için gerçek ve tahmini değerlerin karşılaştırması. .	44
Şekil 4.12. Çarpıklık çıktısı için gerçek ve tahmini değerlerin karşılaştırması.	45



KÖPÜK ENJEKSİYON PROSESİNDE GRİ TAGUCHİ VE YAPAY SİNİR AĞLARI YÖNTEMLERİ İLE PARAMETRE OPTİMİZASYONU

ÖZET

Geniştirilmiş polipropilen (EPP) köpükler; otomotiv, HVAC (Isıtma, Havalandırma ve İklimlendirme), gıda, savunma ve spor ekipmanları gibi çeşitli endüstrilerde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu çalışmanın amacı, EPP köpük enjeksiyon proses parametrelerinin çok yanıtlı optimizasyonunu incelemek ve en iyi performansı elde etmek amacıyla optimal parametrelerin doğrulanmasını sağlamaktır. Köpük enjeksiyon sürecinde operatörler 11 farklı parametreyi ayarlamaktadır. Mevcut durumda, operatörler bir ürünün parametresini geçmiş deneyimlerine dayanarak deneme yanılma yöntemi ile belirlemektedir. Bu çalışmada, Taguchi yöntemi temel alınarak L27 ortogonal dizisi ile deneyler tasarlanmıştır. Sabit ve hareketli taraf buhar süresi, soğutma süreleri, köpük basıncı süresi ve dolum basınçları gibi proses parametrelerinin çevrim süresi ve çarpıklık seviyesi üzerindeki etkileri analiz edilmiştir. İlk olarak proseste kullanılan tüm parametreler sisteme dahil edilmiş ve deneyler gerçekleştirilmiştir. İki çıktının da minimum seviyede tutulabilmesi amaçlandığından Gri Tabanlı Taguchi yöntemi kullanılarak proseste en etkili parametreler analiz edilmiştir. Alınan sonuçlar sabit ve hareketli taraf buhar süresi, otoklav süresi, soğutma süresi ve köpük basıncı soğutma süresinin en etkili parametreler olduğunu göstermektedir. Çalışmanın devamında etkisiz parametrelerin değerleri sabit tutularak çalışmaya belirlenen beş parametre üzerinden devam edilmiştir. Beş parametre için L27 ortogonal diziye göre deneyler tekrarlanmıştır. Her bir deney kombinasyonu için üç tekrarlı deney yapılmıştır. Her bir çıktı için ayrı ayrı Taguchi yöntemi uygulanarak optimal deney kombinasyonları belirlenmiştir. İki çıktı için kombinasyonlar farklılık gösterdiğinden Gri Tabanlı Taguchi metodu ile iki çıktının da optimum olduğu deney düzeneği belirlenmiş ve sonuçlar Varyans Analizi (ANOVA) yöntemi ile incelenmiştir. Optimal deney kombinasyonu, sabit ve hareketli taraf buharlama sürelerinin orta seviyelerde, otoklav süresinin yüksek seviyede ve soğutma sürelerinin düşük seviyelerde tutulmasını içermektedir. İkinci aşamada deneyler için harcanan zamanın ve maliyetin azaltılması için prosesi modelleyen bir yapay sinir ağı oluşturulması amaçlanmıştır. Yapay Sinir Ağları (YSA) yöntemi ile çevrim süresi ve çarpıklık seviyesinin tahminlemesini sağlayan bir model oluşturulmuştur. Çapraz doğrulama metodu ile hiperparametre optimizasyonu yapılmış ve en iyi parametrenin belirlenmesi amaçlanmıştır. Yapılan çalışmada en iyi tahmin sonucunu veren model parametrelerinin düzenleme değeri: 0,0001, gizli katman boyutu: 150, öğrenme hızı: 'adaptive' ve çözücü: 'lbfgs' olarak belirlenmiştir. Alınan sonuçlarda modelin çevrim süresinin %99,8 ve çarpıklık seviyesinin %99,7 oranlarında tahminleme yapabildiği görülmüştür.



PARAMETER OPTIMIZATION IN FOAM INJECTION PROCESS USING GREY TAGUCHI AND ARTIFICIAL NEURAL NETWORK METHODS

SUMMARY

The responses of companies to social, environmental, and economic challenges represent one of the most critical issues of our time. Faced with rapidly evolving technologies and the pressures of globalization, businesses are now compelled to undergo transformation by developing strategies that are tailored to the specific needs of their regions. This transformation process is increasingly gaining importance with the aim of enhancing efficiency in industrial applications and providing a competitive advantage.

In recent years, there has been a significant increase in the use of expanded polymer foam beads. With the widespread adoption of electric vehicles, the importance of reducing vehicle weight has grown substantially, particularly within the automotive sector. Expanded polypropylene (EPP) foams are extensively utilized across a range of industries, including automotive, HVAC (Heating, Ventilation, and Air Conditioning), food services, defense, and sports equipment. Materials with a closed-cell structure, such as Expanded Polypropylene (EPP), are considered the most rational choice for designing protective products or energy-absorbing components. The energy absorbed is equivalent to the work done by forces that cause deformation of the material (such as crushing or breaking).

Expanded polymer foams, such as EPP, play a vital role in modern engineering and manufacturing due to their versatility and resilience. Beyond automotive applications, EPP's lightweight yet durable structure has made it a popular material in the design of protective equipment, packaging solutions, and even energy-efficient construction materials. In the automotive sector, the rising adoption of electric vehicles emphasizes the need for innovative materials like EPP that can reduce overall vehicle weight while meeting stringent safety standards. This material's closed-cell structure allows it to absorb significant amounts of energy upon impact, making it ideal for various crash-protection applications. The global shift toward sustainable practices further underscores the importance of EPP as it is reusable, recyclable, and offers substantial energy-saving benefits in production and application.

Closed-cell EPP foam finds extensive use in automotive bumpers to absorb impact energy. Variations in foam density and thickness influence energy absorption properties, thereby optimizing bumper system performance. Additionally, it has recently been increasingly used in vehicle seat components, including the cushion, backrest, and headrest sections. Due to its low weight and high energy absorption capabilities, EPP is widely applied in the aerospace and automotive industries. Compared to plastic injection processes, the EPP foam injection process is more complex and influenced by numerous factors. EPP exhibits a homogeneous, closed-cell structure due to its favorable mechanical properties and stable thermal conductivity, even in humid environments. For this reason, EPP can function as a high-performance thermal insulation material. Its degradation performance surpasses that

of PS and polyethylene (PE) foams. However, PP resin has a high crystallinity and low melt viscosity, making it difficult to control compared to amorphous polymer foams. Additionally, pure PP is typically a linear polyolefin, and such polymers do not exhibit the high strain hardening required to withstand the stretching forces that occur during the later stages of bubble growth. Consequently, it is challenging to produce foams with a smooth, fine pore structure, high expansion ratios, and low open-cell content.

Optimizing the EPP foam injection process requires overcoming several unique challenges due to the material's complex physical properties. EPP's high crystallinity and low melt viscosity make it difficult to manage during injection molding, as the material demands precise control over temperature, pressure, and expansion. Traditional trial-and-error methods, often based on operator experience, are time-intensive and may lead to inconsistent results. To address these challenges, process optimization techniques, including statistical methods like the Taguchi method and advanced analytical approaches, have been employed. By carefully adjusting parameters such as steam duration, cooling times, and foam pressure, companies aim to achieve consistent quality, minimize cycle times, and reduce waste. These optimizations are particularly valuable in the competitive manufacturing landscape, where efficiency gains can translate directly to cost savings and improved market responsiveness.

In EPP foam bead production, steam serves as both a heat source and an expanding agent. In the initial phase, steam enters the mold, heating the polymer matrix and bonding the beads together. During depressurization, the steam within the beads transitions to a gas, leading to bead expansion and pressure formation within the mold. Water cooling solidifies the product, while air cooling stabilizes it. Once the pressure drops sufficiently, the mold opens, and the expanded foam bead product is ejected. Throughout the foam injection process, several factors impact part quality, including the pressure of the steam introduced into the system, steam duration, cooling times, internal bead pressure upon mold opening, and filling pressures. Determining parameters involves not only maintaining an appropriate quality level but also optimizing production costs. Shorter processing times lower production costs, provide flexibility in capacity utilization, and make cycle time a critical factor. Therefore, optimizing EPP production parameters is essential.

The primary goal of this study is to elucidate the complex structure of the expanded polypropylene foam injection process, analyze the effects of parameters on output, and optimize the process considering these effects. In the current system, parameters are set experimentally based on operator experience, leading to significant time losses. To maintain competitiveness, the company aims to reduce cycle times to lower energy costs, enhance capacity flexibility, and minimize quality-related costs, adhering to a "right first time" approach. In line with this philosophy, it also targets reducing the most common defect, warpage.

The study consists of two stages. First, the effects of parameters on output were identified, followed by an analysis of influential parameters to achieve optimal settings. Due to limited information in the literature on EPP foam injection molding processes, all parameters used in production were included in the scope of the study. During the foam injection process, operators adjust 11 different parameters. In this study, experiments were designed using the L27 orthogonal array based on the Taguchi method. The effects of process parameters, such as steam duration on both fixed and moving sides, cooling times, foam pressure duration, and filling pressures, on cycle

time and warpage level were analyzed. Initially, all parameters used in the process were included, and experiments were conducted. Since the study aimed to minimize both outputs, the Taguchi-based Grey Relational Analysis (TB-GRA) method was applied to identify the most influential process parameters. Results indicated that steam durations on the fixed and moving sides, autoclave time, cooling time, and foam pressure cooling time were the most impactful parameters. In the continuation of the study, values for non-influential parameters were held constant, and further analysis was conducted with the selected five parameters. Experiments for the five parameters were repeated according to the L27 orthogonal array. Each experimental combination was conducted in triplicate. Optimal experimental combinations for each output were identified using the Taguchi method separately. Since combinations varied across outputs, the optimal setup was determined using the Taguchi-based Grey Relational Analysis method, and results were analyzed through Analysis of Variance (ANOVA). The parameters that yielded optimal results for both outputs were identified as follows: the cross-steam duration on the fixed side is 5.5 seconds, while the cross-steam duration on the moving side is also 5.5 seconds. The autoclave duration is set to 11 seconds. The cooling durations for both the fixed and moving sides are maintained at 65 seconds each. Lastly, the foam pressure cooling duration is established at 30 seconds.

The integration of digital tools, such as artificial neural networks (ANNs), marks a pivotal shift in manufacturing, moving away from traditional, labor-intensive practices toward a more predictive and data-driven approach. Digitalization not only enhances process efficiency but also fosters adaptability, as ANN models can continuously learn from new data and refine production settings accordingly. In the context of EPP foam production, the ANN model developed in this study enables manufacturers to predict key outcomes like cycle time and warpage with high accuracy, streamlining decision-making and minimizing variability in production. This transition to a digitalized process aligns with the broader Industry 4.0 movement, which emphasizes smart manufacturing and sustainable practices. As such, the adoption of ANN and other digital tools positions companies to remain competitive in a rapidly evolving industrial landscape, ultimately paving the way for a more resilient and efficient manufacturing sector.

In the second stage, an artificial neural network (ANN) model was developed to predict cycle time and warpage levels. Hyperparameter optimization was conducted using cross-validation, aiming to identify the best parameters. In the study, the best model parameters were found to be: regularization value: 0.0001, hidden layer size: 150, learning rate: 'adaptive,' and solver: 'lbfgs.' The 81-sample dataset was randomly split into 80% training and 20% test sets, and the model was run again. Results showed that cycle time and warpage level predictions were achieved with 99.8% and 99.7% accuracy, respectively. Future optimization studies can now focus on analyzing effective parameters, thus preventing time losses. The developed ANN model, by guiding parameter determination, can be regarded as foundational for transitioning from trial-and-error methods to a digitalized process.



1. GİRİŞ

Şirketlerin karşı karşıya kaldığı sosyal, çevresel ve ekonomik zorluklara verdikleri yanıtlar, günümüzün en kritik meselelerinden biridir. Hızla değişen teknolojiler ve küreselleşme baskılarıyla karşı karşıya kalan işletmelerin, bulundukları bölgeye uygun stratejiler geliştirerek dönüşüme gitmeleri zorunlu hale gelmiştir. Üretim süreçlerinde dijitalleşme, robot teknolojileri ve otomasyonun artması, dijital dönüşüm olarak adlandırılan süreçlerin temel odak noktalarını oluşturmaktadır. Bu dönüşümün başlangıcı sadece son on yıla dayanmamakta, yaklaşık kırk yıl önce bilgisayar destekli tasarım programlarının kullanılması ve esnek üretim sistemlerinin devreye girmesiyle temellerinin atıldığını söylemek mümkündür. Bu dönüşüm süreci, endüstriyel uygulamalarda verimliliği artırmak ve rekabet avantajı sağlamak amacıyla giderek daha fazla önem kazanmaktadır.

1.1. Genişletilmiş Polipropilenin Kalıplama Sürecine Genel Bakış

Son yıllarda genişletilmiş polimer köpük boncuklarının kullanımında önemli bir artış gözlemlenmiştir. Özellikle elektrikli araçların yaygınlaşmasıyla birlikte, otomotiv sektöründe araçların ağırlığını azaltma konusu büyük önem kazanmıştır. Polimer köpüklerden biri olan EPP, polistiren (PS) köpüğün ardından JSP firması tarafından geliştirilmiş ve günümüzde en çok üretilen polimer köpüklerden biri haline gelmiştir. Polipropilenin (PP) özelliklerine ek olarak, EPP çeşitli pratik avantajlar da sunmaktadır (Liu ve ark, 2011).

EPP, sahip olduğu üstün mekanik özellikler ve nemli ortamlarda dahi korunan sabit ısı iletkenliği ile kapalı hücreli, homojen bir yapı sergiler. Bu özellikleri nedeniyle, EPP, yüksek verimli bir ısı yalıtım malzemesi olarak tercih edilmektedir. Bozunma dayanımı, PS ve polietilen (PE) köpüklerine kıyasla daha iyidir. Ancak, PP reçinesinin yüksek kristal yapısı ve düşük erime viskozitesi, amorf polimer köpüklerle karşılaştırıldığında kontrol edilmesini daha güç hale getirir. Ayrıca, saf PP, genellikle lineer bir poliolefin olduğundan, köpük oluşum sürecinin ilerleyen aşamalarında karşılaşılan gerilme kuvvetlerine karşı direnç gösterecek yüksek gerilme sertleşmesini sağlamaz. Bu durum, ince gözenekli, pürüzsüz yüzeye sahip, yüksek genleşme oranlı

ve düşük açık hücre oranlı köpüklerin üretilmesini zorlaştırmaktadır (Yu ve ark, 2013). EPP, öncelikle darbe enerjisini emme amacıyla geliştirilmiş olup, ekstrüde polistirene göre daha yüksek geri dönüştürülebilirliğe sahiptir. Otomotiv sektöründe, enerji emici özellikleri nedeniyle çarpışma bölgelerinde ve koruyucu kasklarda kullanılmaktadır (Lee ve ark, 2010).

Kapalı hücre yapısına sahip malzemeler, EPP gibi, koruyucu ürünler veya enerji emici elemanların tasarımında en mantıklı seçenek olarak değerlendirilmektedir. Bu enerji, malzemenin deformasyonuna neden olan kuvvetlerin gerçekleştirdiği iş ile eşdeğerdir (ezilme, kırılma gibi). Kapalı hücreli EPP köpüğü, otomotiv tamponlarında darbe enerjisini emmek amacıyla geniş bir kullanım alanına sahiptir. Köpüğün yoğunluğundaki ve kalınlığındaki değişiklikler, enerji emme özelliklerini etkileyerek tampon sistemlerinin performansını optimize etmektedir. Ayrıca, son zamanlarda araç koltuklarının minder, sırtlık ve başlık bölümlerinde de sıklıkla tercih edilmektedir. Düşük ağırlığı ve yüksek enerji emme yetenekleri sayesinde, EPP, havacılık ve otomotiv sektörlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Köpük malzemeleri genellikle ısı ve basınç içeren buharlı kalıplama yöntemleriyle üretilmektedir (Rumianek ve ark, 2021).

Köpük enjeksiyon süreci, plastik enjeksiyon sürecine göre daha karmaşık bir yapıya sahiptir ve birçok faktörden etkilenmektedir. EPP köpük boncuğu üretiminde buhar hem ısı kaynağı hem de genişletici madde olarak kullanılır. Süreç boyunca, buhar köpük boncuklarını ısıtarak birbirine yapıştırırken, aynı zamanda içlerine nüfuz edip yoğunlaşır. Sistem basıncı düşürüldüğünde, yoğunlaşan buhar gaz haline dönüşerek yumuşayan boncukların genişlemesine neden olur. Bu işlem, buhar verme, basınç düşürme, su ile soğutma, dışa atma ve hava ile soğutma adımlarını içermektedir. İlk aşamada buhar, kalıba girerek polimer matrisini ısıtır ve boncukları birbirine bağlar. Basınç düşürme aşamasında, boncukların içindeki buhar gaz haline geçerek boncukların genişlemesine ve kalıp içerisinde basınç oluşmasına yol açar. Su ile soğutma, ürünü katılaştırırken, hava ile soğutma da stabilizasyon sağlar. Basınç yeterince düştüğünde, kalıp açılır ve genişletilmiş köpük boncuk ürünü dışarı çıkarılır (Nakai ve ark, 2008).

1.2. Tezin Amacı

Çalışmanın temel amacı genişletilmiş polipropilen köpük enjeksiyon prosesinin karmaşık yapısına ışık tutarak parametrelerin çıktı üzerindeki etkilerinin analiz edilmesi ve bu etkiler dikkate alınarak sürecin optimize edilmesidir. Mevcut sistemde parametreler operatör deneyimlerine dayanarak deneysel olarak belirlenmekte ve bu aşamada oldukça fazla zaman kayıpları yaşanmaktadır. Günümüz koşullarında rekabet seviyesinin üst noktalara çıkması ile maliyet düşürme çalışmalarına önem artmıştır. Firmanın rekabetçiliğini koruyabilmesi için çevrim sürelerinde düşüş yapılarak enerji maliyetlerinin azaltılması ve kapasite esnekliğinin sağlanması amaçlanırken aynı zamanda ilk seferde doğru ürün üretme felsefesiyle yola çıkarak kalitesizlik maliyetinin düşürülmesi hedeflendiğinden en sık yaşanan hata olan çarpıklık seviyesinin iyileştirilmesi de amaçlanmıştır.

Çalışma iki aşamadan oluşmaktadır. İlk olarak parametrelerin çıktı üzerindeki etkilerinin tespiti amaçlanmış, sonrasında etkili parametreler üzerinde analiz yapılarak optimum parametrelere ulaşılması amaçlanmıştır.

1.3. Tezin Gerekçesi

Köpük enjeksiyon süreci boyunca parçanın kalitesini etkileyen çeşitli unsurlar bulunmaktadır; bu unsurlar arasında sisteme verilen buharın basıncı, buhar süresi, soğutma süreleri, kalıp açıldığında iç boncuk basınç değerleri ve dolum basınçları yer almaktadır. Örneğin, buhar süresinin yetersiz olması, parçanın birleşimini zayıflatır ve kırılmalara neden olabilirken, fazla buhar kullanımı yüzey kalitesini olumsuz etkileyebilir. Ayrıca, kalıp, köpük basıncı uygun bir seviyeye düşmeden açıldığında, iç boncuk basıncı ile atmosfer basıncı arasındaki büyük fark aşırı genişlemeye yol açarak ürünün şekil bozukluğuna sebep olabilir. Parametrelerin belirlenmesinde, uygun bir kalite seviyesinin sağlanmasının yanı sıra üretim maliyetlerinin de optimize edilmesi önemlidir. Kısa işleme süreleri, üretim maliyetlerini düşürürken kapasite kullanımında esneklik sağlamak ve bu nedenle çevrim süresi kritik bir faktör haline gelmektedir. Bu nedenle, EPP üretim parametrelerinin optimize edilmesi ihtiyacı doğmaktadır. Literatürde plastik enjeksiyon süreçleri üzerine birçok optimizasyon çalışması bulunmasına rağmen, EPP süreciyle ilgili araştırmalar sınırlıdır. EPP boncuklarının özellikleri, malzeme dayanımı ve geri dönüşümü üzerine birkaç çalışma olmasına rağmen, parametre

optimizasyonuna odaklanan herhangi bir çalışma tespit edilmemiştir. Üretim sürecinin karmaşıklığı ve çok sayıda değişken olması, bu konuda kapsamlı araştırma gereksinimini ortaya koymaktadır.

1.4. Tezin Yeniliği

Literatürde EPP hammadresi ile köpük enjeksiyon kalıplama prosesine dair sınırlı bilgi olduğundan ilk olarak üretimde kullanılan tüm parametreler çalışmanın kapsamına dahil edilmiştir. Taguchi yöntemi ile çevrim süresi ve çarpıklık seviyeleri üzerindeki parametre etkileri analiz edilmiştir. İki çıktının eş zamanlı olarak optimum olması istendiğinden Taguchi Tabanlı Gri ilişkisel analiz yöntemi kullanılarak çoklu çıktıya göre etkiler analiz edilmiştir. Bundan sonra yapılacak optimizasyon çalışmalarında etkili parametreler üzerinden analiz yapılması sağlanabilecek ve zaman kayıpları önlenebilecektir.

Geliştirilen yapay sinir ağları modeli parametrelerin belirlenmesi noktasında kullanılarak prosesin deneme yanılma yönteminden dijitalleşme sürecine geçilmesine temel oluşturacak bir çalışma olarak kabul edilebilir.

1.5. Çalışmanın Sınırları

Çalışmada yanıt değişkeni olarak çevrim süresi ve çarpıklık seviyesi seçilmiştir. Firmada makine kapasitesinin artırılması istenmesi sebebiyle çevrim süresi değeri kritik bir değerdir. Seçilen parça üzerinde yaşanan en sık hata çarpıklık seviyesi olduğundan bu hatanın iyileştirilmesine odaklanılmıştır. İşletmelerin hedefleri ve yaşadıkları hata modları göz önünde bulundurularak farklı çıktılar seçilerek farklı modeller kullanılabilir.

Seçilen parçanın geometrisi parametre değerlerini değiştirdiğinden benzer geometrideki parçada benzer değerler kullanılabilirken farklı geometrideki parçalar için farklı parametre değerleri kullanılmaktadır.

Çalışmada üretim hammadresi olarak ARPRO markalı 21 g/l yoğunluğunda malzeme seçilmiştir. Hammadde yoğunluğu değiştiğinde parametrelerde değişiklik yaşanabilmektedir.

Üretim basınçlı dolum yöntemi ile gerçekleştirilmiş, alüminyum malzemeden üretilen kalıp kullanılmıştır. Silodan basınçsız dolum ile yapılacak üretimlerde ve farklı kalıp malzemesi ile yapılacak üretimlerde farklı sonuçlar görülebilir.

1.6. Tezin Akışı

Bu çalışmada, üretim parametrelerinin çevrim süresi ve çarpıklık seviyesi üzerindeki etkileri incelenmiş, ardından çarpıklık seviyesini en aza indirirken çevrim süresini mümkün olan en düşük seviyede tutacak üretim parametreleri belirlenmiştir.

Birinci bölümde EPP malzemesine ve köpük enjeksiyon prosesine genel bir bakış sağlanmaktadır. Devamında çalışmanın amacı, gerekçesi, yeniliği, sınırları ve akışı sunulmuştur.

İkinci bölümde kapsamlı bir literatür araştırması yer almaktadır. Plastik enjeksiyon proseslerinde yapılmış olan optimizasyon çalışmalarına ve sonuçlarına değinilmiştir. Optimizasyon çalışmalarında kullanılan yöntemler, seçilen parametre ve çıktılar ayrıntılı olarak ele alınmıştır.

Üçüncü bölümde Taguchi, Gri ilişkisel analiz (GİA) ve Yapay sinir ağları yöntemlerinin uygulanmasına dair ayrıntılı bir inceleme sunmaktadır

Dördüncü bölümde köpük enjeksiyon kalıplama süreci tanıtılmış ve kullanılan yöntemler ile uygulama detaylıca anlatılmıştır.

Son olarak beşinci bölümde, çalışmanın sonuçları ve sonuçlar hakkında yorumlar bulunmaktadır. Bu bölümde, çalışmanın katkıları sunulmakta ve gelecekteki araştırmalar için potansiyel ilgili yönler verilmektedir



2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Bu bölüm plastik enjeksiyon prosesinde yapılan parametre optimizasyonu çalışmaları ile ilgili güncel literatüre kısa bir genel bakış sunmaktadır.

Feng ve ark. (2020) yaptıkları çalışmada plastik enjeksiyon prosesinde iki aşamalı bir optimizasyon çalışması gerçekleştirmişlerdir. Çalışmada proses parametrelerinin elde edilen parça kalitesi üzerindeki etkileri incelenmiş, parçanın çarpılma seviyesi, kaynak hattı ve kelepçe kuvvetinin optimize edilmesi amaçlanmıştır. Girdi parametreleri olarak kalıp sıcaklığı, erime sıcaklığı, akış hızı, soğuma süresi ve değişken basınç profili alınmıştır. Yanıt değişkeni olarak çarpılma seviyesi, kaynak uzunluğu ve kelepçe kuvveti alınmıştır. Proses optimizasyonu çalışması için ilk olarak faktörler için 3'er seviye belirlenerek L27 seçilerek Taguchi yöntemi kullanılmıştır. Sonrasında ANOVA ve hibrit Yapay sinir ağları ve Genetik algoritma (GA) yöntemleri kullanılmıştır. Sonuç olarak hibrit Yapay sinir ağları ve Genetik algoritma yöntemlerinin sağladığı optimal çözümler Taguchi metodunun sağladığı optimal çözümden daha etkili olduğu anlaşılmıştır.

Sel (2021) yaptığı çalışmada plastik enjeksiyon prosesinde parçalarda en çok karşılaşılan kalite hatalarından biri olan çarpılma seviyesinin minimuma indirilmesine yönelik bir optimizasyon çalışması yapmıştır. İlk olarak Taguchi yöntemi kullanılarak parçanın kalite seviyesine en çok etki eden parametreler belirlenmiştir. Yapılan deneyler sonucunda proseste en etkili parametrelerin tutma basıncı, dişi çelik sıcaklığı, soğutma zamanı, tutma zamanı ve geri basınç olarak belirlenmiştir. Elde edilen veri seti kullanılarak Makine öğrenmesi yöntemi ve Genetik algoritma yöntemleri kullanılmıştır. Sonuç olarak literatürün aksine eriyik sıcaklığının ve basınç faktörlerinin etkisiz olduğu görülmüştür.

Farooque ve ark. (2021) yaptığı çalışmada plastik enjeksiyon prosesinde yapılan optimizasyon çalışmalarına yönelik bir literatür incelemesi gerçekleştirmiştir. Yaptığı literatür incelemesinde araştırmacıların çoğunlukla girdi parametreleri olarak erime sıcaklığı, kalıp sıcaklığı, enjeksiyon basıncı, enjeksiyon hızı, enjeksiyon süresi, tutma basıncı, tutma süresi ve soğuma süresi gibi parametreleri aldığı, yanıt değişkeni olarak

ise genellikle parça kalitesi üzerinde yoğunlaşarak çarpılma, büzülme, yüzey pürüzlüğü gibi parçanın kalitesini etkileyen parametreleri seçmişlerdir. Proses optimizasyonu için araştırmacıların birçok farklı yöntem kullandığı görülmüştür. Kullanılan teknikler genellikle deney tasarımı, yapay zeka uygulamaları ve simülasyon olarak görülmüştür. Bu tekniklerin örneklerinden bazıları Taguchi, yapay sinir ağları, genetik algoritma ve varyans analizleri olduğu görülmüştür.

Wang ve ark. (2021) yaptıkları çalışmada plastik bir arka kapı araba paneli üretimi için enjeksiyon kalıplama prosesinde parça kalitesinin iyileştirilmesi için parametre optimizasyonu çalışması gerçekleştirmişlerdir. Çalışmada simülasyon parametrelerini elde etmek için öncelikle Taguchi ve gri ilişkisel analiz yöntemleri kullanılmıştır. Sonrasında enjeksiyon prosesinin simüle etmek için MoldFlow2018 programı kullanılmıştır. Girdi parametreleri olarak erime sıcaklığı, kalıp sıcaklığı, soğuma süresi, paketlenme basıncı ve paketlenme süresi seçilmiştir. Yanıt değişkeni olarak çarpılma ve hacimsel büzülme seçilmiştir. Proses parametrelerinin en iyi kombinasyonu 60°C kalıp sıcaklığı, 185°C erime sıcaklığı, 25 sn soğutma süresi, 85 MPa paketlenme basıncı ve 25 sn paketlenme süresi olarak belirlenmiştir.

Etondia ve ark. (2019) tarafından polipropilen bir malzemenin enjeksiyon kalıplama prosesinde parametre optimizasyonu çalışması yapılmıştır. Girdi parametreleri olarak enjeksiyon basıncı, erime sıcaklığı, paketlenme basıncı ve paketlenme süresi seçilmiştir. Seçilen parametreler için üç seviye belirlenmiş ve L27 ortogonal dizi kullanılarak deneyler oluşturulmuştur. Çıktı parametresi olarak malzeme sertliği, yoğunluk ve basınç dayanımı belirlenmiştir. Girdi parametrelerinin çıktı parametreleri üzerindeki etkileri analiz edilmiştir. Proses parametrelerinin optimum kombinasyonunu elde etmek için Gri ilişkisel analiz yöntemi kullanılmıştır. Aynı zamanda ANOVA ile parametrelerin etkileri incelemiştir. Erime sıcaklığının ve paketlenme süresinin en baskın parametreler olduğu görülmüştür. Paketlenme ve enjeksiyon basıncı parametreleri ise diğer parametrelere göre daha az etkili olduğu tespit edilmiştir. Analiz sonucunda enjeksiyon basıncı ve erime sıcaklığı parametrelerinin düşük seviyede, paketlenme basıncı ve paketlenme sıcaklığı parametrelerinin yüksek seviyede tutulduğu deney kombinasyonunun en iyi sonucu verdiği görülmüştür. Optimum parametreler IP=200 MPa, IP=70, PP=35 MPa, PT=5 sn olarak belirlenmiştir.

Yapılan literatür araştırması sonucunda plastik enjeksiyon prosesine ait birçok parametre optimizasyonu çalışmasına rastlanırken EPP malzemesi kullanılarak

yapılan çalışmaların çok sınırlı olduğu görölmüştür. EPP ile ilgili yapılan çalışmalarda daha çok malzeme karakteristikleri, dayanımı, enerji sönümleme kabiliyeti gibi konuların üzerinde durulduğu görölmüştür. Sınırlı sayıdaki çalışmada EPP köpük enjeksiyon proses detayına inilmiştir. Çevrim süresi ve çarpıklık seviyesinin iyileştirilmesi üzerine yapılan bir optimizasyon çalışmasına rastlanamamıştır. (Nakai ve ark, 2008; Sopher ve Granthen, 2011; Tammaro ve ark, 2022; Zhai ve ark, 2010)

Plastik enjeksiyon kalıplama prosesinde son beş yıl içerisinde yapılan parametre optimizasyonu çalışmaları incelenerek bir kısmı Tablo 2.1’de gösterilmiştir.



Tablo 2.1. Enjeksiyon kalıplama prosesinde optimizasyon çalışmaları.

Referans	Yöntem										Proses Parametreleri	Çıktı	Malzeme
	YSA	PSO	Taguchi	GA	GA	DVM	XGBoost	LR Regresyon	Deney Tasarımı	Simülasyon			
(Bensingh ve ark, 2019)	•	•									Dolum süresi, Dolum basıncı, Tutma süresi, Tutma basıncı, Erişik sıcaklığı, Kalıp sıcaklığı, Soğutma süresi	Eğrilik yarıçapı, dalgalık, yüzey pürüzlülüğü	Polikarbonat
(Zhang ve ark, 2019)									•		Enjeksiyon basıncı, Erime sıcaklığı, Soğutma süresi, Paketleme süresi, Paketleme basıncı, Kalıp sıcaklığı, Enjeksiyon hızı	Çekme/büzülme derecesi	Polipropilen
(Abdul ve ark, 2020)	•		•								Enjeksiyon hızı, Tutma süresi, Soğutma süresi	Çekme/büzülme derecesi	Polietilen
(Feng ve ark, 2020)	•		•		•					•	Kalıp sıcaklığı, Erime sıcaklığı, Akış hızı, Soğutma süresi ve Değişken basınç profili	Çarpıklık	-
(Guo ve ark, 2020)	•				•					•	Kalıp sıcaklığı, Erime sıcaklığı, Soğutucu sıcaklığı, Soğutucu Reynolds sayısı, v/p değişimi, İlk köpüklenme hacmi, İlk kabarcık yarıçapı ve İlk gaz konsantrasyonu	Çarpıklık	Mikrohücreli Köpük
(Llewelyn ve ark, 2020)									•		Kalıp sıcaklıkları, Enjeksiyon hızları, Geri basınç, Erime sıcaklığı ve Tutma süresi	Yüzey pürüzlülüğü	Polimer
(Chung ve ark, 2021)									•	•	Enjeksiyon hızı, Erime sıcaklığı ve Kalıp sıcaklığı	Parça ağırlığı, Genleşme oranı, Hücre yoğunluğu	Polipropilen ve Polistiren
(Contreras ve ark, 2021)			•								Erime sıcaklığı, Kalıp sıcaklığı, Enjeksiyon hızı vd.	Kalite seviyesi	Köpüklü polipropilen
(Heinisch ve ark, 2021)	•		•								Enjeksiyon Süresi, Soğutma süresi, Paketleme basıncı, Paketleme süresi, Erime sıcaklığı, Kalıp sıcaklığı	Uzunluk, Genişlik ve Ağırlık	Polipropilen
(Moayyedien ve ark, 2021)	•		•								Dolum süresi, Tutma süresi, Erime sıcaklığı, Kalıp sıcaklığı, Soğutma süresi	Çekme/büzülme derecesi	Polipropilen
(Öktem ve Shinde, 2021)			•		•						Erime sıcaklığı, Enjeksiyon basıncı, Paketleme basıncı, Paketleme süresi ve Soğutma süresi	Parçanın mekanik özelliği ve Büzülme seviyesi	Polimer
(Román ve ark, 2021)	•					•		•			Malzeme içeriği, komonomer içeriği, Enjeksiyon hızı, Kapı geometrisi, Elastomer içeriği	Yüzey pürüzlülüğü	Polipropilen

Tablo 2.1. (Devamı) Enjeksiyon kalıplama prosesinde optimizasyon çalışmaları.

Referans	Yöntem										Proses Parametreleri	Çıktı	Malzeme
	YSA	PSO	Taguchi	GA	GA	DVM	XGBoost	LR Regresyon	Deney Tasarımı	Simülasyon			
(Wang ve ark, 2021)			•	•						•	Erime sıcaklığı, Kalıp sıcaklığı, Soğuma süresi, Paketleme basıncı ve Paketleme süresi	Çekme/büzülme derecesi	-
(Lin ve ark, 2022)			•	•						•	Erime sıcaklığı, Kalıp sıcaklığı, Enjeksiyon basıncı ve Dolum süresi	Çarpıklık	Polioksimetilen, Akrilonitril-butadien-stiren, Polipropilen
(Solanki ve ark, 2022)										•	Enjeksiyon süresi, Paketleme süresi ve Soğutma süresi	Büzülme ve Ağırlık	Polimer
(Idayu ve ark, 2023)			•								Kalıp sıcaklığı, Erime sıcaklığı, Enjeksiyon süresi ve Soğuma süresi	Göz basıncı	Polipropilen
(Ma ve ark, 2023)					•		•			•	Erime sıcaklığı, Kalıp sıcaklığı, Dolum süresi, Paketleme süresi, Paketleme basıncı	Parça ağırlığı, Büzülme oranı, Çarpıklık vd.	-
(Mehta ve Padhi, 2023)	•					•					Enjeksiyon süresi, Kalıp sıcaklığı, Erime sıcaklığı, Paketleme basıncı, Proses verimliliği, Güvenilirlik faktörü, Proses üretim maliyeti	Kalite seviyesi	Polistiren, Polipropilen ve Polivinilklorür
(Nitnara ve Tragangoon, 2023)	•				•						Erime sıcaklığı, Kalıp sıcaklığı, Doldurma süresi, Paketleme süresi ve Soğuma süresi	Çarpıklık	-



3. METODOLOJİ

Bu bölümde Taguchi, Gri İlişkisel Analiz ve Yapay Sinir Ağları yöntemleri ayrıntılı olarak açıklanmakta ve işlem aşamalarından bahsedilmektedir.

3.1. Deney Tasarımı

İlk olarak 1920'lerde Sir Ronald Fisher (aktaran Montgomery, 2013) tarafından Tarım alanında öncü çalışmalar yapılmıştır. Fisher o dönemde İngiltere'de Rothamsted Tarımsal Deney İstasyonu'nda istatistik ve veri analizinden sorumlu olarak çalışmaktaydı. Fisher, veri analizi çalışmaları gerçekleştirirken yapılan deneylerin gerçekleştirilme aşamalarında yapılan hatalardan kaynaklı elde edilen verilerin analizi sıklıkla engellediğini fark etti. Birçok alanda çalışan bilim insanları ile temas kurarak deney tasarımının üç temel ilkesini bloklama, rasgeleleştirme ve tekrarlama olarak belirlemiştir. Fisher faktöriyel tasarım konsepti ve varyans analizi gibi konular üzerinde de çalışarak deney tasarımına sistematik olarak istatistiksel düşüncüyü de dahil etmiştir (Montgomery, 2013).

Bir istatistiksel deney tasarımının planlanması optimum bir istatistiksel deney tasarımının oluşturulmasını ve optimum sonuca ulaşabilmek için minimum deney sayısının ve örnek boyutunun belirlenmesini içermektedir. Optimum tasarım deneyin yapısını, deney sayısını ve minimum gerekliliklerini belirler. Bu nedenle ilk olarak analiz yöntemi ve model belirlenmeli, veriler toplanmış halde iken verilere uygun yöntem seçilmeye çalışılmamalıdır. Bir istatistiksel deneyin sonucu, bir model denklemiyle veya yanıt değişkeninin rasgele bileşenleri hakkında yapılan dağılım varsayımları ile belirlenir (Rasch ve ark, 2011).

İstatistiksel bir deneyin tasarlanması ve analiz edilmesi için deneye katılacak olan herkesin deney hakkında genel bir bilgiye, tam olarak hangi konu hakkında çalışıldığına, verilerin nasıl toplanacağına ve niteliksel bir bakış açısına sahip olması beklenmektedir (Montgomery, 2013).

3.2. Taguchi Metodu

Günümüzde birçok mühendis ve bilim insanı aldıkları teknik eğitimler sırasında istatistiksel olarak tasarlanmış deneylerin ilkelerini öğrenmekte ve sıklıkla çalışmaları esnasında bu ilkelere başvurumaktadırlar. Ancak 1960-1980 yılları arasında deneysel tasarım ilkeleri ve istatistiksel yöntemler günümüzde olduğu kadar yaygın şekilde kullanılmıyordu. İlk olarak 1980lerin başında Japon mühendis Genichi Taguchi tarafından deneysel tasarımın ilkelerinden söz edildi. Dr. Taguchi deneysel tasarımı kullanma yaklaşımı ile aşağıdaki amaçları gerçekleştirmeyi hedeflemiştir (Montgomery, 2013).

- Ürün veya süreçlerin çevresel şartlara dayanıklı hale getirilmesi
- Ürünlerin geliştirilmesi, tasarlanması ve bunların bileşen varyasyonlarına karşı dayanıklı hale getirilmesinin sağlanması
- Amaçlanan hedef değer doğrultusunda hedefin etrafındaki varyasyonun minimize edilmesinin sağlanması.

1980'lerde, sağlam tasarım konsepti, Genichi Taguchi'nin (1991) çalışmalarıyla önemli bir ilgi görmüştür. Dr. Taguchi, sağlam sistemlerin tasarımı ve üretimi için çeşitli deney tasarımları ve veri analizleri önermiştir. Taguchi'nin metotları, çeşitli durumlarda sistem çıktısının değişkenliğini en aza indirecek tasarım parametrelerini bulmayı amaçlamaktaydı. İstatistikçiler, bu istatistiksel yöntemleri anlamak ve eleştirmek için konferanslar düzenlemiştir (Taguchi 1991; akt. Joner, 2017).

Taguchi'nin düşüncesine göre bir sistem öyle tasarlanmalıydı ki sistemin performansı kontrol dışındaki (gürültü) faktörlere karşı duyarsız olabilsin. Bu sağlam tasarım genellikle çevrimdışı deneyler aracılığıyla uygun kontrol faktörleri ile gürültü değişkenleri arasındaki ilişkiyi sistematik olarak inceleyerek yapılmakta ve kontrol faktörlerinin ayarlarını bilinçli bir şekilde seçerek sistem, kontrol dışındaki gürültü varyasyonlarına karşı dirençli hale getirilmektedir. Sağlam tasarım, mühendislik konseptlerini istatistik tekniklerle yenilikçi bir şekilde birleştirmekte ve düşük maliyetle kalite iyileştirmesi için büyük potansiyel sunmaktadır (Lunani ve ark, 1997).

3.3. Taguchi'nin Kalite Felsefesi ve Kayıp Fonksiyonu

Taguchi, geniş uygulanabilirlik gösteren bir kalite mühendisliği felsefesini savunmaktadır. Ürün veya süreç geliştirmenin üç aşamasını sistem tasarımı, parametre

tasarımı ve tolerans tasarımı olarak belirlemiştir. Sistem tasarımında mühendis tarafından bilimsel prensipleri kullanarak temel sistem konfigürasyonunun belirlenmesi amaçlanır. Parametre tasarımında, sistem parametrelerinin belirli değerleri seçilir, böylece kontrol dışı değişkenlerden kaynaklanan değişkenliğin minimuma indirilmesi amaçlanır. Tolerans tasarımında ise parametreler için en uygun olan toleransların belirlenmesi amaçlanmaktadır.

Taguchi, istatistiksel deneysel tasarım yöntemlerini önermiş ve özellikle parametre tasarımı sırasında bu süreçte kullanılmasını vurgulamıştır. Bu yaklaşım, ürün veya süreç tasarımını en iyi şekilde belirleyerek, kontrol dışı faktörlere karşı dirençli olan bir ürün veya süreç elde etmeyi amaçlar. Taguchi'nin sağlam tasarım yaklaşımı, bu hedefi gerçekleştirmede mühendislik tasarım sürecinin formal bir parçası olarak kullanılabileceğini ortaya çıkarttığı için büyük önem taşımaktadır (Montgomery, 2013).

Taguchi'nin temel prensibi, değişkenliği azaltmaktır. Her ürün veya süreç performans özelliği için bir hedef veya nominal bir değer belirlenir ve bu hedef etrafındaki değişkenlik azaltılmaya çalışılır. Taguchi, bu hedef değerden sapmaları bir kayıp fonksiyonu ile modellemektedir. Kayıp, ürünün beklenen kalite seviyesinden sapmaların olduğu durumda toplum tarafından karşılanan maliyeti ifade etmektedir. Taguchi geleneksel düşünceden ayrılarak, küçük sapmalara bile ceza veren bir kare kayıp fonksiyonunu tanımlamıştır (3.1).

$$L(y) = k(y - T)^2 \quad (3.1)$$

Denklemden;

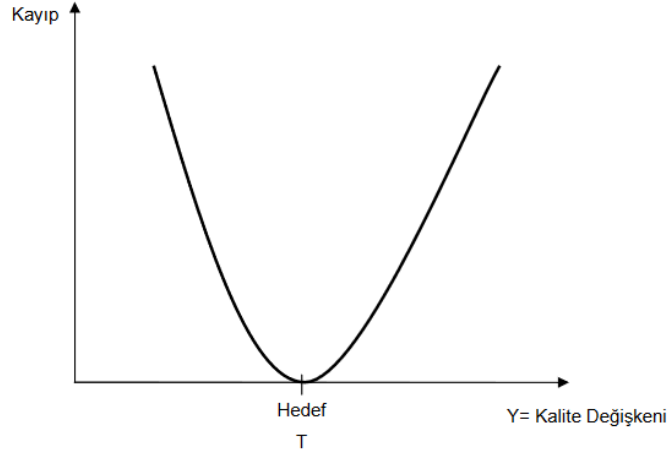
L: Parça başına para birimi cinsinden katlanılan kayıp

K: Soruna uygun bir sabit

Y: Ölçülen büyüklüğün gerçek değeri

T: Hedef

Değişkenliği azaltma ve maliyetleri minimize etme odaklı Taguchi felsefesi, Deming ve Juran'ın sürekli iyileştirme prensipleri ile uyumludur. Bu sağlam kavramlar, deneysel tasarım yöntemlerinin, bu prensipleri pratiğe dönüştürmede önemli bir rol oynayabileceği gerçeğiyle birleşir (Montgomery, 2013).



Şekil 3.1. Taguchi kayıp fonksiyonu.

3.4. Taguchi Deney Tasarımı Aşamaları

Taguchi'nin deney tasarım adımları aşağıdaki gibidir:

- Faktör ve etkileşimlerin belirlenmesi
- Faktör seviyelerinin belirlenmesi
- Uygun ortogonal dizinin belirlenmesi
- Faktörlerin ve etkileşimlerinin yerleştirilmesi
- Performans testlerinin yapılması
- Sonuçların analizi ve doğrulama deneylerinin gerçekleştirilmesi

3.4.1. Faktör ve etkileşimlerin belirlenmesi

İlk olarak mevcut olan problemin çalışmayı yapacak olan kişiler tarafından tam olarak anlaşılmış olması gerekmektedir. Problemin çözümüne yönelik amaç belirlendikten sonra faktörler ve etkileşimleri tanımlanır. Faktörlerin belirlenmesi problemin çözümüne direkt etki eden en önemli adımlardan biridir. Faktörler ve etkileşimleri belirlenirken alanında uzman kişilerin görüşlerine başvurulur. Faktör seçimi ne kadar sağlıklı yapılırsa amaçlanan optimum çözüme o kadar kolay ulaşılır.

3.4.2. Faktör seviyelerinin belirlenmesi

Deneyde kullanılacak olan faktörler belirlendikten sonra bu faktörlerin seviyeleri belirlenir. Faktör seviyeleri en az iki olacak şekilde, üç veya daha fazla olarak belirlenebilir. İki seviye belirlendiği durumda seviyelerden biri düşük seviye iken diğeri yüksek seviye olarak adlandırılabilir. Üç veya daha fazla seviye olduğunda

farklı kademelerde değerler verilebilmektedir. Faktör seviyeleri arttığında deney adımları artacağından seviyelerin doğru şekilde belirlenmesi hem zaman hem de maliyet açısından önemlidir.

3.4.3. Uygun ortogonal dizinin belirlenmesi

Taguchi, etkili fraksiyonel faktöriyel tasarımlardan oluşan bir dizi seçmiş ve her biri için "orthogonal dizisi" adını verdiği tablolar oluşturmuştur. Bu tablolar, basit bir şekilde deney tasarlamak için kullanılır. İki seviyeli tasarımlar için L4, üç faktöre kadar olan durumlar için kullanılırken, yedi faktöre kadar L8, on beş faktöre kadar L16 gibi farklı tablolar mevcuttur. Üç seviyeli tasarımlar için L9, dört faktöre kadar kullanılırken, 13 faktöre kadar L27 ve 40 faktöre kadar L81 gibi alternatif diziler bulunmaktadır (Berger ve ark, 2018). Deneydeki faktör sayısına ve seviyelerine göre uygun olan ortogonal dizi seçilerek deneyler belirlenir.

3.4.4. Faktörlerin ve etkileşimlerinin yerleştirilmesi

Eğer faktörler arasında bir etkileşim bulunmuyorsa faktörler sütunlara keyfi şekilde atanabilmektedir. Eğer faktörler arasında etkileşim bulunuyorsa Taguchi tarafından geliştirilen doğrusal grafikler ve üçgensel tablolar kullanılmaktadır (Berger ve ark, 2018).

3.4.5. Performans testlerinin yapılması

Veriler, belirlenen performans istatistiğine göre analiz edilir. Doğru performans istatistiğinin seçimi kritik önem taşımaktadır. Testler, ortogonal dizi satırlarının belirlediği denemeleri içerir ve gözlem sayısının artması, hata oranını minimize etme ve gürültü faktörlerini gözlemlene açısından önemlidir. Her bir deney tasarımının daha fazla testle değerlendirilmesi, deneyin güvenilirliğini artırmaktadır.

3.4.6. Sonuçların analizi ve doğrulama deneylerinin gerçekleştirilmesi

Tüm deneyler tamamlandıktan sonra, deneyin en uygun işlem parametrelerine ulaşmak için elde edilen sonuçların analiz edilir. Elde edilen verilerin en etkili hedefe ulaşma yeteneği, çeşitli analiz yöntemleri kullanılarak değerlendirilir. Analiz sonuçlarına dayanarak belirlenen en iyi değerlerin uygunluğunu doğrulamak amacıyla doğrulama deneyleri gerçekleştirilir. Bu deneylerin sonuçları, belirlenen en iyi işlem girdi faktörlerinin yanıt üzerindeki etkilerini gözlemlemek için kullanılır.

3.5. Gri İlişkisel Analiz Yöntemi

1982'de Julong Deng (aktaran Liu ve Lin, 2011) tarafından geliştirilen gri sistemler teorisi, küçük örneklem ve sınırlı bilgi içeren problemlerin incelenmesine odaklanan yenilikçi bir metodolojidir. Bu teori, kısmen bilinen bilgilerle ilgili belirsiz sistemlerle uğraşarak mevcut bilgidan faydalı bilgiler üretme, keşfetme ve çıkarma süreçlerini içerir. Böylece sistemlerin işleyiş davranışları ve evrim yasaları doğru bir şekilde tanımlanabilir ve etkili bir biçimde izlenebilir. Doğal dünyada, küçük örneklem ve sınırlı bilgi içeren belirsiz sistemler yaygındır, bu da gri sistemler teorisinin geniş bir uygulama alanına sahip olmasını sağlar (Liu ve Lin, 2011).

Gri sistemler teorisini oluşturma sürecinde, Julong Deng, gri sistemlerin temel ilkelerini keşfetmiş ve ortaya çıkarmıştır (Liu ve ark, 2006).

- Bilgi farklılıkları prensibi: "Farklılık", bilginin varlığını ima eder. Her bilgi parçasının mutlaka bir tür "farklılık" içermesi gerekmektedir.
- Tek düze olmama prensibi: Eksik ve belirsiz bilgi içeren herhangi bir problem için çözüm tek değildir.
- Minimal bilgi prensibi: Gri sistemler teorisinin bir özelliği, mevcut "minimal bilgi miktarını" en etkili ve en iyi şekilde kullanmasıdır.
- Tanıma temeli prensibi: Bilgi, insanların tanıma ve anlama temelidir.
- Yeni bilgi önceliği prensibi: Yeni bilgi parçalarının işlevi, eski bilgi parçalarının işlevinden daha büyüktür.
- Mutlak gri olma prensibi: Bilginin "eksikliği" mutlaktır.

Gri ilişkisel analiz yöntemine ait hesaplama adımları aşağıda verilmiştir (Liu ve ark, 2006).

Referans serisi belirlenmesi: n uzunluğundaki referans seri aşağıdaki gibi olsun (3.2).

$$X_0 = (X_0(1), X_0(2), X_0(3), \dots, X_0(n)) \quad (3.2)$$

Verilerin normalize edilmesi: veriler farklı faktörlerden farklı değerler alarak elde edildiği için ilk adım olarak verilerin normalize edilmesi gerekmektedir. Burada amaç geniş aralıklarda ölçülen farklı verilerin dar bir alana indirgenerek standartlaşmanın sağlanmasıdır. Normalizasyon işleminde en sık kullanılan yöntem lineer veri

önışlemedir. Normalizasyon işlemleri gerçekleştirilirken dikkat edilmesi gereken en önemli nokta faktör serisinin “en düşük en iyi”, “en yüksek en iyi” veya “hedef değeri en iyi” kriterlerinden hangisine uyum sağladığının belirlenmesidir.

“En yüksek en iyi” durumunda normalizasyon denklem 3.3’deki gibidir.

$$X_i(k) = \frac{X_i^0(k) - \min X_i^0(k)}{\max X_i^0(k) - \min X_i^0(k)} \quad (3.3)$$

“En düşük en iyi” durumunda normalizasyon denklem 3.4’teki gibidir.

$$X_i(k) = \frac{\max X_i^0(k) - X_i^0(k)}{\max X_i^0(k) - \min X_i^0(k)} \quad (3.4)$$

“Hedef değeri en iyi” durumunda normalizasyon denklem 3.5’teki gibidir.

$$X_i(k) = 1 - \frac{|X_i^0(k) - X^0|}{\max X_i^0(k) - X^0} \quad (3.5)$$

Bu denklemlerde $X_i^0(k)$, i serisindeki k. sırada bulunan orijinal değeri vermektedir. $X_i(k)$ Değeri ise normalizasyon işlemi sonrasında i. seri ve k. sıradaki değeri vermektedir. $\min X_i^0(k)$ Serideki minimum değeri, $\max X_i^0(k)$ serideki maksimum değeri ve X^0 serideki hedeflenen durumu vermektedir.

Karşılaştırılacak serinin belirlenmesi: X^0 serisi ile karşılaştırılacak m adet seri denklem 3.6’da tanımlanmış olsun.

$$X_i = (X_i(1), X_i(2), X_i(3), \dots, X_i(n)) \quad i = 1, 2, \dots, m, \quad (3.6)$$

Seride seçilen sıradaki değerin hesaplanması: n uzunluğundaki bir seride k değeri k. sırayı gösterebilir. $\varepsilon(X_0(k), X_i(k))$, k. noktadaki gri ilişkisel katsayı olup denklem 3.7’deki gibi hesaplanmaktadır.

$$\varepsilon(X_0(k), X_i(k)) = \frac{\Delta_{\min} + \xi \Delta_{\max}}{\Delta_{0i}(k) + \xi \Delta_{\max}} \quad (3.7)$$

$$\Delta_{0i}(k) = |X_0(k) - X_i(k)|$$

$$\Delta_{\min} = \min_j \min_k |X_0(k) - X_j(k)|$$

$$\Delta_{max} = \max_j \max_k |X_0(k) - X_j(k)|$$

ξ Değeri (0,1) arasında bir katsayıdır. $j = 1, 2, \dots, m$ ve $k = 1, 2, \dots, n$ olmak üzere ξ işlevi Δ_{0i} değeri ile Δ_{max} değeri arasındaki farklı ayarlamaktadır. Literatüre baktığımızda ξ değerinin oluşan sıralamayı etkilemediği görülmektedir.

Gri ilişki derecesinin belirlenmesi: Gri ilişkisel derede denklem 3.8’de belirtilen eşitliğe göre belirlenmektedir.

$$\gamma(X_0, X_i) = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \varepsilon(X_0(k), X_i(k)) \quad (3.8)$$

$\gamma(X_0, X_i)$ değeri X_i ile X_0 arasındaki gri ilişki derecesidir.

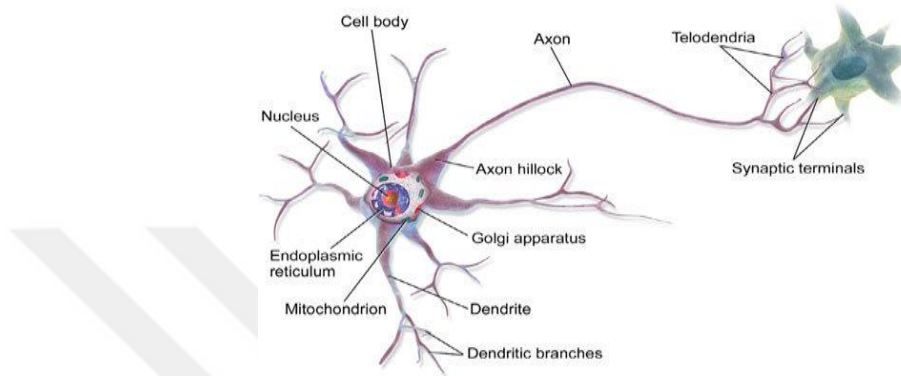
Gri tabanlı Taguchi yönteminde faktörler arasındaki ilişki derecesi gri ilişkisel analiz yöntemi ile hesaplandıktan sonra bulunan değerler Taguchi ’de çıktı değeri olarak kullanılır. Daha önce belirlenen ortogonal dizi tablosuna göre faktörler seviyelerine göre yerleştirilir ve çıktı değeri olarak gri ilişkisel analiz yöntemi ile elde ettiğimiz değerler tabloya işlenir. Tekrar Taguchi ve Varyant analizi işlemleri uygulanarak tüm faktörlerin birlikte değerlendirildiğinde optimum sonucu veren seviyeleri belirlenmiş olur.

3.6. Yapay Sinir Ağları

Yapay sinir ağları üzerinde yapılan çalışmalar, insan beyninin geleneksel dijital bilgisayardan farklı bir şekilde hesaplama yaptığı gerçeğiyle yüzleşilmesi ile birlikte başlamıştır. Beyin, karmaşık, doğrusal olmayan ve paralel bir bilgisayardır. İnsan görüşü gibi bilgi işleme görevleri, insan beyninin yetenekleriyle mevcuttaki en hızlı bilgisayardan çok daha hızlı gerçekleşir. Örneğin, tanıdık bir yüzü tanıma gibi algısal görevler, beyinde 100-200 ms içinde gerçekleşirken, güçlü bir bilgisayar ile daha az karmaşık görevler çok daha uzun sürelerde gerçekleşebilir. Bu durum, sinir ağlarının, beyin benzeri bilgi işleme yeteneklerini modellemeye çalıştığını gösterir. Ayrıca, doğal sistemlerin, küçük boyutlu beyinlerle bile karmaşık bilgileri işleyip etkili bir şekilde hareket edebildiğini gösterir. Buna örnek olarak yarasanın sonarı gösterilebilir. Yarasalar bir hedefin uzaklığı, hızı, boyutu gibi hedef hakkındaki birçok bilgiyi çok kısa bir sürede tespit edebilirler. Erik büyüklüğündeki bir beyinde bu karmaşık

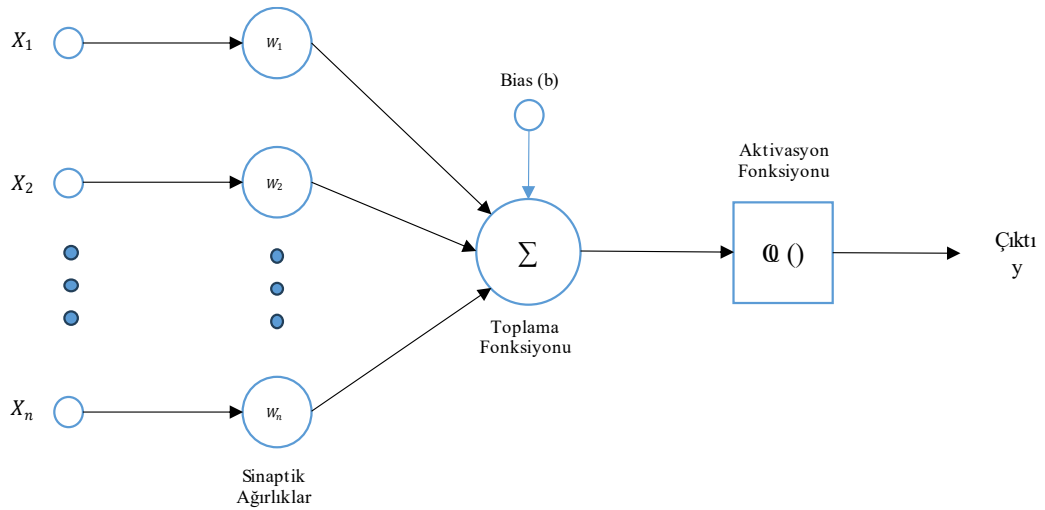
hesaplamalar mükemmel bir şekilde gerçekleştirilmektedir. Bilgilerin tespit edilmesindeki bu yüksek başarı oranı radar ve sonar mühendislerinin gıpta ettiği örneklerdendir. Bu nedenle, bilim insanları özellikle desen tanıma, algılama ve kontrol gibi alanlarda, insan beyninin işleme kapasitesine benzer yetenekler sunmak için çalışmalar gerçekleştirmektedir (Haykin, 2009).

Biyolojik bir nöronun örneği Şekil 3.2’de gösterilmiştir.



Şekil 3.2. Biyolojik bir nöron örneği (López ve ark, 2022).

Yapay sinir ağlarının temel bileşenlerini içeren bir yapay sinir ağı modeli Şekil 3.3’te gösterilmektedir.



Şekil 3.3. Yapay sinir ağlarının temel bileşenleri.

Bu modelde $X_1, X_2, \dots, X_n$ nöronun dış duyu sisteminden aldığı bilgiyi, diğer bir deyişle girdiyi temsil etmektedir. $w_1, w_2, \dots, w_n$ değerleri alınan bilgiyi değiştiren sinaptik ağırlıkların vektörüdür. Nöronun aldığı farklı değerler, sinaptik ağırlıklar tarafından değiştirilir ve bunlar daha sonra net girdi olarak adlandırılan değeri

oluşturmak için toplanır. Bu net girdi ile nöronun etkinliği değerlendirilir. Nöronun aktivasyonu, aktivasyon fonksiyonuna bağlıdır. Bu fonksiyonda net girdi değerlendirilir ve ağıın çıktısı elde edilir (López ve ark, 2022).

Yapay sinir ağlarının yapı taşlarından biri olan aktivasyon fonksiyonu, sinyal çıkışında matematiksel bir işlem gerçekleştirerek girdiye karşılık gelen aktivasyon sonuç çıktıları hesaplar. Ağıın çözmesi gereken problemin türüne bağlı olarak farklı aktivasyon fonksiyonları kullanılabilir. Tablo 3.1’de aktivasyon fonksiyonları gösterilmektedir (Zilouchian, 2001).

Tablo 3.1. Aktivasyon fonksiyonları ve formülleri.

Aktivasyon Fonksiyonu	Denklem	Aralık
Doğrusal	$f(x) = x$	$(-\infty, \infty)$
Basamak	$f(x) = \begin{cases} 0, & x < 0 \\ 1, & x \geq 0 \end{cases}$	$\{0, 1\}$
Sigmoid	$f(x) = \frac{1}{1 + e^{-x}}$	$(0, 1)$
Hiperbolik Tanjant	$f(x) = \frac{e^x - e^{-x}}{e^x + e^{-x}}$	$(-1, 1)$
ReLU	$f(x) = \begin{cases} 0, & x < 0 \\ x, & x \geq 0 \end{cases}$	$[0, \infty)$
Leaky ReLU	$f(x) = \begin{cases} 0,01x, & x < 0 \\ x, & x \geq 0 \end{cases}$	$(-\infty, \infty)$
Swish	$f(x) = \begin{cases} \beta = 0, & f(x) = x \\ \beta = \infty, & f(x) = 2\max(0, x) \end{cases}$	$(-\infty, \infty)$

Girdi katmanı dış kaynaklardan alınan bilgiyi işlem için ağa ileten bir nöron katmanıdır. Buradaki bilgiler, duygusal girişler veya modellemesi yapılan sistem dışındaki diğer sistemlerden gelen sinyaller olabilir. Genellikle giriş katmanını en az bir gizli katman takip eder (Zilouchian, 2001).

Gizli katman, girdi katmanından gelen bilgiyi gizli bir şekilde işleyen nöron katmanıdır. Giriş ve çıkışlar ile doğrudan bir bağlantısı olmayan bir dizi iç nörondan oluşmaktadır. Gizli katmandan gelen tüm bağlantılar, sistem içerisindeki diğer katmanlara iletilir (Zilouchian, 2001).

Çıktı katmanı ise işlenmiş olarak gelen bilgiyi alan ve çıkış sinyallerini sistemin dışına aktaran bir nöron katmanıdır. Bu çıkış katmanı, giriş katmanından gelen bilgiye dayanarak yapay sinir ağının çıktısını veya tahminini vermektedir (Zilouchian, 2001).

4. UYGULAMA

Bu bölümde seçilen problemin ve sistemin tanımı, yapılan deneyler, deney sonuçlarının analizi ve yorumu sunulmaktadır.

4.1. Sistem ve Problemin Tanımı

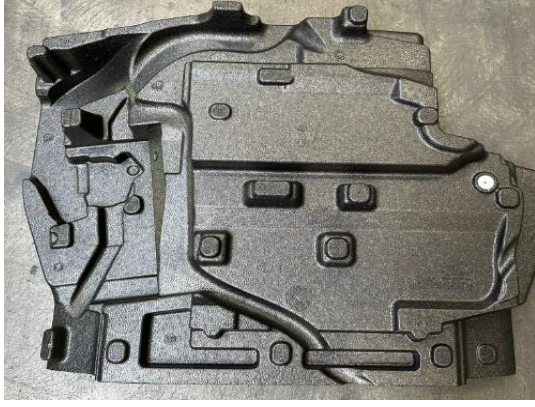
Uygulama plastik köpük enjeksiyon prosesi ile ana sanayilere otomotiv parçası üretimi yapan bir otomotiv yan sanayi firmasında gerçekleştirilmiştir. Firma bünyesinde altı adet enjeksiyon makinesi bulunmaktadır. Firma bünyesinde otomotiv, gıda, HVAC, ambalaj ve taşımacılık gibi birçok sektöre ürün üretilmektedir. Otomotiv sektörü için tampon, halı altı, koltuk, kapı bölgeleri gibi aracın birçok bölgesinde ısı yalıtımı, enerji sönmüleme ve hafifletme gibi amaçlarla kullanılan parçaların üretimleri gerçekleştirilmektedir.

Bu tez kapsamında deneylerin gerçekleştirileceği makine olarak Şekil 4.1’de gösterilen Teubert marka enjeksiyon makinesi seçilmiştir. Çalışma için bu makinenin seçilmesinin nedeni bu makinenin üretim kapasitesinin %89 oranında doluluğu bulunmasıdır. Çevrim sürelerinin ve kalite problemlerinin minimuma indirilmesi sağlanarak makinede kapasite boşluğu yaratılması ve sadece bu makine ebatlarına uygun olan yeni işlere teklif verilebilmesinin sağlanmasıdır.

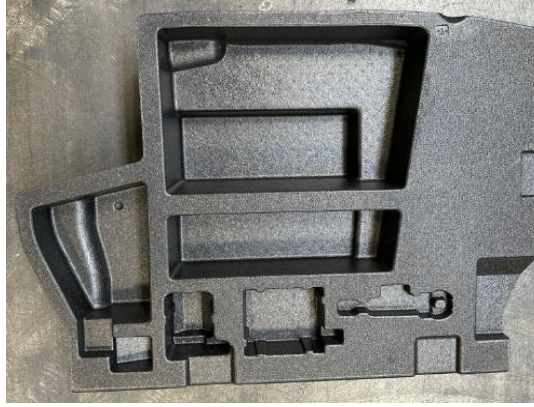
Çalışmanın yapılması için bu makinede üretilen 61 farklı ürün arasından aracın bagaj bölgesinde kullanılan bir parça seçilmiştir. Makine kapasitesini en büyük oranda etkileyen parça üzerinden iyileşme çalışması yapılması amaçlanmıştır. Çalışmada kullanılan parçanın görseli Şekil 4.2’de gösterilmektedir.



Şekil 4.1. Teubert Enjeksiyon makinesi.



a) Ön Görünüş



b) Arka Görünüş

Şekil 4.2. Parça görseli.

Ürünün üretiminde EPP hammadde kullanılmaktadır. EPP bir mühendislik plastiğidir. Isı yalıtımı, hafiflik, dayanım ve enerji sönümleme gibi özellikleri sebebiyle birçok sektörde kullanılmaktadır. Özellikle hafiflik ve güvenlik amaçlarıyla otomotiv sektöründe yaygın bir şekilde kullanılmaktadır (Srivastava ve Srivastava, 2014).

EPP, JSP şirketi tarafından geliştirilen ve dünya çapında yaygın olarak kullanılan köpüklü polimerlerdir biridir. EPP, polipropilen malzemenin özelliklerine sahip olmakla birlikte ayrıca kendine has özellikler de barındırmaktadır. 130 °C'nin altındaki sıcaklıklarda çalışabilme özelliğine sahiptir. Aynı zamanda nemli ortamlarda bile kararlı ısı iletkenliği nedeniyle homojen ve kapalı hücre yapısına sahiptir (Yu ve ark, 2013). Şişirilebilen formu sayesinde istenilen yoğunluğa göre şişirilmekte ve kalıplanabilmektedir. Bu çalışmada üretilen parça özelinde kullanılan hammadde yoğunluğu 21g/l dir. Çalışmada kullanılan hammaddenin görseli Şekil 4.3'te gösterilmektedir.



Şekil 4.3. Kullanılan hammadde görseli.

EPP hammaddesi kullanılarak gerçekleştirilen plastik köpük enjeksiyon üretimi, aşağıdaki aşamalardan oluşmaktadır:

- **Hammadde Hazırlığı:** EPP boncukları, enjeksiyon işlemi öncesinde genellikle ısıtılarak ön genişletilir ve köpük yapısı kazanır.
- **Enjeksiyon Hazırlığı:** Genişletilmiş EPP boncukları, enjeksiyon makinesine beslenir ve uygun sıcaklıkta ısıtılarak plastikleşir. Bu aşamada, EPP boncukları erimeden kalıp içerisine doldurulmaya hazırlanır.
- **Kalıplama:** Isıtılan EPP malzemesi yüksek basınç altında kalıba enjekte edilir. Kalıp, ürünün nihai şeklini almasını sağlar. Malzeme kalıpta soğutularak sertleşir ve köpük formu korunur.
- **Kalıptan Çıkarma:** Kalıp soğutulduktan sonra açılır ve oluşan parça itici veya hava yardımı ile itilerek çıkarılır. Gerekirse, ürün üzerindeki fazlalıklar temizlenir.
- **Kontrol ve Son İşlemler:** Ürün, kalite kontrol testlerinden geçirilir ve gerekli durumlarda ek işlemler uygulanır.
- **Depolama ve Sevkiyat:** Nihai ürün paketlenir ve sevkiyata hazırlanır.

4.2. Deney Tasarımı

Bu çalışmada köpük enjeksiyon prosesinde üretim parametresinin iyileştirilmesi amacıyla ilk olarak Taguchi deney tasarımı yönteminden faydalanılmıştır. Bu çalışmada çevrim süresinin azalırken parçanın çarpıklık seviyesinin de minimumda tutulması hedeflenmiştir. Deney tasarımının aşamaları Şekil 4.4'te gösterilmiştir.



Şekil 4.4. Deney tasarımı aşamaları.

Teubert köpük enjeksiyon makinesinde her parça için kaydedilmiş parametreler mevcuttur. Teubert makinesinde üretimin yapılabilmesi için değer girilmesi gereken 11 adet parametre bulunmaktadır. Bu parametrelerin değerleri proje aşamasında parçanın ilk deneme üretimleri yapılırken belirlenir ve makineye kaydedilir. Üretim

başlangıcında önceden kaydedilmiş olan parametre çağırılarak üretim gerçekleştirilir. Parça özelinde belirlenmesi gereken parametre isimleri Tablo 4.1’de gösterilmektedir.

Tablo 4.1. Proses parametreleri ve açıklamaları.

No	Parametreler	Açıklama
P1	S.Taraf Çapraz Buhar Süresi (sn)	Sabit taraf, kalıbın hareketsiz kalan kısmını ifade eder ve genellikle daha stabil ve sağlam bir yapıya sahiptir. Sabit taraf çapraz buharlama esnasında kalıbın sabit tarafından hareketli tarafına doğru buhar verilir. Hareketli tarafın kondensinden buhar çıkışı meydana gelir. Bu işlem ile parçanın iç kaynaşması sağlanır.
P2	H.Taraf Çapraz Buhar Süresi (sn)	Hareketli taraf, kalıbın açılıp kapanan kısmını ifade eder ve bu kısım, enjeksiyon işlemi sırasında hareket eder. Hareketli taraf çapraz buharlama esnasında kalıbın hareketli tarafından sabit tarafına doğru buhar verilir. Sabit tarafın kondensinden buhar çıkışı meydana gelir. Bu işlem ile parçanın iç kaynaşması sağlanır.
P3	Otoklav Süresi (sn)	Otoklav adımı kalıbın hem sabit hem de hareketli tarafından buhar verilir. Bu işlem esnasında buhar çıkışı olmaz. Parçanın yüzey kalitesinin iyileştirilmesi, homojenliğin sağlanması ve mukavemetinin artırılması sağlanır.
P4	H./S.Taraf Soğutma Süresi (sn)	Hem hareketli taraf hem de sabit taraf için soğutma süreleri, malzemenin iç yapısının homojenleşmesi, boyutsal stabilite kazanması ve en önemlisi kalıptan ayrılabilmesi için gerekli soğukluğa ulaşmasını sağlar. Bu işlem sırasında kalıbın içerisine su püskürtülerek soğutma sağlanır.
P5	Köpük Basıncı Soğutma Süresi (sn)	Bu işlem adımı parçanın iç stresini atması ve stabil hale gelmesi sağlanır. Kondensler açıktır. Kalıba buhar veya su girişi olmaz. İstenen köpük basınç değerine düşmesi için geçen süredir.
P6	H.Taraf Buhar Çıkış Basıncı (bar)	Hareketli taraf çapraz buharlama işlemi esnasındaki basınç değerini ifade eder. Bu işlem parçanın iç kaynaşmasını sağlamaktadır. Basınç değerinin düşük veya yüksek olması parçanın kalite seviyesini etkilemektedir.
P7	H.Taraf Otomatik Kısaç Basıncı (bar)	Otoklav adımı esnasındaki hareketli taraftan verilen basınç değerini ifade eder. Parçanın yüzey kalitesinin artırılması ve pürüzsüzlüğü sağlanır.
P8	S.Taraf Buhar Çıkış Basıncı (bar)	Sabit taraf çapraz buharlama işlemi esnasındaki basınç değerini ifade eder. Bu işlem parçanın iç kaynaşmasını sağlamaktadır. Basınç değerinin düşük veya yüksek olması parçanın kalite seviyesini etkilemektedir.
P9	S.Taraf Otomatik Kısaç Basıncı (bar)	Otoklav adımı esnasındaki sabit taraftan verilen basınç değerini ifade eder. Parçanın yüzey kalitesinin artırılması ve pürüzsüzlüğü sağlanır.
P10	Dolum Basıncı (bar)	EPP malzemesinin kalıp içerisine doldurulabilmesi için silo çıkışındaki basınç değeridir. Silo çıkışı ve kalıp girişi arasında basınç farkı yaratılarak dolum sağlanır. Basınç farkı yüksek olduğunda daha hızlı dolum yapılırken düşük olduğunda daha yavaş dolum yapılır. Basınç değeri parça kalitesi açısından önemlidir.
P11	Kısıtlama Basıncı (bar)	EPP malzemesinin kalıp içerisine doldurulabilmesi için kalıp girişindeki basınç değeridir. Silo çıkışı ve kalıp girişi arasında basınç farkı yaratılarak dolum sağlanır. Basınç farkı yüksek olduğunda daha hızlı dolum yapılırken düşük olduğunda daha yavaş dolum yapılır. Basınç değeri parça kalitesi açısından önemlidir.

Mevcut proseste parametre değerleri deneme yanılma yöntemi ile operatörlerin tecrübeleri kullanılarak belirlenmektedir. Literatürde EPP üretimi yapılan köpük enjeksiyon prosesine ait kapsamlı çalışmalar bulunmadığından parametrelerin belirlenme aşamasında referans alınacak bir çalışma bulunamamıştır. Hangi

parametrenin çevrim süresi ve çarpıklık üzerinde ne seviyede etkili olduğu tam olarak bilinmediğinden ilk aşamada tüm parametreler kullanılarak Taguchi deney tasarımı uygulanmıştır. Bu alanda uzman kişilerden destek alınarak 11 adet parametrenin seviyeleri belirlenmiştir. Her parametre değeri için 3 seviye belirlenmiştir. Belirlenen değerler Tablo 4.2’de gösterilmektedir.

Tablo 4.2. Parametrelerin seviyeleri.

Parametreler	1. Seviye	2. Seviye	3. Seviye
P1	4	5,5	7
P2	4	5,5	7
P3	9	10	11
P4	65	75	85
P5	30	40	50
P6	3,1	3,25	3,4
P7	3,25	3,3	3,35
P8	3,1	3,25	3,4
P9	3,25	3,3	3,35
P10	1,8	1,9	2
P11	1,5	1,6	1,7

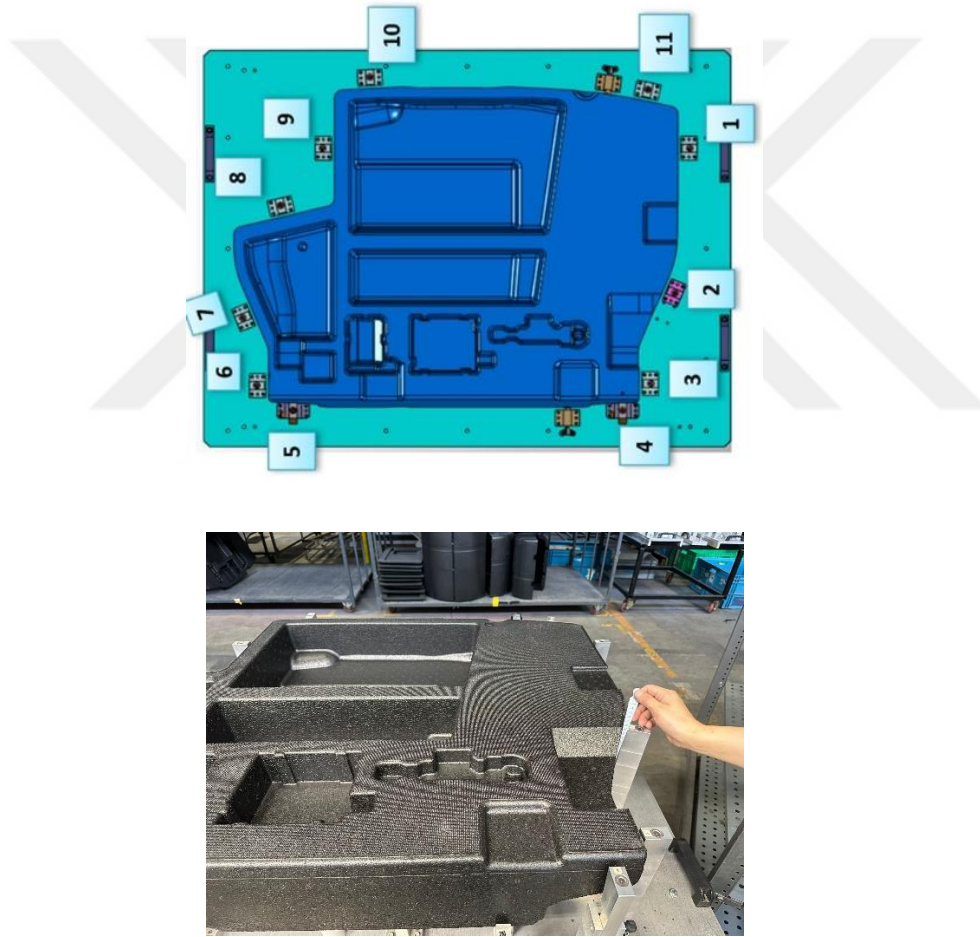
Minitab programı kullanılarak 27 denemeden oluşan ortogonal bir tablo elde edilmiştir. Belirlenen deneyler Tablo 4.3’te gösterilmektedir.

Tablo 4.3. Deneyde kullanılan L27 ortogonal dizisi.

No	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11
1	4	4	9	65	30	3,1	3,25	3,1	3,25	1,8	1,5
2	4	4	9	65	40	3,25	3,3	3,25	3,3	1,9	1,6
3	4	4	9	65	50	3,4	3,35	3,4	3,35	2	1,7
4	4	5,5	10	75	30	3,1	3,25	3,25	3,3	1,9	1,7
5	4	5,5	10	75	40	3,25	3,3	3,4	3,35	2	1,5
6	4	5,5	10	75	50	3,4	3,35	3,1	3,25	1,8	1,6
7	4	7	11	85	30	3,1	3,25	3,4	3,35	2	1,6
8	4	7	11	85	40	3,25	3,3	3,1	3,25	1,8	1,7
9	4	7	11	85	50	3,4	3,35	3,25	3,3	1,9	1,5
10	5,5	4	10	85	30	3,25	3,35	3,1	3,3	2	1,5
11	5,5	4	10	85	40	3,4	3,25	3,25	3,35	1,8	1,6
12	5,5	4	10	85	50	3,1	3,3	3,4	3,25	1,9	1,7
13	5,5	5,5	11	65	30	3,25	3,35	3,25	3,35	1,8	1,7
14	5,5	5,5	11	65	40	3,4	3,25	3,4	3,25	1,9	1,5
15	5,5	5,5	11	65	50	3,1	3,3	3,1	3,3	2	1,6
16	5,5	7	9	75	30	3,25	3,35	3,4	3,25	1,9	1,6
17	5,5	7	9	75	40	3,4	3,25	3,1	3,3	2	1,7
18	5,5	7	9	75	50	3,1	3,3	3,25	3,35	1,8	1,5
19	7	4	11	75	30	3,4	3,3	3,1	3,35	1,9	1,5
20	7	4	11	75	40	3,1	3,35	3,25	3,25	2	1,6
21	7	4	11	75	50	3,25	3,25	3,4	3,3	1,8	1,7
22	7	5,5	9	85	30	3,4	3,3	3,25	3,25	2	1,7
23	7	5,5	9	85	40	3,1	3,35	3,4	3,3	1,8	1,5
24	7	5,5	9	85	50	3,25	3,25	3,1	3,35	1,9	1,6
25	7	7	10	65	30	3,4	3,3	3,4	3,3	1,8	1,6
26	7	7	10	65	40	3,1	3,35	3,1	3,35	1,9	1,7
27	7	7	10	65	50	3,25	3,25	3,25	3,25	2	1,5

Her bir parametre dizilimi için yapılan üretimde makine ekranında kaydedilen çevrim süresi değerleri not edilmiş ve üretilen parçaların üzerlerine işaretleme yapılmıştır.

Üretilen parçalar fırın arabalarına dizilerek 8 saatlik fırınlama sürecinden geçirilmiştir. İşaretlenen parçalar montaj prosesinde parçaya özel üretilmiş olan kontrol fikstürüne yerleştirilerek çarpıklık seviyeleri ölçülmüştür. Parçanın kontrol fikstüründeki konumu Şekil 4.5'te görülmektedir. 11 ölçüm noktasından, 2 numara olarak gösterilen nokta kritik ölçüm noktası olarak belirlenmiştir ve tüm ölçümler bu nokta referans alınarak yapılmıştır. Parça ile fikstür arasındaki mesafe üçgen cetvel kullanılarak ölçülmüştür (Şekil 4.5). Elde edilen değerler Tablo 4.4'te gösterilmiştir.



Şekil 4.5. CF üzerinde parçanın çarpıklık seviyesinin ölçümü.

Tablo 4.4. Taguchi deney tasarımına göre çıktı sonuçları.

No	Çevrim Süresi (ÇS) (sn)	Çarpıklık(Ç) (mm)
1	173,2	14,1
2	183,3	14,3
3	183,4	14,6
4	170,2	14,5
5	180,8	15
6	191,7	15,1
7	188,6	15,6
8	198	15,7
9	208,1	15,7
10	185,1	14,7
11	196,3	14,9
12	205,8	15
13	167,9	10,1
14	177,3	10,4
15	188,2	10,8
16	177,8	12
17	187	12,5
18	197,3	13,1
19	178	12,9
20	188,1	13
21	198	13,4
22	188,1	15,5
23	197,4	15,6
24	206,9	15,8
25	170,1	15
26	181	15,2
27	190	15,4

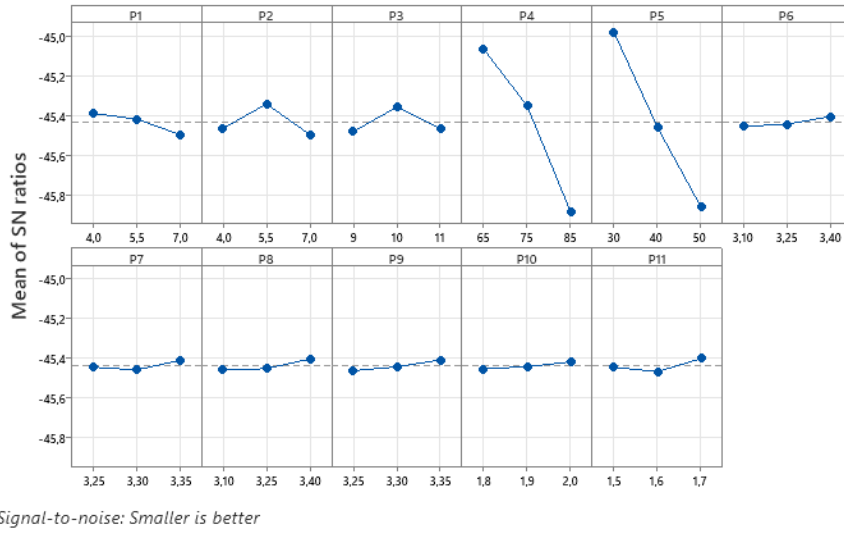
Deney sonuçları elde edildikten sonra ölçülen değerler Minitab programında bağımlı değişkenler olarak atandı. Daha sonra S/N kalite indeksi kullanılarak parametrelerin çevrim süresi ve çarpıklık seviyeleri üzerindeki etkileri belirlendi. Bu çalışmada çevrim süresinin ve çarpıklık seviyesinin minimum değerinin elde edilmesi amaçlandığından “en düşük en iyi” seçeneği seçilmiştir. Elde edilen S/N oranları Tablo 4.5’te gösterilmektedir.

S/N oranına göre çevrim süresi çıktısı üzerindeki parametrelerin ana etkileri Şekil 4.6’da gösterilmektedir.

Çevrim süresi çıktısına göre incelendiğinde parametrelerin seviyelerinin sırasıyla 1-2-2-1-1-3-3-3-3-3-3 kombinasyonunu veren deneyin en iyi sonucu alacağı görülmektedir. Grafikler incelendiğinde H./S.Taraf Soğutma Süresi ve Köpük Basıncı Soğutma Süresi faktörlerinin çevrim süresi üzerinde en büyük etkiye sahip olduğu görülmektedir.

Tablo 4.5. Taguchi kontrol faktörleri için S/N oranları.

No	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11	ÇS	Ç	S/N - ÇS	S/N - Ç
1	4	4	9	65	30	3,1	3,25	3,1	3,25	1,8	1,5	173,2	14,1	-44,77	-22,98
2	4	4	9	65	40	3,25	3,3	3,25	3,3	1,9	1,6	183,3	14,3	-45,26	-23,11
3	4	4	9	65	50	3,4	3,35	3,4	3,35	2	1,7	183,4	14,6	-45,27	-23,29
4	4	5,5	10	75	30	3,1	3,25	3,25	3,3	1,9	1,7	170,2	14,5	-44,62	-23,23
5	4	5,5	10	75	40	3,25	3,3	3,4	3,35	2	1,5	180,8	15	-45,14	-23,52
6	4	5,5	10	75	50	3,4	3,35	3,1	3,25	1,8	1,6	191,7	15,1	-45,65	-23,58
7	4	7	11	85	30	3,1	3,25	3,4	3,35	2	1,6	188,6	15,6	-45,51	-23,86
8	4	7	11	85	40	3,25	3,3	3,1	3,25	1,8	1,7	198	15,7	-45,93	-23,92
9	4	7	11	85	50	3,4	3,35	3,25	3,3	1,9	1,5	208,1	15,7	-46,37	-23,92
10	5,5	4	10	85	30	3,25	3,35	3,1	3,3	2	1,5	185,1	14,7	-45,35	-23,35
11	5,5	4	10	85	40	3,4	3,25	3,25	3,35	1,8	1,6	196,3	14,9	-45,86	-23,46
12	5,5	4	10	85	50	3,1	3,3	3,4	3,25	1,9	1,7	205,8	15	-46,27	-23,52
13	5,5	5,5	11	65	30	3,25	3,35	3,25	3,35	1,8	1,7	167,9	10,1	-44,50	-20,09
14	5,5	5,5	11	65	40	3,4	3,25	3,4	3,25	1,9	1,5	177,3	10,4	-44,97	-20,34
15	5,5	5,5	11	65	50	3,1	3,3	3,1	3,3	2	1,6	188,2	10,8	-45,49	-20,67
16	5,5	7	9	75	30	3,25	3,35	3,4	3,25	1,9	1,6	177,8	12	-45,00	-21,58
17	5,5	7	9	75	40	3,4	3,25	3,1	3,3	2	1,7	187	12,5	-45,44	-21,94
18	5,5	7	9	75	50	3,1	3,3	3,25	3,35	1,8	1,5	197,3	13,1	-45,90	-22,35
19	7	4	11	75	30	3,4	3,3	3,1	3,35	1,9	1,5	178	12,9	-45,01	-22,21
20	7	4	11	75	40	3,1	3,35	3,25	3,25	2	1,6	188,1	13	-45,49	-22,28
21	7	4	11	75	50	3,25	3,25	3,4	3,3	1,8	1,7	198	13,4	-45,93	-22,54
22	7	5,5	9	85	30	3,4	3,3	3,25	3,25	2	1,7	188,1	15,5	-45,49	-23,81
23	7	5,5	9	85	40	3,1	3,35	3,4	3,3	1,8	1,5	197,4	15,6	-45,91	-23,86
24	7	5,5	9	85	50	3,25	3,25	3,1	3,35	1,9	1,6	206,9	15,8	-46,32	-23,97
25	7	7	10	65	30	3,4	3,3	3,4	3,3	1,8	1,6	170,1	15	-44,61	-23,52
26	7	7	10	65	40	3,1	3,35	3,1	3,35	1,9	1,7	181	15,2	-45,15	-23,64
27	7	7	10	65	50	3,25	3,25	3,25	3,25	2	1,5	190	15,4	-45,58	-23,75

**Şekil 4.6.** S/N oranları için ana etki grafiği.

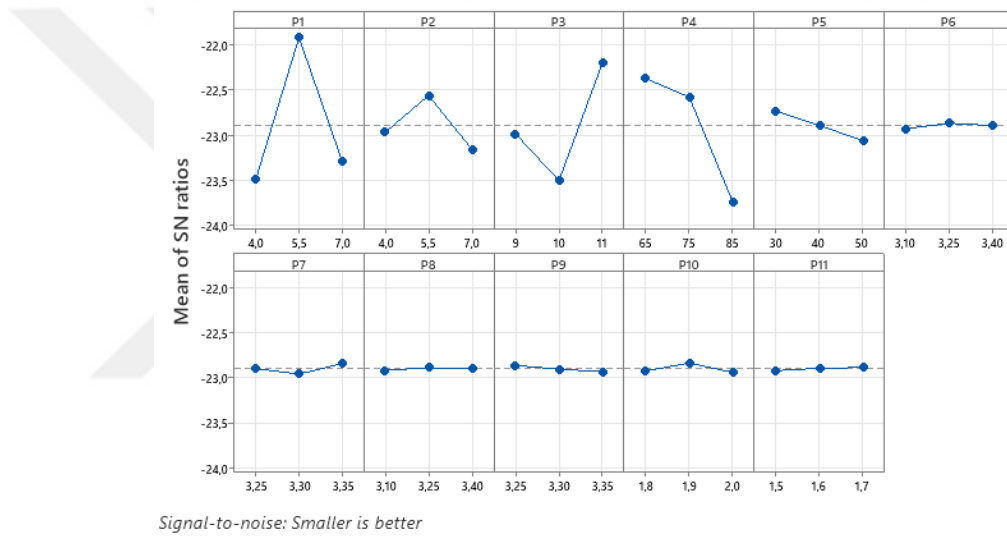
Bir parametrenin çevrim süresi üzerindeki etkisini sıralamak için ilk olarak, her seviye için belirli bir faktörün S/N oranları tahmin edildi. Daha sonra bu değerlerin maksimum ve minimumları arasındaki fark (“delta” olarak adlandırılır) elde edildi. Son olarak “delta” değerleri büyükten küçüğe doğru sıralanmıştır. Sonuçlar Tablo 4,6’da gösterilmektedir.

Tablo 4.6. S/N oranlarına ilişkin yanıt tablosu ve faktörlerin sıralaması (“en düşük en iyi”).

Seviye	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11
1	-45,39	-45,47	-45,48	-45,07	-44,98	-45,46	-45,44	-45,46	-45,46	-45,45	-45,44
2	-45,42	-45,34	-45,36	-45,35	-45,46	-45,45	-45,46	-45,45	-45,44	-45,44	-45,47
3	-45,5	-45,5	-45,47	-45,89	-45,86	-45,41	-45,41	-45,4	-45,41	-45,42	-45,4
Delta	0,11	0,16	0,12	0,82	0,88	0,05	0,05	0,05	0,05	0,04	0,07
Önem Sırası	5	3	4	2	1	9	10	7	8	11	6

Tablodaki önem derecelerine baktığımızda da ilk beş parametrenin çevrim süresi üzerinde daha etkili olduğu görülmektedir.

S/N oranına göre çarpıklık çıktısı üzerindeki parametrelerin ana etkileri Şekil 4.7’de gösterilmektedir.



Şekil 4.7. S/N oranları için ana etki grafiği.

Çarpıklık çıktısına göre incelendiğinde parametrelerin seviyelerinin sırasıyla 2-2-3-1-1-2-3-2-1-2-3 kombinasyonunu veren deneyin en iyi sonucu alacağı görülmektedir. Grafikler incelendiğinde S.Taraf Çapraz Buhar Süresi, H./S.Taraf Soğutma Süresi ve Otoklav Süresi parametrelerinin çarpıklık üzerinde en büyük etkiye sahip olduğu görülmektedir.

Çarpıklık çıktısına göre hesaplanan delta değerleri Tablo 4.7’de gösterilmektedir.

Tablo 4.7. SN oranlarına ilişkin yanıt tablosu ve faktörlerin sıralaması (“en düşük en iyi”).

Seviye	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11
1	-23,49	-22,97	-22,99	-22,38	-22,74	-22,93	-22,9	-22,92	-22,86	-22,92	-22,92
2	-21,92	-22,56	-23,51	-22,58	-22,9	-22,87	-22,96	-22,89	-22,9	-22,84	-22,89
3	-23,29	-23,16	-22,2	-23,74	-23,07	-22,9	-22,84	-22,89	-22,93	-22,94	-22,88
Delta	1,57	0,6	1,3	1,37	0,33	0,06	0,12	0,03	0,07	0,1	0,04
Önem Sırası	1	4	3	2	5	9	6	11	8	7	10

Tablodaki önem derecelerine baktığımızda da ilk beş parametrenin çarpıklık üzerinde daha etkili olduğu görülmektedir.

Yapılan analizler sonucunda çevrim süresine göre parametre etkileri ve çarpıklık seviyesine göre parametrelerin etkileri ayrı ayrı görülmektedir. Ayrı ayrı inceleme yapıldığında parametrelerin önem sıralarında ve optimum deney kombinasyonlarında farklılık olduğu görülmektedir. Oluşan farklılık sebebiyle etkili olan parametrelerin belirlenmesi ve sonrasında optimal kombinasyona ulaşılması noktasında zorluk yaşanmaktadır.

Yapılan çalışmanın amacı hem çevrim süresinin hem de çarpıklık seviyesinin minimumda tutulması olduğundan iki çıktının birlikte analiz edilmesi için Gri ilişkisel analiz yönteminden faydalanılmıştır.

Çevrim süresi ve çarpıklık seviyesinin minimum olması istendiğinden normalizasyon işlemi sırasında “en düşük en iyi” denklemi kullanılarak normalizasyon işlemi gerçekleştirilmiştir (3.4).

Normalizasyon işlemi yapıldıktan sonra uzaklık matrisi elde edilmiştir. Katsayı matrisinin oluşturulması için denklem 3.7’den faydalanılmıştır.

Katsayı değerleri hesaplandıktan sonra denklem 3.8’e göre çevrim süresi ve çarpıklık değerleri için gri ilişkisel dereceleri ve sıralamaları belirlenmiştir.

Oluşan değerler ve sıralama sonuçları Tablo 4.8’de gösterilmektedir.

Tablo 4.8. Gri ilişki derecesi.

No	Sinyal Gürültü Oranı		Normalizasyon		Gri İlişki Katsayısı		Gri İlişki Derecesi	
	ÇS	Ç	ÇS	Ç	ÇS	Ç	GİA Derecesi	Sıra
1	-44,771	-22,984	0,855	0,254	0,775	0,401	0,588	7
2	-45,263	-23,107	0,591	0,223	0,550	0,392	0,471	13
3	-45,268	-23,287	0,589	0,177	0,549	0,378	0,463	14
4	-44,619	-23,227	0,937	0,192	0,887	0,382	0,635	3
5	-45,144	-23,522	0,655	0,116	0,592	0,361	0,477	11
6	-45,652	-23,580	0,382	0,101	0,447	0,357	0,402	21
7	-45,511	-23,862	0,458	0,028	0,480	0,340	0,410	19
8	-45,933	-23,918	0,232	0,014	0,394	0,337	0,365	24
9	-46,365	-23,918	0,000	0,014	0,333	0,337	0,335	27
10	-45,348	-23,346	0,546	0,161	0,524	0,373	0,449	15
11	-45,858	-23,464	0,272	0,131	0,407	0,365	0,386	22
12	-46,269	-23,522	0,052	0,116	0,345	0,361	0,353	25
13	-44,501	-20,086	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1
14	-44,974	-20,341	0,746	0,935	0,663	0,884	0,774	2
15	-45,492	-20,668	0,468	0,850	0,485	0,770	0,627	4
16	-44,999	-21,584	0,733	0,615	0,652	0,565	0,608	6
17	-45,437	-21,938	0,498	0,524	0,499	0,512	0,506	9
18	-45,903	-22,345	0,248	0,419	0,399	0,462	0,431	16
19	-45,008	-22,212	0,728	0,453	0,648	0,478	0,563	8
20	-45,488	-22,279	0,471	0,436	0,486	0,470	0,478	10
21	-45,933	-22,542	0,232	0,368	0,394	0,442	0,418	17
22	-45,488	-23,807	0,471	0,043	0,486	0,343	0,414	18
23	-45,907	-23,862	0,246	0,028	0,399	0,340	0,369	23
24	-46,315	-23,973	0,027	0,000	0,339	0,333	0,336	26
25	-44,614	-23,522	0,939	0,116	0,892	0,361	0,627	5
26	-45,154	-23,637	0,650	0,087	0,588	0,354	0,471	12
27	-45,575	-23,750	0,424	0,057	0,465	0,347	0,406	20

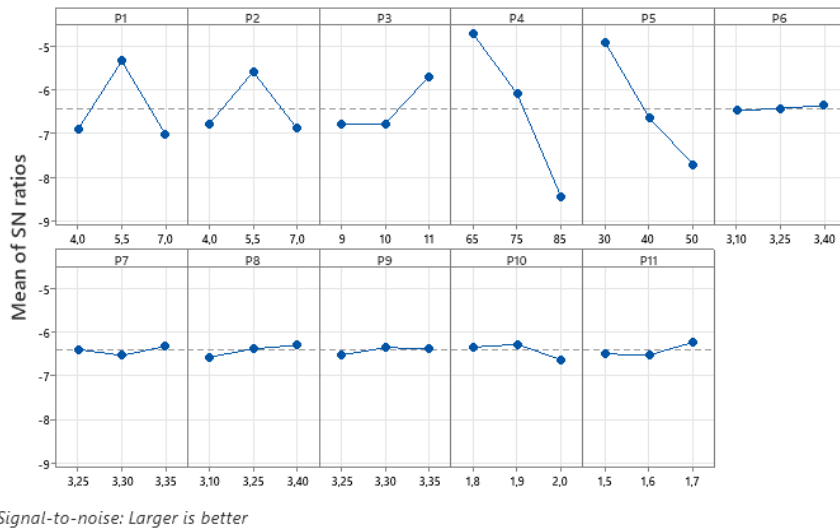
Yapılan hesaplamalara göre Tablo 4.8’de görüldüğü gibi 13 numaralı deney kombinasyonu optimum sonucu veren kombinasyon olarak görülmektedir. Önem sırası belirlenirken Gri ilişki derecesi en büyük olan değer en ideal değer olarak değerlendirilir.

Hesaplanan gri ilişki derecesi kullanılarak Taguchi yöntemi uygulanmıştır. Hesaplanan gri ilişki derecesi Taguchi yönteminde yanıt değişkeni olarak kullanılmıştır. Taguchi yönteminin burada kullanılma amacı en yüksek gri ilişki derecesine sahip olarak kombinasyonun belirlenmesidir. Her deney kombinasyonu sonucu elde edilen gri ilişki derecesi yanıt değişkeni olarak atandı ve tablo yeniden düzenlendi. Gri ilişki derecesini maksimize etmeye çalıştığımızdan Taguchi yönteminde “en yüksek en iyi” seçeneği kullanılarak sinyal gürültü oranı hesaplanmıştır (Tablo 4.9).

Tablo 4.9. Taguchi kontrol faktörleri için S/N oranları.

No	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11	GİA Derecesi	S/N
1	4	4	9	65	30	3,1	3,25	3,1	3,25	1,8	1,5	0,588	-4,61
2	4	4	9	65	40	3,25	3,3	3,25	3,3	1,9	1,6	0,471	-6,54
3	4	4	9	65	50	3,4	3,35	3,4	3,35	2	1,7	0,463	-6,68
4	4	5,5	10	75	30	3,1	3,25	3,25	3,3	1,9	1,7	0,635	-3,95
5	4	5,5	10	75	40	3,25	3,3	3,4	3,35	2	1,5	0,477	-6,44
6	4	5,5	10	75	50	3,4	3,35	3,1	3,25	1,8	1,6	0,402	-7,91
7	4	7	11	85	30	3,1	3,25	3,4	3,35	2	1,6	0,41	-7,75
8	4	7	11	85	40	3,25	3,3	3,1	3,25	1,8	1,7	0,365	-8,74
9	4	7	11	85	50	3,4	3,35	3,25	3,3	1,9	1,5	0,335	-9,50
10	5,5	4	10	85	30	3,25	3,35	3,1	3,3	2	1,5	0,449	-6,96
11	5,5	4	10	85	40	3,4	3,25	3,25	3,35	1,8	1,6	0,386	-8,26
12	5,5	4	10	85	50	3,1	3,3	3,4	3,25	1,9	1,7	0,353	-9,04
13	5,5	5,5	11	65	30	3,25	3,35	3,25	3,35	1,8	1,7	1	0,00
14	5,5	5,5	11	65	40	3,4	3,25	3,4	3,25	1,9	1,5	0,774	-2,23
15	5,5	5,5	11	65	50	3,1	3,3	3,1	3,3	2	1,6	0,627	-4,05
16	5,5	7	9	75	30	3,25	3,35	3,4	3,25	1,9	1,6	0,608	-4,32
17	5,5	7	9	75	40	3,4	3,25	3,1	3,3	2	1,7	0,506	-5,92
18	5,5	7	9	75	50	3,1	3,3	3,25	3,35	1,8	1,5	0,431	-7,31
19	7	4	11	75	30	3,4	3,3	3,1	3,35	1,9	1,5	0,563	-5,00
20	7	4	11	75	40	3,1	3,35	3,25	3,25	2	1,6	0,478	-6,41
21	7	4	11	75	50	3,25	3,25	3,4	3,3	1,8	1,7	0,418	-7,58
22	7	5,5	9	85	30	3,4	3,3	3,25	3,25	2	1,7	0,414	-7,65
23	7	5,5	9	85	40	3,1	3,35	3,4	3,3	1,8	1,5	0,369	-8,65
24	7	5,5	9	85	50	3,25	3,25	3,1	3,35	1,9	1,6	0,336	-9,46
25	7	7	10	65	30	3,4	3,3	3,4	3,3	1,8	1,6	0,627	-4,06
26	7	7	10	65	40	3,1	3,35	3,1	3,35	1,9	1,7	0,471	-6,54
27	7	7	10	65	50	3,25	3,25	3,25	3,25	2	1,5	0,406	-7,84

S/N oranına göre parametrelerin ana etkileri Şekil 4.8’de gösterilmektedir.

**Şekil 4.8.** S/N oranları için ana etki grafiği.

GİA Derecesine göre incelendiğinde parametrelerin seviyelerinin sırasıyla 2-2-3-1-1-3-3-3-2-2-3 kombinasyonunu veren deneyin en iyi sonucu alacağı görülmektedir.

Grafikler incelendiğinde ilk beş parametrenin daha yüksek etkiye sahip olduğu, diğer parametrelerin etkilerinin oldukça düşük olduğu görülmektedir.

Gri ilişki derecesine göre etkili faktörleri belirlemek amacıyla Minitab programı kullanılarak ANOVA yöntemi uygulanmıştır.

Analiz sonuçları Tablo 4.10'da gösterilmektedir.

Tablo 4.10. Gri ilişki derecesine göre ANOVA sonuçları.

Faktör	SD	Sıralı Kareler Toplamı	Katkı Yüzdesi	Ayarlanmış Kareler Toplamı	Ayarlanmış Ortalama Kareler	F Değeri	P Değeri
P1	2	0,077279	13,46%	0,077279	0,038639	10,30	0,026
P2	2	0,056220	9,80%	0,056220	0,028110	7,49	0,044
P3	2	0,044303	7,72%	0,044303	0,022152	5,90	0,064
P4	2	0,224680	39,15%	0,224680	0,112340	29,94	0,004
P5	2	0,132844	23,15%	0,132844	0,066422	17,70	0,010
P6	2	0,001597	0,28%	0,001597	0,000798	0,21	0,817
P7	2	0,003422	0,60%	0,003422	0,001711	0,46	0,663
P8	2	0,003757	0,65%	0,003757	0,001879	0,50	0,640
P9	2	0,001258	0,22%	0,001258	0,000629	0,17	0,851
P10	2	0,008544	1,49%	0,008544	0,004272	1,14	0,406
P11	2	0,005025	0,88%	0,005025	0,002513	0,67	0,561
Hata	4	0,015006	2,61%	0,015006	0,003752		
Toplam	26	0,573936	100,00%				
S: 0,0613	R-sq:	%97,39	R-sq (Ayarlanmış):	%83			

ANOVA'da kullanılan çeşitli parametreler yukarıdaki Tablo 4.10'da gösterilmektedir. Bu parametrelere ait kısa açıklamalar aşağıdaki gibidir.

- Serbestlik Derecesi: Verideki bilgi miktarıdır. Bu bilgi, bilinmeyen popülasyon parametrelerinin değerlerini tahmin etmek için analizde kullanılır. Toplam serbestlik derecesi, örneklemdaki gözlem sayısına göre belirlenir. Bu, her bir kaynağın modeldeki serbestlik derecesini gösterir ve burada her kaynak için 2 olarak verilmiştir.
- Sıralı Kareler Toplamı: Her bir kaynağın toplam kareler içinde ne kadar katkı sağladığını gösterir. Bir kaynağın değişkenliğe olan katkısını ölçer.
- Katkı Yüzdesi: Her bir kaynağın toplam değişkenlik içindeki yüzdesel katkısıdır. Örneğin, "H./S.Taraf Soğutma Süresi" %39,15 katkı sağlamaktadır, bu da bu değişkenin diğerlerinden daha fazla etkili olduğunu gösterir.
- Ayarlanmış Kareler Toplamı: Her bir kaynağın toplam kareler içindeki katkısını, diğer kaynakların etkilerini hesaba katarak gösterir.
- Ayarlanmış Ortalama Kareler. Ayarlanmış kareler toplamının serbestlik derecesine bölünmesiyle elde edilir.

- F Değeri: Bu değer, bir kaynağın etkisinin önemli olup olmadığını belirlemeye yarar. Daha yüksek F değeri, kaynağın anlamlı bir etkisi olduğunu gösterir. Örneğin, "H./S.Taraf Soğutma Süresi" için F değeri 29,94'tür ve bu, çok önemli bir etkisi olduğunu gösterir.
- P Değeri: İstatistiksel anlamlılığı gösteren bir değerdir. Genellikle 0,05'in altındaki p-değerleri, faktörün önemli bir etkisi olduğunu göstermektedir. "H./S.Taraf Soğutma Süresi" ve "Köpük Basıncı Soğutma Süresi" gibi faktörlerin p-değerleri 0,05'in altında olduğu görülmektedir. Bu da bu faktörlerin sürece anlamlı etkiler yaptığını anlatmaktadır.
- S (Standart Hata): 0,0613, modelin tahmin hatasının ortalama büyüklüğünü göstermektedir.
- R-sq (%97,39): Modelin bağımlı değişkendeki toplam varyasyonun %97,39'unu açıkladığını göstermektedir. Yüksek uyumlu olduğu anlaşılmaktadır.
- R-sq (Ayarlanmış) (%83): Modelin bağımlı değişkendeki varyasyonu açıklama oranı %83'tür. Ayarlanmış R-sq, modele eklenen faktörlerin etkisini dikkate alarak bu değeri düzeltmektedir.

Tüm sonuçlar değerlendirildiğinde çevrim süresi ve çarpıklık seviyelerini etkileyen ana parametrelerin P1, P2, P3, P4 ve P5 parametreleri olduğu anlaşılmıştır. Çalışmanın bundan sonraki kısmında P6-P11 parametreleri modelden çıkartılarak sabit tutulmuş ve iyileştirme çalışmaları P1, P2, P3, P4 ve P5 parametre değeri üzerinden ilerletilmiştir.

5 faktörlü 3 seviyeli deney düzeneği kurulması için L27 ortogonal dizi seçilerek deney kombinasyonları oluşturulmuştur. Belirlenen her bir deney için 3 tekrar yapılmıştır. Alınan sonuçlar Minitab programına kaydedilerek S/N oranları belirlenmiştir. Alınan sonuçlar Tablo 4.11'de gösterilmektedir.

Tablo 4.11. Taguchi kontrol faktörleri için S/N oranları.

No	P1	P2	P3	P4	P5	ÇS1	ÇS2	ÇS3	Ç1	Ç2	Ç3	S/N - ÇS	S/N - Ç
1	4	4	9	65	30	173,2	173,1	173,2	14,0	14,0	14,1	-44,7693	-22,9433
2	4	4	9	65	40	183,4	183,2	183,3	14,3	14,3	14,3	-45,2633	-23,1067
3	4	4	9	65	50	183,4	183,4	183,3	14,5	14,4	14,5	-45,2664	-23,2074
4	4	5,5	10	75	30	170,3	170,2	170,3	14,4	14,3	14,4	-44,6226	-23,1472
5	4	5,5	10	75	40	180,7	180,6	180,8	15,1	15,1	15,0	-45,1392	-23,5604
6	4	5,5	10	75	50	191,8	191,8	191,7	15,2	15,2	15,1	-45,6555	-23,6178
7	4	7	11	85	30	188,7	188,9	188,6	15,6	15,5	15,5	-45,5170	-23,8253
8	4	7	11	85	40	198,0	198,1	198,0	15,7	15,7	15,6	-45,9348	-23,8996
9	4	7	11	85	50	208,2	208,1	208,3	15,8	15,8	15,8	-46,3696	-23,9731
10	5,5	4	10	85	30	185,0	185,0	185,1	14,6	14,5	14,6	-45,3450	-23,2672
11	5,5	4	10	85	40	196,2	196,1	196,2	14,9	14,8	14,9	-45,8525	-23,4443
12	5,5	4	10	85	50	205,9	205,8	205,7	15,0	15,0	15,0	-46,2689	-23,5218
13	5,5	5,5	11	65	30	167,8	167,9	167,9	10,2	10,1	10,3	-44,4993	-20,1723
14	5,5	5,5	11	65	40	177,4	177,3	177,5	10,5	10,6	10,4	-44,9791	-20,4240
15	5,5	5,5	11	65	50	188,1	188,0	188,1	10,7	10,8	10,6	-45,4862	-20,5879
16	5,5	7	9	75	30	177,9	177,8	178,0	12,1	12,0	12,2	-45,0035	-21,6559
17	5,5	7	9	75	40	187,1	187,0	187,2	12,6	12,5	12,5	-45,4415	-21,9614
18	5,5	7	9	75	50	197,4	197,3	197,5	13,0	13,1	13,1	-45,9069	-22,3234
19	7	4	11	75	30	178,0	178,0	178,0	12,9	13,0	12,9	-45,0084	-22,2343
20	7	4	11	75	40	188,0	188,1	187,9	13,0	12,9	13,0	-45,4832	-22,2566
21	7	4	11	75	50	198,1	198,0	198,0	13,5	13,4	13,6	-45,9348	-22,6068
22	7	5,5	9	85	30	188,0	188,1	188,0	15,6	15,6	15,5	-45,4847	-23,8440
23	7	5,5	9	85	40	197,3	197,4	197,2	15,7	15,8	15,7	-45,9025	-23,9365
24	7	5,5	9	85	50	207,0	207,0	207,1	15,8	15,8	15,9	-46,3208	-23,9915
25	7	7	10	65	30	170,0	170,1	169,9	15,1	15,0	15,0	-44,6090	-23,5411
26	7	7	10	65	40	181,1	181,0	181,2	15,3	15,2	15,4	-45,1584	-23,6940
27	7	7	10	65	50	189,8	189,9	189,7	15,4	15,4	15,5	-45,5659	-23,7692

Çevrim süresi çıktısına göre hesaplanan delta değerleri Tablo 4.12’de gösterilmektedir. Çevrim süresine göre parametrelerin seviyelerinin sırasıyla 1-2-2-1-1 kombinasyonunu veren deneyin en iyi sonucu alacağı görülmektedir. Çarpıklık çıktısına göre hesaplanan delta değerleri Tablo 4.13’te gösterilmektedir.

Tablo 4.12. SN oranlarına ilişkin yanıt tablosu ve faktörlerin sıralaması (“en düşük en iyi”).

Seviye	P1	P2	P3	P4	P5
1	-45,39	-45,47	-45,48	-45,07	-44,98
2	-45,42	-45,34	-45,36	-45,36	-45,46
3	-45,5	-45,5	-45,47	-45,89	-45,86
Delta	0,1	0,16	0,13	0,82	0,88
Önem Sırası	5	3	4	2	1

Tablo 4.13. SN oranlarına ilişkin yanıt tablosu ve faktörlerin sıralaması (“en düşük en iyi”).

Seviye	P1	P2	P3	P4	P5
1	-23,48	-22,95	-23	-22,38	-22,74
2	-21,93	-22,59	-23,51	-22,6	-22,92
3	-23,32	-23,18	-22,22	-23,74	-23,07
Delta	1,55	0,6	1,29	1,36	0,33
Önem Sırası	1	4	3	2	5

Çarpıklık seviyesine göre parametrelerin seviyelerinin sırasıyla 2-2-3-1-1 kombinasyonunu veren deneyin en iyi sonucu alacağı görülmektedir.

Yapılan çalışmanın amacı hem çevrim süresinin hem de çarpıklık seviyesinin minimumda tutulması olduğundan iki çıktının birlikte analiz edilmesi için Gri ilişkisel analiz yönteminden faydalanılmıştır.

Çevrim süresi ve çarpıklık seviyesinin minimum olması istendiğinden normalizasyon işlemi sırasında “en düşük en iyi” denklemi kullanılarak normalizasyon işlemi gerçekleştirilmiştir (3.4).

Normalizasyon işlemi yapıldıktan sonra uzaklık matrisi elde edilmiştir. Katsayı matrisinin oluşturulması için denklem 3.7’den faydalanılmıştır.

Katsayı değerleri hesaplandıktan sonra denklem 3.8’e göre çevrim süresi ve çarpıklık değerleri için gri ilişkisel dereceleri ve sıralamaları belirlenmiştir.

Oluşan değerler ve sıralama sonuçları Tablo 4.14’te gösterilmektedir.

Tablo 4.14. Gri ilişki derecesi.

No	Sinyal Gürültü Oranı		Normalizasyon		Gri İlişki Katsayısı		Gri İlişki Derecesi	
	ÇS	Ç	ÇS	Ç	ÇS	Ç	GİA Derecesi	Sıra
1	-44,769	-22,943	0,856	0,274	0,776	0,408	0,592	7
2	-45,263	-23,107	0,592	0,232	0,550	0,394	0,472	12
3	-45,266	-23,207	0,590	0,205	0,549	0,386	0,468	14
4	-44,623	-23,147	0,934	0,221	0,884	0,391	0,637	4
5	-45,139	-23,560	0,658	0,113	0,594	0,360	0,477	11
6	-45,655	-23,618	0,382	0,098	0,447	0,357	0,402	21
7	-45,517	-23,825	0,456	0,044	0,479	0,343	0,411	19
8	-45,935	-23,900	0,232	0,024	0,394	0,339	0,367	24
9	-46,370	-23,973	0,000	0,005	0,333	0,334	0,334	27
10	-45,345	-23,267	0,548	0,190	0,525	0,382	0,453	15
11	-45,853	-23,444	0,276	0,143	0,409	0,369	0,389	22
12	-46,269	-23,522	0,054	0,123	0,346	0,363	0,354	25
13	-44,499	-20,172	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1
14	-44,979	-20,424	0,743	0,934	0,661	0,884	0,772	2
15	-45,486	-20,588	0,472	0,891	0,487	0,821	0,654	3
16	-45,004	-21,656	0,730	0,612	0,650	0,563	0,606	6
17	-45,441	-21,961	0,496	0,532	0,498	0,516	0,507	9
18	-45,907	-22,323	0,247	0,437	0,399	0,470	0,435	16
19	-45,008	-22,234	0,728	0,460	0,647	0,481	0,564	8
20	-45,483	-22,257	0,474	0,454	0,487	0,478	0,483	10
21	-45,935	-22,607	0,232	0,363	0,394	0,440	0,417	17
22	-45,485	-23,844	0,473	0,039	0,487	0,342	0,415	18
23	-45,903	-23,936	0,250	0,014	0,400	0,337	0,368	23
24	-46,321	-23,991	0,026	0,000	0,339	0,333	0,336	26
25	-44,609	-23,541	0,941	0,118	0,895	0,362	0,628	5
26	-45,158	-23,694	0,648	0,078	0,587	0,352	0,469	13
27	-45,566	-23,769	0,430	0,058	0,467	0,347	0,407	20

Yapılan hesaplamalara göre Tablo 4.14'te görüldüğü gibi 13 numaralı deney kombinasyonu optimum sonucu veren kombinasyon olarak görülmektedir. Önem sırası belirlenirken Gri ilişki derecesi en büyük olan değer en ideal değer olarak değerlendirilir.

Hesaplanan gri ilişki derecesi kullanılarak Taguchi yöntemi uygulanmıştır. Hesaplanan gri ilişki derecesi Taguchi yönteminde yanıt değişkeni olarak kullanılmıştır. Taguchi yönteminin burada kullanılma amacı en yüksek gri ilişki derecesine sahip olarak kombinasyonun belirlenmesidir. Her deney kombinasyonu sonucu elde edilen gri ilişki derecesi yanıt değişkeni olarak atandı ve tablo yeniden düzenlendi. Gri ilişki derecesini maksimize etmeye çalıştığımızdan Taguchi yönteminde “en yüksek en iyi” seçeneği kullanılarak sinyal gürültü oranı hesaplanmıştır (Tablo 4.15).

Tablo 4.15. Taguchi kontrol faktörleri için SN oranları.

No	P1	P2	P3	P4	P5	GİA Derecesi	S/N
1	4	4	9	65	30	0,592	-4,55
2	4	4	9	65	40	0,472	-6,52
3	4	4	9	65	50	0,468	-6,60
4	4	5,5	10	75	30	0,637	-3,91
5	4	5,5	10	75	40	0,477	-6,43
6	4	5,5	10	75	50	0,402	-7,92
7	4	7	11	85	30	0,411	-7,72
8	4	7	11	85	40	0,367	-8,72
9	4	7	11	85	50	0,334	-9,53
10	5,5	4	10	85	30	0,453	-6,87
11	5,5	4	10	85	40	0,389	-8,21
12	5,5	4	10	85	50	0,354	-9,01
13	5,5	5,5	11	65	30	1,000	0,00
14	5,5	5,5	11	65	40	0,772	-2,25
15	5,5	5,5	11	65	50	0,654	-3,69
16	5,5	7	9	75	30	0,606	-4,35
17	5,5	7	9	75	40	0,507	-5,90
18	5,5	7	9	75	50	0,435	-7,24
19	7	4	11	75	30	0,564	-4,97
20	7	4	11	75	40	0,483	-6,33
21	7	4	11	75	50	0,417	-7,60
22	7	5,5	9	85	30	0,415	-7,65
23	7	5,5	9	85	40	0,368	-8,68
24	7	5,5	9	85	50	0,336	-9,47
25	7	7	10	65	30	0,628	-4,04
26	7	7	10	65	40	0,469	-6,57
27	7	7	10	65	50	0,407	-7,81

Gri ilişki derecesine göre hesaplanan delta değerleri Tablo 4.16’da gösterilmektedir.

Tablo 4.16. S/N oranlarına ilişkin yanıt tablosu ve faktörlerin sıralaması (“en yüksek en iyi”).

Seviye	P1	P2	P3	P4	P5
1	-6,877	-6,739	-6,771	-4,669	-4,896
2	-5,278	-5,554	-6,752	-6,07	-6,621
3	-7,012	-6,874	-5,644	-8,428	-7,65
Delta	1,733	1,32	1,127	3,758	2,754
Önem Sırası	3	4	5	1	2

GİA Derecesine göre incelendiğinde parametrelerin seviyelerinin sırasıyla 2-2-3-1-1 kombinasyonunu veren deneyin en iyi sonucu alacağı görülmektedir.

Gri ilişki derecesine göre etkili faktörleri belirlemek amacıyla Minitab programı kullanılarak varyans analizi (ANOVA) gerçekleştirilmiştir.

Analiz sonuçları Tablo 4.17’de gösterilmektedir.

Tablo 4.17. Gri ilişki derecesine göre ANOVA sonuçları.

Faktör	SD	Sıralı Kareler Toplamı	Katkı Yüzdesi	Ayarlanmış Kareler Toplamı	Ayarlanmış Ortalama Kareler	F Değeri	P Değeri
P1	2	0,08149	14,04%	0,08149	0,040746	19,24	0
P2	2	0,05781	9,96%	0,05781	0,028907	13,65	0
P3	2	0,04665	8,04%	0,04665	0,023325	11,01	0,001
P4	2	0,23072	39,76%	0,23072	0,115362	54,47	0
P5	2	0,12975	22,36%	0,12975	0,064876	30,63	0
Hata	16	0,03389	5,84%	0,03389	0,002118		
Toplam	26	0,58032	100,00%				
S: 0,0460	R-sq:	%94,16	R-sq (Ayarlanmış):	%90,51			

Analiz sonuçları değerlendirildiğinde S/N oranları ile ANOVA sonuçlarının birbirini desteklediği görülmüştür. “H./S.Taraf Soğutma Süresi” parametresinin en etkili parametre olduğu görülürken sırasıyla “Köpük Basıncı Soğutma Süresi” ve “S.Taraf Çapraz Buhar Süresi” şeklinde devam etmektedir.

Çalışmada çevrim süresi için ve çarpıklık seviyesi için ayrı ayrı Taguchi metotları uygulanmış, sonrasında Gri ilişkisel analiz yöntemi ile gri ilişki derecesine göre Taguchi metodu uygulanmıştır. Uygulanan 3 yöntemde belirlenen en iyi parametre kombinasyonları Tablo 4.18’de gösterilmektedir. Taguchi metodu ile geri tahminleme yapılarak alınan sonuçlar incelendiğinde GİA ve çarpıklık seviyesine göre belirlenen değerler iki değer için de optimum sonucun olduğu kombinasyonu vermektedir.

Tablo 4.18. Optimum parametreler ve sonuçları.

Çıktı	P1	P2	P3	P4	P5	CT	W
Çevrim Süresi	4	5,5	10	65	30	161,126	14,463
Çarpıklık	5,5	5,5	11	65	30	165,893	9,985
GİA	5,5	5,5	11	65	30	165,893	9,985

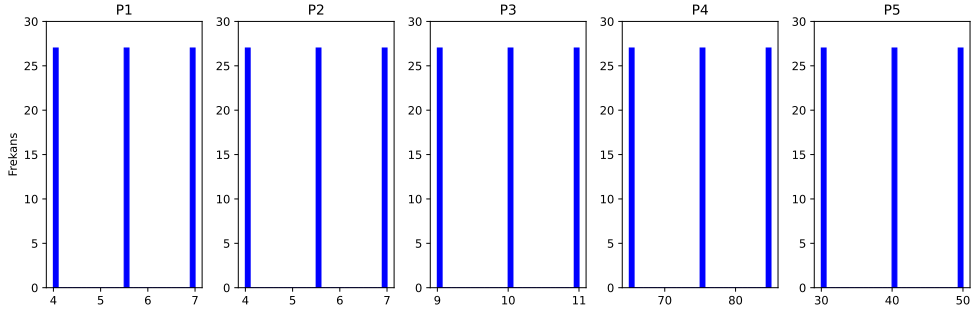
4.3. Yapay Sinir Ağları

Bu aşamada taguchi deney tasarımı ile belirlenen deney kombinasyonları girdi değerleri olarak alınmış ve deneyler 3 kez tekrarlanarak oluşturulan veri seti yapay sinir ağları metodu ile optimize edilmiştir. Tablo 4.19’da YSA’da kullanılan veri seti gösterilmektedir. Modelde 5 girdi parametresi ve 2 çıktı parametresi bulunmaktadır. Her deney 3 kez tekrarlanarak her bir deney sonucu alındığından 81 satırlık veri seti oluşturulmuştur.

Tablo 4.19. Girdi ve çıktı parametreleri.

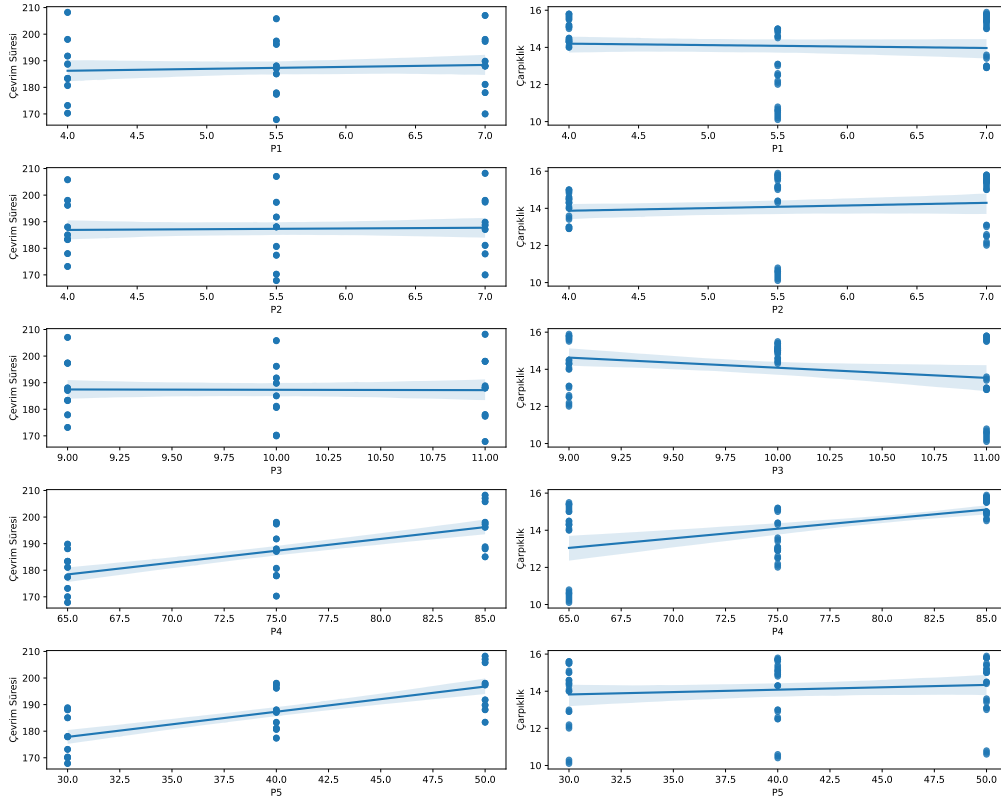
No	Proses girdi parametreleri					Proses çıktı parametreleri					
	P1	P2	P3	P4	P5	ÇS1	ÇS2	ÇS3	Ç1	Ç2	Ç3
1	4	4	9	65	30	173,2	173,1	173,2	14,0	14,0	14,1
2	4	4	9	65	40	183,4	183,2	183,3	14,3	14,3	14,3
3	4	4	9	65	50	183,4	183,4	183,3	14,5	14,4	14,5
4	4	5,5	10	75	30	170,3	170,2	170,3	14,4	14,3	14,4
5	4	5,5	10	75	40	180,7	180,6	180,8	15,1	15,1	15,0
6	4	5,5	10	75	50	191,8	191,8	191,7	15,2	15,2	15,1
7	4	7	11	85	30	188,7	188,9	188,6	15,6	15,5	15,5
8	4	7	11	85	40	198,0	198,1	198,0	15,7	15,7	15,6
9	4	7	11	85	50	208,2	208,1	208,3	15,8	15,8	15,8
10	5,5	4	10	85	30	185,0	185,0	185,1	14,6	14,5	14,6
11	5,5	4	10	85	40	196,2	196,1	196,2	14,9	14,8	14,9
12	5,5	4	10	85	50	205,9	205,8	205,7	15,0	15,0	15,0
13	5,5	5,5	11	65	30	167,8	167,9	167,9	10,2	10,1	10,3
14	5,5	5,5	11	65	40	177,4	177,3	177,5	10,5	10,6	10,4
15	5,5	5,5	11	65	50	188,1	188,0	188,1	10,7	10,8	10,6
16	5,5	7	9	75	30	177,9	177,8	178,0	12,1	12,0	12,2
17	5,5	7	9	75	40	187,1	187,0	187,2	12,6	12,5	12,5
18	5,5	7	9	75	50	197,4	197,3	197,5	13,0	13,1	13,1
19	7	4	11	75	30	178,0	178,0	178,0	12,9	13,0	12,9
20	7	4	11	75	40	188,0	188,1	187,9	13,0	12,9	13,0
21	7	4	11	75	50	198,1	198,0	198,0	13,5	13,4	13,6
22	7	5,5	9	85	30	188,0	188,1	188,0	15,6	15,6	15,5
23	7	5,5	9	85	40	197,3	197,4	197,2	15,7	15,8	15,7
24	7	5,5	9	85	50	207,0	207,0	207,1	15,8	15,8	15,9
25	7	7	10	65	30	170,0	170,1	169,9	15,1	15,0	15,0
26	7	7	10	65	40	181,1	181,0	181,2	15,3	15,2	15,4
27	7	7	10	65	50	189,8	189,9	189,7	15,4	15,4	15,5

İlk olarak veri seti ve dağılımı görselleştirilmiştir. L27 ortogonal dizi kullanılarak oluşturulan veri setinde belirlenen beş parametrenin değerleri ve her bir parametreye ait veri sayısı Şekil 4.9’da gösterilmiştir.



Şekil 4.9. Girdi parametrelerine ait verilerin dağılımı.

Belirlenen her bir parametrenin çıktı değerleri üzerindeki ilişkileri Şekil 4.10'da görselleştirilmiştir. Parametrelerin çevrim süresi ve çarpıklık üzerindeki etkilerine ilişkin analiz sonuçları, çevrim süresi açısından özellikle P4 ve P5'in belirgin bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir. P4 ve P5 parametrelerinin artışı, çevrim süresinde gözle görülür bir artış eğilimi yaratırken, diğer parametreler olan P1, P2 ve P3'ün çevrim süresi üzerindeki etkileri oldukça sınırlıdır. Çarpıklık çıktısına bakıldığında ise, tüm parametreler ile çarpıklık arasında zayıf bir ilişki bulunmuştur. Çarpıklık üzerinde düşük bir eğilim gösteren P3 hariç, P1, P2, P4 ve P5 parametrelerinin anlamlı bir etkisi olmadığı gözlenmiştir.



Şekil 4.10. Girdi parametrelerinin çıktılar üzerindeki etkileri.

Parametre optimizasyon işlemine başlamadan önce veriler normalize edilmiştir. Bu noktadan sonra kullanılan tüm veriler normalize değerleri üzerinden ifade edilmiştir.

Bu çalışmada 81 adet deney setinden oluşan veri kullanılmıştır. Veri seti az olduğu için çalışmanın doğruluğunu arttırmak amacıyla çapraz doğrulama yöntemi uygulanmıştır. Çapraz doğrulama yöntemi verileri belirli bir oranda alt kümelere bölerek veri analizi yaptığından özellikle veri sayısı az olan çalışmalarda aşırı öğrenmeyi engellemek ve doğruluğu arttırmak için kullanılmaktadır. Bu yöntemde veri kümesi belirli bir sayıda eşit boyutlu alt kümeye (fold) ayrılır. Model, her bir fold için bir kez test kümesi olarak ayrılan fold dışında kalan diğer foldlarda eğitilir ve test işlemi test foldu üzerinde gerçekleştirilir. Bu işlem, her fold bir kez test kümesi olacak şekilde tekrarlanır ve her bir tekrarda modelin performansı kaydedilir. Son olarak, modelin genel performansını belirlemek için tüm katlamalardaki test sonuçlarının ortalaması alınır. Bu çalışmada veri seti 5 alt kümeye bölünmüştür. En iyi sonucu veren modeli bulmak için Hiperparametre optimizasyonu yapılmış ve Izgara arama (Grid Search) yöntemi kullanılmıştır. Gizli katman boyutu olarak; 10, 15, 20, 25, 50, 75, 100, 150 ve 200 alınmıştır. Çözücü olarak 'lbfgs', 'adam' ve 'sgd' kullanılmıştır. Düzenleştirme parametresi (alpha) olarak “0,0001, 0,001, 0,01 ve 0,1” alınmıştır. Öğrenme hızı olarak 'constant', 'invscaling' ve 'adaptive' kullanılmıştır.

Hiperparametre optimizasyonunda çapraz doğrulama yöntemine göre toplamda 324 farklı algoritma denenmiş ve en iyi sonucu veren ilk 10 model Tablo 4.20’de gösterilmiştir.

Tablo 4.20. En iyi sonucu veren ilk 10 model

Düzenleme (alpha)	Gizli Katman Boyutu	Öğrenme Hızı	Çözücü	R^2 Değerleri						Sıra
				Bölüm 1	Bölüm 2	Bölüm 3	Bölüm 4	Bölüm 5	Ortalama	
0,0001	150	adaptive	lbfgs	0,9933	0,9970	0,9975	0,9976	0,9964	0,9963	1
0,0010	150	constant	lbfgs	0,9927	0,9945	0,9983	0,9966	0,9977	0,9959	2
0,0010	20	adaptive	lbfgs	0,9958	0,9962	0,9975	0,9966	0,9925	0,9957	3
0,0001	200	constant	lbfgs	0,9903	0,9947	0,9978	0,9981	0,9974	0,9957	4
0,0001	100	invscaling	lbfgs	0,9939	0,9942	0,9965	0,9979	0,9956	0,9956	5
0,0100	150	invscaling	lbfgs	0,9936	0,9939	0,9960	0,9961	0,9985	0,9956	6
0,0100	200	constant	lbfgs	0,9923	0,9942	0,9965	0,9966	0,9981	0,9955	7
0,0001	25	invscaling	lbfgs	0,9923	0,9958	0,9979	0,9969	0,9947	0,9955	8
0,0001	100	constant	lbfgs	0,9904	0,9948	0,9980	0,9969	0,9969	0,9954	9
0,0100	150	constant	lbfgs	0,9927	0,9932	0,9964	0,9960	0,9986	0,9954	10

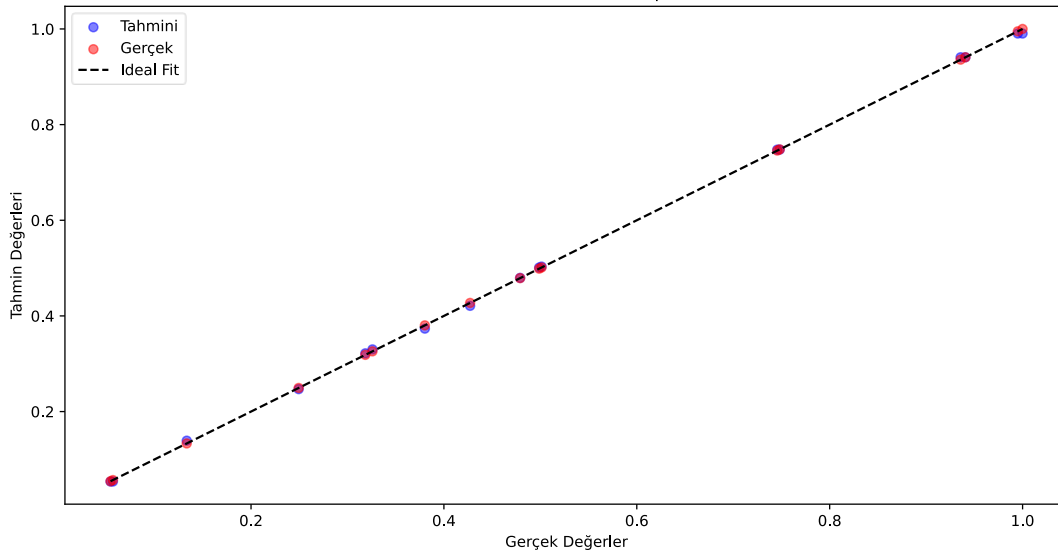
Ortalama R^2 değerlerine göre sıralama yapıldığında 1. sırada belirlenen model parametreleri; düzenleme değeri: 0,0001, gizli katman boyutu: 150, öğrenme hızı: ‘adaptive’ ve çözücü: ‘lbfgs’ olarak belirlenmiştir.

Seçilen en iyi parametreye göre yeniden model kurulmuştur. 81 adetlik veri setinin %80'i eğitim için %20'si ise test için rasgele olarak ayrılmıştır. Model tekrardan çalıştırılmıştır. Çalıştırılan algoritma sonucunda eğitim ve test setine ait Ortalama hataların karesi (MSE), Ortalama mutlak hata (MAE) ve Belirlilik katsayısı (R^2) değerleri hesaplanmıştır. Tablo 4.21'de gösterilmektedir.

Tablo 4.21. Eğitim ve test seti için MSE, MAE ve R^2 değerleri.

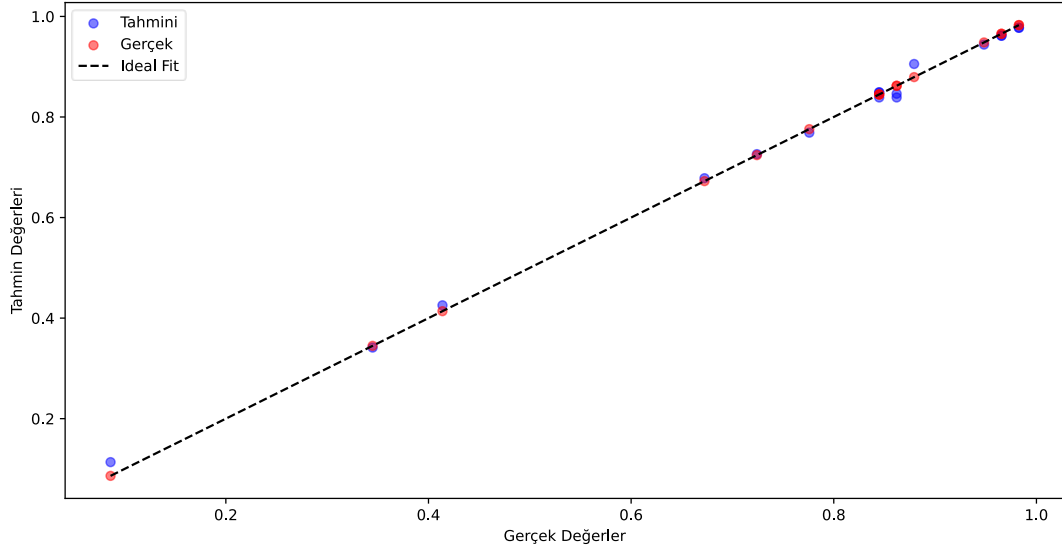
	Çevrim Süresi (ÇS)			Çarpıklık (Ç)		
	MSE	MAE	R^2	MSE	MAE	R^2
Eğitim Seti	0,00000767	0,00217482	0,99988522	0,00009971	0,00863820	0,99881820
Test Seti	0,00000917	0,00231217	0,99990677	0,00017047	0,01042452	0,99718888

Çevrim süresine göre gerçekleşen değerler ve tahmini değerler Şekil 4.11'de gösterilmektedir.



Şekil 4.11. Çevrim süresi çıktısı için gerçek ve tahmini değerlerin karşılaştırması.

Çarpıklık seviyesine göre gerçekleşen değerler ve tahmini değerler Şekil 4.12'de gösterilmektedir.



Şekil 4.12. Çarpıklık çıktısı için gerçek ve tahmini değerlerin karşılaştırması.

Modelin iki çıktı üzerinde de çok düşük hata payları ile gerçeğe oldukça yakın tahminler üretebildiği görülmüştür.

Modelin sonuçları incelendiğinde MSE, MAE ve R^2 değerlerinin oldukça iyi sonuçlar verdiği görülmüştür. Alınan sonuçlarda çevrim süresinin %99,8 ve çarpıklık seviyesinin %99,7 oranlarında tahminleme yapabildiği görülmüştür. Grafikler incelendiğinde çevrim süresinin tahmininde modelin gerçek değere çok yakın sonuçlar verdiği, çarpıklık seviyesinin tahmininde ise bazı küçük sapmaların olduğu fakat bu sapmaların kabul edilebilir seviyede olduğu görülmüştür. Genel olarak değerlendirildiğinde modelin oldukça başarılı bir şekilde tahminleme yaptığı görülmüştür.



5. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

EPP köpük enjeksiyon üretimi yapan proseslerde, prosesin değişkenliğinin fazla olması ve karmaşık bir yapıya sahip olması sebebiyle diğer plastik enjeksiyon üretim yöntemlerine göre nispeten daha zor bir prosestir. EPP köpük enjeksiyon prosesini simüle eden bir program olmadığından yapılacak olan her bir üretim denemesi zaman ve maliyet kaybına sebebiyet vermektedir. Aynı zamanda EPP köpük enjeksiyon prosesine ait literatürde yeterli çalışma olmadığından hangi parametrenin hangi çıktı üzerinde ne kadar etkili olduğu da bilinmemektedir. Bu durum yapılan üretim denemelerinin operatörlerin geçmiş bilgi birikimlerine bağlı olarak deneme yanılma yöntemi ile uzun sürelerde gerçekleşmesine neden olmaktadır.

Bu çalışmada, EPP köpük enjeksiyon prosesinde çarpıklık seviyesinin minimumda tutularak çevrim süresinin azaltılması amacıyla Gri Tabanlı Taguchi yöntemi ve Yapay sinir ağları yöntemi kullanılarak yeni bir yaklaşım sunulmaktadır. EPP prosesi ile ilgili literatürde sınırlı sayıda çalışma olduğundan prosesi simüle eden bir model oluşturan öncü çalışmalardan biri olmaktadır.

Bu çalışmada, ilk olarak literatür taraması yapılmış, proses parametrelerine yönelik yeterli veri bulunamadığından proste kullanılan tüm parametreler çalışma kapsamına dahil edilmiştir. Taguchi metodu kullanılarak 11 adet parametre için 3'er seviye belirlenmiş ve L27 ortogonal diziye göre bir deney kombinasyonu oluşturulmuştur. Yapılan deneyler sonucunda çevrim süresi ve çarpıklık seviyesi çıktıları için parametrelerin ağırlıkları ve katkı yüzdeleri incelenmiş, optimum proses parametreleri belirlenmiştir. İki çıktı için farklı parametreler bulunduğu için iki çıktıyı da aynı anda optimize edebilmek amacıyla Gri ilişkisel analiz yönteminden yararlanılmıştır. Gri Tabanlı Taguchi yöntemi sonucunda "sabit taraf çapraz buhar süresi", "hareketli taraf çapraz buhar süresi", "otoklav süresi", "hareketli ve sabit taraf soğutma süresi" ve "köpük basıncı soğutma süresi" parametrelerinin iki çıktı için de anlamlı olduğu ve etkisinin diğer parametrelere göre daha yüksek olduğu görülmüştür. Çalışmanın devamında belirlenen beş parametre üzerinden devam edilmiş, diğer parametreler sabit tutulmuştur. L27 ortogonal diziye göre tekrar Taguchi metodu

kullanılmış ve her bir deney kombinasyonundan 3'er kez üretim alınarak 81 satırlık veri seti oluşturulmuştur. İki çıktı için tekrar Gri Tabanlı Taguchi metodu uygulanmış belirlenen beş parametrenin de anlamlı etkisi olduğu görülmüştür. İki çıktı için de optimal sonucu veren parametrenin sabit taraf çapraz buhar süresinin 5,5 sn, hareketli taraf çapraz buhar süresinin 5,5 sn, otoklav süresinin 11 sn, hareketli ve sabit taraf soğutma süresinin 65 sn ve köpük basıncı soğutma süresinin 30 sn olduğu belirlenmiştir.

İkinci aşamada YSA yöntemi ile çevrim süresi ve çarpıklık seviyesinin tahminlemesini sağlayan bir model oluşturulmuştur. Çapraz doğrulama metodu ile hiperparametre optimizasyonu yapılmış ve en iyi parametrenin belirlenmesi amaçlanmıştır. Yapılan çalışmada en iyi tahmin sonucunu veren model parametrelerinin düzenleme değeri: 0,0001, gizli katman boyutu: 150, öğrenme hızı: 'adaptive' ve çözücü: 'lbfgs' olarak belirlenmiştir. Belirlenen modelde 81 adetlik veri seti %80 eğitim ve %20 test olmak üzere rastgele olarak ayrılmış ve model tekrar çalıştırılmıştır. Alınan sonuçlarda çevrim süresinin %99,8 ve çarpıklık seviyesinin %99,7 oranlarında tahminleme yapabildiği görülmüştür.

EPP köpük enjeksiyon prosesinin incelendiği bu tez çalışmasında çalışma alanı ve yöntem açısından literatüre kazandırılan temel katkılar aşağıda maddeler halinde verilmiştir:

- EPP köpük enjeksiyon prosesinde kullanılan üretim parametrelerinin çevrim süresi ve çarpıklık seviyesi değerlerine sağladıkları katkı yüzdeleri ve etkileri belirlenmiştir.
- Taguchi metodu ile Gri ilişkisel analiz metodu birlikte kullanılarak hem çevrim süresinin minimumda tutulduğu hem de çarpıklık seviyesinin minimumda tutulduğu proses parametresi belirlenmiştir. Benzer geometrideki parçaların üretiminde kullanılması için bir öngörü sağlanmıştır.
- Literatürde EPP prosesine yönelik sınırlı sayıda çalışma bulunduğundan literatüre prosesin detaylı bir incelemesi sunulmuştur.
- Literatürde EPP köpük enjeksiyon prosesinin tahminlenmesine yönelik bir simülasyon programı veya geliştirilmiş bir model olmadığından üretim denemelerine süre ve maliyet harcamadan deney sonucunun alınabileceği bir model oluşturulmuştur.

Gelecekte yapılacak çalışmalarda kalıplara sıcaklık sensörü ve köpük basınç sensörü eklenerek sıcaklık ve köpük basıncı değeriinin de modele dahil edilmesi ile daha detaylı sonuçlar alınabilir.





KAYNAKLAR

- Abdul, R., Guo, G., Chen, J. C., & Yoo, J. J.-W. (2020). Shrinkage prediction of injection molded high density polyethylene parts with taguchi/artificial neural network hybrid experimental design. *International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM)*, 14(2), 345-357. <https://doi.org/10.1007/s12008-019-00593-4>
- Bensingh, R. J., Machavaram, R., Boopathy, S. R., & Jebaraj, C. (2019). Injection molding process optimization of a bi-aspheric lens using hybrid artificial neural networks (ANNs) and particle swarm optimization (PSO). *Measurement*, 134, 359-374. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2018.10.066>
- Berger, P. D., Maurer, R. E., & Celli, G. B. (2018). Introduction to Taguchi Methods. *Experimental Design*. (2. Baskı, ss. 449-477) içinde. Springer International Publishing.
- Chung, C.-Y., Hwang, S.-S., Chen, S.-C., & Lai, M.-C. (2021). Effects of injection molding process parameters on the chemical foaming behavior of polypropylene and polystyrene. *Polymers*, 13(14), 2331. <https://doi.org/10.3390/polym13142331>
- Contreras, V., Maturana, F. J., Poveda, J., Núñez, K. C., Merino, J. C., & Pastor, J. M. (2021). Optimization of injection parameters to obtain selected properties on foamed PP with hollow glass microspheres and thermally expandable microspheres using Taguchi method. *Journal of Cellular Plastics*, 57(3), 313-327. <https://doi.org/10.1177/0021955X20943097>
- Etondia, H. V., Gaur, M. K., & Kushwaha, A. (2019). A Study on Response Parameters of Injection Moulding Process in Polypropylene Plastic using Grey Relational Analysis. *Journal of Experimental & Applied Mechanics*, 10(3), 30-39, <https://doi.org/10.37591/joeam.v10i3.3444>
- Farooque, R., Asjad, M., & Rizvi, S. J. A. (2021). A current state of art applied to injection moulding manufacturing process – A review. *Materials Today: Proceedings*, 43, 441-446. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.11.967>
- Feng, Q., Liu, L., & Zhou, X. (2020). Automated multi-objective optimization for thin-walled plastic products using Taguchi, ANOVA, and hybrid ANN-MOGA. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 106(1-2), 559-575. <https://doi.org/10.1007/s00170-019-04488-2>
- Guo, W., Deng, F., Meng, Z., Hua, L., Mao, H., & Su, J. (2020). A hybrid back-propagation neural network and intelligent algorithm combined algorithm for optimizing microcellular foaming injection molding process parameters. *Journal of Manufacturing Processes*, 50, 528-538. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2019.12.020>
- Haykin, S. S. (2009). *Neural networks and learning machines* (3. ed). Prentice-Hall.

- Heinisch, J., Lockner, Y., & Hopmann, C. (2021). Comparison of design of experiment methods for modeling injection molding experiments using artificial neural networks. *Journal of Manufacturing Processes*, 61, 357-368. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2020.11.011>
- Idayu, N., Ali, M. a. M., Fauadi, M. H. F. M., Razak, Z., & Khadim, K. J. (2023). Optimization of injection moulding parameters in reducing cavity pressure using taguchi method. *Journal of Advanced Manufacturing Technology (JAMT)*, 17(2). <https://jamt.utem.edu.my/jamt/article/view/6525>
- Joner, M. (2017). Fundamentals of Statistical Experimental Design and Analysis. *Journal of Quality Technology*, 49(2), 187-188. <https://doi.org/10.1080/00224065.2017.11917989>
- Lin, W.-C., Fan, F.-Y., Huang, C.-F., Shen, Y.-K., & Wang, H. (2022). Analysis of the Warpage Phenomenon of Micro-Sized Parts with Precision Injection Molding by Experiment, Numerical Simulation, and Grey Theory. *Polymers*, 14(9), 1845. <https://doi.org/10.3390/polym14091845>
- Liu, H., Chuai, C., Iqbal, M., Wang, H., Kalsoom, B. B., Khattak, M., & Qasim Khattak, M. (2011). Improving foam ability of polypropylene by crosslinking. *Journal of Applied Polymer Science*, 122(2), 973-980. <https://doi.org/10.1002/app.33227>
- Liu, S., & Lin, Y. (2011). *Grey Systems* (C. 68). Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-16158-2>
- Liu, S., Sifeng, L., & Lin, Y. (2006). *Grey information: Theory and practical applications*. Springer.
- Llewelyn, G., Rees, A., Griffiths, C., & Jacobi, M. (2020). A Design of Experiment Approach for Surface Roughness Comparisons of Foam Injection-Moulding Methods. *Materials*, 13(10), 2358. <https://doi.org/10.3390/ma13102358>
- Lunani, M., Nair, V. N., & Wasserman, G. S. (1997). Graphical Methods for Robust Design with Dynamic Characteristics. *Journal of Quality Technology*, 29(3), 327-338. <https://doi.org/10.1080/00224065.1997.11979774>
- Ma, Y., Dang, K., Wang, X., Zhou, Y., Yang, W., & Xie, P. (2023). *Intelligent recommendation system of injection molding process parameters based on CAE simulation, process window and machine learning* [Preprint]. In Review. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-2873220/v1>
- Mehta, E. S., & Padhi, S. N. (2023). Quality and Defect Prediction in Plastic Injection Molding using Machine Learning Algorithms based Gating Systems and Its Mathematical Models. *International Journal on Recent and Innovation Trends in Computing and Communication*, 11(3s), 216-230. <https://doi.org/10.17762/ijritcc.v11i3s.6183>
- Moayyedean, M., Dinc, A., & Mamedov, A. (2021). Optimization of Injection-Molding Process for Thin-Walled Polypropylene Part Using Artificial Neural Network and Taguchi Techniques. *Polymers*, 13(23), 4158. <https://doi.org/10.3390/polym13234158>
- Montesinos López, O. A., Montesinos López, A., & Crossa, J. (2022). *Multivariate Statistical Machine Learning Methods for Genomic Prediction*. Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-89010-0>

- Montgomery, D. C. (2013). *Design and analysis of experiments* (Eighth edition). John Wiley & Sons, Inc.
- Nakai, S., Taki, K., Tsujimura, I., & Ohshima, M. (2008). Numerical simulation of a polypropylene foam bead expansion process. *Polymer Engineering & Science*, 48(1), 107-115. <https://doi.org/10.1002/pen.20895>
- Nitnara, C., & Tragangoon, K. (2023). Simulation-Based Optimization of Injection Molding Process Parameters for Minimizing Warpage by ANN and GA. *International Journal of Technology*, 14(2), 422. <https://doi.org/10.14716/ijtech.v14i2.5573>
- Öktem, H., & Shinde, D. (2021). Determination of Optimal Process Parameters for Plastic Injection Molding of Polymer Materials Using Multi-Objective Optimization. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 30(11), 8616-8632. <https://doi.org/10.1007/s11665-021-06029-z>
- Rasch, D., Pilz, J., Verdooren, R., & Gebhardt, A. (2011). *Optimal Experimental Design with R*. (1st ed.). Chapman and Hall/CRC
- Román, A. J., Qin, S., Zavala, V. M., & Osswald, T. A. (2021). Neural network feature and architecture optimization for injection molding surface defect prediction of model polypropylene. *Polymer Engineering & Science*, 61(9), 2376-2387. <https://doi.org/10.1002/pen.25765>
- Rumianek, P., Dobosz, T., Nowak, R., Dziewit, P., & Aromiński, A. (2021). Static Mechanical Properties of Expanded Polypropylene Crushable Foam. *Materials*, 14(2), 249. <https://doi.org/10.3390/ma14020249>
- Sel, B. (2021). *Optimization of plastic injection process parameters using the taguchi method, machine learning and genetic algorithm* [Yüksek lisans tezi]. İstanbul Teknik Üniversitesi
- Solanki, B. S., Singh, H., & Sheorey, T. (2022). Effect of injection molding cycle time on shrinkage and weight of manufactured polymer gear. *Materials Today: Proceedings*, 62, A1-A6. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.06.430>
- Sopher, S. R., & Granthen, G. C. (2011). Material and Design Innovation Techniques for Expanded Polypropylene (EPP) Products Used in Automotive Interior Applications. *SAE International Journal of Materials and Manufacturing*, 4(1), 440-448. <https://doi.org/10.4271/2011-01-0247>
- Srivastava, V., & Srivastava, R. (2014). *A Review on Manufacturing, Properties and Application of Expanded Polypropylene*. 4(1).
- Tammaro, D., Ballesteros, A., Walker, C., Reichelt, N., & Trommsdorff, U. (2022). Expanded Beads of High Melt Strength Polypropylene Moldable at Low Steam Pressure by Foam Extrusion. *Polymers*, 14(1), 205. <https://doi.org/10.3390/polym14010205>
- Wang, G., Wang, Y., & Yang, D. (2021). Study on Automotive Back Door Panel Injection Molding Process Simulation and Process Parameter Optimization. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2021, 1-15. <https://doi.org/10.1155/2021/9996423>
- Yeon Soo Lee, Nam Hoon Park, & Hi Seak Yoon. (2010). Dynamic Mechanical Characteristics of Expanded Polypropylene Foams. *Journal of Cellular Plastics*, 46(1), 43-55. <https://doi.org/10.1177/0021955X09346363>

- Yu, L., Zhu, Q., & Yu, J. (2013). Development and application of expanded polypropylene foam. *Journal of Wuhan University of Technology-Mater. Sci. Ed.*, 28(2), 373-379. <https://doi.org/10.1007/s11595-013-0698-1>
- Zhai, W., Kim, Y.-W., & Park, C. B. (2010). Steam-Chest Molding of Expanded Polypropylene Foams. 1. DSC Simulation of Bead Foam Processing. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 49(20), 9822-9829. <https://doi.org/10.1021/ie101085s>
- Zhang, T., Chen, K., Liu, G., & Zheng, X. (2019). Injection Molding Process Optimization of Polypropylene using Orthogonal Experiment Method Based on Tensile Strength. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 612(3), 032102. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/612/3/032102>
- Zilouchian, A. (2001). *Fundamentals of neural networks*.



ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad : Nilay ERKAN

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2018, Sakarya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Endüstri Mühendisliği

MESLEKİ DENEYİM:

- 2017-2022 yılları arasında Atermit Firmasında Planlama ve Lojistik Uzmanı olarak görev yaptı.
- 2022 yılından beri Atermit Firmasında Planlama ve Lojistik Şefi olarak görev yapmaktadır.

DİĞER ESERLER:

- Kiraz, A., Gençer, N., Taş, M., Teke, Ç. (2018). Bulanık AHP ve Bulanık TOPSIS Yöntemleri ile Sakarya İlinin Yatırım Öncelikli Sektörlerinin Belirlenmesi. Bayburt Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, 1(1), 42-52.