

Bir Cam Fabrikasında Operasyonel Hataları Önlemeye Yönelik Risk Değerlendirme  
Modeli Uygulaması

Necati Yağız Zeybek

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı

Temmuz 2024

Implementation of a Risk Assessment Model to Prevent Operational Defects in a Glass  
Factory

Necati Yağız Zeybek

**MASTER OF SCIENCE THESIS**

Department of Industrial Engineering

July 2024

Bir Cam Fabrikasında Operasyonel Hataları Önlemeye Yönelik Risk Değerlendirme  
Modeli Uygulaması

Necati Yağız Zeybek

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliği Uyarınca  
Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı  
Endüstri Mühendisliği Bilim Dalında  
YÜKSEK LİSANS TEZİ  
Olarak Hazırlanmıştır.

Danışman: Prof.Dr. Ezgi AKTAR DEMİRTAŞ

Temmuz, 2024

## ONAY

Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı Yüksek Lisans öğrencisi Necati Yağız ZEYBEK'in YÜKSEK LİSANS tezi olarak hazırladığı " Bir Cam Fabrikasında Operasyonel Hataları Önlemeye Yönelik Risk Değerlendirme Modeli Uygulaması" başlıklı bu çalışma, jürimizce lisansüstü yönetmeliğin ilgili maddeleri uyarınca değerlendirilerek oy birliği ile kabul edilmiştir.

**Danışman** : Prof.Dr. Ezgi Aktar DEMİRTAŞ

**İkinci Danışman** : --

### **Yüksek Lisans /Doktora Tez Savunma Jürisi:**

Üye: Prof.Dr. Ezgi Aktar DEMİRTAŞ

Üye: Prof.Dr. Aydın SİPAHİOĞLU

Üye: Doç.Dr. Fehmi Burçin ÖZSOYDAN

Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun ..... tarih ve  
..... sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Prof. Dr. ....

Enstitü Müdürü

## ETİK BEYAN

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kılavuzuna göre, Prof Dr. Ezgi Aktar DEMİRTAŞ danışmanlığında hazırlamış olduğum **Bir Cam Fabrikasında Operasyonel Hataları Önlemeye Yönelik Risk Değerlendirme Modeli Uygulaması** başlıklı Yüksek Lisans tezimin özgün bir çalışma olduğunu; tez çalışmamın tüm aşamalarında bilimsel etik ilke ve kurallara uygun davrandığımı; tezimde verdiğim bilgileri, verileri akademik ve bilimsel etik ilke ve kurallara uygun olarak elde ettiğimi; tez çalışmamda yararlandığım eserlerin tümüne atıf yaptığımı ve kaynak gösterdiğimi ve bilgi, belge ve sonuçları bilimsel etik ilke ve kurallara göre sunduğumu beyan ederim. 08/07/2024

Necati Yağız ZEYBEK

## ÖZET

Hata Türü ve Etkileri Analizi (Failure Mode and Effect Analysis-FMEA), işletmelerin üretim süreçlerinde ortaya çıkabilecek potansiyel hataları ve bu hataların neden olabileceği zararları belirlemeye yönelik sistematik bir yöntemdir. Bu analiz tekniği, hataların nedenlerini ve etkilerini inceleyerek, işletmelerin bu hataları önleyici tedbirler almasını sağlar ve böylece üretim süreçlerindeki aksaklıkları en aza indirir veya tamamen ortadan kaldırır. FMEA, ayrıca işletmelerin operasyonel maliyetlerini azaltırken, ürün ve hizmet kalitesini artırmada da önemli bir rol oynar.

Çalışmada, cam üretim proseslerinden biri olan pres üretim için proses FMEA yapılmıştır. Analiz sonucunda, olası hata türleri tanımlanmıştır. Yapılan FMEA sonuçlarına göre kontrol planı revize edilmiştir.

Pres üretim prosesi ile üretilen bir ürüne ait şekillendirme kaynaklı hatalar için mevcut durum analiz edilmiştir. Üretim kaybına neden olan hataların başlıca kök nedeni olan, damla ağırlığı değişiminin kontrol altına alınabilmesi için sistem entegrasyonu planlanmıştır. Damla ağırlığı ölçüm ekipmanı ve ölçümcü güvenilirliğini ölçmeye yönelik Ölçüm Sistemleri Analizi (Measurement System Analysis-MSA) çalışması ve ağırlık dağılımının yeterliliğini ölçmeye yönelik İstatistiksel Süreç Kontrolü (Statistical Process Control-SPC) çalışmaları yapılmıştır.

Damla pozisyonu, sıcaklığı ve ağırlığı kaynaklı hata oranını azaltmaya yönelik, otomatik ağırlık ölçüm sistemi kurulumu ve entegrasyonu planlanmıştır. Damlaya ait parametrelerin kontrol altında tutulmasıyla birlikte, kalitesizlik maliyetleri ile ıskarta oranlarının azaltılması ve işgücünde optimizasyon sağlanması hedeflenmiştir.

Otomatik ağırlık ölçüm sistemi entegrasyonu sonrası damla ağırlıklarına ait veriler için istatistiksel süreç kontrolü çalışması tekrarlanmış, hata oranları dağılımı analiz edilmiştir. Damla ile ilgili parametreler kontrol altına alındığında, ıskarta oranlarında ve kalitesizlik maliyetlerinde azalma olduğu görülmüştür.

**Anahtar Kelimeler:** Hata Türü ve Etkileri Analizi, Kontrol Planı, İstatistiksel Süreç Kontrolü, Ölçüm Sistemleri Analizi, Süreç Yeterlilik Analizi

## SUMMARY

Failure Mode and Effects Analysis (FMEA) is a systematic method for identifying potential failures in production processes and the damages these failures may cause. This analytical technique examines the causes and effects of failures, enabling to take preventive measures to minimize or completely eliminate disruptions in production processes. FMEA also plays a crucial role in reducing operational costs while enhancing the quality of products and services.

In this study, a process FMEA was conducted for press production, which is one of the glass production processes. As a result of the analysis, potential failure modes were identified. Based on the FMEA results, the control plan was revised.

The current situation for forming-related defects in a product produced by the press production process has been analyzed. To control the main root cause of production losses, which is the variation in gob weight, system integration was planned. A Measurement Systems Analysis (MSA) was conducted to assess the reliability of the gob weight measurement equipment and the measurers, along with Statistical Process Control (SPC) studies to measure the adequacy of the weight distribution.

An automatic gob weight measurement system was planned to be installed and integrated to reduce the error rate caused by gob position, temperature, and weight. By keeping the parameters of the gob under control, the aim was to reduce quality costs, scrap rates, and optimize the workforce.

After the integration of the automatic gob weight measurement system, statistical process control studies were repeated for the data on gob weights, and the distribution of error rates was analyzed. It was observed that when the parameters related to the gob were controlled, there was a reduction in scrap rates and quality-related costs.

**Keywords:** Failure Mode and Effects Analysis, Control Plan, Statistical Process Control, Measurement Systems Analysis, Process Capability Analysis

## TEŞEKKÜR

Hazırlamış olduğum yüksek lisans tezimin tüm aşamalarında değerli yardım ve katkılarıyla beni yönlendiren, tez danışmanım Sayın Prof. Dr. Ezgi AKTAR DEMİRTAŞ'a saygı ve teşekkürlerimi sunuyorum.

Tez çalışmam sırasında ihtiyaç duyduğum tüm veriler için yardımcı olan, konu hakkındaki yetkinliğimi arttırmak için tüm imkanları sağlayan, bir parçası olmaktan her an gurur duyduğum ŞİŞECAM ailesine ve özellikle ŞİŞECAM Cam Ev Eşyası Eskişehir Fabrikası'na minnetlerimi iletiyorum.

Hayatımın her döneminde olduğu gibi, bu süreçte de desteklerini yanımda hissettiğim aileme ve eşim Gül ZEYBEK'e teşekkür ediyorum. Tezimi, sevgili aileme ve çocuklarım Alya ZEYBEK ve Aras ZEYBEK'e ithaf ediyorum.

## İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
<b>ÖZET</b> .....	vi
<b>SUMMARY</b> .....	vii
<b>TEŞEKKÜR</b> .....	viii
<b>İÇİNDEKİLER</b> .....	ix
<b>ŞEKİLLER DİZİNİ</b> .....	xii
<b>ÇİZELGELER DİZİNİ</b> .....	xiii
<b>SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ</b> .....	xiv
<b>1. GİRİŞ VE AMAÇ</b> .....	1
<b>2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI</b> .....	5
2.1. FMEA ile İlgili Literatür Araştırması .....	5
2.2. MSA ile İlgili Literatür Araştırması .....	9
2.3. SPC ile İlgili Literatür Araştırması .....	11
<b>3. MATERYAL VE YÖNTEM</b> .....	14
3.1. FMEA'nın Tanımı ve Amaçları.....	14
3.2. FMEA'nın Tarihçesi .....	15
3.3. FMEA'nın Avantajları ve Dezavantajları .....	16
3.3.1. FMEA'nın Avantajları .....	16
3.3.2. FMEA'nın Dezavantajları .....	17
3.4. FMEA Tipleri .....	18
3.5. FMEA Uygulama Basamakları.....	20
3.6. FMEA Versiyonları .....	20
3.6.1. FMEA Versiyon 4 .....	20
3.6.2. FMEA Versiyon 5 .....	21
3.7. FMEA Aksiyon Önceliklerinin Belirlenmesi .....	23
3.7.1. Hata Etkisinin Şiddeti (S).....	23
3.7.2. Hata Nedeninin Oluşma Olasılığı (O).....	23
3.7.3. Tespit Edilebilirlik (D).....	24
3.7.4. Aksiyon Önceliklendirme (AP) .....	24
3.8. MSA'nın Tanımı ve Amaçları .....	24
3.9. Nicel MSA .....	25

## İÇİNDEKİLER

	<b><u>Sayfa</u></b>
3.9.1 Gage R&R Metotları .....	26
3.9.2. Ortalama ve Aralık Metodu .....	26
3.10. Nitel MSA.....	29
3.11. Nicel ve Nitel MSA'nın Karşılaştırılması .....	30
3.12. SPC'nin Tanımı ve Araçları .....	30
3.13. SPC'nin Tarihçesi .....	31
3.14. SPC'nin Temel İlkeleri .....	31
3.15. SPC Metotları .....	32
3.15.1. Çetele Diyagramı .....	32
3.15.2. Süreç Akış Şeması .....	32
3.15.3. Beyin Fırtınası.....	33
3.15.4. Histogram.....	33
3.15.5. Pareto Analizi.....	33
3.15.6. Neden – Sonuç Diyagramı .....	34
3.15.7. Kontrol Diyagramları .....	34
3.16. $\bar{x}$ ve s Grafikleri .....	34
3.16.1. $\bar{x}$ Grafiği .....	34
3.16.2. S (Standart Sapma) Grafiği .....	35
3.17. Süreç Yetenek Analizi .....	36
3.17.1. $C_p$ Hesaplama .....	36
3.17.2. $C_{pk}$ ve $C_m$ Hesaplama .....	37
<b>4. BULGULAR VE TARTIŞMA .....</b>	<b>39</b>
4.1. Pres Üretim Süreci İçin FMEA Uygulaması .....	45
4.2. Pres Üretim Süreci İçin Kontrol Planı Oluşturulması .....	49
4.3. Pres Üretim Süreci İçin Ürün Ağırlığına Yönelik MSA Uygulaması .....	51
4.4. Pres Üretim Süreci İçin Ürün Ağırlığına Yönelik SPC Uygulaması.....	53
4.4.1. Kontrol Grafikleri ile Sürecin İzlenmesi.....	55
4.4.2. Süreç Yetenek Analizi Çalışması.....	57
4.5. Kulplu Çay Bardağı Üretimlerine Yönelik Süreç İyileştirme Çalışmaları .....	57

## İÇİNDEKİLER

	<b><u>Sayfa</u></b>
4.5.1. Otomatik Damla Ağırlığı Ölçüm Sistemi Çalışma Prensipleri .....	58
4.5.1.1. <u>Damla Ağırlığı Belirleme</u> .....	58
4.5.1.2. <u>Damla Konumu Gözlemi</u> .....	59
4.5.1.3. <u>Damla Görseli Grafiği</u> .....	60
4.5.1.4. <u>Damla Sıcaklığı Ölçümü ve Grafik Gösterimi</u> .....	63
4.5.1.5. <u>Damla Formlarının Karşılaştırılması</u> .....	63
4.5.2. Sistemin Devreye Alınması .....	65
4.6. Otomatik Damla Ağırlığı Ölçüm Sistemi Sonrası Yapılan SPC Çalışması.....	67
4.6.1. Kontrol Grafikleri ile Sürecin İzlenmesi.....	68
4.6.2. Süreç Yetenek Analizi Çalışması.....	69
<b>5. SONUÇ VE ÖNERİLER .....</b>	<b>73</b>
<b>KAYNAKLAR DİZİNİ.....</b>	<b>76</b>
<b>EK AÇIKLAMALAR .....</b>	<b>83</b>
Ek Açıklamalar-A : FMEA Versiyon 5 Şiddet (S) Skor Çizelgesi.....	83
Ek Açıklamalar-B : FMEA Versiyon 5 Olasılık (O) Skor Çizelgesi.....	84
Ek Açıklamalar-C : FMEA Versiyon 5 Tespit Edilebilirlik (D) Skor Çizelgesi .....	85
Ek Açıklamalar-D : FMEA Versiyon 5 Aksiyon Önceliklendirme (AP) Çizelgesi .....	86
Ek Açıklamalar-E : Kontrol Grafikleri İçin Katsayılar Çizelgesi.....	87

## ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
4.1. Cam Ev Eşyası Üretimi Şematik Gösterim .....	40
4.2. Cam Ev Eşyası Süreç Akış Şeması.....	40
4.3. Kulplu Çay Bardağı Görseli .....	41
4.4. Pres Üretim Şekillendirme Süreç Akış Şeması .....	46
4.5. Pres Üretim Süreç Adımları AP Dağılımı .....	47
4.6. Pres Üretim Tekniği Şekillendirme Prosesi AP Sonuçları .....	48
4.7. Yüksek Öncelikli Aksiyonların Hata Nedenlerine Göre Dağılımı .....	49
4.8. Pres üretim süreç adımları kontrol edilen parametre dağılımı .....	50
4.9. $\bar{X}$ - s Kontrol Grafikleri .....	56
4.10. Süreç Yetenek Analizi Çalışması .....	57
4.11. Damla Ağırlığı Ölçüm Sistemi Kamera Yerleşimine Ait Görsel .....	58
4.12. Damla Ağırlığı Ölçüm Sistemi Ağırlık Gösterim Arayüzü.....	59
4.13. Damla Ağırlığı Ölçüm Sistemi Damla Konumu Gözlem Arayüzü .....	59
4.14. Damla Ağırlığı Ölçüm Sistemi Damla Uzunluğu Karşılaştırmalı Grafik .....	60
4.15. Damla Ağırlığı Ölçüm Sistemi Damla Çapı Karşılaştırmalı Grafik.....	61
4.16. Damla Ağırlığı Ölçüm Sistemi Damla Şekli Gözlem Arayüzü.....	61
4.17. Damla Ağırlığı Ölçüm Sistemi Manuel Kontrol Arayüzü.....	62
4.18. Damla Ağırlığı Ölçüm Sistemi Veri Gözlem Arayüzü .....	63
4.19. Damla Ağırlığı Ölçüm Sistemi Damla Sıcaklığı Gözlem Arayüzü.....	63
4.20. Damla Ağırlığı Ölçüm Sistemi Damla Form Karşılaştırma Arayüzü .....	64
4.21. Damla Ağırlığı Ölçüm Sistemi İkaz Lambası Görseli.....	64
4.22. Damla Ağırlığı Ölçüm Sistemi Fiili Damla Gözlem Ekranı .....	65
4.23. Damlalar Arası Uzunluk ve Çap Karşılaştırma .....	66
4.24. Damla Ağırlığı Ölçüm Sistemi Damlalar Arası Görsel Karşılaştırma .....	66
4.25. Damla Ağırlığı Ölçüm Sistemi Damlalar Arası Ağırlık Karşılaştırma Grafiği.....	67
4.26. İyileştirme sonrası $\bar{X}$ - s Kontrol Grafikleri .....	69
4.27. İyileştirme sonrası Süreç Yetenek Analizi Çalışması .....	70
4.28. İyileştirme sonrası Süreç Yetenek Analizi Çalışması .....	70

## ÇİZELGELER DİZİNİ

<u>Çizelge</u>	<u>Sayfa</u>
3.1. FMEA’da 7 Adım Yaklaşımı (AIAG & VDA, 2019).....	20
3.2. FMEA Versiyon 4 Avantajlar ve Dezavantajlar Çizelgesi.....	21
3.3. FMEA Versiyon 5 Avantajlar ve Dezavantajlar Çizelgesi.....	22
3.4. FMEA Versiyon 4 ve Versiyon 5 Karşılaştırma Çizelgesi .....	23
3.5. GRR Kabul Kriterleri .....	28
3.6. EV, AV ve PV Değerlerinin Anlamları.....	29
3.7. Süreç Yetenek İndeksinin Yorumlanması .....	37
4.1. 2023 Yılı Kulplu Çay Bardağı Üretim Bilgileri .....	43
4.2. Kulplu Çay Bardağı Karşılaşan Hata Pareto Diyagramı .....	43
4.3. Proseslerde Karşılaşılan Damla Ağırlığı Kaynaklı Hatalar Listesi .....	44
4.4. Damla Ağırlığı Kaynaklı Hatalara İlişkin Görseller.....	44
4.5. 2023 yılı Damla Ağırlığı Kaynaklı Kayıpların Maliyeti .....	45
4.6. Kulplu Çay Bardağı Ağırlık Ölçüm Sonuçları .....	51
4.7. Kulplu Çay Bardağı Ağırlık MSA Çalışması.....	52
4.8. Kulplu Çay Bardağı Ağırlık Verileri .....	54
4.9. Kulplu Çay Bardaklarına Ait İstatistiksel Veriler .....	55
4.10. Sistem Entegrasyonu Sonrası Kulplu Çay Bardağı Ağırlık Verileri .....	67
4.11. İyileştirme Sonrası Kulplu Çay Bardağı Ağırlıklarına Ait İstatistiksel Veriler .....	68
4.12. İstatistiksel Veri Karşılaştırma Çizelgesi .....	71
4.13. İyileştirme Sonrası Üretim Verileri Karşılaştırma Çizelgesi.....	71
4.14. İyileştirme Sonrası Beklenen Kazanç Çizelgesi.....	72
4.15. FMEA Karşılaştırma Çizelgesi.....	72

**SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ****Simgeler****Açıklama**

AV	Ölçümcü Varyasyonu
$C_m$	Merkezleme İndeksi
$C_p$	Süreç Yetenek İndeksi
$C_{pk}$	Uzun Dönem Süreç Yetenek İndeksi
EV	Cihaz Varyasyonu
FMEA	Hata Türü ve Etkileri Analizi
GRR	Ölçüm Sistemi Varyasyonu
LCL	Alt Kontrol Sınırı
MSA	Ölçüm Sistemleri Analizi
NDC	Ayrılık Kategori İndisi
PV	Parça Varyasyonu
RPN	Risk Öncelik Puanı
QFD	Kalite Fonksiyon Yayılımı
SPC	İstatistiksel Süreç Kontrolü
TV	Toplam Varyasyon
UCL	Üst Kontrol Sınırı

## 1. GİRİŞ VE AMAÇ

Camın üretim tarihi, insanlık tarihinin en eski dönemlerine kadar uzanır. İlk cam eserlerinin MÖ 3500 civarında Mezopotamya ve Mısır'da ortaya çıktığı düşünülmektedir. Bu dönemde cam, genellikle küçük boncuklar ve süs eşyaları şeklinde üretilmiştir. Camın geniş çapta kullanımı, MÖ 1500 yıllarında Mısırlılar tarafından yapılan cam kapların üretilmesiyle başlamıştır. Mısırlılar, kum ve soda karışımını yüksek ısılarla eriterek cam elde etmişlerdir. Bu yöntem, modern cam üretiminin temellerini oluşturmuştur.

Camın yaygınlaşması, Romalılar döneminde hız kazanmıştır. Romalılar, cam üfleme tekniğini geliştirerek cam üretiminde büyük bir ilerleme kaydetmişlerdir. Bu teknik, camın şekillendirilmesini kolaylaştırmış ve cam kapların, pencerelerin ve süs eşyalarının daha geniş kitlelere ulaşmasını sağlamıştır. Roma İmparatorluğu'nun çöküşünden sonra cam üretimi, Orta Çağ boyunca Bizans ve İslam dünyasında gelişmeye devam etmiştir. Özellikle Venedik'te Murano Adası, 13. yüzyılda cam üretiminde bir merkez haline gelmiş ve cam sanatı burada zirveye ulaşmıştır.

Sanayi Devrimi, cam üretiminde devrim niteliğinde değişiklikler getirmiştir. 19. yüzyılın sonlarında, otomatik cam üfleme makineleri ve sürekli bant teknolojileri geliştirilmiştir. Bu yenilikler, cam üretiminde verimliliği artırmış ve maliyetleri düşürmüştür. Cam, artık yalnızca lüks bir malzeme olmaktan çıkarak, günlük yaşamın vazgeçilmez bir parçası haline gelmiştir. Bu dönemde pencere camları, şişeler, lambalar ve aynalar gibi birçok cam ürünü yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır.

Günümüzde cam üretimi, ileri teknoloji ve mühendislik yöntemleriyle gerçekleştirilmektedir. Modern cam fabrikaları, büyük ölçekte cam üretimi yapabilen otomatik makinelerle donatılmıştır. Bu fabrikalarda kullanılan ana hammadde kum, soda külü ve kireçtaşıdır. Bu malzemeler yüksek sıcaklıklarda eritilerek cam haline getirilir ve ardından istenilen şekil ve boyutlarda kalıplanır.

Cam üretimi, sürdürülebilirlik ve çevre dostu üretim teknikleriyle gelişmeye devam etmektedir. Geri dönüştürülebilir bir malzeme olan cam, atık yönetimi ve enerji tasarrufu açısından önemli avantajlar sunmaktadır. Cam üretiminde kullanılan enerji miktarını

azaltmak ve karbon ayak izini küçültmek için yenilenebilir enerji kaynakları ve gelişmiş fırın teknolojileri kullanılmaktadır. Ayrıca, akıllı camlar ve enerji tasarruflu camlar gibi yenilikçi ürünler, gelecekte camın kullanım alanlarını daha da genişletecektir.

Sonuç olarak, cam üretimi, tarih boyunca önemli bir gelişim göstermiş ve günümüzde ileri teknolojiyle desteklenen geniş bir endüstri haline gelmiştir. Cam, modern yaşamın birçok alanında vazgeçilmez bir malzeme olarak kullanılmakta ve gelecekte de inovatif yaklaşımlarla gelişimini sürdürecektir.

Yapılan tez çalışmasında, 1997 yılından beri faaliyetini sürdüren bir cam ev eşyası üretim fabrikasında pres üretim tekniği ile üretilen kulplu çay bardakları için proses veriminin artırılması ve şekillendirme prosesi esnasında meydana gelen operasyonel kayıpların azaltılması hedeflenmiştir.

Çalışmada ilk olarak cam üretiminin tarihine değinilmiş ve yaklaşık 5500 yıldır var olduğu düşünülen cam üretiminin tarihçesine değinilmiştir. Daha sonra geri dönüştürülebilir bir madde olan camın sürdürülebilir ve çevre dostu olma özelliklerinden bahsedilmiştir. Gelecekte de büyük bir potansiyele sahip olduğu düşünülen cam sektörü için, bir cam ev eşyası fabrikasındaki en büyük üretim kapasitesine sahip ürünlerden olan kulplu çay bardağı üretim sürecinin veriminin önemine değinilmiştir.

İkinci bölümde konuya ilişkin literatür çalışmasının detayları aktarılmıştır. FMEA'ya yönelik literatür çalışması yapılarak, yoğunlukla kullanıldığı sektörler ve cam üretimindeki uygulama örnekleri araştırılmıştır. Özellikle, düz cam üretim ve şişe üretim süreçlerine yönelik çalışmalar olduğu görülmüş, ancak cam ev eşyası üretimine dair sınırlı sayıda yayına erişilmiştir. Bu yayınların içeriğinde de, cam ev eşyası üretiminde yaşanan kayıplara ilişkin FMEA çalışmasına ve sonrasında FMEA sonucu ortaya çıkan hata etkilerini azaltmak için alınan aksiyon uygulamalarına ve proses boyunca oluşan kayıpların azaltılmasına yönelik yapılmış MSA ve SPC uygulamasına rastlanılmamıştır.

Üçüncü bölümde, çalışma içeriğinde yararlanılan FMEA tekniği detaylı olarak anlatılmış ve geleneksel FMEA çalışmasında belirlenen Şiddet (Severity-S), Olasılık (Occurrence-O) ve Tespit Edilebilirlik (Detection-D) puanlarının çarpımıyla ortaya çıkan

Risk Öncelik Puanına (Risk Priority Number-RPN) göre belirlenen aksiyon önceliklendirmesi ile, yeni FMEA uygulamasına göre, S, O ve D puanlarının değişik kombinasyonlarına göre belirlenmiş Aksiyon Önceliklendirme (Action Prioritization-AP) derecesinin karşılaştırması yapılmıştır.

FMEA uygulamasına göre, en önemli hata kaynağı olan ağırlık parametresinin ölçüm güvenilirliğini belirlemeye yönelik kullanılan MSA anlatılmıştır. MSA türleri hakkında bilgi verilmiş ve çalışmada kullanılan nicel MSA hakkında detaylı bilgi verilmiştir. Nicel MSA çalışmalarının tipleri olan Aralık Metodu, Ortalama ve Aralık Metodu ve ANOVA Metoduna değinilmiştir. Çalışmadaki MSA için tercih edilen Ortalama ve Aralık Metoduna ilişkin hesaplama yöntemleri detaylı bir şekilde anlatılmıştır.

MSA sonucu değerlendirmelerine göre yapılması gereken SPC çalışmaları, amaçları ve uygulamalar konusunda bilgi verilmiştir. Süreç yeterlilik analizleri kapsamında çalışmada kullanılan süreç yeterlilik (Process Capability- $C_p$ ) ve süreç yeterlilik indeksi (Process Capability Index- $C_{pk}$ ) ve makine yeterliliği (Machine Capability- $C_m$ ) uygulamaları anlatılmıştır.

Çalışmanın dördüncü bölümünde, cam ev eşyası üretim tesisi ve buradaki üretim süreçleri hakkında genel bir bilgilendirme yapılmıştır. Toplam üretim içerisinde en büyük orana sahip pres üretim yöntemi ve bu yöntemle üretimi gerçekleştiren kulplu çay bardağı üretimleri hakkında bilgi verilmiştir. Kulplu çay bardakları üretimlerinin şekillendirme sonucu meydana gelen operasyonel kayıpları, hazırlanan pareto diyagramı ile analiz edilmiştir. Analiz sonuçlarına göre, damla ağırlıkları kaynaklı hataların ön plana çıktığı görülmüştür.

Pres üretim sürecindeki operasyonel hatalara yönelik FMEA çalışması yapılması planlanmıştır. Öncelikle ekip üyeleri belirlenmiş ve süreç adımları çıkarılmıştır. Daha sonrasında, pres üretim sürecinin tüm adımlarını içerecek şekilde süreç akış şeması hazırlanmıştır. Çalışma kapsamında, sürecin her bir adımı için belirlenmiş ekiplerle istatistiksel veriler ve grup karar verme tekniklerinden beyin fırtınası yöntemi kullanılarak FMEA uygulamaları gerçekleştirilmiştir. Tez kapsamında ise, şekillendirme sürecine ilişkin çalışmalardan ayrıntılı olarak bahsedilmiştir. Alınması gereken aksiyon önceliklendirme

çalışmaları yapılmış, sürece ait mevcut kontrol planları incelenmiş ve FMEA sonuçlarına göre kontrol planları revize edilmiştir.

Pareto analizi ve FMEA sonuçları incelendiğinde, öncelikli aksiyon olarak, damla ağırlıklarını kontrol altına almaya yönelik yapılacak çalışmalara başlanması belirlenmiştir. Damla ağırlık ölçümleri için nicel MSA, Ortalama ve Aralık Metodu ile yapılmış ve ölçüm sisteminin kabul edilebilir çıkması sonucu, bu sistemle elde eden verilerle SPC çalışmaları yürütülmüş, süreç yeterliliği incelenmiştir. Süreç yeterlilik analizi sonuçlarından da damla ağırlıkları dağılımının geliştirilebilir durumda çıkması sonucu, dağılımı daha da kontrol altında tutabilmek için teknolojik yatırım yapılması kararlaştırılmıştır. Yapılan incelemeler sonucu otomatik damla ağırlığı ölçüm sistemi entegrasyonunun ağırlık dağılımını kontrol altında tutabileceği görülmüş, böylece de optimum damla ağırlığı ile yapılacak üretimin, ürün verimliliğinin artmasına ve operasyonel kayıpların azaltılmasına katkı sağlayacağı düşünülmüştür. Damla ağırlığı ölçüm sisteminin çalışma prensipleri hakkında bilgilendirme yapılmış ve pres üretim hattına kurulumu sonrası, kulplu çay bardağı imalatında ağırlık değerlerine yönelik SPC gerçekleştirilmiştir. Sistem entegrasyonu öncesi ve sonrası  $\bar{X}$ , S,  $C_m$ ,  $C_p$  ve  $C_{pk}$  değerleri karşılaştırılmış ve kampanya hata analizi gerçekleştirilmiştir. Damla ağırlık ölçüm sistemi öncesi FMEA ile belirlenen “Yüksek” öncelikli hata nedenlerinin, sistem kurulumu sonrası tekrar değerlendirmesi yapılmıştır.

Çalışmanın beşinci bölümü olan sonuç ve öneriler kısmında ise, sistem entegrasyonu sonrası, takip edilen üretimdeki operasyonel kayıpların analizi, ürün maliyetine etkisini içermektedir. Yeni versiyon FMEA ve ürün hatalarına yönelik hazırlanmış pareto diyagramı ile ortaya çıkan, operasyonel kayıpları azaltabilmek için damla ağırlıklarının kontrol altına alınması gereksinimi, MSA ve SPC uygulamalarıyla da desteklenmiş ve cam ev eşyası üretimine yönelik daha önce literatürde yer almamış şekilde bütünleşik bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Şirketin, bir üretim hattında uygulanan damla ağırlığı ölçüm sistemini diğer hatlarda da uygulaması halinde, operasyonel verimliliğin ve potansiyel kazancın daha da artacağı önerisiyle çalışma tamamlanmıştır.

Çalışmada yararlanılan veriler, firmanın veri gizliliği politikası nedeniyle gölgeleme yapılarak kullanılmıştır.

## 2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Yapılan tez çalışmasında, cam fabrikasında pres üretim prosesi ile üretilen kulplu çay bardaklarına yönelik FMEA çalışmasını takiben, ağırlık ölçüm ekipmanı ve ölçümcü güvenilirliğini belirlemeye yönelik MSA çalışması planlanmıştır. Sonrasında ise süreç yeterliliğini belirlemeye yönelik SPC uygulaması yapılmıştır. Literatür araştırması yapılırken bu unsurlar göz önüne alınmıştır.

### 2.1. FMEA ile İlgili Literatür Araştırması

FMEA yöntemi, çeşitli sektörlerde ve alanlarda yaygın olarak kullanılmaktadır. FMEA'nın yaygın olarak kullanıldığı alanlar için araştırma yapıldığında çıkan sonuçlar şu şekildedir:

- Otomotiv endüstrisinde, güvenlik ve kalite kontrol süreçlerinde sıklıkla kullanılır. Ürün tasarımı, üretim süreçleri ve tedarik zinciri yönetiminde potansiyel hata modlarını analiz etmek için yaygın olarak uygulanır. (Yousaf vd., 2023, Güzel, 2022; Özcan, 2021)
- Havacılık ve uzay sektöründe, güvenlik ve güvenilirlik kritik öneme sahiptir. FMEA, uçak ve uzay aracı bileşenlerinin ve sistemlerinin güvenlik risklerini değerlendirmek için kullanılır. (Kazula, 2024; Kang vd., 2024; Basnet vd., 2023)
- Sağlık sektöründe, tıbbi cihazlar ve hastane operasyonlarının güvenliğini ve etkinliğini artırmak amacıyla FMEA kullanılır. Hastane süreçlerinin analizi ve tıbbi cihazların güvenlik değerlendirmelerinde yaygın bir yöntemdir. (Önder, 2019; Can, 2022; Gan vd., 2020)
- İlaç sektöründe, ilaç geliştirme ve üretim süreçlerinde, FMEA potansiyel riskleri ve hata modlarını belirlemek için kullanılır. Ürün kalitesini ve hasta güvenliğini sağlamak için kritik bir araçtır. (Arnal-Velasco ve Barach, 2021; Singhvi vd., 2021; Qu vd., 2024)
- Elektronik endüstrisinde, cihazların ve yarı iletken bileşenlerin tasarımı ve üretiminde FMEA, ürün kalitesini ve güvenilirliğini artırmak için uygulanır. (Özkılınç, 2023; Ateş, 2016; Ahire ve Relkar, 2012)
- Gıda üretim ve işleme süreçlerinde, potansiyel hata modlarını ve bu hataların etkilerini analiz etmek amacıyla FMEA kullanılır. Gıda güvenliği ve kalite kontrol

süreçlerinde önemli bir yer tutar. (Gopal vd., 2023; Kavşara, 2019; Bouzembrak vd., 2024)

- Enerji santralleri ve elektrik dağıtım sistemlerinde, FMEA potansiyel arıza modlarını ve bu arızaların sistem üzerindeki etkilerini değerlendirmek için kullanılır. (Taşkan vd., 2021; Soares vd., 2021; Peters vd., 2024)

FMEA yönteminin ele alındığı çalışmalar incelendiğinde, geleneksel FMEA uygulaması ile gerçekleştirilenlerde dezavantajlı yönleri bulunması sebebiyle, yeni versiyon FMEA kullanımının yaygınlaşmaya başladığı görülmüştür. Yeni versiyon FMEA ile ilgili farklı sektörlerde yapılmış çalışmalar izleyen paragraflarda özetlenmiştir:

- Ayaz ve Ervural (2023), yılında yaptıkları çalışmada, FMEA versiyonlarının öznel değerlendirmeler, yetersiz risk önceliklendirme yöntemleri ve risk faktörlerinin önem seviyesinin göz ardı edilmesi gibi konularla eleştirildiğini belirterek, bu tür sorunların ele alındığı veri odaklı bir FMEA yaklaşımını tanıtmışlardır.
- Alnahhal vd. (2023) geleneksel FMEA yönteminin bazı sınırlamaları olduğunu dile getirmişlerdir. Çünkü faktörlerin eşit öneme sahip olduğu varsayımı ve uzmanların farklı bakış açılarına göre farklı sonuçlar doğurması gibi sorunları bulunduğunu belirtmişlerdir. Bu nedenle, belirsizliklerin ve öznelliklerin bu yöntemin yaygın problemleri olduğunu bildirmiş ve bu sınırlamaların üstesinden gelmek için, geleneksel FMEA'ya yönelik önerilen değişiklikler üzerinde yoğunlaşmışlardır.
- Mohanty (2014), FMEA'nın, endüstride bileşenlerin, parçaların veya daha büyük yatırım mallarının hata koşullarını önceden belirlemek için yaygın olarak kullanılan ve kabul gören bir yöntem olduğunu belirtmiştir. Bu yöntemin, genellikle ürün tasarım ve geliştirme süreçlerinde kullanıldığını, hataları ve arızaları daha erken aşamalarda önlemeyi hedeflediğini açıklamıştır. Böylece, hem bireysel bileşenlerin hem de tüm sistemin güvenilirliğinin artırılabilirdiği yönünde görüş bildirmiştir.
- Chang ve Cheng (2010), FMEA'nın, endüstride yaygın kullanılmasına rağmen, pratikte olasılık, şiddet ve tespit edilebilirlik göstergelerinin önemi arasında bir denge nadiren bulunduğunu belirtmişlerdir. Bu göstergeler için eşit ağırlıklar kullanmak çok uygun bulunmamaktadır. Ayrıca, bu üç göstergenin farklı puan kombinasyonlarının aynı RPN'ye sahip olabileceğini, ancak risk etkisinin durumdan duruma büyük ölçüde değişebileceğini anlatmışlardır. En kötü senaryoda, bu

durumun yüksek riskli hata modlarının fark edilmeden kalmasına yol açabileceğini bildirmişlerdir.

- Özcan (2021), IATF 16949:2016 Kalite Yönetim Sistemi kapsamında otomotiv üreticilerinin kullanmasını önerdiği İleri Ürün Kalite Planlaması (APQP), Üretim Parçası Onay Prosesi (PPAP), FMEA, SPC ve MSA tekniklerini, otomotiv tedarikçisi bir işletmenin metrolojik faaliyetlerine yönelik uygulamış ve üretim üzerindeki etkilerini incelemiştir. Sonuç olarak, bu yöntemlerin uygulanmasıyla üretim performansında bir artış sağlandığını, hata türlerinin önceden tespit edilerek engellendiğini ve verimliliğin arttığını bildirmiştir.
- Yee vd. (2014) bir cam üretim tesisi kuran firmanın proses performansını artırmak ve ürün kalitesini iyileştirmek amacıyla, histogram, kontrol grafikleri, pareto diyagramları, akış diyagramları ve neden-sonuç diyagramları gibi çeşitli istatistiksel araçlar ve teknikler kullanmışlardır. Sonuçlar, sürecin özelliklerinin sürecin yeteneğini belirlemede anahtar olduğunu ve süreç davranışı ile kabiliyetinin birbirleriyle güçlü bir ilişki içinde olduğunu göstermektedir. En sorunlu süreç olarak temperleme işlemi belirlenmiş ve analiz edilecek ürün olarak arka cam seçilmişlerdir. Temperleme işleminin, kesme işlemi ve ısıl baskı işlemine göre, red oranının fazla olduğu tespit edilmiştir. Fabrikada karşılaşılan sorunlara yönelik olarak mesleki eğitim, bakım, proses öncesi kontrol ve ayar süreçleri ele alınarak çözüm önerilerinde bulunulmuştur.
- Toptancı ve Erginel (2017), yaptıkları çalışmada bir inşaat firması için FMEA yöntemi kullanarak risk değerlendirmesi yapmışlar, sonrasında pareto analizi ile ilk %25'e karşılık gelen en önemli tehlike türlerini Kalite Fonksiyon Yayılımı (Quality Function Deployment- QFD) yöntemine eklemişlerdir. QFD yöntemi ile en önemli tehlike türleri ve alınabilecek önleyici tedbirler arasındaki ilişkileri belirleyip, tehlike türlerinin çoğunluğunun önlenmesi için alınacak önleyici tedbirlerin önem derecesine göre sıralamasını yapmışlardır.
- Yousaf vd. (2023) çalışmalarında otomobil aks muhafazalarının tasarım ve üretim süreçlerindeki yaygın hataları kapsamlı bir şekilde belirlemek ve değerlendirmek için FMEA kullanmışlardır. Dayanıklılığın azalması, hatalı boşluk, delik pozisyonunun hatalı olması, çapaklı kenarlar ve delik pozisyonunun hatalı olması olmak üzere beş önemli hata modu üzerinde durmuşlardır. Önerilen çözümlerin uygulanmasıyla ve tasarım optimizasyonu ile RPN değerlerinde önemli düşüşler sağlanmıştır.

Çözümlerin uygulanmasının, müşteri memnuniyetinin artması, hata oranlarının azalması, ürün/süreç kalitesi ve güvenilirliğinin yükselmesi, süreçlerin iyileştirilmesi ve kaynak kullanımının optimize edilmesi gibi birçok fayda sağlayacağını bildirmişlerdir.

- Hassan vd. (2010) çalışmalarında kalite/maliyet odaklı kavramsal süreç planlaması geliştirmek için bir yaklaşım önermişlerdir. Süreç planı ile ilişkili risk maliyetini göz önünde bulundurarak, üretim maliyetinin tahminiyle birlikte anahtar süreç kaynaklarını belirlemeyi amaçlamışlardır. Süreç alternatiflerini seçmek için QFD yöntemi kullanılmışlardır. QFD yöntemindeki kalite özellikleri ve süreç elemanları, süreç FMEA tablosunu tamamlamak için girdi olarak alınmıştır. Üretim maliyetini tahmin etmek için faaliyet tabanlı maliyetleme yöntemi kullanılmıştır. Daha sonra, incelenen süreç planıyla ilişkili risk maliyetlerini tahmin etmek için maliyet tabanlı FMEA uygulanmıştır.
- Göksu (2021), çalışmasında gemi operasyonlarındaki riskleri artıran dinamik faktörleri tespit etmiş ve bunların değerlendirilmesine yönelik FMEA yöntemi kullanmıştır. Belirlenen değişkenlerin olası riskleri hangi oranda artırdığını belirleme için ön anket çalışması yapılmıştır. Belirlenen hata türlerinin ortaya çıkma sebeplerini, bunlar ortaya çıktığında karşılaşılan durumlar ve bu hata türlerinin operasyon esnasında tespitinin mümkün olup olmayacağını değerlendirmesi yapılmıştır. Klasik FMEA'daki hatalı ölçüm ve uzman değerlendirmelerinden kaynaklanan belirsizliğin ortadan kaldırılması için çalışmaya bulanık küme teorisi dahil etmiştir.
- Kolukırık (2021), yüksek lisans tezinde, ilk olarak küçük parti süreç kontrol diyagramları seçim kriterlerini incelemiştir. FMEA ile incelenen süreçlerin hata risk seviyelerine göre sıralamasını yapmış ve buna göre SPC uygulanabilecek süreçlerin tanımlamasını gerçekleştirmiştir. SPC gerçekleştirilecek süreçlerde, süreç tipi ve üretim modeli dikkate alınarak, uygun kontrol grafikleri önermiş ve süreçlerdeki kontrol grafiklerini oluşturularak, süreç yeterliliklerini değerlendirmiştir.
- Musubeyli Erginel (2004), yaptığı çalışmada mekanik termostat parçaları için, müşteri gereksinim ve isterlerini dikkate alarak, Analitik Hiyerarşi Prosesi ile önceliklendirmesi yapılan parçalara tasarım FMEA uygulamıştır.

FMEA yöntemi, genellikle güvenlik ve kalitenin kritik olduğu alanlarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu yöntem, potansiyel hata modlarını erken aşamalarda belirleyerek, bu hataların önlenmesine veya etkilerinin azaltılmasına yardımcı olur.

## 2.2. MSA ile İlgili Literatür Araştırması

MSA, çeşitli sektörlerde kalite kontrol ve süreç iyileştirme çalışmaları için yaygın olarak kullanılan kritik bir yöntemdir. MSA, ölçüm sistemlerinin doğruluk, hassasiyet ve güvenilirliğini değerlendirerek, üretim süreçlerinin ve ürünlerin kalitesini artırmak için kullanılır. MSA'nın yaygın olarak kullanıldığı alanlara bakılacak olursa;

- Otomotiv sektöründe MSA, parça üretimi ve montaj süreçlerinde ölçüm sistemlerinin performansını değerlendirmek için sıkça kullanılır. Motor bileşenlerinin, şanzıman parçalarının ve diğer kritik otomotiv parçalarının ölçümleri MSA ile analiz edilir. Bu yöntem, parçaların spesifikasyonlara uygunluğunu ve üretim süreçlerinin tutarlılığını sağlamak için önemlidir. (Özcan, 2021)
- Havacılık ve uzay sanayii, güvenilirliğin ve güvenliğin son derece önemli olduğu bir alandır. Bu sektörde MSA, uçak parçalarının ve sistemlerinin üretiminde kullanılan ölçüm ekipmanlarının doğruluğunu ve hassasiyetini değerlendirmek için kullanılır. Kanat parçaları, iniş takımları ve motor bileşenleri gibi kritik parçaların üretiminde ölçüm sistemlerinin güvenilirliği hayati öneme sahiptir. (Zhao vd., 2022)
- Tıp ve sağlık hizmetlerinde, ölçüm sistemlerinin doğruluğu ve güvenilirliği, hasta güvenliği ve tedavi kalitesi açısından kritik öneme sahiptir. Tıbbi cihazların kalibrasyonu, laboratuvar testleri ve tanısal ölçümlerin doğruluğu MSA ile analiz edilir. (Zwetsloot vd., 2019; Ross vd., 2022; Gradl, 2022)
- Elektronik ve yarı iletken endüstrisinde, ürünlerin hassas toleranslarla üretilmesi gerekmektedir. Bu sektörde MSA, devre kartları, mikroçipler ve diğer elektronik bileşenlerin üretiminde kullanılan ölçüm ekipmanlarının doğruluğunu ve tutarlılığını değerlendirmek için kullanılır. Üretim sürecinin her aşamasında, yüksek hassasiyetli ölçümler, ürün kalitesini ve güvenilirliğini sağlamak için kritik öneme sahiptir. (Çelik, 2023; Aygan, 2023; Bottani vd, 2021)

İzleyen paragraflarda, yapılan tez çalışması ile ilişkili olabileceği düşünülen ve özellikle FMEA ve SPC çalışmaları ile entegre edilmiş MSA çalışmalarına yer verilmiştir:

- Çelik (2023), Ölçüm Sistemleri Analizi ile ilgili teorik bilgilere, analizlerle ilgili Kalite iyileştirme konularına odaklanmıştır. Makine parçalarında kullanılan ölçüm sistemlerinin güvenilirliğini,  $\bar{X}$  - R yöntemi ile ANOVA yöntemi kullanarak incelemiştir.
- Aygan (2023), talaşlı imalat yöntemi ile üretim yapan bir firmada, parça seçimi yaparak , bu parça için imalat sürecinin ölçme sistemi güvenilirliği ve süreç yeterliliği üzerinde çalışmıştır.
- Dindaş (2018), yüksek lisans tezinde Ölçüm Sistemleri Analizi uygulamalarına, Varyans Çözümlemesi Yöntemi, En Çok Olabilirlik Yöntemi, Kısıtlı En Çok Olabilirlik Yöntemi ve Minimum Norm Karesel Yansız Tahmin Yöntemi ile yapılan tahminlerin entegrasyonu üzerine çalışmıştır. MSA varyans bileşenlerinin tahmin yöntemlerini anlatmış ve tek yönlü varyans çözümlemesine yönelik teorik altyapı sunmuştur. Sonrasında MSA ile varyans bileşenlerinin tahmin yöntemine ilişkin uygulama yapmıştır. Varyans Çözümlemesi Yöntemi, En Çok Olabilirlik Yöntemi, Kısıtlı En Çok Olabilirlik Yöntemi ve Minimum Norm Karesel Yansız Tahmin Yöntemi ile tahmin ettiği varyans bileşenlerinin karşılaştırmasını gerçekleştirmiştir.
- Bottani vd. (2021) çalışmalarında taşıma kelepçeleri yüksekliği ve döner halka-pinyon boşluğu için analiz çalışması gerçekleştirmiştir. İki sürecin de ilgili kontroller ve uygun ayarlamalar sağlandıktan sonra, mükemmel performans gösterdiği bildirilmiştir. Sonuçlar, kalite kontrol aşamalarında kullanılan ve yalın üretim prensipleriyle uyumlu olan altı sigma teorisinden elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Analiz sonuçlarının güvenilirliği, ANOVA Gage R&R kullanılarak doğrulanmış ve ölçüm sisteminin hassasiyeti bu metolla değerlendirilmiştir.
- Aslam ve Bantan (2020) yaptıkları çalışmada neutrosophic MSA modeli üzerine bir çalışmayı tanıtmışlardır. Önerilen çalışmanın, belirsiz bir ortamdaki ürün ölçme yeteneğine yardımcı olacağını belirtmişlerdir. Ayrıca, belirsizlik varlığında çeşitli ölçüm yeteneği değerlendirme kriterlerini de tartışmışlardır. Çalışmadan elde ettikleri sonuçlara göre, önerilen neutrosophic MSA'nın mevcut ölçüm sistemleri analiz modelinden daha iyi performans gösterdiği sonucuna varmışlardır.

Görüldüğü üzere MSA, birçok sektörde kalite kontrol ve süreç iyileştirme çalışmalarında kritik bir rol oynar. Otomotiv, havacılık, tıp, ilaç, elektronik ve gıda gibi çeşitli endüstrilerde, MSA kullanılarak ölçüm sistemlerinin doğruluğu, hassasiyeti ve güvenilirliği değerlendirilir. Bu, üretim süreçlerinin tutarlılığını sağlamak, ürün kalitesini artırmak ve müşteri memnuniyetini yükseltmek için hayati öneme sahiptir.

### 2.3. SPC ile İlgili Literatür Araştırması

SPC, çeşitli endüstriyel alanlarda süreçlerin istikrarını sağlamak, kaliteyi artırmak ve değişkenlikleri minimize etmek için yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir. SPC'nin yaygın olarak kullanıldığı başlıca alanlar izleyen paragraflarda özetlenmiştir:

- Otomotiv üretimi, yüksek hassasiyet ve kalite gerektiren karmaşık bir süreçtir. SPC, otomotiv parçalarının üretiminde kullanılan makinelerin ve işlemlerin istikrarını sağlamak için önemli bir rol oynar. Örneğin, motor parçalarının, şanzımanların ve gövde parçalarının üretiminde süreçlerin istatistiksel olarak kontrol edilmesi, parça kalitesinin ve dayanıklılığının sağlanmasında kritik öneme sahiptir. (Özdemir, 2013; Yılmaz ve Ersöz, 2018; Yacan vd., 2022)
- Genel imalat süreçlerinde, ürünlerin kalitesi ve maliyet etkinliği önemli faktörlerdir. SPC, üretim hattındaki değişkenlikleri izleyerek ve kontrol ederek süreçlerin istikrarını sağlar. Metal işleme, plastik enjeksiyon, elektronik bileşen üretimi gibi çeşitli imalat süreçlerinde SPC, hataların erken tespitini ve düzeltici önlemlerin alınmasını sağlayarak ürün kalitesini artırır. (Sargınoğlu, 2023; Park vd., 2021; Lim ve Kim, 2021)
- Gıda güvenliği ve kalitesi, gıda ve içecek endüstrisinde temel öneme sahiptir. SPC, gıda işleme ve üretim süreçlerinde kullanılarak hammaddelerin, ürünlerin ve ambalaj malzemelerinin kalitesinin izlenmesini sağlar. Bu, ürünlerin tutarlılığını sağlamak ve tüketicilere güvenilir ürünler sunmak için kritik öneme sahiptir. (Samuelsen vd., 2019; Andrade vd., 2022; Akyurt, 2020)
- Sağlık hizmetleri ve tıp alanında, doğru teşhis ve tedavi için güvenilir veri ve süreçler gereklidir. SPC, tıbbi cihazların kalibrasyonu, laboratuvar testlerinin doğruluğu ve klinik süreçlerin yönetimi için kullanılır. Örneğin, kan testleri, MRG taramaları ve cerrahi işlemlerde SPC, hasta güvenliğini ve tedavi etkinliğini artırmak için hayati öneme sahiptir. (Jafari-Marandi vd., 2018; Wang vd., 2024; Loh vd., 2019)

- Havacılık ve uzay endüstrisinde, güvenilirlik ve güvenlik en üst düzeyde önem taşır. SPC, uçak parçalarının üretiminde kullanılan süreçlerin ve malzemelerin kontrol edilmesinde kritik bir araçtır. Bu endüstrideki süreçlerin istikrarlı olması, uçakların güvenliği ve performansı için kritik önem taşır. (Yılmaz ve Ersöz, 2018)

Literatürde yer alan örnek SPC çalışmalarından bazıları, detaylı olarak izleyen paragraflarda özetlenmiştir:

- Soysal (2014), yaptığı çalışmada bulanık kontrol diyagramları kullanarak bulanık süreç yeterliliğinin analizini gerçekleştirmeyi amaçlanmıştır. Bulanık gözlem değerlerine sahip bir sürecin, öncelikle bulanık mantıkla, sonrasında ise geleneksel yöntemlerle analizini yapıp, sonuçları karşılaştırılmıştır. Sürecin kontrolü ve yetenek analizi yapılırken bulanık kurallar kullanılmıştır. Sonuç olarak, bulanık tabanlı çalışmanın geleneksel kontrol diyagramı ve yeterlilik analizine göre, daha çok bilgi içeren, daha esnek ve detaylı analiz sağladığını belirtmiştir.
- Aravind vd. (2017) tornalama işleminde kesme hızı, ilerleme hızı ve kesme derinliği gibi üç temel işleme parametresinin optimizasyonu üzerine çalışmışlardır.  $C_{pk}$  iyileştirmesi için, yüzey pürüzlülüğü parametresine ait veriler incelenmiştir. Taguchi yaklaşımı ile tornalama sürecinin çeşitli girdi parametrelerinin süreç yeterliliği üzerindeki etkileri gözlemlenmiştir.
- Hansen vd. (2023) endüstriyel durumlarını analiz etmek amacıyla dört modeli karşılaştırmışlardır. Daha iyi tahminler ve özellik önemini artırmak için derin öğrenme modellerine basit bir dikkat mekanizması önermişlerdir. Çalışmada iki veri seti kullanılmıştır. Biri Tennessee Eastman Süreci'nden simüle edilmiştir, diğeri ise Danimarka'daki bir kombine ısı ve güç santralindeki iki besleme suyu pompasından alınmıştır. Daha basit ve iyi test edilmiş modellerle modelleme yapmaya başlamanın, daha karmaşık ve gelişmiş modellerin benimsenmesinden daha iyi sonuçlar verdiğini ve karmaşıklığın kademeli olarak arttırılmasının önemini vurgulamışlardır.
- Rocha vd. (2023) Ar-Ge birimlerine sahip şirketlerin kalite yönetimi uygulamalarını kullanma sıklığını analiz etmiş ve bunları proje yönetimi öğrencilerinin profesyonel olarak kalite proje yönetimi uygulamalarını hayata geçirme beklentileriyle karşılaştırmışlardır. Sonuçların, proje yönetimi uygulamalarını iyileştirmeye yönelik girdiler sağlayabileceğini ve projelerin başarılı

bir şekilde yönetilmesi için gerekli eğitim, yetenek ve uyumlu beklentilere sahip proje yönetimi uygulamalarının profesyonellerin eğitiminin ve işe alımının önemini pekiştirebileceği aktarılmıştır.

SPC, birçok endüstriyel alanda süreçlerin kalitesini ve güvenilirliğini artırmak için güçlü bir araç olarak kullanılmaktadır. Otomotiv, imalat, gıda, sağlık hizmetleri ve havacılık gibi çeşitli sektörlerde SPC, süreçlerin istikrarını sağlamak, maliyetleri düşürmek ve müşteri memnuniyetini artırmak için vazgeçilmezdir.



### 3. MATERYAL VE YÖNTEM

#### 3.1. FMEA'nın Tanımı ve Amaçları

FMEA, bir sistem, süreç, ürün veya hizmetin potansiyel hata türlerini ve bu hataların olası etkilerini belirlemek için kullanılan sistematik bir yöntemdir. Bu yöntem, genellikle kalite yönetimi ve güvenilirlik mühendisliği alanlarında uygulanır ve potansiyel arızaların önlenmesine yardımcı olmak amacıyla kullanılır. Bir ürün veya süreçteki olası hata türlerini tanımlayarak, bu hataların meydana gelme olasılıkları ile etkilerini değerlendirir ve böylece riskleri önceliklendirme imkanı sağlar.

FMEA, bir ürün veya süreçteki potansiyel teknik riskleri değerlendiren, bu risklerin nedenlerini ve etkilerini analiz eden, önleyici ve tespit edici önlemleri belgelendiren, riski azaltmak için çözümler öneren, ekip çalışmasına dayalı, sistematik, nitel ve analitik bir yöntemdir.

FMEA'nın temel amaçları şunlardır:

- Bir sistem, tasarım, süreç veya hizmette meydana gelebilecek olası hata türlerinin tanımlanması hedeflenir. Hata türlerinin tanımlanmış olması, her bir süreç adımının hataya açık noktalarının belirlenmesini sağlar. Potansiyel hataların önceden tespit edilmesi, bu hatalara yönelik önleyici aksiyon alınmasını sağlar.
- Tanımlanan her hata türünün olası etkilerini değerlendirmeyi amaçlar. Bu etkiler, müşteriye, son ürüne veya sürece yönelik olumsuz sonuçları içerebilir. Hataların etkilerinin anlaşılması, bu etkilerin ciddiyetine göre önceliklendirilmesine imkan tanır.
- Her hata türünün potansiyel nedenlerini tanımlamak, FMEA'nın ana hedeflerinden biridir. Hataların nasıl ve neden meydana gelebileceğini anlamak, bu nedenleri ortadan kaldırmak veya azaltmak için etkili önlemler alınmasını sağlar.
- Mevcut durumda var olan kontrol ve önleyici tedbirlerin ne kadar etkili olduğunu değerlendirmeyi hedefler. Hataların tespit edilmesi, önlenmesi veya etkilerinin azaltılması için var olan kontrollerin gözden geçirilmesini içerir. Mevcut kontrollerin değerlendirilmesi, ek kontrollerin gerekip gerekmediğine karar verilmesini sağlar.

- Tanımlanan hata türlerini ve etkilerini şiddet, olasılık ve tespit edilebilirlik faktörlerine göre puanlar ve bir sistematığe göre önceliklendirmeyi hedefler. Önceliklendirme sonucunda, kritik hatalar belirlenir ve analiz edilir. Bununla birlikte risklerin önceliklendirilmesi, kaynakların en etkili şekilde kullanılmasına yardımcı olur.
- Tespit edilen riskleri azaltmak veya ortadan kaldırmak için gerekli düzeltici ve önleyici aksiyonların tanımlanması hedeflenir. Aksiyon planlarının oluşturulması ve uygulamaya geçilmesi, sürecin güvenilirliğini artırır.
- FMEA, sürekli iyileştirme süreçlerinin bir parçası olarak kullanılabilir. Hataların belirlenmesi ve planlanan aksiyonların uygulanması, sürecin sürekli olarak gözden geçirilmesini ve iyileştirilmesini sağlar.
- Potansiyel hataların erken aşamada tespit edilmesi ve önlenmesi yoluyla maliyet tasarrufu sağlamayı amaçlar. Ayrıca, verimlilik artışına katkıda bulunarak süreçlerin daha etkin bir şekilde yönetilmesini sağlar.

FMEA'nın bu amaçları, işletmelerin ürün ve süreç kalitesini artırmalarına, müşteri memnuniyetini sağlamalarına ve riskleri yönetmelerine yardımcı olur. FMEA, proaktif bir yaklaşım sağlayarak, potansiyel sorunları önceden tespit eder ve çözümler geliştirir, böylece uzun vadeli başarının temelini oluşturur. (AIAG & VDA, 2019)

### **3.2. FMEA'nın Tarihçesi**

FMEA yaklaşım ilk olarak 1940'lı yıllarda ABD askeri endüstrisinde ortaya çıkmıştır. İkinci Dünya Savaşı sırasında, savaş ekipmanlarının güvenilirliğini artırmak amacıyla kullanılmıştır. Bu dönemde, FMEA'nın temel prensipleri geliştirilmiştir ve askeri standartlar oluşturulmuştur.

1960'ların sonları ve 1970'lerin başlarında, FMEA otomotiv endüstrisinde benimsenmiştir. Özellikle Ford Motor Company, bu yöntemi kullanarak araç güvenilirliğini artırmayı amaçlamıştır. 1970'lerde Ford, FMEA'yı üretim süreçlerindeki hataları tespit etmek ve önlemek için bir standart olarak kullanmaya başlamıştır.

1980'ler ve 1990'lar boyunca, FMEA daha geniş bir alanda kabul görmüş ve çeşitli endüstrilerde standart bir araç haline gelmiştir. Bu dönemde, FMEA'nın uygulanmasına yönelik standartlar geliştirilmiştir.

FMEA, günümüzde birçok farklı endüstride yaygın olarak kullanılmaktadır. Otomotiv, havacılık, sağlık, enerji, savunma ve üretim gibi sektörlerde FMEA, risk yönetimi ve kalite kontrol süreçlerinin ayrılmaz bir parçası haline gelmiştir. FMEA, sürekli olarak gelişmekte ve güncellenmektedir. Yeni sürümler ve yöntemler, risklerin daha etkin bir şekilde yönetilmesini sağlamaktadır. (Gebel, 2023)

### **3.3. FMEA'nın Avantajları ve Dezavantajları**

FMEA metodolojisine hazırlık yapılırken, risk analizinin oluşturulmasında, Şiddet (S), Olasılık (O), Tespit Edilebilirlik (D) ve Aksiyon Önceliklendirme (AP) puanlamaları yapılırken ve sonrasında aksiyonları gerçekleşmesi sonucu yeniden değerlendirme gerçekleştirilirken, avantaj ve dezavantajlar ortaya çıkmaktadır.

#### **3.3.1. FMEA'nın Avantajları**

- FMEA, potansiyel hata türlerini önceden belirleyerek, bu hataların meydana gelmeden önce önlenmesini sağlar. Bu proaktif yaklaşım, hata oluşumunu en aza indirir ve güvenilirlik sorunlarının erken aşamada ele alınmasına yardımcı olur.
- FMEA, olası hata türlerini ve bu hataların etkilerini değerlendirerek, en kritik riskleri belirler ve önceliklendirir. Bu, kaynakların ve çabaların en önemli alanlara odaklanmasını sağlar, böylece risklerin etkili bir şekilde azaltılmasına katkıda bulunur.
- FMEA, ürün ve hizmet kalitesini artırarak müşteri memnuniyetini sağlar. Hataların önlenmesi ve kalite sorunlarının en aza indirilmesi, müşterilere daha güvenilir ve tatmin edici ürünler sunulmasını mümkün kılar.
- Hataların erken aşamada tespit edilmesi ve düzeltilmesi, pahalı düzeltici eylem ve geri çağırma maliyetlerini azaltır. Bu, işletmelerin maliyetlerini düşürmesine ve kaynaklarını daha verimli kullanmasına yardımcı olur.
- FMEA, sürekli iyileştirme süreçlerine önemli bir katkı sağlar. Hataların belirlenmesi ve düzeltilmesi, süreçlerin ve sistemlerin sürekli olarak gözden geçirilmesine ve

iyileştirilmesine olanak tanır. Bu, kalite yönetimi ve risk yönetimi süreçlerinde sürekli gelişim sağlar.

- FMEA, analiz ve değerlendirme süreçlerinin standartlaştırılmasını sağlar. Bu, analizlerin tutarlı ve izlenebilir olmasına yardımcı olur, böylece farklı projeler ve ekipler arasında karşılaştırılabilir sonuçlar elde edilmesini mümkün kılar.
- FMEA, ürün ve süreç tasarımında potansiyel hataların belirlenmesine ve bu hataların önlenmesine yönelik önlemlerin alınmasına yardımcı olur. Bu, daha güvenilir ve etkin tasarımların geliştirilmesini sağlar.
- FMEA, farklı disiplinlerden uzmanların bir araya gelerek işbirliği yapmasını ve bilgi paylaşımını teşvik eder. Bu, çeşitli bakış açıları ve uzmanlıkların bir araya gelmesiyle daha kapsamlı ve etkili analizlerin yapılmasını sağlar.
- Birçok endüstride, FMEA kullanımı düzenleyici gereksinimlerin bir parçasıdır. FMEA, işletmelerin bu gereksinimlere uyum sağlamasına ve düzenleyici denetimlerde başarılı olmasına yardımcı olur.
- FMEA, analiz süreçlerinin ve sonuçlarının dokümanite edilmesini sağlar. Bu, gelecekteki projeler için değerli bir referans kaynağı oluşturur ve kalite yönetimi süreçlerinin izlenebilirliğini artırır.

FMEA'nın bu avantajları, işletmelerin daha güvenilir, kaliteli ve müşteri odaklı ürünler ve hizmetler sunmasına katkıda bulunur. FMEA, risk yönetimi ve kalite kontrol süreçlerinde kritik bir araçtır ve doğru uygulandığında işletmelere önemli faydalar sağlar.

### 3.3.2. FMEA'nın Dezavantajları

- FMEA, kapsamlı ve detaylı bir analiz gerektirir. Bu, önemli miktarda zaman ve kaynak tüketebilir. Özellikle karmaşık sistemlerde veya büyük projelerde, FMEA'nın tamamlanması uzun sürebilir ve önemli miktarda insan gücü gerektirebilir.
- FMEA, hata türlerinin ciddiyetini, olasılığını ve keşfedilebilirliğini değerlendirirken subjektif yargılara dayanır. Bu, analiz sonuçlarının kişisel görüşlere ve deneyimlere bağlı olarak değişebileceği anlamına gelir. Farklı ekip üyeleri farklı sonuçlara ulaşabilir, bu da tutarlılık ve doğruluk açısından sorunlar yaratabilir.
- FMEA'da kullanılan RPN veya Aksiyon Önceliği (AP) gibi metrikler, risklerin önceliklendirilmesinde her zaman yeterli olmayabilir. Yüksek RPN puanları olan

bazı hatalar, gerçekte düşük risk taşıyabilir ve düşük RPN puanları olan bazı hatalar ise ciddi sonuçlar doğurabilir.

- FMEA, potansiyel hata türlerini belirlemeye odaklanır, ancak tüm olası hataları tespit etme garantisi yoktur. Bilinmeyen veya beklenmedik hata türleri gözden kaçabilir. Ayrıca, hataların karmaşık neden-sonuç ilişkileri tam olarak belirlenemeyebilir.
- FMEA, genellikle statik bir analizdir ve değişen koşullara hızlı bir şekilde uyum sağlamada zorluk yaşayabilir. Sürekli olarak güncellenmesi ve gözden geçirilmesi gerekebilir, ancak bu her zaman pratik olmayabilir. Bu, özellikle dinamik ve hızlı değişen endüstrilerde bir dezavantaj olabilir.
- FMEA'nın etkin bir şekilde uygulanabilmesi için ekip üyelerinin iyi eğitilmiş ve deneyimli olması gerekir. FMEA yönteminin karmaşıklığı ve detaylı analiz gerektirmesi, eğitim ve uygulama süreçlerinde zorluklar yaratabilir. Yetersiz eğitim veya deneyim, analiz sonuçlarının kalitesini ve doğruluğunu etkileyebilir.
- FMEA'nın detaylı bir analiz gerektirmesi, maliyet açısından da bir dezavantaj olabilir. Analiz sürecinde harcanan zaman, kaynak ve insan gücü maliyetleri, küçük işletmeler veya sınırlı kaynaklara sahip projeler için bir yük oluşturabilir.
- FMEA, etkili bir şekilde çalışabilmesi için doğru ve yeterli verilere ihtiyaç duyar. Eksik veya hatalı veriler, analiz sonuçlarını olumsuz etkileyebilir ve yanlış risk değerlendirmelerine yol açabilir. Veri toplama ve doğrulama süreçleri de zaman alıcı ve maliyetli olabilir.

FMEA için sözü edilen dezavantajlar uygun stratejiler ve yaklaşımlarla minimize edilebilir. FMEA'nın doğru ve etkin bir şekilde uygulanabilmesi için ekip üyelerinin iyi eğitilmesi, yeterli kaynakların sağlanması ve analiz süreçlerinin sürekli olarak gözden geçirilmesi önemlidir. (Kolukırık, 2021)

### **3.4. FMEA Tipleri**

FMEA tipleri, belirli sektörlerin ve uygulamaların gereksinimlerine göre tasarlanmıştır. Her bir FMEA türü, analiz edilen alanın özelliklerine, olası hata türlerine ve bu hataların etkilerine göre özelleştirilmiştir.

Ürün FMEA, bir ürünün tasarım aşamasında potansiyel hata türlerini tanımlamak ve bu hataların muhtemel etkilerini değerlendirmek amacıyla kullanılan bir yöntemdir. Bu

analiz, ürünün her bileşeninin veya özelliğinin nasıl başarısız olabileceğini ve bu hataların nihai ürün performansını nasıl etkileyebileceğini inceler.

Süreç FMEA, üretim veya iş süreçlerinde potansiyel hata türlerini tanımlamak ve bu hataların etkilerini değerlendirmek için kullanılan bir analiz yöntemidir. Bu tür FMEA, üretim süreçlerindeki her adımın nasıl başarısız olabileceğini ve bu hataların üretim kalitesini ve verimliliğini nasıl etkileyebileceğini inceler.

Servis FMEA, bir sistemin genel yapısında ve işleyişinde potansiyel hata türlerini tanımlamak ve bu hataların etkilerini değerlendirmek amacıyla kullanılan bir yöntemdir. Bu analiz, bir sistemin tüm bileşenlerinin ve alt sistemlerinin nasıl başarısız olabileceğini ve bu hataların sistemin genel performansını nasıl etkileyebileceğini inceler.

Yazılım FMEA, yazılım uygulamalarında potansiyel hata türlerini tanımlamak ve bu hataların etkilerini değerlendirmek amacıyla kullanılan bir analiz yöntemidir. Bu analiz, yazılımın her bir modülünün veya bileşeninin nasıl başarısız olabileceğini ve bu hataların yazılımın işlevselliğini nasıl etkileyebileceğini inceler.

Tasarım FMEA, ürün tasarımı aşamasında potansiyel hata türlerini tanımlamak ve bu hataların etkilerini değerlendirmek amacıyla kullanılan bir analiz yöntemidir. Bu tür FMEA, ürünün her bir bileşeninin veya fonksiyonunun nasıl başarısız olabileceğini ve bu hataların ürünün genel performansını nasıl etkileyebileceğini inceler.

FMEA tipleri, analiz yapılacak sistemin, ürünün veya sürecin doğasına ve gereksinimlerine göre belirlenir. FMEA'nın hangi türünün kullanılacağına karar verirken, analiz edilecek alanın özellikleri, hataların potansiyel etkileri ve bu hataların hangi aşamada ortaya çıkabileceği dikkate alınır. Örneğin, ürünün tasarım aşamasında potansiyel hataları önceden belirlemek için Tasarım FMEA tercih edilirken, üretim sürecindeki olası hataları analiz etmek için Süreç FMEA kullanılır. Hizmet sunumu sırasında meydana gelebilecek hataları değerlendirmek için ise Servis FMEA uygundur. Karmaşık sistemlerdeki hata türlerini incelemek için Sistem FMEA, yazılım geliştirme süreçlerindeki hataları analiz etmek için Yazılım FMEA kullanılır. Bu seçim, FMEA'nın doğru uygulanmasını ve analizden elde edilen sonuçların etkinliğini artırır. (Can, 2022)

### 3.5. FMEA Uygulama Basamakları

FMEA süreci 7 adımda gerçekleştirilir. Bu yedi adım, FMEA yapmak için sistematik bir yaklaşım sunar ve teknik risk analizinin bir kaydı olarak hizmet eder. FMEA’da 7 adım yaklaşımı Çizelge 3.1’de verilmiştir. (AIAG & VDA, 2019)

**Çizelge 3.1.** FMEA’da 7 Adım Yaklaşımı (AIAG & VDA, 2019)

SİSTEM ANALİZİ			HATA ANALİZİ VE RISK AZALTMA			RISK İLETİŞİMİ
1. Adım	2. Adım	3. Adım	4. Adım	5. Adım	6. Adım	7. Adım
Hazırlık ve Planlama	Yapı Analizi	Fonksiyon Analizi	Hata Analizi	Risk Analizi	Optimizasyon	Sonuçların Dokümantasyonu
Proje Tanımı	Analiz kapsamının görselleştirilmesi	Ürün ve Süreç fonksiyonlarının görselleştirilmesi	Hata zincirinin hazırlanması	Mevcut ve/veya planlanmış kontrollerin değerlendirilmesi ve hataların sınıflandırılması	Risklerin azaltılması için gerekli aksiyonların belirlenmesi	Elde edilen sonuçların paylaşımı ve analizlerin bitirilmesi
Proje Planı	Yapı ağacı veya eş değer olarak süreç akış diyagramı	Fonksiyon ağacı veya eş değer olarak süreç akış diyagramı	Her bir süreç fonksiyonu için potansiyel hata etkileri, hata türleri, hata nedenlerinin belirlenmesi	Hata nedenleri için önleyici kontrollerin atanması. Hata nedenleri ve/veya hata türleri için tespit kontrollerinin atanması	Aksiyonların devreye alınması için sorumluların ve terminlerin belirlenmesi	Belgelemenin içeriğinin hesaplanması
FMEA çalışmasına nelerin dahil edileceği ve edilmeyeceğinin belirlenmesi	Süreç adımlarının ve alt adımların belirlenmesi	Gerekliklerin veya karakteristiklerin fonksiyonlara göre sınıflandırılması	Hata ağ veya balık kılıcı diyagramı kullanarak süreç hatalarının belirlenmesi	Her bir hata zinciri için Şiddet, Olasılık ve Tespit Edilebilirlik değerlerinin tartışılması	Seçilen aksiyonların devreye alınması, etkililik kontrolleri dahil belgelenmesi ve aksiyonlar devreye alındıktan sonra risk değerlendirilmesi	Alınan aksiyonların etkinlikleri, uygulanmaları ile uygulama sonrası yeniden risk değerlendirilmesinin gerçekleştirilmesi
Öğrenilmiş derslerin ve baz FMEA'nın belirlenmesi	Müşteri ve tedarikçilerin mühendislik ekipleri arasında iş birliği	Mühendislik ekipleri arasında iş birliği	Müşteri ve tedarikçi arasında iş birliği (Hata Etkileri)	Müşteri ve tedarikçi arasında iş birliği	FMEA ekibi, yönetim, müşteri ve tedarikçi arasında potansiyel hatalara yönelik işbirliği	Risklerin azaltımı için aksiyonların organizasyon, müşteriler ve/veya tedarikçilerin ihtiyacına göre paylaşımı
Yapı Analizi adımı için temel oluşturulması	Fonksiyon Analizi adımı için temel oluşturulması	Hata Analizi adımı için temel oluşturulması	Hataların FMEA form sayfasına kayıtl edilmesi ve Risk Analizi adımı için temel oluşturulması	Ürün ve Süreç Optimizasyonu adımı için temel oluşturulması	Ürün ve/veya süreç gereklilikleri ile önleyici ve tespit etme kontrollerinin ayrıntılı hale getirmesi için temel oluşturma	Risk analizlerinin ve kabul edilebilir seviyelerin kayıtlarının hazırlanması

### 3.6. FMEA Versiyonları

FMEA çalışmaları için günümüzde 2 farklı yöntem kullanılmaktadır. Bunlardan biri geleneksel yöntem olarak adlandırılan, FMEA Versiyon 4, diğeri ise 2019 yılında AIAG & VDA'nın ortak çalışmasıyla yayınlanmış olan FMEA Versiyon 5'tir.

#### 3.6.1. FMEA Versiyon 4

FMEA 4. versiyonunda, risklerin önceliklendirilmesi için RPN kullanılır. RPN, hata türünün şiddeti (S), olasılığı (O) ve tespit edilebilirliği (D) puanlarının çarpımı ile hesaplanır. Formül şu şekildedir:

$$RPN = \text{Şiddet} \times \text{Olasılık} \times \text{Tespit Edilebilirlik} \quad (3.1)$$

Bu versiyon, hataların tanımlanması ve analiz edilmesinde klasik bir yöntem kullanır. Sorunları tespit etmek ve önceliklendirmek için standartlaştırılmış bir yaklaşım benimser.

FMEA Versiyon 4, FMEA formu ve dokümantasyonu için standart bir şablon sunar. Bu şablon, hata modlarının, etkilerinin, nedenlerinin ve mevcut kontrollerin belirlenmesini içerir. (Özkılınç, 2023)

Çeşitli disiplinlerden gelen ekip üyelerinin bir araya gelerek çalışmasını teşvik eder. Bu, farklı perspektiflerin ve uzmanlık alanlarının entegrasyonunu sağlar.

Hata modlarının etkilerine ve bu hataların nasıl önlenebileceğine odaklanır. Bu, ürün veya süreç güvenilirliğini artırmayı amaçlar.

FMEA Versiyon 4 için oluşturulmuş avantajlar ve dezavantajlar çizelgesi, Çizelge 3.2'de yer almaktadır.

**Çizelge 3.2. FMEA Versiyon 4 Avantajlar ve Dezavantajlar Çizelgesi**

FMEA Versiyon 4	
Avantajlar	Dezavantajlar
Basitlik : Anlaşılması ve uygulanması kolaydır. Kullanıcılar, temel FMEA kavramlarını hızla öğrenebilir ve uygulayabilir.	Subjektif Olması: Şiddet, olasılık ve tespit edilebilirlik puanlarının subjektif değerlendirilmesi sonucu RPN hesaplamaları değişken olabilir. Farklı ekip üyeleri aynı hatayı farklı şekilde değerlendirebilir.
Yaygın Kullanım: Endüstride geniş bir kabul görmüştür, bu yüzden birçok insan ve kuruluş bu yöntemi tercih etmektedir.	RPN'nin Kısıtlamaları: RPN'nin sadece üç faktörün çarpımı ile hesaplanması bazı durumlarda hataların önemini tam olarak yansıtmayabilir. Örneğin, etkisi düşük ama sık karşılaşılan hatalar, etkisi yüksek ama nadir görülen hatalarla aynı RPN değerine sahip olabilir.
Standardizasyon: Standart bir format sunar, bu da çeşitli projeler ve ekipler arasında tutarlılığı artırır. Standardizasyon, sonuçların karşılaştırılabilirliğini ve izlenebilirliğini sağlar.	Öncelik Belirleme: Yüksek RPN değerlerine sahip hataların her zaman en kritik hatalar olmadığı durumlar olabilir. Bu, yanlış önceliklendirmelere yol açabilir ve önemli hataların gözden kaçmasına neden olabilir.

### 3.6.2. FMEA Versiyon 5

FMEA versiyon 5'te, risk önceliklendirmesi için yeni bir metrik olan Aksiyon Önceliklendirme (AP) kullanılır. AP, sadece puanların çarpımına değil, daha karmaşık bir risk önceliklendirme metodolojisine dayanır. AP, ciddiyet, olasılık ve keşfedilebilirlik puanlarını daha dinamik bir şekilde değerlendirir.

Versiyon 5, daha ayrıntılı ve kapsamlı bir FMEA formu kullanır. Bu form, daha fazla veri toplanmasını ve analiz edilmesini sağlar.

Süreç FMEA'sı ve tasarım FMEA'sı gibi farklı türlerde daha fazla ayrıntı ve odaklanma sağlar. Her iki tür FMEA da, süreçlerin veya tasarımların potansiyel hatalarını belirlemeyi ve bu hataları önlemeyi amaçlar.

Riskleri azaltmak için daha yönlendirilmiş ve etkili eylem planları önerir. Bu, hataların tespit edilmesinin yanı sıra, düzeltici ve önleyici faaliyetlerin daha iyi yönetilmesini sağlar.

Daha fazla veri ve analiz kullanımı ile daha doğru sonuçlar elde edilir. Bu, hataların daha iyi anlaşılmasını ve daha etkin çözümler üretilmesini sağlar.

FMEA Versiyon 5 için oluşturulmuş avantajlar ve dezavantajlar çizelgesi, Çizelge 3.3'te yer almaktadır.

**Çizelge 3.3. FMEA Versiyon 5 Avantajlar ve Dezavantajlar Çizelgesi**

FMEA Versiyon 5	
Avantajlar	Dezavantajlar
Daha Doğru Önceliklendirme: AP kullanımı, risklerin daha doğru bir şekilde önceliklendirilmesini sağlar. AP, ciddiyet, olasılık ve keşfedilebilirlik arasındaki ilişkiyi daha iyi değerlendirdiği için, en kritik hataların öncelikli olarak ele alınmasını sağlar.	Karmaşıklık: Uygulanması daha kompleks bir yöntem olduğundan anlaşılması daha zor olabilir. Kullanıcıların bu yeni yöntemle adapte olması zaman alabilir.
Daha Etkif Eylem Planları: Daha etkili eylem planları geliştirilmesine yardımcı olur. Bu, düzeltici faaliyetlerin daha etkili ve verimli bir şekilde uygulanmasını sağlar.	Eğitim Gereksinimi: Ekip üyelerinin yeni yöntem ve araçlar konusunda eğitilmesi gereklidir. Bu, başlangıçta ekstra maliyet ve zaman gerektirebilir.
Gelişmiş Analiz: Daha fazla veri ve analitik araçlar kullanılarak daha kapsamlı bir analiz yapılır. Bu, hataların kök nedenlerini daha iyi anlamayı ve önleyici tedbirlerin daha etkin olmasını sağlar.	Zaman ve Kaynaklar: Daha fazla veri ve analiz gerektirdiği için daha fazla zaman ve kaynak harcanabilir. Bu, özellikle küçük projeler veya sınırlı kaynaklara sahip ekipler için bir dezavantaj olabilir.
Kapsamlı Dokümantasyon: Daha ayrıntılı dokümantasyon ile daha iyi izlenebilirlik ve raporlama sağlar. Bu, proje yönetimi ve denetim süreçlerinde büyük bir avantaj sağlar.	

FMEA Versiyon 4 ve FMEA Versiyon 5'in basitlik ve kullanım kolaylığı, aksiyon önceliklendirme, dokümantasyon ve izlenebilirlik, eğitim ihtiyacı ve uygulama ile zaman ve kaynaklar kriterlerin göre yapılmış karşılaştırma çizelgesi, Çizelge 3.4'te yer almaktadır.

**Çizelge 3.4. FMEA Versiyon 4 ve Versiyon 5 Karşılaştırma Çizelgesi**

FMEA Versiyon 4 ve Versiyon 5 Karşılaştırma Tablosu		
	Versiyon 4	Versiyon 5
<b>Basitlik ve Kullanım Kolaylığı</b>	Anlaşılması ve uygulanması daha basit, yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir. Temel FMEA kavramlarını öğrenmek ve uygulamak daha hızlıdır.	Daha karmaşık ve sofistike bir yöntemdir. Uygulanması ve anlaşılması daha fazla eğitim ve deneyim gerektirir.
<b>Aksiyon Önceliklendirme</b>	RPN kullanarak riskleri önceliklendirir. Ancak, RPN'nin subjektifliği ve bazı durumlarda hataların önemini tam olarak yansıtamaması dezavantajdır.	Aksiyon Önceliklendirme (AP) kullanarak daha doğru bir önceliklendirme sağlar. AP, ciddiyet, olasılık ve keşfedilebilirlik arasındaki ilişkiyi daha iyi değerlendirir.
<b>Dokümantasyon ve İzlenebilirlik</b>	Standart bir FMEA formu ve dokümantasyonu sunar. Bu, temel hataların ve önleyici tedbirlerin kaydedilmesi için yeterlidir.	Daha ayrıntılı ve kapsamlı bir dokümantasyon sağlar. Bu özellik, hataların daha iyi izlenmesini ve raporlanmasını sağlar.
<b>Eğitim ve Uygulama</b>	Daha az eğitim ve kaynak gerektirir. Temel FMEA kavramlarını öğrenmek ve uygulamak daha hızlıdır.	Daha fazla eğitim ve kaynak gerektirir. Ekip üyelerinin yeni yöntem ve araçlar konusunda eğitilmesi gereklidir.
<b>Zaman ve Kaynaklar</b>	Daha az zaman ve kaynak gerektirir. Basit ve hızlı bir şekilde uygulanabilir.	Daha fazla zaman ve kaynak gerektirir. Daha kapsamlı analizler ve veri toplama süreçleri gerektirir.

### 3.7. FMEA Aksiyon Önceliklerinin Belirlenmesi

Hata etkisi, olası hata ve olası hata nedenini içeren neden-sonuç zincirlerinin önceliği, hata etkisinin şiddeti, hata nedeninin oluşma olasılığı ve neden-sonuç zincirinde tespit edilebilirliği değerlendirilerek tahmin edilir.

#### 3.7.1. Hata Etkisinin Şiddeti (S)

Analiz edilen sistemin üst seviyesindeki veya daha yüksek seviyeli sistemdeki bir hata etkisinin şiddeti, "S" sayısı ile derecelendirilir. Bu değerlendirme, ortaya çıkma olasılığından (O) ve tespit edilebilirlikten (D) bağımsız olarak yapılır. "S" değeri, ürün veya sektör spesifik derecelendirme tablolarına göre belirlenir.

Tez çalışmasında kullanılan FMEA Versiyon 5 için AP belirlenirken, "S" değeri için Ek Açıklamalar-A'daki çizelge kullanılmıştır.

#### 3.7.2. Hata Nedeninin Oluşma Olasılığı (O)

"O" değeri, potansiyel bir hata nedeninin meydana gelme olasılığını gösterir. Burada hata nedenini önlemek için alınan önlemler dikkate alınır ve bu önleyici faaliyetlerin etkinliği doğrulanmalıdır. Önleyici bir faaliyet tanımlanmamışsa, skor O=10 olacaktır. "O" değeri, mutlak bir ölçü yerine göreceli bir tahmin olarak değerlendirilmelidir.

Hata önleme, hata nedenlerinden kaçınmak veya meydana gelme olasılıklarını azaltmak amacıyla ürün ve süreç tasarımında kullanılan tüm önleyici faaliyetleri içerir.

Tez çalışmasında kullanılan FMEA Versiyon 5 için AP belirlenirken, “O” değeri için Ek Açıklamalar-B’deki çizelge kullanılmıştır.

### **3.7.3. Tespit Edilebilirlik (D)**

“D” değeri, neden-sonuç zincirindeki (hata ağı) hatanın, belirlenen inceleme önlemleri kullanılarak müşteriye ulaşmadan önce tespit edilme olasılığını gösterir.

Tez çalışmasında kullanılan FMEA Versiyon 5 için AP belirlenirken, “D” değeri için Ek Açıklamalar-C’deki çizelge kullanılmıştır.

### **3.7.4. Aksiyon Önceliklendirme (AP)**

FMEA'nın 5. versiyonunda, yenilik olarak karşımıza çıkan AP, risklerin önceliklendirilmesinde, şiddet, olasılık ve tespit edilebilirlik puanların çarpımına dayanmaz, daha karmaşık bir önceliklendirme yöntemi içerir. AP, şiddet, olasılık ve tespit edilebilirlik puanlarını daha kompleks bir şekilde değerlendirir.

Tez çalışmasında kullanılan FMEA Versiyon 5 için şiddet, olasılık ve tespit edilebilirlik değerlerine karşılık gelen AP değerleri, Ek Açıklamalar-D’deki çizelgede verilmiştir. (AIAG & VDA, 2019)

## **3.8. MSA'nın Tanımı ve Amaçları**

MSA, bir ölçüm sisteminin doğruluğunu, güvenilirliğini ve tutarlılığını değerlendirmek için kullanılan sistematik bir yöntemdir. MSA, kalite kontrol ve iyileştirme süreçlerinde kritik bir rol oynar, çünkü üretim süreçlerinin kalitesi büyük ölçüde ölçüm sistemlerinin doğruluğuna ve tekrarlanabilirliğine bağlıdır. MSA, ölçüm sisteminin güvenilir olup olmadığını ve elde edilen verilerin doğru ve tutarlı olup olmadığını belirlemek için kullanılır. (AIAG, 2002)

MSA'nın temel amaçları şunlardır;

- Ölçüm sisteminde var olan hataları ve sapmaları belirler.
- Ölçüm cihazlarının ve operatörlerin doğruluk ve hassasiyetini değerlendirir.
- Aynı ölçüm sisteminin farklı operatörler tarafından veya aynı operatör tarafından farklı zamanlarda yapılan ölçümlerde tutarlılık gösterip göstermediğini tespit eder.
- Ölçüm sonuçlarına dayalı olarak verilen kararların ne kadar güvenilir olduğunu değerlendirir.

Ölçüm Sistemleri Analizi (MSA), bir ölçüm sisteminin doğruluğunu, tekrarlanabilirliğini, tekrarlanabilirliğini ve stabilitesini değerlendirir. MSA, iki ana kategoriye ayrılır: Nicel (Kantitatif) MSA ve Nitel (Kalitatif) MSA. Bu analiz türleri, ölçüm sistemlerinin farklı yönlerini değerlendirir ve kalite kontrol süreçlerinde kritik bir rol oynar.

### 3.9. Nicel MSA

Nicel MSA, sayısal veri üretme yeteneğine sahip ölçüm sistemlerinin değerlendirilmesini içerir. Bu tür analizler, ölçüm sistemlerinin doğruluğunu, hassasiyetini ve tekrarlanabilirliğini belirlemek için kullanılır. Nicel MSA'nın tipleri şunlardır:

- Doğruluk (Bias) Analizi: Ölçüm cihazının, gerçek değerden ne kadar sapma gösterdiğini belirler. Bias analizi, ölçüm cihazının sistematik hatasını değerlendirir.
- Tekrar Edilebilirlik ve Tekrarlanabilirlik (R&R) Analizi:
  - Tekrar Edilebilirlik: Aynı operatör tarafından, aynı ölçüm cihazı kullanılarak, aynı parçanın kısa süre içinde tekrar tekrar ölçülmesi sonucu elde edilen varyasyonu değerlendirir.
  - Tekrarlanabilirlik: Farklı operatörlerin aynı ölçüm cihazını kullanarak, aynı parçayı ölçmeleri sonucu elde edilen varyasyonu değerlendirir.
- Lineerlik Analizi: Ölçüm cihazının, ölçüm aralığı boyunca tutarlı olup olmadığını değerlendirir. Lineerlik, cihazın kalibrasyon eğrisinin doğruluğunu kontrol eder. Ölçüm aralığı boyunca cihazın doğruluğu nasıl değiştiğini belirler.
- Stabilitate Analizi: Ölçüm cihazının zaman içinde tutarlı ölçümler sağlayıp sağlamadığını değerlendirir. Stabilitate, cihazın uzun vadeli performansını belirler. Örneğin, bir terazinin belirli aralıklarla yapılan ölçümlerinde aynı ağırlığı sürekli doğru ölçüp ölçmediğini kontrol eder.

- Gage R&R (Gauge Repeatability and Reproducibility): Ölçüm sisteminin toplam varyasyonunu değerlendirir. Bu analiz, ölçüm cihazının ve operatörlerin neden olduğu varyasyonları bir araya getirir. Gage R&R, ölçüm sisteminin güvenilirliğini ve doğruluğunu belirlemek için kullanılır.

$$\sigma^2_{GRR} = \sigma^2_{reproducibility} + \sigma^2_{repeatability} \quad (3.2)$$

### 3.9.1 Gage R&R Metotları

Gage R&R metoduyla, ölçüm sisteminin güvenilirliği ve doğruluğu belirlenirken kullanılan yöntemler;

- Aralık Metodu: Ölçüm sistemi yeterliliğini belirlemek üzere kullanılır.
- Ortalama ve Aralık Metodu: Cihaz Varyasyonu (Equipment Variation- EV), Ölçümcü Varyasyonu (Appraiser Variation- AV), Ölçüm Sistemi Varyasyonu (Gage Repeatability and Reproducibility- GRR) ve Ayrıklık Kategori İndeksi (Number of distinct categories-Ndc) değerleri hesaplanır.
- Anova Metodu: Diğer metotlardan farklı olarak, cihaz hatasını da gösterdiğinden daha fazla tercih edilmektedir.

### 3.9.2. Ortalama ve Aralık Metodu

Ortalama ve Aralık Metodu, ölçüm sistemindeki tekrarlanabilirlik (aynı operatörün aynı cihazı kullanarak aynı parçayı tekrar tekrar ölçmesi) ve yeniden üretilebilirlik (farklı operatörlerin aynı cihazı kullanarak aynı parçayı ölçmesi) varyasyonlarını belirlemek için kullanılır. Bu metod, çeşitli parçaların birden fazla operatör tarafından ölçülmesi ve sonuçların analiz edilmesi ile gerçekleştirilir.

Ortalama ve Aralık Metodu kullanılırken, çalışmanın hazırlıkları şu şekilde oluşturulur:

- Örneklerin Seçilmesi: Analiz için belirli sayıda parça seçilir. Genellikle 10 parça seçilmesi önerilir. Bu parçalar, analiz boyunca aynı kalmalıdır.
- Operatörlerin Belirlenmesi: Ölçümleri gerçekleştirecek operatörler belirlenir. Genellikle üç farklı operatör seçilir.

- Ölçümlerin Yapılması: Her operatör, her parçayı belirli sayıda kez ölçer. Örneğin, her operatör her parçayı 3 kez ölçer. Bu şekilde, her parça için birden fazla ölçüm değeri elde edilir.
- Ortalama ve Aralıkların Hesaplanması: Her parçanın ölçümleri için ortalama ( $\bar{x}$ ) ve aralık (R) hesaplanır. Ortalama, ölçüm değerlerinin toplamının ölçüm sayısına bölünmesi ile bulunur. Aralık ise en yüksek ve en düşük ölçüm değeri arasındaki farktır.

Ortalama hesaplanırken,  $X_{ij}$ , i-inci örneğin,  $i = 1, 2, \dots, m$ , j-inci ölçüm değeri,  $j = 1, 2, \dots, n$  olmak üzere, i-inci örneğin ortalaması şu formülle hesaplanır:

$$\bar{X}_i = \frac{\sum_{j=1}^n X_{ij}}{n} \quad (3.3)$$

Alınan örneklere ait ortalamaların ortalamasını veren formül şu şekildedir:

$$\bar{\bar{X}} = \frac{\sum_{i=1}^m \bar{X}_i}{m} \quad (3.4)$$

Ölçümlerden alınan sonuçların, ölçüm aletinden kaynaklanan varyasyonunu ifade eden Ekipman Varyasyonu (EV) ise şu şekilde hesaplanır:

$$EV = \bar{R} \times K_1 \quad (3.5)$$

Burada,  $\bar{R}$  ortalama aralık,  $K_1$  ise çalışmada yapılan ölçüm denemesine, parça ve ölçümcü sayısına bağlı bir sabit katsayıdır.  $K_1$  değerinin 15'ten büyük olması beklenir.

Tekrarlanabilirlik Varyasyonu (AV) ise, maksimum ortalama değerlendirme farkının ( $\bar{X}_{DIFF}$ ), sabit bir katsayıyla ( $K_2$ ) çarpılmasıyla elde edilir.  $K_2$  katsayısı değerlendirme uzmanı sayısına bağlı bir sabit katsayıdır.

$$\sqrt{(\bar{X}_{DIFF} \times K_2) - \frac{EV_2}{nr}} \quad (3.6)$$

Tekrarlanabilirlik ve yeniden üretilebilirlik için ölçüm sistemi varyasyonu (GRR) hesaplama formülü şu şekildedir:

$$GRR = \sqrt{EV^2 + AV^2} \quad (3.7)$$

Parça Varyasyonu hesaplama denklemi,

$$PV = R_p \times K_3 \quad (3.8)$$

Parça Varyasyonu (PV), parça ölçüm sonuçlarına ait ortalama ağırlığın ( $R_p$ ),  $K_3$  katsayısı ile çarpımından elde edilmiştir.  $K_3$ , parça sayısına bağlı bir katsayıdır.

Toplam Varyasyon denklemi;

$$TV = \sqrt{GRR^2 + PV^2} \quad (3.9)$$

Toplam Varyasyondaki yüzdesel faktörler aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$\%EV = 100 \frac{EV}{TV} \quad (3.10)$$

$$\%AV = 100 \frac{AV}{TV} \quad (3.11)$$

$$\%GRR = 100 \frac{GRR}{TV} \quad (3.12)$$

$$\%PV = 100 \frac{PV}{TV} \quad (3.13)$$

Bu formüllerde;

- EV, Bütün ölçüm cihazları aynı işi yapıyor mu?
- AV, Bütün ölçümcülerin ölçüm yetenekleri aynı mı?
- GRR, Ölçüm sistemi varyansı, proses varyansından büyük mü?
- Ndc, Ölçüm işleminden elde edilen veri ne kadar iyi veya birbiryle kesişmeyen kaç gruba ayrılabilir?

Sorularına yanıt aranır. (Özcan, 2021)

GRR kabul kriterleri Çizelge 3.5'te verilmiştir.

**Çizelge 3.5. GRR Kabul Kriterleri**

<b>%GRR</b>	<b>KARAR</b>
< %10	Ölçüm sistemi kabul edilir.
%10 < X < %30	Ölçüm sistemi kabul edilebilir ancak gelişime açıktır.
> %30	Ölçüm sistemi kabul edilemez. Geliştirici faaliyetler uygulanmalıdır.

- Ayrıca, Ndc değerinin  $\geq 5$  olması,  $PV > GRR$  olması, %PV değerinin %99,9'a yakın olması beklenir.

GRR'nin %10'a küçük ya da eşit olduğu durumlarda Çizelge 3.6'daki değerlendirmeler yapılabilir.

**Çizelge 3.6.** EV, AV ve PV Değerlerinin Anlamları (Şale, 2023)

EV > AV	Ölçüm ekipmanına bakım ihtiyacı
	Daha rijit ölçüm için ekipman / master tekrar dizayn edilmeli
	Cihazın / Masterın gevşek yerlerinin sıkılması ve merkezlenmesi açısından iyileştirme ihtiyacı
	Ölçüm Cihazı / Mastarda aşırı varyasyon
AV > EV	Ölçümcülerin, cihazı okuma ve kullanmasına yönelik eğitim ihtiyacı
	Cihaz göstergesinin net olmaması
PV < %90	Yeniden parametre, kalıp iyileştirme, Makine ayarı
%90 < PV < %95	
%95 < PV < %99	

### 3.10. Nitel MSA

Sayısal olmayan veri üreten ölçüm sistemlerinin değerlendirilmesini içerir. Bu analizler, ölçüm sistemlerinin niteliksel özelliklerini belirlemek için kullanılır. Nitel MSA'nın başlıca unsurları şunlardır:

- Atama Ölçümleri Analizi ile, niteliksel ölçüm sistemlerinin performansını değerlendirir. Parçaları "geçti" veya "kaldı" olarak sınıflandırır. Bu analiz, ölçüm sisteminin tutarlılığını ve doğruluğunu belirler.
- Yeniden Üretilebilirlik, aynı operatörün, aynı parçayı defalarca sınıflandırması sonucu elde edilen tutarlılığı değerlendirir. Örneğin, bir operatörün bir parçayı tekrar tekrar "geçti" veya "kaldı" olarak değerlendirmesi. Tekrarlanabilirlik ise, farklı operatörlerin aynı parçayı sınıflandırmaları sonucu elde edilen tutarlılığı değerlendirir. Örneğin, farklı operatörlerin aynı parçayı benzer şekilde sınıflandırıp sınıflandırmadığı.
- Kappa analizi, sınıflandırma işlemlerinin tutarlılığını değerlendirmek için kullanılır. Bu analiz, operatörler arasındaki anlaşmayı ölçer ve rastgele anlaşma olasılığını dikkate alır. Örneğin, iki operatörün aynı parçayı "geçti" veya "kaldı" olarak sınıflandırma konusunda ne kadar uyumlu olduklarını belirler.
- Concordance analizi, nitel verilerin ölçüm sistemlerinde tutarlılığı belirler. Bu analiz, birden fazla operatörün aynı parçayı aynı şekilde sınıflandırıp sınıflandırmadığını değerlendirir. Örneğin, üç farklı operatörün aynı parçayı

değerlendirmesi sonucu elde edilen sınıflandırmaların ne kadar tutarlı olduğunu belirler.

### 3.11. Nicel ve Nitel MSA'nın Karşılaştırılması

Nicel MSA, sayısal verilerle çalıştığı için daha objektif sonuçlar sağlar ve ölçüm sisteminin doğruluğunu, tekrarlanabilirliğini ve stabilitesini hassas bir şekilde belirler. Örneğin, bir terazinin doğruluğunu gram cinsinden belirler.

Nitel MSA, niteliksel verilerle çalışır ve ölçüm sisteminin sınıflandırma doğruluğunu ve tutarlılığını değerlendirir. Bu tür analizler, subjektif değerlendirmelerin doğruluğunu belirlemek için kullanılır. Örneğin, bir parçanın "geçti" veya "kaldı" olarak sınıflandırılmasının tutarlılığını inceler. (Şale, 2023)

### 3.12. SPC'nin Tanımı ve Araçları

SPC, kalite yönetimi ve proses iyileştirme süreçlerinde kullanılan etkili bir yöntemdir. SPC, üretim süreçlerinin kontrol altında tutulmasını ve proses varyasyonlarının minimize edilmesini sağlar. Bu yöntem, istatistiksel teknikler kullanarak üretim süreçlerini izler, kontrol eder ve iyileştirir. SPC'nin temel amacı, ürün kalitesini artırmak ve müşteri memnuniyetini sağlamaktır. (Montgomery, 2017; Burnak ve Aktar Demirtaş, 2019)

SPC, üretim ve hizmet süreçlerinin kalitesini ve performansını artırmak amacıyla kullanılan istatistiksel teknikler bütünüdür. SPC'nin temel amaçları;

- Ürün kalitesini etkileyen en önemli faktörlerden biri olan süreç varyasyonlarını azaltarak, ürün kalitesini arttırmaktır. Varyasyonların kontrol altına alınması, daha tutarlı ve öngörülebilir sonuçlar elde edilmesini sağlar.
- Süreçlerin sürekli olarak izlenmesini ve kontrol altında tutulmasını sağlar. Kontrol grafikleri ve diğer istatistiksel araçlar kullanılarak, süreç performansı sürekli olarak değerlendirilir ve kontrol dışı durumlar tespit edilir. Bu sayede, süreçlerde meydana gelen sapmalar erken aşamada fark edilip düzeltici önlemler alınabilir.
- Süreç varyasyonlarının kontrol altına alınması ve sürekli iyileştirme çalışmaları sayesinde, daha yüksek kaliteli ürünler ve hizmetler sunulabilir. Bu da müşteri memnuniyetini artırır ve rekabet avantajı sağlar.

- Kalite problemleri ve hatalar, üretim ve hizmet süreçlerinde maliyetlerin artmasına neden olur. SPC, bu tür problemleri minimize ederek maliyetleri azaltmayı hedefler. Hataların ve kusurların erken aşamada tespit edilip düzeltilmesi, yeniden işleme, hurda ve müşteri şikayetleri gibi maliyetleri düşürür.
- SPC, süreçlerin sürekli olarak izlenmesi ve analiz edilmesi yoluyla iyileştirme fırsatlarının belirlenmesini sağlar. Süreçlerdeki zayıf noktalar ve varyasyon kaynakları tespit edilerek, iyileştirme çalışmaları başlatılabilir. Bu da süreç verimliliğini ve performansını artırır.

### 3.13. SPC'nin Tarihçesi

SPC'nin kökenleri, 1920'lerde Walter A. Shewhart tarafından geliştirilmiş olan istatistiksel kalite kontrol tekniklerine dayanır. Shewhart, Bell Telefon Laboratuvarları'nda çalışırken, üretim süreçlerindeki varyasyonları analiz etmek için kontrol grafiklerini geliştirdi. 1930'larda Shewhart'ın çalışmaları, W. Edwards Deming tarafından genişletildi ve Japonya'da kalite yönetimi ve proses iyileştirme alanında büyük bir etki yarattı. Deming'in çalışmaları, Japonya'nın üretim kalitesini artırmasına ve uluslararası rekabet gücünü artırmasına yardımcı oldu. (Burnak ve Aktar Demirtaş, 2019)

### 3.14. SPC'nin Temel İlkeleri

- Her üretim sürecinde, kaçınılmaz olarak bir miktar varyasyon vardır. Varyasyonlar, süreç içinde doğal olarak meydana gelen ve kontrol edilemeyen rastgele varyasyonlar (tesadüfi nedenler) ve belirli bir nedene bağlı olarak ortaya çıkan özel nedenler (sistemik nedenler) olarak ikiye ayrılır. SPC'nin amacı, bu varyasyonları analiz ederek, süreçteki özel nedenleri belirlemek ve ortadan kaldırmaktır.
- SPC'nin temel araçlarından biri kontrol grafikleridir. Kontrol grafikleri, proses performansını izlemek ve kontrol altında olup olmadığını belirlemek için kullanılır. Kontrol grafiklerinde, belirli bir zaman dilimi boyunca alınan örneklerin ölçüm değerleri, ortalama, üst kontrol sınırı (Upper Control Limit-UCL) ve alt kontrol sınırı (Lower Control Limit-LCL) ile karşılaştırılır. Bu sınırlar, prosesin doğal varyasyon sınırlarını temsil eder.
- SPC, süreç performansını izlemek için sürekli veri toplama ve analiz gerektirir. Bu veri toplama süreci, ölçüm sistemlerinin doğruluğunu ve tekrarlanabilirliğini

sağlamak için dikkatli bir şekilde yapılmalıdır. Veriler analiz edilerek, süreçteki varyasyonlar ve olası sorunlar belirlenir.

- SPC, sürekli iyileştirme felsefesine dayanmaktadır. Süreçlerin sürekli olarak izlenmesi ve analiz edilmesi, süreç performansının sürekli olarak iyileştirilmesine olanak tanır. Bu yaklaşım, süreçteki zayıf noktaların belirlenmesini ve iyileştirme fırsatlarının tespit edilmesini sağlar. (Erginel, 2020)

### 3.15. SPC Metotları

SPC metotları, üretim ve hizmet süreçlerinin performansını izlemek ve iyileştirmek için kullanılan çeşitli araç ve teknikleri içerir. Bu metotlar, süreçlerin istikrarını sağlamak, kaliteyi artırmak ve verimliliği yükseltmek amacıyla verilerin sistematik bir şekilde toplanmasını, analiz edilmesini ve yorumlanmasını sağlar. Çetele diyagramı, süreç akış şeması, beyin fırtınası, histogram, Pareto analizi, neden-sonuç diyagramı ve kontrol diyagramları gibi araçlar, SPC'nin temel bileşenleridir ve süreçlerin sürekli iyileştirilmesi için vazgeçilmezdir. Bu metotlar, problemleri belirlemeye, kök nedenleri tespit etmeye ve çözüm önerileri geliştirmeye yardımcı olarak, işletmelerin rekabet gücünü artırır ve müşteri memnuniyetini sağlar. Ishikawa, kaliteye ilişkin karşılaşılan problemlerin %95'inin temel istatistik teknikleri ile çözülebileceğini, kalan %5 için ise ileri seviye istatistik yöntemleri uygulanması gerektiğini bildirmiştir. (Thomas, 2000)

#### 3.15.1. Çetele Diyagramı

Verilerin toplanması ve organize edilmesi için kullanılan basit bir araçtır. Bu diyagram, verilerin belirli kategorilere ayrılmasını ve her kategoriye düşen olayların sayısının kaydedilmesini sağlar. Çetele diyagramlarının kullanıldığı alanlara, hata sayımlarının takibi, müşteri şikayetlerinin sınıflandırılması, üretim hatalarının izlenmesi örnek olarak verilebilir. Çetele diyagramlarının kullanımı ve anlaşılması kolaydır. Verilerin dağılımını sayısal ve görsel olarak gösterir. Veri seti oluşturma sürecinin sistematik bir hale getirilmesini sağlar.

#### 3.15.2. Süreç Akış Şeması

Bir sürece ait adımları ve bu adımlar arasındaki ilişkileri görsel olarak temsil eden bir diyagramdır. Bu şemalar, süreçlerin analiz edilmesi ve iyileştirilmesi için kullanılır. İş

süreçlerinin detaylı olarak analiz edilmesi, süreçlere ait risk analiz çalışmaları, verimlilik artırma çalışmaları, süreçlerin tanımlı hale gelmesi ve standardizasyon çalışmaları vb. konularda süreç akış şemalarından yararlanır. Süreç akış şemaları, hazırlandıkları süreçlerin anlaşılmasını kolaylaştırır, Darboğazların tespit edilmesine ve problemlerin ortaya çıkmasına yardımcı olur. Süreçlerin optimize edilmesine katkı sağlar.

### **3.15.3. Beyin Fırtınası**

Ele alınacak konuyla ilgili bir grup insanın bir araya gelerek serbest bir şekilde fikir üretmesini sağlayan bir tekniktir. Herhangi bir kısıt olmadan, mümkün olduğunca çok fikir toplamak ve daha sonra bu fikirleri değerlendirmektir. Risk analizi oluşturma, problem çözme, yeni ürün tasarımı ve süreç geliştirme gibi çalışmalarda beyin fırtınası yönteminden yararlanır. Bu yöntem yaratıcılığı teşvik eder. Konuya, çeşitli perspektiflerden bakılmasına katkı sunar. Fikir üretimi açısından hızlı ve etkili bir yöntemdir.

### **3.15.4. Histogram**

İncelenen verilerin dağılımını ve frekansını gösteren bir tür sütun grafiğidir. Belirli aralıklara ayrılan veriler için, her aralıkta kaç veri olduğunu gösterir. Veri setlerindeki veri dağılımları analiz edilirken, süreç performans değerlendirmeleri yapılırken, kalite kontrol uygulamaları gerçekleştirilirken sıklıkla yararlanır. Süreç performansının izlenmesine yardımcı olur. Veri dağılımlarını grafiksel olarak gösterir. Anomali yaratan verilerin tespit edilmesini sağlar.

### **3.15.5. Pareto Analizi**

Pareto Analizi, 80/20 kuralına dayanan bir analiz yöntemidir. Bu kural, sonuçların %80'inin nedenlerin %20'sinden kaynaklandığını öne sürer. Hata türlerinin önceliklendirilmesi, müşteri şikayetlerinin analiz edilmesi, kalite iyileştirme çalışmalarının yapılması vb. konularda pareto analizinden yararlanır. Önemli problemlerin hızlıca belirlenmesinde etkin bir yöntem olan pareto analizi, kaynakların verimli kullanılmasında ve süreç iyileştirme uygulamalarında avantaj yaratır.

### 3.15.6. Neden – Sonuç Diyagramı

Ishikawa diyagramı ya da balık kılıçığı diyagramı olarak da bilinir. İnsan, Makine, Metot ve Malzeme başlıkları altında, belirli bir sonuca yol açan olası nedenleri belirlemek ve analiz etmek için kullanılır. Diyagram ana nedenleri ve bunların alt nedenlerini sınıflandırır. Problemlerin kök nedenleri belirlenirken, süreç iyileştirme çalışmalarında ve kalite kontrol uygulamalarında yararlanır. Neden-Sonuç diyagramları, sorun çözme sürecini sistematik hale getirir. Problemlerin kök nedenlerinin belirlenmesini etkin bir yöntemdir. Analitik düşünmeyi teşvik eder.

### 3.15.7. Kontrol Diyagramları

Ele alınan sürecin zaman içindeki performansını takip etmek için kullanılır. Bu diyagramlar, sürecin kontrol altında olup olmadığını tespit etmek için, sürece ait verilerin alt ve üst kontrol limitleri arasında olup olmadığını gösterir. Süreç performanslarının, istikrarının değerlendirilmesinde ve kalite kontrol uygulamalarında kullanılır. Sürecin kontrol altında olup olmadığını gösterir. Süreçteki anlık anomalilerin ve değişkenliklerin tespit edilmesine yardımcı olur. Süreç performansının sürekli takip edilmesini sağlar. (Özdemir, 2013)

### 3.16. $\bar{x}$ ve s Grafikleri

SPC metotları arasında yer alan  $\bar{x}$  ve s grafiklerinin amacı, bir sürecin zaman içindeki ortalamasını ve değişkenliğini izlemektir. Bu grafikler, süreç performansının istikrarlı olup olmadığını ve belirlenen kontrol sınırları içinde kalıp kalmadığını değerlendirir.

#### 3.16.1. $\bar{x}$ Grafiği

$\bar{x}$  grafiği, belirli bir zaman diliminde veya parti içinde üretilen örneklerin ortalama değerlerini gösterir. Bu grafiğin kullanım amaçları;

- Süreç ortalamasının zaman içerisindeki değişimini gözlemlemek,
- Süreç içerisindeki trendi ve dağılımı tespit etmek,
- Sürecin hedef değere ne kadar yakın olduğunu değerlendirmektir.

$X_{ij}$ , i-inci örneğin,  $i = 1, 2, \dots, m$ , j-inci ölçüm değeri,  $j = 1, 2, \dots, n$  olmak üzere, i-inci örneğin ortalaması için kullanılan formül aşağıda verilmiştir:

$$\bar{X}_i = \frac{\sum_{j=1}^n X_{ij}}{n} \quad (3.14)$$

Sonrasında, süreç ortalaması ise, örnek ortalamalarının ortalaması olur. Hesaplama formülü şu şekildedir:

$$\bar{\bar{X}} = \frac{\sum_{i=1}^m \bar{X}_i}{m} \quad (3.15)$$

Üst kontrol limiti (ÜKS $\bar{X}$ ) ve alt kontrol limiti (AKS $\bar{X}$ ) ise aşağıdaki formül kullanılarak hesaplanmaktadır:

$$\text{ÜKS}_{\bar{X}} = \bar{\bar{X}} + A_3\bar{S} \quad (3.16)$$

$$\text{OÇ}_{\bar{X}} = \bar{\bar{X}} \quad (3.17)$$

$$\text{AKS}_{\bar{X}} = \bar{\bar{X}} - A_3\bar{S} \quad (3.18)$$

Bu formülde kullanılan,  $A_3$  katsayısı, örneklem büyüklüğüne bağlı olarak belirlenen bir sabittir. Katsayılar, Kontrol Grafikleri İçin Katsayılar Çizelgesi, Ek Açıklamalar-E olarak paylaşılmıştır.

Her örnekleme periyodunda alınan örneklerin ortalamaları hesaplandıktan sonra, bu değerler,  $\bar{x}$  grafiğinde işaretlenir. Sonrasında, ÜKS $\bar{X}$  ve AKS $\bar{X}$  değerleri hesaplanarak grafiğe yerleştirilir. Hesaplanan ortalamalar, kontrol limitleri içerisinde yer alıyorsa, süreç kontrol altında kabul edilir.

### 3.16.2. S (Standart Sapma) Grafiği

S grafiği, belirli bir zaman diliminde veya parti içinde üretilen örneklerin standart sapmalarını gösterir. Bu grafiğin kullanım amaçları;

- Zamana bağlı süreç içerisindeki değişkenliği gözlemlemek,
- Süreçteki varyasyonları ve düzensizlikleri tespit etmek,
- Sürecin güvenilirliği ve tutarlılığı hakkında değerlendirme yapabilmektir.

$\bar{x}$  grafiği, belirli bir zaman diliminde veya parti içinde üretilen örneklerin ortalama değerlerini gösterir. Bu grafiğin kullanım amaçları;

- Süreç ortalamasının zaman içerisindeki değişimini gözlemlemek,
- Süreç içerisindeki trendi ve dağılımı tespit etmek,
- Sürecin hedef değere ne kadar yakın olduğunu değerlendirmektir.

Sürecin standart sapması bilinmiyorsa, eşit büyüklükte örnekler alınarak, bunların standart sapmaları tahmin edilir. j-inci örneğin standart sapması  $s_j$ ,  $j = 1,2,\dots,m$  olmak üzere, aşağıdaki formül hesaplanılarak kullanılır:

$$\bar{s} = \frac{\sum_{j=1}^m s_j}{m} \quad (3.19)$$

Üst kontrol limiti (ÜKS<sub>S</sub>) ve alt kontrol limiti (AKS<sub>S</sub>) ise aşağıdaki formül kullanılarak hesaplanmaktadır:

$$\text{ÜKS}_S = B_4 \bar{s} \quad (3.20)$$

$$\text{OÇ}_S = \bar{s} \quad (3.21)$$

$$\text{AKS}_S = B_3 \bar{s} \quad (3.22)$$

Bu formülde kullanılan,  $B_3$  ve  $B_4$  katsayıları, örneklem büyüklüğüne bağlı olarak belirlenen bir sabittir. Ek Açıklamalar-E içerisinde yer almaktadır. (Burnak ve Aktar Demirtaş, 2019)

### 3.17. Süreç Yetenek Analizi

Bir üretim sürecinin belirli tolerans sınırları içinde ne kadar tutarlı bir şekilde ürün üretebildiğini değerlendiren bir tekniktir. Bu analiz, süreç performansını ve kalite seviyesini ölçmek için kullanılır.  $C_m$ ,  $C_p$  ve  $C_{pk}$  gibi süreç yeterlilik indeksleri, bu değerlendirmeyi yapmak için kullanılır.

#### 3.17.1. $C_p$ Hesaplama

Süreç yeterlilik indeksi ( $C_p$ ), ele alınan sürecin spesifikasyonları hangi ölçüde sağladığının bir göstergesidir. Farklı birimlerde olan kalite karakteristiklerini ortadan kaldırır ve süreçlerin birbirleri ile karşılaştırılmasını sağlar.  $C_p$  aşağıda yer alan formül kullanılarak hesaplanmaktadır:

$$C_p = \frac{\text{ÜSS} - \text{ASS}}{6\hat{\sigma}} \quad (3.23)$$

Bu formülde, ÜSS kalite karakteristiğinin üst spesifikasyon değeri, ASS kalite karakteristiğinin alt spesifikasyon değeri,  $\hat{\sigma}$  ise sürecin standart sapmasının tahminidir.

$C_p$  indeksi yorumlanırken, sürecin istatistiksel olarak kontrol altında olduğu kabul edilmektedir. Ayrıca işgili kalite karakteristiğinin normal dağılıma uygun olduğu

düşünülmektedir. Buna göre,  $C_p$  değerlerine ilişkin değerlendirmeler Çizelge 3.7'ye göre yapılmaktadır.

**Çizelge 3.7.** Süreç Yetenek İndeksinin Yorumlanması (Şale, 2023)

Süreç Yeteneği İndeksi	Yorum
$C_p < 1,0$	Süreç yeterli değil
$1,0 \leq C_p < 1,33$	Süreç geliştirilebilir
$1,33 \leq C_p \leq 1,67$	Süreç yeterli kabul edilebilir. Ancak kritik süreçlerde iyileştirme yapılması önerilir.
$C_p \geq 1,67$	Süreç yeterlidir. Süreç performansı yeterli düzeydedir.

$C_p$  indeksinde göz önüne alınan, tolerans aralığı içine,  $6\sigma$ 'nın sığmasıdır. Ancak  $C_p$  ortalamadaki kayıklığı dikkate almamaktadır. Bu dezavantajı ortadan kaldırmak için  $C_p$  ile birlikte, ortalamadaki kayıklığı da göz önüne aldığından  $C_{pk}$  değeri dikkate alınmaktadır.

### 3.17.2. $C_{pk}$ ve $C_m$ Hesaplama

$C_{pk}$  değerinin hesaplama formülü aşağıda verilmiştir:

$$C_{pk} = \min \left\{ \frac{\bar{ÜSS} - \mu}{3\sigma}, \frac{\mu - \bar{ASS}}{3\sigma} \right\} \quad (3.24)$$

$C_{pk}$  değeri de,  $C_p$  değeri ile aynı şekilde yorumlanmaktadır.

$C_m$  süreç yeterlilik indeksinin türetilmesi, Taguchi'nin kayıp fonksiyonu temeline dayanır. Taguchi ortalama civarında üretim yapılmasının gerekli olduğunu savunmakla birlikte, toleranslar dahilinde bile olsa ortalamadan sapmanın bir kayıp olduğunu bildirmiştir. Bu nedenle, ortalamadan sapma miktarının karesini varyansa ekleyerek yeni bir standart sapma hesaplamıştır:

$$\sigma^* = \sqrt{\sigma^2 + (\mu - T)^2} \quad (3.25)$$

Bu durumda  $C_m$  şu şekilde hesaplanmaktadır:

$$C_m = \frac{\bar{ÜSS} - \bar{ASS}}{6\sqrt{\sigma^2 + (\mu - T)^2}} \quad (3.26)$$

Süreç yeterlilik analizi, üretim süreçlerinin performansını ve kalite seviyesini değerlendirmenin önemli bir yoludur.  $C_p$ ,  $C_{pk}$  ve  $C_m$  indeksleri, sürecin ne kadar yetenekli olduğunu ve spesifikasyon sınırları içinde ne kadar tutarlı üretim yapabildiğini ölçer. Bu analizler, süreçlerin iyileştirilmesi ve müşteri memnuniyetinin artırılması için kritik öneme sahiptir. Hesaplanan indekslerin yorumlanması, süreç iyileştirme çabalarına rehberlik eder ve kalite kontrol süreçlerini optimize eder. (Erginel, 2020)



#### 4. BULGULAR VE TARTIŞMA

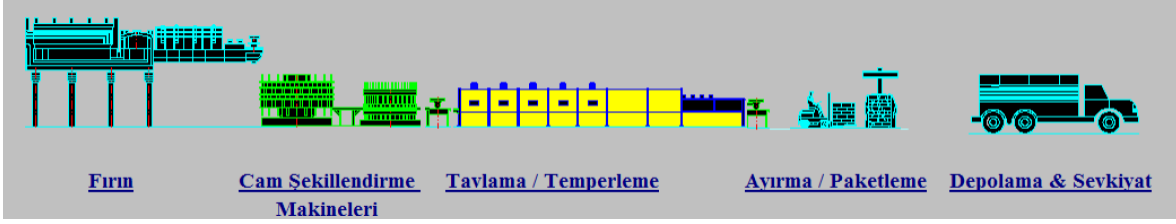
Şişecam Cam Ev Eşyası Eskişehir Fabrikası, 1997 yılında kurulmuştur. Toplam 436.325 m<sup>2</sup> alana sahip olup, 123.565 m<sup>2</sup>'lik kapalı alanı bulunmaktadır. A, B ve C olmak üzere 3 fırınla faaliyetlerini sürdürmektedir. 525 ton/gün üretim kapasitesiyle Türkiye'nin en büyük züccaciye üretim tesisidir. Yıllık brüt üretim kapasitesi 191.625 tondur. Bu da yaklaşık 400 milyon adet üretime karşılık gelmektedir.

- Pres Üfleme – Ayaksız Bardak Üretimi,
- Pres Üretim,
- Çekme Ayaklı Bardak Üretim,
- Yapıştırma Ayaklı Bardak Üretim,
- IS Üretim,
- Sınai Pres Üretimi olmak üzere 6 farklı proses ile üretim yapılmaktadır.

Cam Ev Eşyası Eskişehir Fabrikası üretim tesislerinde, 5 adet pres üfleme – ayaksız bardak üretim hattı, 10 adet pres üretim hattı, 2 adet çekme ayaklı bardak üretim hattı, 2 adet yapıştırma ayaklı bardak üretim hattı, 1 adet IS üretim hattı ve 2 adet sınai pres üretim hattı olmak üzere toplam 22 üretim hattı bulunmaktadır. Bu hatların yanı sıra, Dekorasyon Atölyesi içerisinde 6 adet dekorasyon hattı bulunmaktadır.

Renksiz ve kendiliğinden renklendirilmiş cam üreten tesisin, proses adımları temel olarak aşağıda verilmiştir:

- Harman Hazırlama,
- Cam Ergitme,
- Çalışma Havuzu ve Forehearth,
- Şekillendirme,
- Tavlama / Temperleme,
- Paketleme,
- Depolama ve Sevkiyat



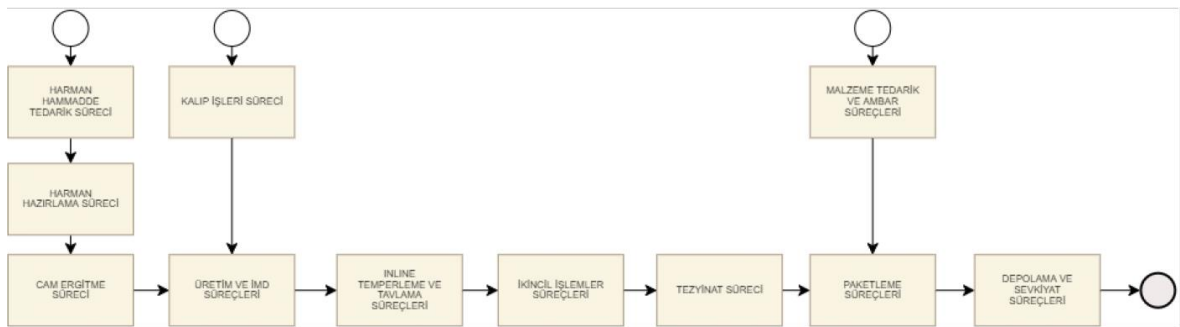
**Şekil 4.1.** Cam Ev Eşyası Üretimi Şematik Gösterim

Cam Ev Eşyası üretim süreci hammaddelerin (kum, kalker, dolomit, feldspat, cam kırığı vb.) belirli bir reçeteye göre karıştırılıp, cam ergitme fırınlarına gönderilmesiyle başlar. Yaklaşık 1500 °C'lik fırınlar içerisinde ergitilen cam, çalışma havuzu ve forehearth'ta şartlandırılarak şekillendirme makinalarına, uygun kalıplarla şekil verilmek üzere damla halinde düşürülür.

- Pres Üfleme makinalarında, ebüşör içine düşürülen cam damlasının önce bir mastör yardımıyla preslenmesi ve oluşan parizonun kalıp içerisinde üfleme havası yardımıyla döndürülerek şişirilmesi suretiyle mamulün şekillendirilmesi prosesi gerçekleştirilirken,

- IS üretiminde ise, kalıp içine düşürülen damlanın bir mastör ile preslenmesi ve oluşan parizonun ikinci bir kalıba taşınıp üfleme havası ile şişirilmesi suretiyle ürün şekillendirilmesi tamamlanır.

- Pres makinalarında ise, kalıbın içine düşürülen cam damlasının bir mastör yardımıyla preslenmesi ile şekillendirme prosesinin gerçekleşmesi sağlanır.



**Şekil 4.2.** Cam Ev Eşyası Süreç Akış Şeması

Yapılan çalışmanın konusu olan, pres üretim prosesinin şekillendirme sürecine daha detaylı değinecek olursak, ergimiş cam, damla yolu yardımı ile pres kalıplarının ön bölümüne dökülür. Damlanın sıcaklığı, kalıba düşüş pozisyonu ve ağırlığı, üretilmek istenen

ürünün boyutuna ve şekline bağlı olarak dikkatli bir şekilde ayarlanmalıdır. Sonrasında damla, alt ve üst kalıplar arasına pozisyonlandırılır. Üst kalıp, hidrolik veya mekanik presleme makineleri kullanılarak erimiş camın üzerine indirilir. Bu basınç uygulaması, camın kalıbın iç yüzeyine doğru itilerek şekillenmesini sağlar. Presleme işlemi sırasında, kalıpta bulunan ince detaylar (desenler, markalar, şekil detayları) camın yüzeyine işlenir. Bu aşama, ürünün nihai estetik ve fonksiyonel özelliklerini belirler. Şekillendirilmiş cam ürünler, yavaşça soğutulmak üzere tavlama fırınına yerleştirilir. Bu işlem, camın iç gerilimlerini azaltarak ürünün dayanıklılığını artırır. Tavlama fırınında, cam ürünler belirli bir sıcaklık aralığında kontrollü bir şekilde soğutulur. Bu süreç, camın ani soğuma nedeniyle çatlamasını veya kırılmasını önler. Bu adımlar, cam ev eşyalarının presleme yöntemiyle yüksek kalitede ve detaylı bir şekilde üretilmesini sağlar.

Cam Ev Eşyası Eskişehir Fabrikası'nda pres üretim tekniği ile en çok üretilen ürünlerden biri, kulplu çay bardağıdır.



**Şekil 4.3.** Kulplu Çay Bardağı Görseli

Kulplu çay bardağı ürünü, hem yerel hem de uluslararası düzeyde önemli bir tüketici segmentine hitap eder. Bu pazar, ev içi kullanımdan kafe ve restoranlara, otellerden çay evlerine kadar geniş bir kullanım alanına sahiptir. Çay tüketimi, birçok kültürde günlük yaşamın vazgeçilmez bir parçasıdır ve bu durum, kulplu çay bardağı talebinin sürekli yüksek kalmasını sağlar. Tüketicilerin çay içme alışkanlıkları ve estetik zevkleri, kulplu çay bardağı pazarındaki ürün çeşitliliğini şekillendirir. Geleneksel ve modern tasarımlar, farklı büyüklükler ve renk seçenekleri tüketicilerin tercihleri arasında yer alır. Ayrıca, ergonomik tasarımlar ve dayanıklı malzemeler kullanılarak üretilen bardaklar, tüketiciler arasında popülerdir.

Kulplu ay bardağı pazarı, genellikle ev kullanımı, ticari kullanım ve hediyeelik eŐya olmak üzere 3 ana segmente ayrılır. Ev içi kullanım için tasarlanmıŐ bardaklar, genellikle Őık ve estetik görünümleriyle dikkat çekerken, ticari işletmeler için tasarlanan bardaklar dayanıklılık ve iŐlevsellik açısından ne çıkar.

Hediyeelik eŐya segmentinde, özel günler için tasarlanan bardaklar yer alır. Pazarda hem yerel hem de uluslararası birçok marka faaliyet göstermektedir. Rekabet, rn kalitesi, fiyatlandırma, yenilikçi tasarımlar ve marka bilinirliği üzerinden yürütülür.

Pazar koŐullarının zorlaŐması nedeniyle, ürünlerin kaliteli ve minimum maliyetle, ayrıca minimum fire ile üretilmesi büyük önem taşır. Bu durum, maliyet yönetimi ve verimlilik stratejilerinin önemini artırmaktadır. Pazarda fiyatlandırma, üretim maliyetleri, malzeme kalitesi ve tasarım özelliklerine göre deđiŐkenlik gösterir. Yüksek kaliteli, el yapımı veya özel tasarımı bardaklar daha yüksek fiyatlardan satılırken, seri üretim ve standart tasarımlar daha uygun fiyatlarla tüketicie sunulabilir.

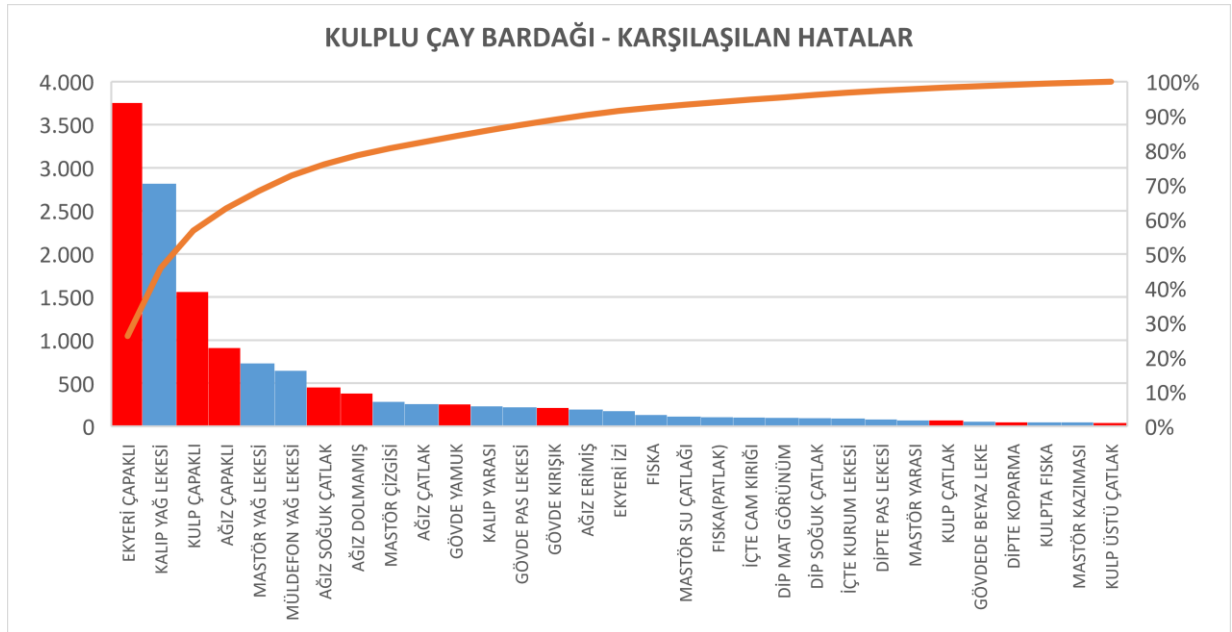
Teknolojik ilerlemeler ve değişen tüketicie beklentileri, kulplu çay bardağı pazarında yenilikçi ürünlerin ortaya çıkmasına neden olmaktadır. Ayrıca, sürdürülebilirlik ve evre dostu ürünler giderek daha fazla önem kazanmakta ve geri dönüştürülebilir malzemelerden yapılan bardaklara olan talep artmaktadır. Kulplu ay bardağı pazarı, geniş bir tüketicie kitlesine hitap eden ve sürekli büyüme potansiyeli taŐıyan dinamik bir sektördür.

Cam Ev EŞyası Eskişehir Fabrikası'nda pres üretim tekniği ile üretilen kulplu çay bardakları veriminin arttırılması ve Şekillendirme prosesi esnasında meydana gelen operasyonel kayıpların azaltılmasına yönelik yapılan tez çalışması için öncelikle kulplu çay bardağı üretimlerine ait veri toplama adımı gerçekleştirilmiştir.İlk olarak 2023 yılı içerisindeki kulplu çay bardağı üretimleri için kullanılan paket program üzerinden rapor çekilmiŐ ve izelge 4.1'de yer alan verilere ulaŐılmıŐtır.

**Çizelge 4.1.** 2023 Yılı Kulplu Çay Bardağı Üretim Bilgileri

	Üretim Verileri	Birim
2023 yılı Toplam Üretim	13.899.066	Adet
2023 yılı Palete Giren Ürün	13.003.211	Adet
Toplam Hatalı Ürün Adedi	895.854	Adet
Hatalı Ürün Oranı	6,45	%

2023 yılına ait tüm üretim kampanyaları için oluşturulmuş proses kontrol raporları analiz edildiğinde, alınan toplam 82.076 numunede karşılaşılan toplam hata sayısının 14.805 olduğu görülmektedir. (Proses kontrol raporlarında 1 ürün üzerinde bulunan tüm hatalar yer almaktadır.) Sonrasında proses kontrol raporlarında karşılaşılan hataları analiz etmek için, pareto diyagramı hazırlanmıştır. (Çizelge 4.2)

**Çizelge 4.2.** Kulplu Çay Bardağı Karşılaşılan Hata Pareto Diyagramı




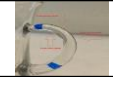



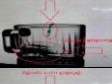




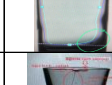
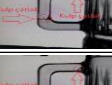

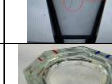
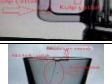

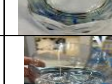




Oluşturulan pareto diyagramında, damla ağırlığı kaynaklı hatalar toplam hataların %54,8'ine karşılık gelmektedir. Damla ağırlığı kaynaklı hatalara ait tanımlar ve hata adetleri Çizelge 4.3'te yer almaktadır.

**Çizelge 4.3.** Proseslerde Karşılaşılan Damla Ağırlığı Kaynaklı Hatalar Listesi

Hata Tanımı	Hatalı Ürün Adeti
EKYERİ ÇAPAKLI	3.752
KULP ÇAPAKLI	1.561
AĞIZ ÇAPAKLI	911
AĞIZ SOĞUK ÇATLAK	454
AĞIZ DOLMAMIŞ	382
AĞIZ ÇATLAK	259
GÖVDE YAMUK	257
GÖVDE KIRIŞIK	215
KULP ÇATLAK	71
DİPTE KOPARMA	49
KULP ÜSTÜ ÇATLAK	40
KALIP KROMAJ ÇATLAĞI	29
GÖVDEDE CAM YAPIŞIĞI	27
AĞIZDA KAYNAMA	24
DİP ÇAPAKLI	19
DİP ÇATLAK	19
AĞIZ YANMIŞ KIRIK	7
AĞIZ KIRIK	6
DİPTE KATLANMA	6
GÖVDE KATLANMA	6
KULP ALTI ÇATLAK	6
EKYERİ ÇATLAK	5
AĞIZDA CAM YAPIŞIĞI	2
DIŞ CAM YAPIŞIĞI	1

Damla ağırlığı kaynaklı öne çıkan hatalara ait görseller Çizelge 4.4’te verilmiştir.

**Çizelge 4.4.** Damla Ağırlığı Kaynaklı Hatalara İlişkin Görseller

Hata	Görsel	Hata	Görsel	Hata	Görsel
EKYERİ ÇAPAKLI		KULP ÇATLAK		AĞIZ YANMIŞ KIRIK	
KULP ÇAPAKLI		DIPTE KOPARMA		AĞIZ KIRIK	
AĞIZ ÇAPAKLI		KULP ÜSTÜ ÇATLAK		DİPTE KATLANMA	
AĞIZ SOĞUK ÇATLAK		KALIP KROMAJ ÇATLAĞI		GÖVDE KATLANMA	
AĞIZ DOLMAMIŞ		GÖVDEDE CAM YAPIŞIĞI		KULP ALTI ÇATLAK	
AĞIZ ÇATLAK		AĞIZDA KAYNAMA		EKYERİ ÇATLAK	
GÖVDE YAMUK		DİP ÇAPAKLI		AĞIZDA CAM YAPIŞIĞI	
GÖVDE KIRIŞIK		DİP ÇATLAK		DIŞ CAM YAPIŞIĞI	

Oluşan kalitesizlik maliyetlerine yönelik hesaplamalar yapıldığında;

- Damla ağırlığı kaynaklı meydana gelen hataların, toplam hataların %54,8'i olduğu görülmüştür.
- Bu oranın 2023 yılı üretim adetleri incelendiğinde, 490.617 adete karşılık geldiği tespit edilmiştir.
- Bir ürünün ortalama ağırlığı 207,74 gram olduğundan, toplamda 490.617 adet \* 0,20774 kg/adet hesaplamasından 101.921 kg cam kayıp yaşandığı ve bu miktara karşılık gelen maliyetin ise, 3.742.532 ₺ olduğu görülmüştür. Detaylar Çizelge 4.5'te yer almaktadır.

**Çizelge 4.5.** 2023 yılı Damla Ağırlığı Kaynaklı Kayıpların Maliyeti

	Üretim Verileri	Birim
2023 yılı Toplam Üretim	13.899.066	adet
2023 yılı Palete Giren Ürün	13.003.211	adet
Toplam Hatalı Ürün Adedi	895.854	adet
Hatalı Ürün Oranı	6,45	%
Damla Ağırlığı Kaynaklı Hatalı Ürün Sayısı	490.617	adet
Bir Ürün Ortalama Ağırlığı	207,74	gr
Damla Ağırlığı Hatası Kaynaklı Kayıp Cam	101.921	kg
Damla Ağırlığı Hatası Kaynaklı Maliyet	3.742.532	₺

#### 4.1. Pres Üretim Süreci İçin FMEA Uygulaması

Pres Üretim prosesinde karşılaşılan operasyonel kayıpların hata nedenlerinin FMEA çalışması ile belirlenmesi ve bu hataları ortadan kaldırmaya yönelik aksiyonların önceliklendirilmesi hedeflenmiştir.

Öncelikli olarak, Pres Üretim prosesinin adımları;

- Girdi Kalite Kontrol,
- Hammadde Depolama,
- Harman Hazırlama,
- Cam Ergitme,

- Forehearth,
- Şekillendirme,
- Sıcak Uç Kontrol,
- Tavlama/Temperleme,
- Soğuk Kaplama,
- Proses Kontrol,
- Hata Ayırma (Inspection),
- Paketleme,
- Ürün Kontrol,
- Depolama ve Sevkiyat olarak belirlenmiştir.

Belirlenen proses adımları için süreç akış şeması hazırlanmıştır. Şekillendirme sürecine ait süreç akış şeması Şekil 4.4 ile paylaşılmıştır.

PROSES ADI / STEP NO	PROSESİN TANIMI / EXPLANATION	BC / CC	RESPONSIBLE	INPUT	FLOW DIAGRAM	PROSESİN KURALLARI / INSTRUCTION(S)	OUTPUT
50.01	Danışa oluşumu ve transferi Formation and transfer of the job	(S) Form, Sıcaklık ve Ağırlık (S) Form, Temperature and Weight	Pres Üretim Şefliği Press Production Dept.	Parametre ayarları Set up parameters	<pre> graph TD     Op40[Op 40] --&gt; Op50.1{Op 50.1}     Op50.1 --&gt; Op50.2{Op 50.2}     Op50.2 --&gt; Op50.3{Op 50.3}     Op50.3 --&gt; HotCoating{Sıcak uç kontrolü / Hot coating}     HotCoating -- E/Y --&gt; Op50.4{Op 50.4}     HotCoating -- H/Y --&gt; Op50.5{Op 50.5}     Op50.4 --&gt; Op50.6{Op 50.6}     Op50.5 --&gt; Op50.6{Op 50.6} </pre>	TUM.01328 / TUM.02593	Vardiye Değeri Shift book Bağlama Kartı Binding card
50.02	Presleme Pressing	(S) Öğe kontrolü (Büyük, sıcaklık, ağırlık vb.) (S) Item control (Form, temperature, weight etc.)	Pres Üretim Şefliği Press Production Dept.	Tedrisik malin Parameter ayarları Inch. Drawing Set up parameters		TUM.02598	Vardiye Değeri Shift book Bağlama Kartı Binding card
50.03	Yakma pahlama Burning polishing		Pres Üretim Şefliği Press Production Dept.	Parametre ayarları Set up parameters		TUM.02598	Vardiye Değeri Shift book Bağlama Kartı Binding card
50.04	Sıcak kaplama Hot coating		Pres Üretim Şefliği Press Production Dept.	Parametre ayarları Set up parameters		Sıcak Kaplama Talimatı	
50.05	Künye temizliği Edge transfer		Pres Üretim Şefliği Press Production Dept.			TUM.02598	Vardiye Değeri Shift book Bağlama Kartı Binding card
50.06	Temperleme fırınına yükleme Loading to the tempering		Pres Üretim Şefliği Press Production Dept.			TUM.02598	Vardiye Değeri Shift book Bağlama Kartı Binding card

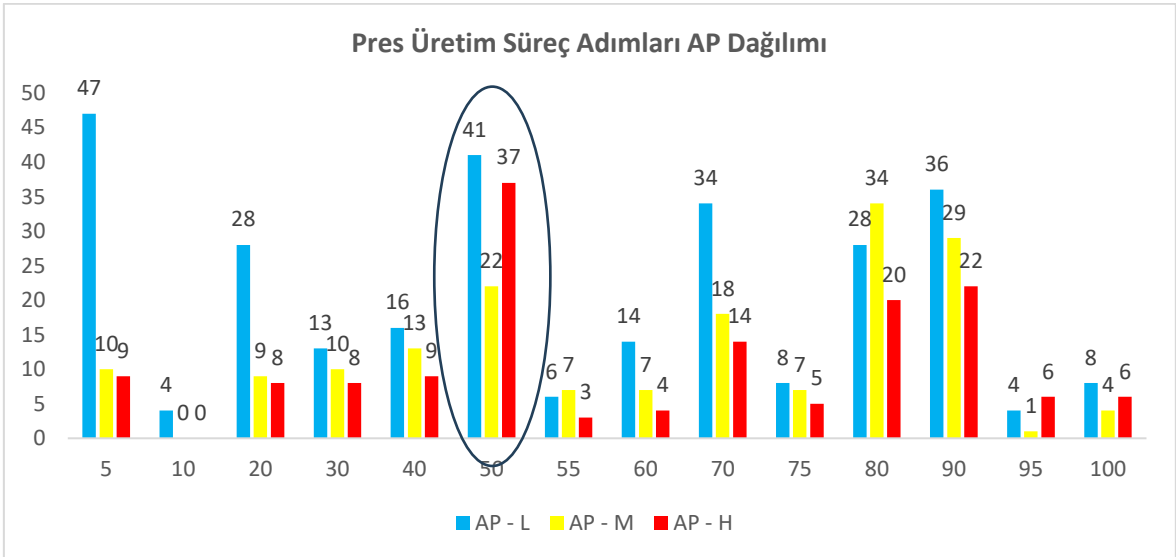
Şekil 4.4. Pres Üretim Şekillendirme Süreç Akış Şeması

Pres Üretim proses adımlarına yönelik süreç akış şeması hazırlandıktan sonra, FMEA çalışmasını gerçekleştirmek üzere, her süreç adımı için proje ekip üyeleri belirlenerek proje ekibi oluşturulmuştur. Şekillendirme adımı için, Pres Üretim Şefi, Mühendisi, Teknisyen ve Ustabaşısı, Bakım Mühendisleri, Kalite Mühendisi ekipte yer almaktadır.

Pres üretim süreci için, proje ekibinin bir araya gelmesiyle komite toplantıları gerçekleştirilmiştir. Bu toplantılarda, kalite mühendisi liderliğinde beyin fırtınası oturumları gerçekleştirilerek potansiyel hata modları belirlenmiştir. Hata modları, sürecin başarısız olabileceği tüm aşamalar için ele alınmıştır. Forma kaydedilen her bir hata olası nedenleri ile birlikte analiz edilmiştir.

Belirlenen her hata modunun etkileri, FMEA formu yardımı ile değerlendirilerek, pres üretim sürecinin genel performansı üzerindeki sonuçları incelenmiştir. Etkiler, müşteri memnuniyeti, üretim hataları ve maliyet gibi faktörler açısından ele alınmıştır.

Daha sonra aksiyon önceliklendirmesine yönelik çalışma yapılmıştır. Pres üretim sürecine yönelik FMEA çalışmasının sonuçlarına göre, her bir süreç adımı için ortaya çıkan, “Düşük” (L), “Orta” (M) ve “Yüksek” (H) öncelikli AP sayıları Şekil 4.5’te yer almaktadır.

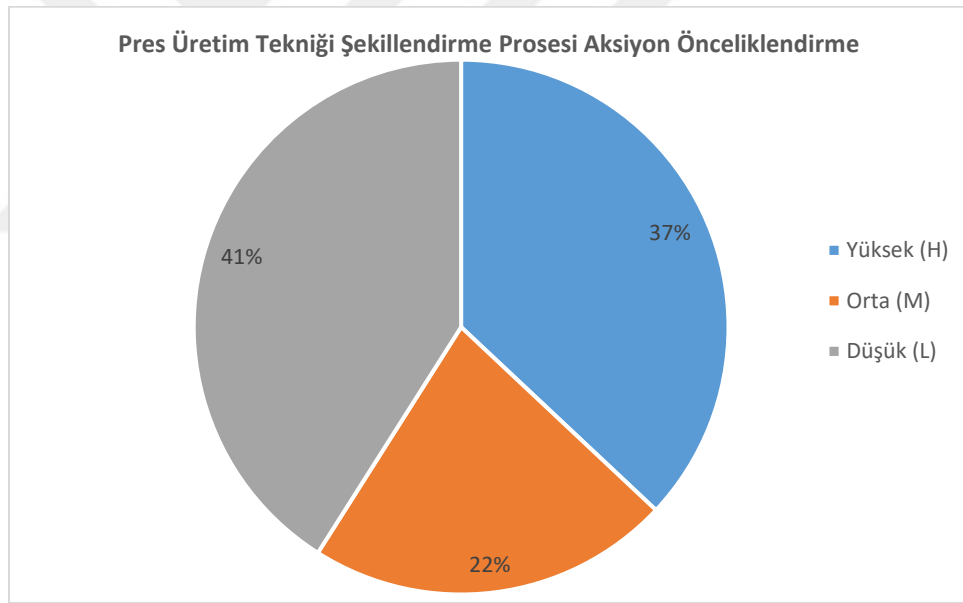


**Şekil 4.5.** Pres Üretim Süreç Adımları AP Dağılımı

Pres Üretim süreci şekillendirme adımı için yapılan FMEA çalışması sonucunda 100 adet hata türü ve etkisi belirlenmiştir. Bu potansiyel hata etkilerinin Şiddet (S) skorları için,

Ek Açıklamalar-A : FMEA Versiyon 5 Şiddet (S) Skor Çizelgesi, hata nedenlerinin proses için gerçekleşme olasılığı (O) skorları için, Ek Açıklamalar-B : FMEA Versiyon 5 Olasılık (O) Skor Çizelgesi ve hata moduna ait Tespit Etme Potansiyeli (D) skorları için Ek Açıklamalar-C : FMEA Versiyon 5 Tespit Edilebilirlik (D) Skor Çizelgesi kullanılmıştır.

Hata nedeni gerçekleşme olasılığına ilişkin skorlar belirlenirken, zaman bazlı tahmin değerleri için SAP'ta yer alan duruş raporlarındaki sayısal verilerden faydalanılmış ve mevcut durumdaki önleyici kontroller dikkate alınmıştır. Sonrasında FMEA için Ek Açıklamalar-D : FMEA Versiyon 5 Aksiyon Önceliklendirme (AP) Çizelgesi kullanılarak öncelikleri belirlenmiştir. Yapılan risk değerlendirme modeli sonrası 100 adet Hata Etkisinin, 37 adedi için Aksiyon Önceliklendirme “Yüksek” (H) olarak belirlenmiştir. (Şekil 4.6)



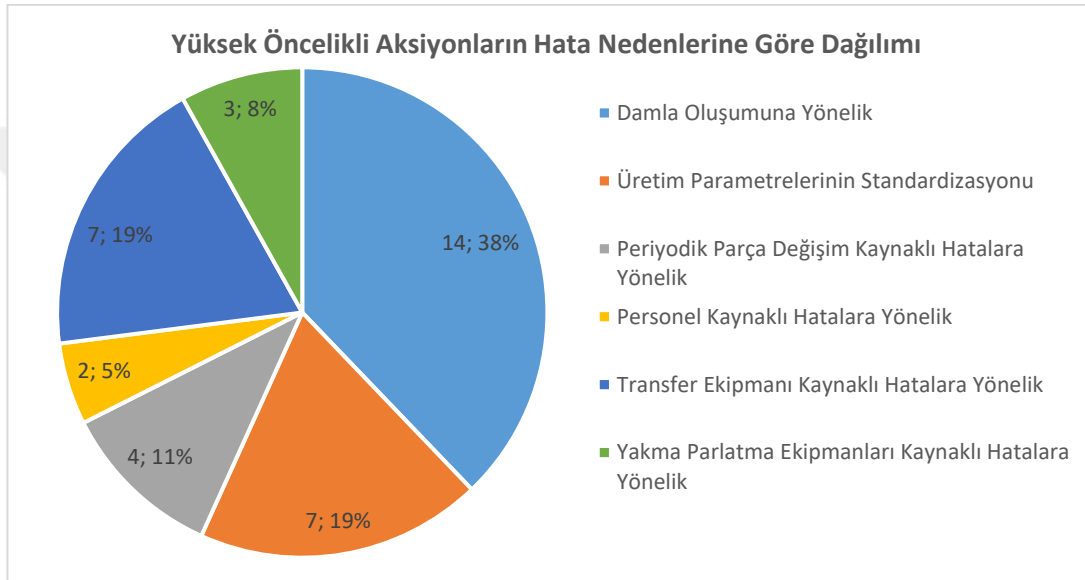
**Şekil 4.6.** Pres Üretim Tekniği Şekillendirme Prosesi AP Sonuçları

Aksiyon Önceliklendirme değerlendirmesine göre, Yüksek Öncelikli olarak belirlenen 37 aksiyonun Hata Nedenlerine göre dağılımı incelendiğinde;

- 14 adetinin damla oluşumu sürecindeki hata nedenleri kaynaklı,
- 7 adetinin üretim parametrelerinin standardize edilememesi ile ortaya çıkmış hata nedenleri kaynaklı,

- 7 adetinin ürünlerin transferi esnasında fonksiyonu bulunan ekipmanlar kaynaklı,
- 4 adetinin periyodik parça ve kalıp değişiminin yapılmaması ile ortaya çıkan hata nedenleri kaynaklı,
- 3 adetinin yakma parlatma işleminde kullanılan ekipmanlar kaynaklı,
- 2 adetinin ise personel hatası kaynaklı meydana gelen hata nedenleri olduğu

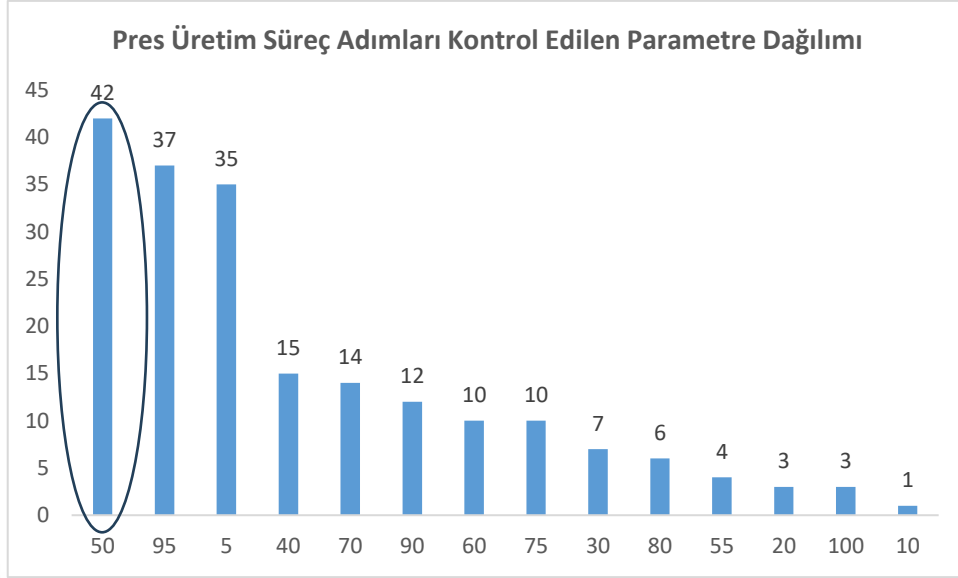
gözükmektedir. (Şekil 4.7)



**Şekil 4.7.** Yüksek Öncelikli Aksiyonların Hata Nedenlerine Göre Dağılımı

#### 4.2. Pres Üretim Süreci İçin Kontrol Planı Oluşturulması

Yapılan FMEA çalışmasının sonuçlarına göre, Pres üretim süreci Girdi Kalite Kontrol, Hammadde Depolama, Harman Hazırlama, Cam Ergitme, Forehearth, Şekillendirme, Sıcak Uç Kontrol, Tavlama/Temperleme, Soğuk Kaplama, Proses Kontrol, Hata Ayırma (Inspection), Paketleme, Ürün Kontrol, Depolama ve Sevkiyat adımları için kontrol planları hazırlanmıştır. Süreç adımlarında kontrol edilen parametrelere ilişkin grafik Şekil 4.8’de yer almaktadır.



**Şekil 4.8.** Pres üretim süreç adımları kontrol edilen parametre dağılımı

Pres üretim süreci Şekillendirme adımı için hazırlanan kontrol planı 42 adımdan oluşmaktadır. Kontrol edilecek her bir parametre için, süreç karakteristikleri belirlenmiş, spesifikasyonlar ve toleranslar kayıt altına alınmıştır. Ölçüm ve değerlendirme yöntemleri tekrardan ele alınmış, kontrol sayıları ve sıklıkları atanmıştır. Yapılan kontrollere ait sonuçların hangi yöntemlerle kayıt altına alınacağı belirlenmiştir. Kontrol esnasında yapılacak aksiyonlar plan üzerine tanımlanmıştır.

Tüm süreç adımlarına ilişkin hazırlanan kontrol planları, firmanın veri gizliliği nedeniyle paylaşılmamıştır.

Gerçekleştirilen FMEA çalışması ile kulplu çay bardak hata dağılımına ilişkin pareto analizi incelendiğinde, ortaya çıkan sonuçların tutarlı olduğu gözükmektedir. FMEA sonucu yüksek öncelikle aksiyon alınması gereken, Damla Oluşumuna Yönelik Hata nedenleri, yapılan hata dağılımına ait pareto analizinde gözükten damla ağırlığı kaynaklı hataların kök nedenini oluşturmaktadır. Kulplu çay bardağı üretiminde yaşanan operasyonel kayıpların %54,8'inin damla ağırlığı kaynaklı hatalar olduğu göz önüne alınarak damla ağırlığının optimize edilerek standardizasyonunun sağlanması öncelikli hedef haline gelmiştir.

### 4.3. Pres Üretim Süreci İçin Ürün Ağırlığına Yönelik MSA Uygulaması

Mevcut durumda, damla ağırlığı ölçüm sistemlerinin periyodik, planlı ve istatistiki yöntemler yardımı ile analiz edilerek güvenilirliğinin incelenmesi için Nicel Ölçüm Sistemleri Analiz çalışması planlanmıştır. Böylece, ölçüm sisteminin, üretim prosesi varyansını ölçmek için yeterli olup olmadığı belirlenecektir.

Ortalama ve Aralık Metodu kullanılarak yapılan MSA çalışmasında, ağırlık spesifikasyon değeri,  $208 \pm 5$  gr. olan 10 adet kulplu çay bardağı imalattan alınarak numaralandırması yapılmıştır. Sonrasında 3 ölçümcü ilk olarak 1'den 10'a kadar numaralandırılan ürünlerin, ağırlık ölçümünü gerçekleştirerek sonuçları kayıt altına almıştır. MSA çalışmasının ikinci adımında, ürünler karışık olarak dizilmiş ve karışık dizilim sırası not edilmiştir. Her 3 ölçümcü aynı karışık dizilim sırasına göre ürün ağırlıklarını ölçerek kaydetmiştir. Üçüncü adım olarak ürün sırası tekrar değiştirilmiş ve yine sabit karıştırılmış ürün dizilimine göre ölçümcüler ağırlık ölçümünü gerçekleştirerek sonuçları kayıt altına almışlardır. Ölçüm sonuçlarına ait değerler Çizelge 4.6'da paylaşılmıştır.

**Çizelge 4.6.** Kulplu Çay Bardağı Ağırlık Ölçüm Sonuçları

APPRAISER/	PART									
TRIAL #	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Murat 1	207,000	208,000	208,000	208,000	208,000	209,000	209,000	208,000	207,000	209,000
Hasan 2	207,000	208,000	208,000	208,000	208,000	209,000	209,000	208,000	207,000	209,000
Abdullah 3	207,000	208,000	208,000	208,000	208,000	209,000	209,000	208,000	207,000	209,000
Murat 1	207,000	208,000	208,000	208,000	208,000	209,000	209,000	208,000	207,000	209,000
Hasan 2	207,000	208,000	208,000	208,000	208,000	209,000	209,000	208,000	207,000	209,000
Abdullah 3	207,000	208,000	208,000	208,000	208,000	209,000	209,000	208,000	207,000	209,000
Murat 1	207,000	208,000	208,000	208,000	208,000	209,000	208,000	208,000	207,000	209,000
Hasan 2	207,000	208,000	208,000	208,000	208,000	209,000	208,000	208,000	207,000	209,000
Abdullah 3	207,000	208,000	208,000	208,000	208,000	209,000	208,000	208,000	207,000	209,000

Ortalama ve Aralık Metodu kullanılarak EV, AV, %GRR ve ndc değerleri belirlenmiştir. Belirlenen değerler Çizelge 4.7'de verilmiştir.

Çizelge 4.7. Kulplu Çay Bardağı Ağırlık MSA Çalışması

APPRAISER/ TRIAL #	PART										AVERAGE	Measurement Unit Analysis			% Total Variation (TV)		
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		Trials	K1				
Murat 1	207.000	208.000	208.000	208.000	208.000	209.000	209.000	208.000	207.000	209.000	208,100	Repeatability - Equipment Variation (EV) EV = $\bar{R} \times K_1$ = $0,033 \times 0,5908$ = $0,01969$	2	0,8862	% EV = 100 (EV/TV) = $100(0,01969/0,63167)$ = $3,11767$		
Hasan 2	207.000	208.000	208.000	208.000	208.000	209.000	209.000	208.000	207.000	209.000	208,100					3	0,5908
Abdullah 3	207.000	208.000	208.000	208.000	208.000	209.000	209.000	208.000	207.000	209.000	208,100						
AVE	207,00	208,00	208,00	208,00	208,00	209,00	209,00	208,00	207,00	209,00	$\bar{X}_a = 208,100$	Reproducibility - Appraiser Variation (AV) AV = $\{(\sum_{i=1}^m X_{DIFF}^2 \times K_2) - (EV^2/mr)\}^{1/2}$ = $\{(0,000 \times 0,5231)^2 - (0,000^2/(10 \times 3))\}^{1/2}$ = $0,05219$	2	0,7071	0,5231	% AV = 100 (AV/TV) = $100(0,05219/0,63167)$ = $8,26167$	
R	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	$\bar{R}_a = 0,000$						
Murat 1	207.000	208.000	208.000	208.000	208.000	209.000	209.000	208.000	207.000	209.000	208,100						
Hasan 2	207.000	208.000	208.000	208.000	208.000	209.000	209.000	208.000	207.000	209.000	208,100	n = parts r = trials	K2	0,7071	0,5231	% GRR = 100 (GRR/TV) = $100(0,05578/0,63167)$ = $8,83035$ <b>Gage system O.K</b>	
Abdullah 3	207.000	208.000	208.000	208.000	208.000	209.000	209.000	208.000	207.000	209.000	208,000						
AVE	207,00	208,00	208,00	208,00	208,00	209,00	208,67	208,00	207,00	209,00	$\bar{X}_b = 208,067$						
R	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	1,000	0,000	0,000	0,000	$\bar{R}_b = 0,100$	Repeatability & Reproducibility (GRR) GRR = $\{(\sum_{i=1}^m EV^2 + AV^2)\}^{1/2}$ = $\{(0,000^2 + 0,000^2)\}^{1/2}$ = $0,05578$	Parts	K3	0,7071	0,5231	
Murat 1	207.000	208.000	208.000	208.000	208.000	209.000	209.000	208.000	207.000	209.000	208,000						
Hasan 2	207.000	208.000	208.000	208.000	208.000	209.000	209.000	208.000	207.000	209.000	208,000						
Abdullah 3	207.000	208.000	208.000	208.000	208.000	209.000	209.000	208.000	207.000	209.000	208,000	Part Variation (PV) PV = $R_p \times K_3$ = $0,002 \times 0,3146$ = $0,62920$	4	0,4467	0,4030	% PV = 100 (PV/TV) = $100(0,62920/0,63167)$ = $99,61$	
AVE	207,00	208,00	208,00	208,00	208,00	209,00	208,00	208,00	207,00	209,00	$\bar{X}_c = 208,000$						
R	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	$\bar{R}_c = 0,000$						
16. PART AVERAGE	207,00	208,00	208,00	208,00	208,00	209,00	208,56	208,00	207,00	209,00	$\bar{X} = 208,056$	Total Variation(TV) TV = $\{(\sum_{i=1}^m GRR^2 + PV^2)\}^{1/2}$ = $\{(0,000^2 + 0,001^2)\}^{1/2}$ = $0,63167$	8	0,3375	0,3249	0,3146	ndc = 1,41(PV/GRR) = $1,41(0,62920/0,05578)$ = $15,90528$ <b>Gage discrimination acceptable</b>
(Ra + Rb + Rc) / (# OF APPRAISERS) =											$\bar{R} = 0,0333$						
X <sub>DIFF</sub> = (Max X - Min X) =											X <sub>DIFF</sub> = 0,1000						
* UCL <sub>R</sub> = $\bar{R} \times D_{15}$											UCL <sub>R</sub> = 0,0860	Evaluation of Results 1. %GRR < %10: Acceptable %10 ≤ % GRR ≤ %30: May be Acceptable %30 < % GRR: Not Acceptable 2. ndc > 5 (Acceptable), ndc ≤ 5 (Not Acceptable)	Reason/Planned Action				
* D <sub>15</sub> = 3.27 for 2 trials and 2.58 for 3 trials. UCL <sub>R</sub> represents the limit of individual R's. Circle those that are beyond this limit. Identify the cause and correct. Repeat these readings using the same appraiser and unit as originally used or discard values and re-average and recompute R and the limiting value from the remaining observations.																	
Notes:																	

Değerler incelendiğinde;

- ndc = 15,90 olmakla birlikte, kabul edilebilir değer 5'ten büyük olması beklenmektedir.
- EV = 0,01969,
- AV = 0,05219,
- GRR = 0,05578
- PV = 0,62920,
- TV = 0,63167 olarak hesaplanmıştır.

Bu değerlere bağlı olarak;

- %EV =  $100 \times (0,01969/0,63167) = 3,11767$  olarak,
- %AV =  $100 \times (0,05219/0,63167) = 8,26167$  olarak,
- %GRR =  $100 \times (0,05578/0,63167) = 8,83035$  olarak hesaplanmıştır.
- %GRR < %10 olması ve Ayrılık Kategori İndisi (ndc) değerinin > 5 olmasıyla Ölçüm Sistemi kabul edilebilir olarak değerlendirilmiştir.
- %PV =  $100 \times (0,62920/0,63167) = 99,61$  olarak hesaplanmıştır. Bu değer %90'ın altına indiği durumlar, ölçüm verilerinin nominalden uzaklaştığı anlamını taşır ve bu cihazlarla elde edilen ölçüm sonuçları istatistiksel süreç kontrolü için sağlıklı bir girdi oluşturamaz.

Yapılan çalışmada ise, parça varyasyon değerinin %99,9'a yakın olması, deney için kullanılan cihazların belirlenmiş tolerans içinde nominale yakın olduğunu göstermektedir. Dolayısıyla, bu cihazlarla elde edilen veriler kullanılarak SPC çalışmalarına devam edilmiştir.

#### **4.4. Pres Üretim Süreci İçin Ürün Ağırlığına Yönelik SPC Uygulaması**

Ürün ağırlığı kaynaklı hataların minimize edilmesinin yöntemi damla ağırlıklarının istenilen aralıkta olmasıdır. Damla ağırlıklarının takibi ve sürecin olağan biçimde devam edip etmediğinin istatistiksel yöntemlerle kontrolü ve varsa normal dışı durumun fark edilmesi için istatistiksel süreç kontrolü uygulaması yapılmalıdır. Sonuçlara göre, olağan dışı durumlar ortaya çıktığında, sebepleri belirlenmeli ve ortadan kaldırılmalıdır. Bu nedenle, kulplu çay bardağı ağırlıklarının istatistiksel olarak kontrol altında olup olmadığını belirlemek amacıyla SPC çalışması yapılmıştır.

Kulplu çay bardağı üretim kampanyasında 10 saat boyunca her saat 36 numune olmak üzere toplam 360 numune toplanarak ağırlık ölçümleri yapılmıştır. Böylece kulplu çay bardakları ağırlıklarına yönelik istatistiksel süreç kontrolü için veri seti hazırlanmıştır.

10 saat boyunca, her saat 36 adet kulplu bardak toplanması sonucu ortaya çıkan veri seti Çizelge 4.8'de paylaşılmıştır.

Çizelge 4.8. Kulplu Çay Bardağı Ağırlık Verileri

	Ö1	Ö2	Ö3	Ö4	Ö5	Ö6	Ö7	Ö8	Ö9	Ö10
Örnek 1	207	208	210	210	207	211	207	207	210	207
Örnek 2	210	206	204	207	206	210	205	208	211	208
Örnek 3	209	207	206	208	208	209	208	208	210	206
Örnek 4	208	208	207	209	206	211	204	206	211	207
Örnek 5	209	209	209	211	205	210	207	204	209	208
Örnek 6	208	207	208	209	206	211	206	208	207	206
Örnek 7	209	208	208	207	207	212	207	207	208	207
Örnek 8	209	208	209	208	205	211	206	208	206	208
Örnek 9	208	206	208	208	206	204	207	206	209	210
Örnek 10	209	208	209	210	207	207	206	207	207	209
Örnek 11	209	206	208	207	205	206	207	204	208	210
Örnek 12	207	208	209	208	207	205	206	206	210	212
Örnek 13	208	206	208	209	207	206	208	204	207	211
Örnek 14	207	208	210	208	206	207	207	204	208	211
Örnek 15	208	206	209	209	208	209	207	205	207	211
Örnek 16	207	207	213	208	207	209	209	206	210	210
Örnek 17	208	209	211	209	207	207	208	207	207	209
Örnek 18	207	208	209	210	206	206	207	208	205	209
Örnek 19	207	209	208	211	207	207	208	206	207	210
Örnek 20	208	207	207	211	207	206	208	207	208	208
Örnek 21	206	209	207	210	206	207	209	209	209	212
Örnek 22	208	208	208	209	209	206	208	206	210	211
Örnek 23	206	209	209	211	208	207	207	208	209	209
Örnek 24	208	209	210	209	207	206	206	205	211	208
Örnek 25	206	208	208	209	209	207	208	210	208	209
Örnek 26	206	207	209	210	209	206	207	209	210	208
Örnek 27	208	207	208	209	208	209	206	211	212	207
Örnek 28	208	209	207	208	206	207	207	208	210	208
Örnek 29	210	209	209	209	210	208	208	209	208	209
Örnek 30	211	208	208	209	211	209	207	208	207	207
Örnek 31	208	209	209	210	212	208	209	207	206	208
Örnek 32	206	208	208	208	210	207	208	208	209	209
Örnek 33	208	207	207	206	211	207	206	208	207	209
Örnek 34	208	208	208	206	212	206	209	211	208	210
Örnek 35	208	209	209	209	210	207	207	212	211	206
Örnek 36	207	208	209	208	211	205	208	212	210	209

Çizelge analiz edildiğinde, kulplu çay bardağına ait ağırlık değerlerinin 204 gr. ve 213 gr. arasında değiştiği gözlemlenmiştir. Ağırlık spesifikasyon değeri  $208 \pm 5$  gr. olan kulplu çay bardaklarından alınan numune setindeki ürün ağırlıklarının tolerans dahilinde olduğu gözükmemektedir. Sonrasında örnek gruplarına ait ortalama, standart sapma, maksimum, minimum ve değişim aralığı değerleri hesaplanmıştır. Sonuçları Çizelge 4.9'da yer almaktadır.

**Çizelge 4.9.** Kulplu Çay Bardaklarına Ait İstatistiksel Veriler

	Ö1	Ö2	Ö3	Ö4	Ö5	Ö6	Ö7	Ö8	Ö9	Ö10	Ortalama	Standart Sapma	Maksimum	Minimum	Değişim Aralığı
Örnek 1	207	208	210	210	207	211	207	207	210	207	208,40	1,65	211	207	4
Örnek 2	210	206	204	207	206	210	205	208	211	208	207,50	2,32	211	204	7
Örnek 3	209	207	206	208	208	209	208	208	210	206	207,90	1,29	210	206	4
Örnek 4	208	208	207	209	206	211	204	206	211	207	207,70	2,21	211	204	7
Örnek 5	209	209	209	211	205	210	207	204	209	208	208,10	2,18	211	204	7
Örnek 6	208	207	208	209	206	211	206	208	207	206	207,60	1,58	211	206	5
Örnek 7	209	208	208	207	207	212	207	207	208	207	208,00	1,56	212	207	5
Örnek 8	209	208	209	208	205	211	206	208	206	208	207,80	1,75	211	205	6
Örnek 9	208	206	208	208	206	204	207	206	209	210	207,20	1,75	210	204	6
Örnek 10	209	208	209	210	207	207	206	207	207	209	207,90	1,29	210	206	4
Örnek 11	209	206	208	207	205	206	207	204	208	210	207,00	1,83	210	204	6
Örnek 12	207	208	209	208	207	205	206	206	210	212	207,80	2,10	212	205	7
Örnek 13	208	206	208	209	207	206	208	204	207	211	207,40	1,90	211	204	7
Örnek 14	207	208	210	208	206	207	207	204	208	211	207,60	1,96	211	204	7
Örnek 15	208	206	209	209	208	209	207	205	207	211	207,90	1,73	211	205	6
Örnek 16	207	207	213	208	207	209	209	206	210	210	208,60	2,07	213	206	7
Örnek 17	208	209	211	209	207	207	208	207	207	209	208,20	1,32	211	207	4
Örnek 18	207	208	209	210	206	206	207	208	205	209	207,50	1,58	210	205	5
Örnek 19	207	209	208	211	207	207	208	206	207	210	208,00	1,56	211	206	5
Örnek 20	208	207	207	211	207	206	208	207	208	208	207,70	1,34	211	206	5
Örnek 21	206	209	207	210	206	207	209	209	209	212	208,40	1,90	212	206	6
Örnek 22	208	208	208	209	209	206	208	206	210	211	208,30	1,57	211	206	5
Örnek 23	206	209	209	211	208	207	207	208	209	209	208,30	1,42	211	206	5
Örnek 24	208	209	210	209	207	206	206	205	211	208	207,90	1,91	211	205	6
Örnek 25	206	208	208	209	209	207	208	210	208	209	208,20	1,14	210	206	4
Örnek 26	206	207	209	210	209	206	207	209	210	208	208,10	1,52	210	206	4
Örnek 27	208	207	208	209	208	209	206	211	212	207	208,50	1,84	212	206	6
Örnek 28	208	209	207	208	206	207	207	208	210	208	207,80	1,14	210	206	4
Örnek 29	210	209	209	209	210	208	208	209	208	209	208,90	0,74	210	208	2
Örnek 30	211	208	208	209	211	209	207	208	207	207	208,50	1,51	211	207	4
Örnek 31	208	209	209	210	212	208	209	207	206	208	208,60	1,65	212	206	6
Örnek 32	206	208	208	208	210	207	208	208	209	209	208,10	1,10	210	206	4
Örnek 33	208	207	207	206	211	207	206	208	207	209	207,60	1,51	211	206	5
Örnek 34	208	208	208	206	212	206	209	211	208	210	208,60	1,96	212	206	6
Örnek 35	208	209	209	209	210	207	207	212	211	206	208,80	1,87	212	206	6
Örnek 36	207	208	209	208	211	205	208	212	210	209	208,70	2,00	212	205	7

Sonrasında 360 adetlik numune için ortalama, standart sapma, değişim aralığı değerleri hesaplanmıştır.

#### 4.4.1. Kontrol Grafikleri ile Sürecin İzlenmesi

36 ölçümden oluşan 10 adet örnek için,  $X_{ij}$ ,  $i$ -inci örneğin,  $i = 1, 2, \dots, m$ ,  $j$ -inci ölçüm değeri,  $j = 1, 2, \dots, n$  olmak üzere,  $i$ -inci örneğin ortalaması,

$$\bar{X}_i = \frac{\sum_{j=1}^n X_{ij}}{n} \text{ formülünden hesaplanmıştır.}$$

Sonrasında, süreç ortalaması ise, örnek ortalamalarının ortalaması olur ve

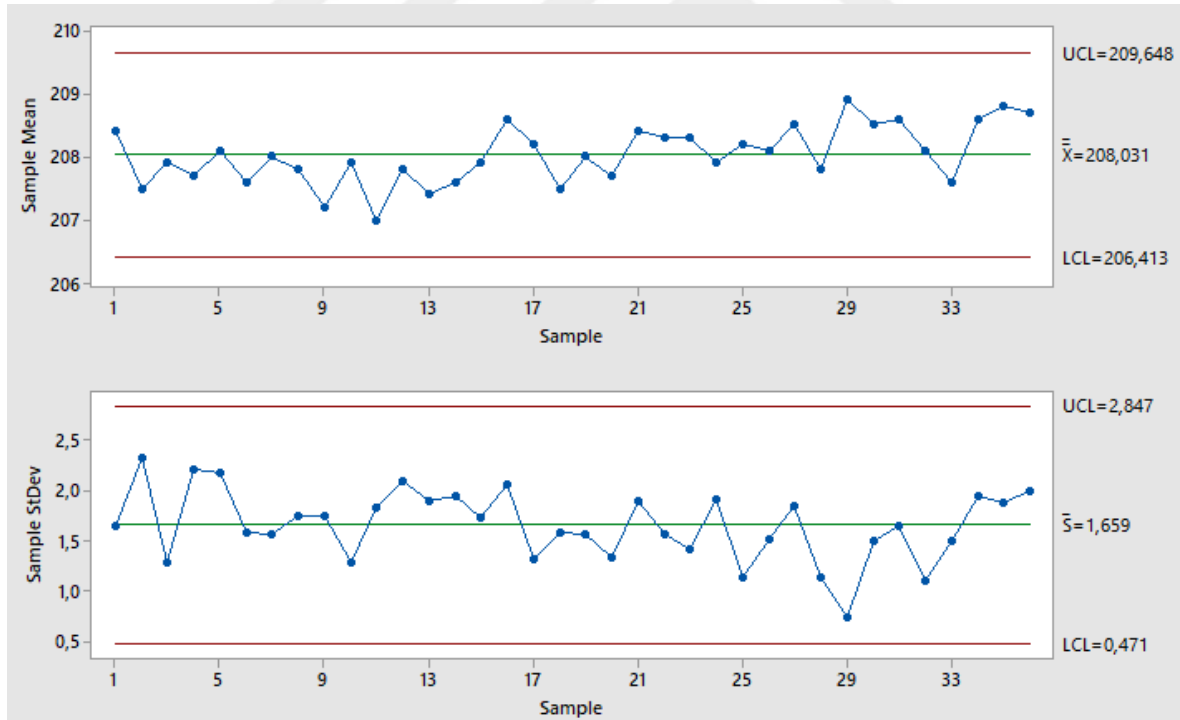
$$\bar{\bar{X}} = \frac{\sum_{i=1}^m \bar{X}_i}{m} \text{ formülünden hesaplanır. Alınan 10 adet örneğin genel ortalama değeri;}$$

$$\bar{\bar{X}} = \frac{7489,1}{36} = 208,03 \text{ gr olarak hesaplanmıştır}$$

Standart sapmaların ortalaması ise,  $\bar{S} = \frac{\sum_{i=1}^m s_i}{m}$  olmak üzere,  $\bar{S} = 1,659$  gr olarak hesaplanmıştır.

N=10 için,  $\bar{X}$  - kontrol grafiği, Üst Kontrol Sınırı,  $\bar{ÜKS}_{\bar{X}} = \bar{\bar{X}} + A_3\bar{S}$  formülünden hesaplanılacak olursa, Ek-1'deki çizelgeden  $A_3 = 0,975$  değerine ulaşılır.  $\bar{ÜKS}_{\bar{X}} = 208,03 + 0,975*1,659 = 209,65$  gr olarak hesaplanmıştır.  $\bar{X}$  - kontrol grafiği, Alt Kontrol Sınırı ise,  $\bar{AKS}_{\bar{X}} = \bar{\bar{X}} - A_3\bar{S}$  formülünden hesaplanarak,  $\bar{AKS}_{\bar{X}} = 208,03 - 0,975*1,659 = 206,41$  gr olarak hesaplanmıştır.

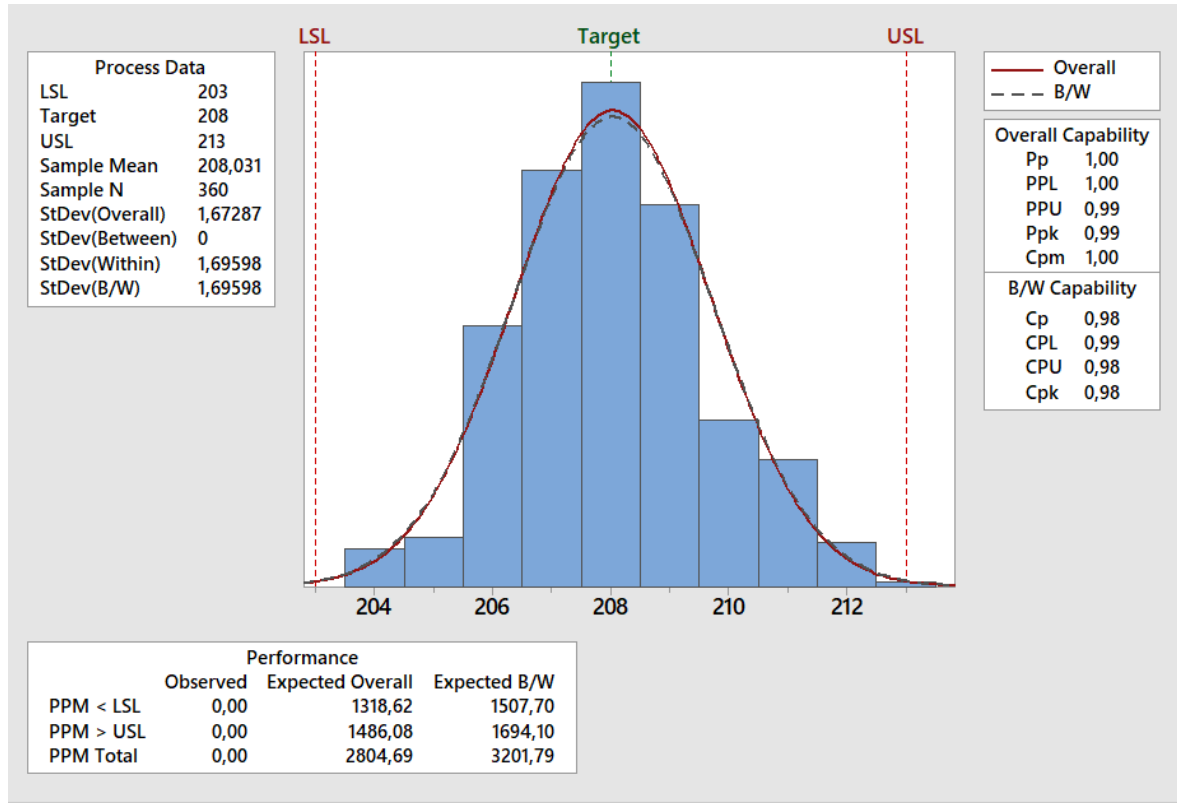
S - kontrol grafiği, Üst Kontrol Sınırı,  $ÜKS_s = B_4\bar{S}$  formülünden hesaplanmıştır. Ek-1'deki çizelgeden  $B_4 = 1,716$  değerine ulaşılır.  $ÜKS_s = 1,716 * 1,659 = 2,847$  gr olarak hesaplanmıştır. S - kontrol grafiği, Alt Kontrol Sınırı ise,  $AKS_s = B_3\bar{S}$  formülünden hesaplanarak, Ek-1'deki çizelgeden  $B_3 = 0,284$  değerinden  $AKS_s = 0,284*1,659 = 0,471$  gr olmuştur. Bu değerlere göre hazırlanan  $\bar{X}$  - s kontrol grafikleri Şekil.4.9'da yer almaktadır.



Şekil 4.9.  $\bar{X}$  - s Kontrol Grafikleri

#### 4.4.2. Süreç Yetenek Analizi Çalışması

Süreçin aynılığının kontrolü için süreç yeteneği incelenmiştir. Bu örnekte damla ağırlığının değişkenliğine yönelik süreç yeteneğine bakılmıştır. Alınan 10 ölçümdeki toplam 360 adet ürünün damla ağırlığı için,  $C_p$  değerinin  $C_{pk}$  ile eşit ve 0,98 olduğu gözükmektedir.  $C_p$  ve  $C_{pk} < 1,33$  olması, sürecin yeterli olmadığını bir göstergesidir. Dolayısıyla, damla ağırlığındaki varyasyonu azaltmak için iyileştirme çalışmalarının yapılması gerekmektedir. (Şekil 4.10)



Şekil 4.10. Süreç Yetenek Analizi Çalışması

#### 4.5. Kulplu Çay Bardağı Üretimlerine Yönelik Süreç İyileştirme Çalışmaları

Yapılan SPC çalışması sonuçları değerlendirildiğinde, damla ağırlığı dağılımını kontrol altında tutmanın süreç yeterliliğine fayda sağlayacağı öngörülmüştür. Konuyla ilgili araştırma yapıldığında, kesilen damlanın otomatik olarak ağırlığını ölçebilen bir sistemin, kulplu çay bardağı üretim hattına kurulması yönünde karar alınmıştır.

#### 4.5.1. Otomatik Damla Ağırlığı Ölçüm Sistemi Çalışma Prensipleri

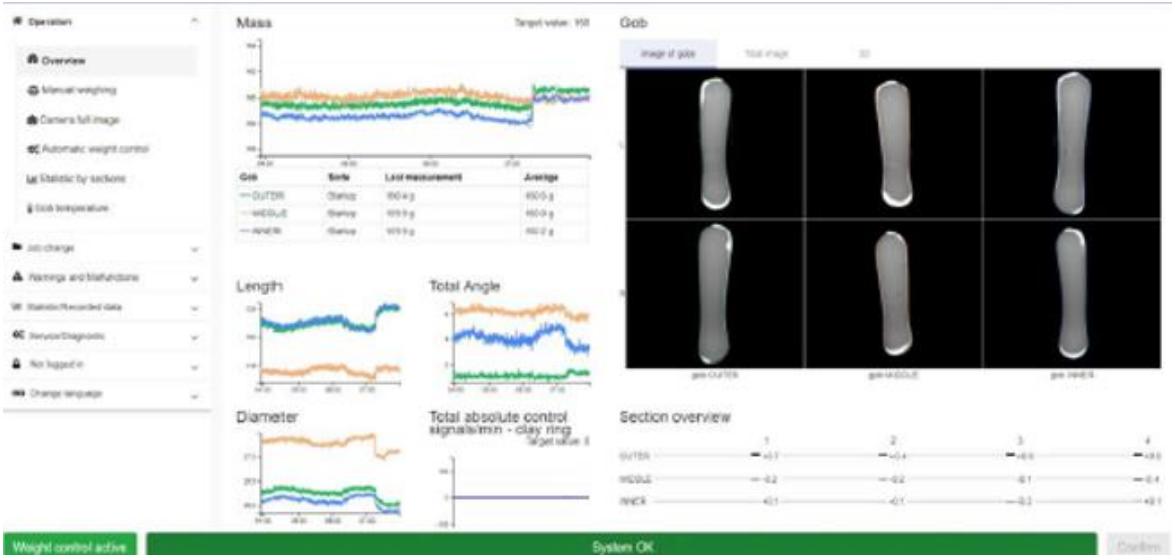
Otomatik Damla Ağırlığı Ölçüm Sistemi cam üretim için geliştirilmiştir. Besleme ünitesinin altındaki ergimiş cam parçası izleme işlemini kesintisiz olarak takip eder. Makas bıçaklarının hemen altındaki birbirine açılı olarak yerleştirilmiş iki adet kamera her serbest düşen ergimiş cam parçasının resimlerini çeker. Yazılım desteği ile, resimlerden her bir ergimiş cam parçasının gerçek zamanlı, 3 boyutlu modeli hesaplanır. Ergimiş cam parçalarının, boyut, sıcaklık, şekil, hacim ve ağırlık parametreleri için bilgi sağlar. Otomatik Damla Ağırlığı Ölçüm Sistemi tek damla kesiminden, 4 damla kesimli makinalara kadar her üretim hakkında kullanılabilir. Damla kesim bölgesine göre kameraların yerleşimi Şekil.4.11’de verilmiştir.



Şekil 4.11. Damla Ağırlığı Ölçüm Sistemi Kamera Yerleşimine Ait Görsel

##### 4.5.1.1. Damla Ağırlığı Belirleme

Kesilen damlanın hacminden ağırlık bilgisi türetilir. Sistem, son dört saatin damla ağırlıklarının belirlenmesine ve grafik gösterimine olanak sağlar. Bu grafikte iki damla için de yapılan ağırlık ölçüm değerleri gözlenebilmektedir. Damla ağırlığında değişiklik yapıldığında ya da tolerans dışında bir sapma yaşandığında anlık olarak ikaz ışığı yanmakta ve geriye dönük takip edilmesine olanak sağlamaktadır. Grafiklerdeki renkler, her bir damla yolundan gelen damlalara ait detaylı bilgi sağlamaktadır. (Şekil 4.12)



Şekil 4.12. Damla Ağırlığı Ölçüm Sistemi Ağırlık Gösterim Arayüzü

#### 4.5.1.2. Damla Konumu Gözlemi

Her bir damla yolundan gelen damlaların düştüğü konuma denk düşen ortalama ağırlık değerleri de görülebilmektedir. Damlaların düştüğü konumlar, 3 boyutlu olarak gözlemlenebilmektedir. Ortaya çıkan 3 boyutlu görüntü, ölçeklenebilir ve ebat ölçümü yapılabilmektedir. (Şekil 4.13)



Şekil 4.13. Damla Ağırlığı Ölçüm Sistemi Damla Konumu Gözlem Arayüzü

### 4.5.1.3. Damla Görseli Grafiği

“Ağırlık” grafiğindekiyle aynı renkte, ana hatlarıyla çizilmiş olan damlalara ait son görsellerin görüntülenmesini sağlar. Bu özellik ile, kesilmiş damlaların konum ve yönleri için 3 boyutlu gösterim sağlanabilmektedir. Ayrıca her bir damlaya ait tekil görüntülere de erişim sağlanabilmektedir.

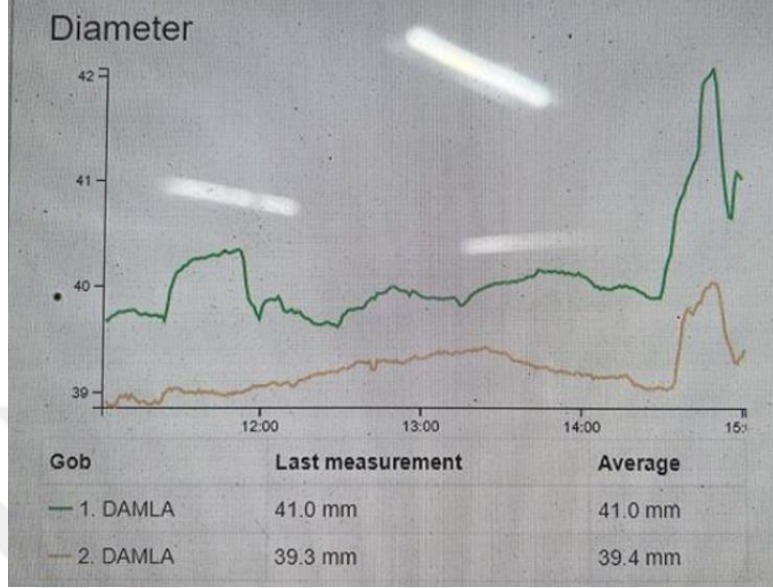
Son 4 saat içinde ölçülen, kesilmiş damlaların parça uzunluklarının ve çaplarının mm. cinsinden görüntülenebilmesi sağlanmaktadır. Ayrıca yine son 4 saat içinde gerçekleşen tüp ayarlama sayıları ve genleşme miktarı görüntülenebilmektedir.

Damla uzunluğu grafiği ile, damla şekline yapılan müdahalelerin takip edilebilmesini ve rakamsal bir karşılık alınmasını sağlamaktadır. (Şekil 4.14)



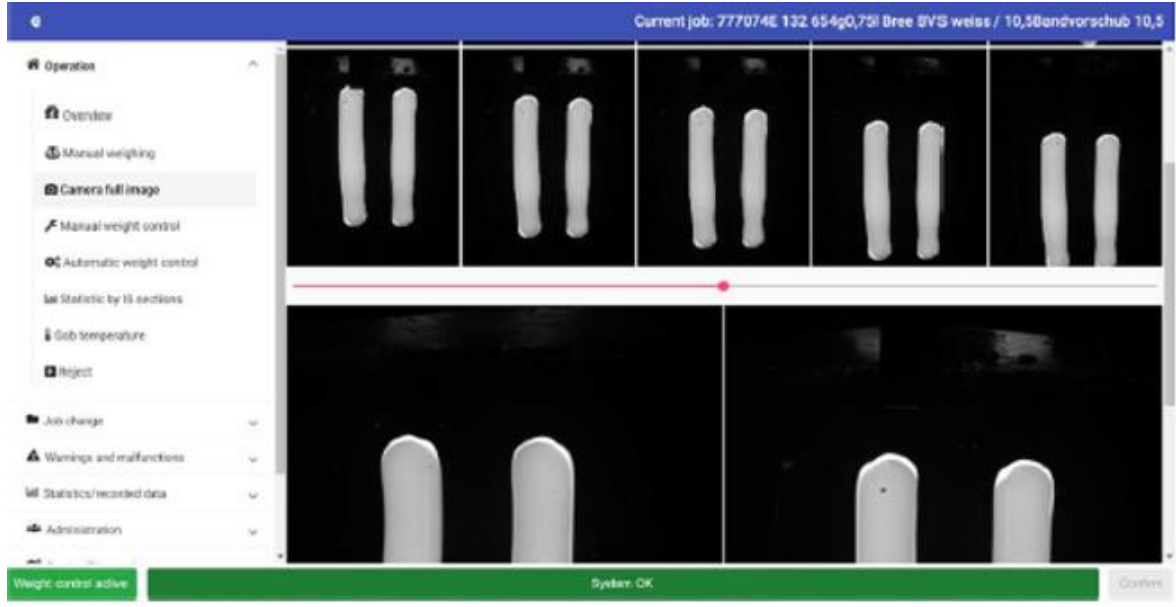
Şekil 4.14. Damla Ağırlığı Ölçüm Sistemi Damla Uzunluğu Karşılaştırmalı Grafik

Damla çapı grafiği ise, makas kesimi sonucu meydana gelen damlaların şekil takibi amacıyla kullanılmaktadır. (Şekil 4.15)



Şekil 4.15. Damla Ağırlığı Ölçüm Sistemi Damla Çapı Karşılaştırmalı Grafik

Her 2 kameraya ait tüm görüntülerin bir arada gözlemlenebildiği ara yüz de mevcuttur. (Şekil 4.16)



Şekil 4.16. Damla Ağırlığı Ölçüm Sistemi Damla Şekli Gözlem Arayüzü

Manuel ağırlık kontrolü özelliği ile, otomatik damla ağırlığı ölçüm sistemi ağırlık kontrolü etkinleştirilebilir ya da devre dışı bırakılabilir.

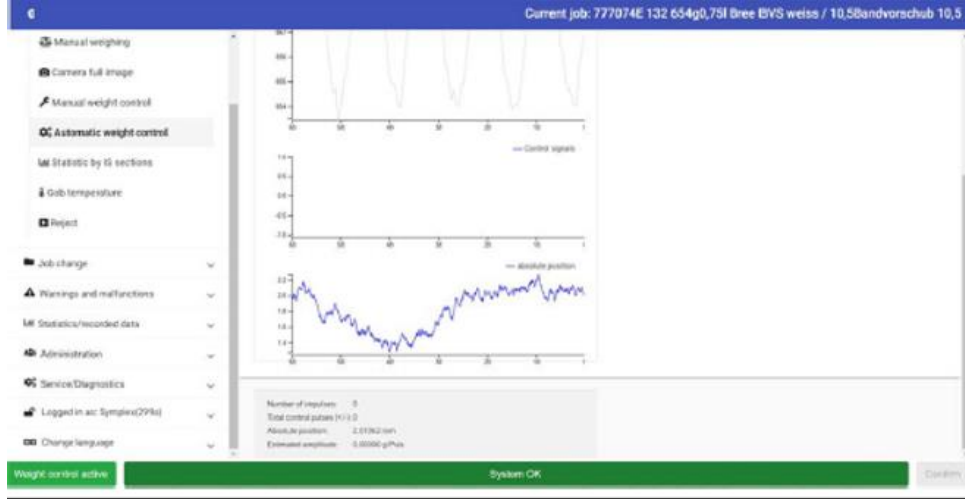


Şekil 4.17. Damla Ağırlığı Ölçüm Sistemi Manuel Kontrol Arayüzü

Otomatik ağırlık kontrolü özelliği kullanılarak, yine otomatik damla ağırlığı ölçüm sisteminin ağırlık kontrolü etkinleştirilmesi ya da devre dışı bırakılması mümkündür. Otomatik ağırlık kontrol ara yüzünden;

- Son 60 saniyeye ait gram cinsinden kap ağırlığına,
- Son 60 saniyedeki yukarı ve aşağı yönlü tüp ve dalgıç pistonların toplam hareket sayılarına,
- Tüp ve dalgıç pistonların mutlak konumuna ait grafikler görüntülenebilmektedir.

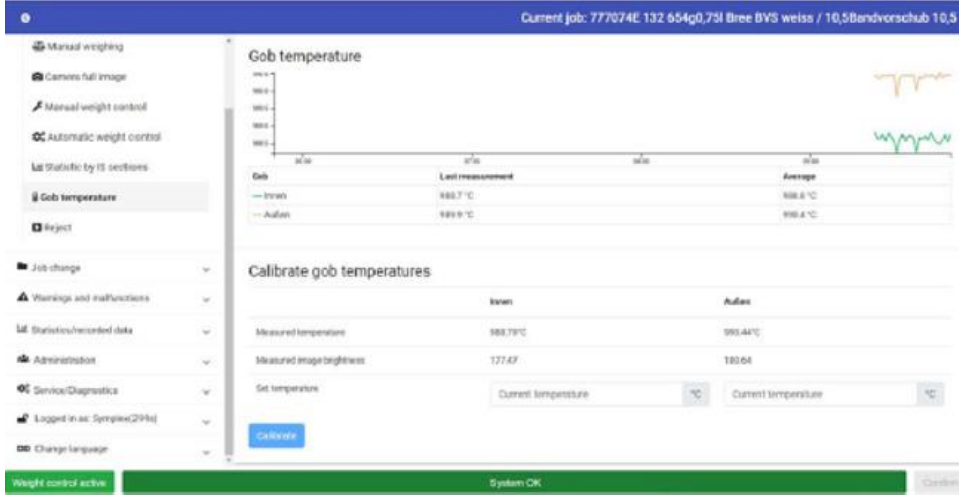
Yine bu alandan, başlangıçtan ilgili ana kadar geçen toplam yönlendirme hareketlerinin sayısına, ilgili sürücünün mutlak konumuna ait koordinatlara, yine ilgili sürücünün yönlendirme için genlik ve damladaki gram cinsinden ağırlık değişimini görüntüleme olanağı bulunmaktadır. (Şekil 4.18)



Şekil 4.18. Damla Ağırılığı Ölçüm Sistemi Veri Gözlem Arayüzü

#### 4.5.1.4. Damla Sıcaklığı Ölçümü ve Grafik Gösterimi

Bu özellik ile, son 4 saat içindeki tüm damlaların sıcaklık ölçümlerine ait veriler ile oluşturulmuş sıcaklık eğrisine ulaşılabilmektedir. Yine bu alandan, harici bir referans kullanarak, damla sıcaklığının kalibre edilmesi mümkündür. (Şekil 4.19)

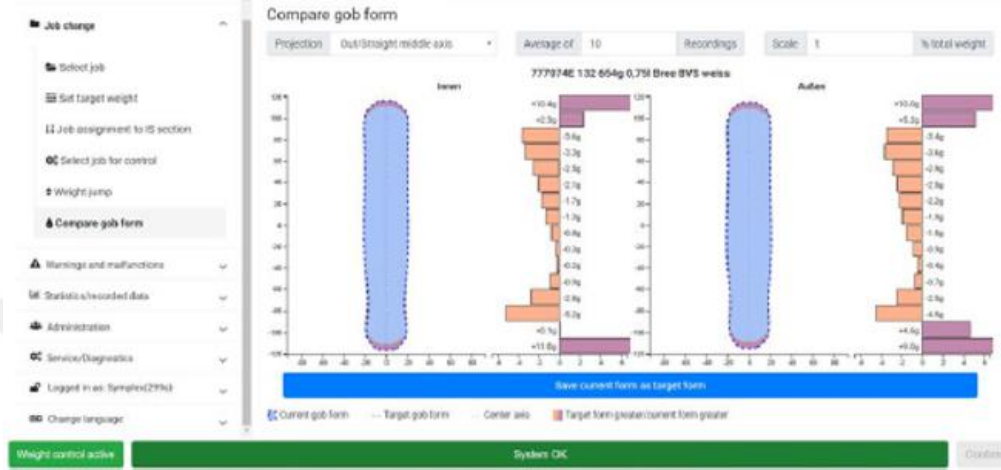


Şekil 4.19. Damla Ağırılığı Ölçüm Sistemi Damla Sıcaklığı Gözlem Arayüzü

#### 4.5.1.5. Damla Formlarının Karşılaştırılması

Yetkin kullanıcılar tarafından, optimum olduğu kabul edilen damla formunun kaydedilme işlemi yapılabilmektedir. Sonrasında her bir damlanın, en uygun formdaki damlaya göre, ne kadarlık bir sapmaya sahip olduğu bu alandan takip edilebilmektedir.

Noktalı çizgi görüntüsü ile damlalar arasındaki fark görsel olarak görüntülenmektedir. Bu ara yüz ayrıca, damla düşümünün aksel görünümünün ortalama damlama düşümlerine göre hangi konumda bulunduğu, kesilen damlaya ait ağırlığın, tüm damla ağırlıklarına göre ne kadar sapmaya sahip olduğunun karşılaştırılmasını sağlar. (Şekil 4.20)



Şekil 4.20. Damla Ağırlığı Ölçüm Sistemi Damla Form Karşılaştırma Arayüzü

Hedef ve limit ağırlık değerleri “Job Change” kısmında “Set Target Weight” alanından girilmektedir. Bu değerlerin değiştirilebilmesi için sisteme yönetici olarak giriş yapılması gereklidir.

Belirlenen değerlerden sapma olduğu takdirde cihaz üzerindeki ikaz lambası yanarak uyarı vermektedir. (Şekil 4.21)



Şekil 4.21. Damla Ağırlığı Ölçüm Sistemi İkaz Lambası Görseli

Makas kesimi ile görüntü yakalama arasındaki damlanın düşüş süresi tüm işlerde aynı değildir. Her üretim için bu süre, otomatik ağırlık ölçüm sistemi tarafından, damlanın kamera açısına girene kadar, görüntü yakalama anının ayarlanmasıyla belirlenir. Damla görüntüleri alındıktan sonra, bu görüntüleri merkezleyebilmek için, çekim anında her görüntü özelinde ince ayar gerçekleşmektedir. Burada ilk değer için, makas kesimi ile, görüntü yakalama arasındaki süreyi, görüntü alma aralığını belirlemek ve görüntü yakalama sinyalini ayarlamak, damlalara ait görüntüleri merkezleyebilmek için adım süreleri yine milisaniye olarak, görüntüsü alınmış damlayı değerlendirebilmek için optimum parlaklık değerini % olarak belirler.

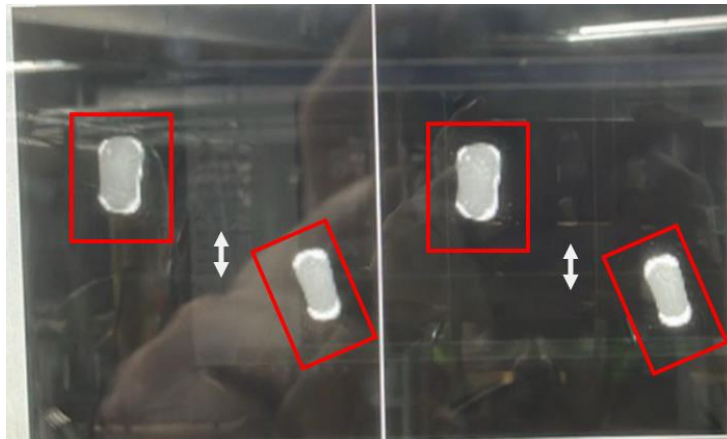
Bu arayüzde yer alan damla pozisyonu grafiği, geçerli damla konumunun hedef konuma göre sapmasını gösterir. Sapma ne kadar büyük olursa, görüntü yakalama zamanlaması ve sonuç olarak ortaya çıkan görüntü bölümü o kadar kabul edilemez olur.

Tetikleme gecikmesi sinyali ise, makas kesimi ile, görüntünün yakalanması arasındaki aralığı gösterir. Bu aralık değerlerine ait grafik, mümkün olduğunca az salınıma sahip olmalıdır. Salınımların fazla olması veya bir yöne kayması, sistemin doğru olarak çalışmadığının bir kanıtı sayılır.

#### 4.5.2. Sistemin Devreye Alınması

Cam Ev Eşyası Fabrikasında, otomatik damla ağırlığı ölçüm sistemi, 27.05.2024 tarihi itibariyle B-4 pres üretim hattında devreye alınmıştır.

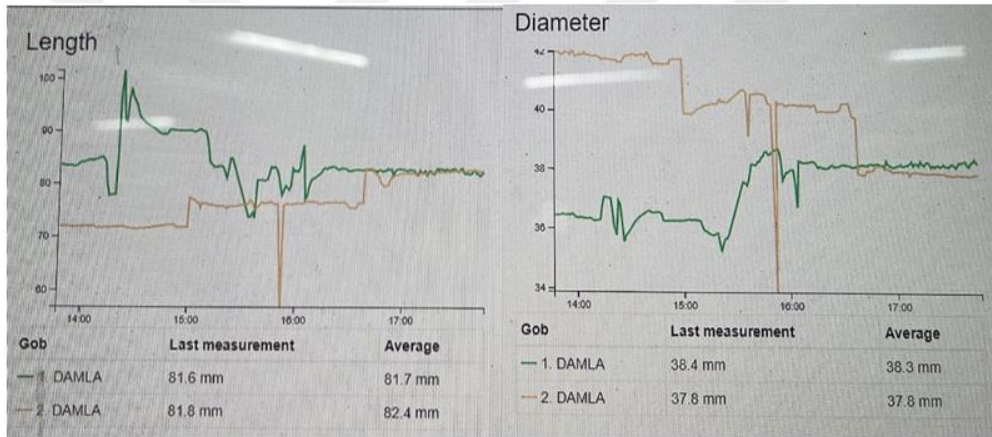
Bu sistem yardımıyla erişilen damlalara ait şekiller incelendiğinde, iki damla arasındaki feeder faz farkı kaynaklı senkron olmayan düşüş, makas ve tampon ayarları kaynaklı damla yatmaları ve damla şekillerinde bozulmalar gözlemlenmiştir. (Şekil 4.22)



Şekil 4.22. Damla Ağırlığı Ölçüm Sistemi Fiili Damla Gözlem Ekranı

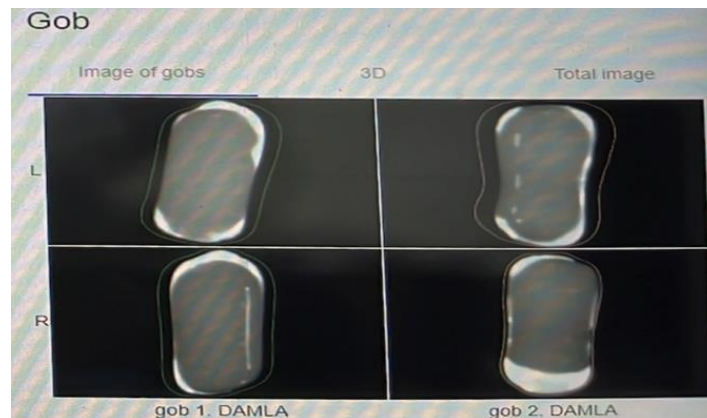
Makaslara göre damlalar arası uzunluk ve çap değerlerine ilişkin veriler ve grafikler incelenerek, birinci makas kesimi damlalara ait uzunluğun ortalama 82 mm., çapın ise 36,5 mm. olduğu, ikinci makas kesimi damlalara ait uzunluğun ise ortalama 73 mm., çapın ise 41,5 mm. olduğu görülmüştür.

Damla uzunluğu ve damla çapı değerlerini eşit hale getirmek ve damla şekli ve düşüşündeki senkronunu sağlamak amacıyla, feeder faz değerleri ve kesme değerlerinde değişiklikler yapılmıştır. Ölçüm grafikleri tekrar analiz edildiğinde, birinci makas kesimi damlalara ait uzunluğun ortalama 81,7 mm., çapın ise 38,3 mm. olduğu, ikinci makas kesimi damlalara ait uzunluğun ise ortalama 82,4 mm., çapın ise 37,8 mm. olduğu görülmüştür. (Şekil 4.23)



Şekil 4.23. Damlalar Arası Uzunluk ve Çap Karşılaştırma

Damla görselleri ve düşüşündeki senkron kontrol edildiğinde, uyumsuzluğun ortadan kalktığı gözlemlenmiştir. (Şekil 4.24)



Şekil 4.24. Damla Ağırlığı Ölçüm Sistemi Damlalar Arası Görsel Karşılaştırma

Her bir damlaya ait ağırlık ölçümleri için grafik oluşturulmuş ve damla ağırlıklarının yapılan ayar değişiklikleriyle birbirine yakın noktaya geldiği görülmüştür. (Şekil 4.25)



Şekil 4.25. Damla Ağırlığı Ölçüm Sistemi Damlalar Arası Ağırlık Karşılaştırma Grafığı

#### 4.6. Otomatik Damla Ağırlığı Ölçüm Sistemi Sonrası Yapılan SPC Çalışması

Otomatik damla ağırlığı sisteminin entegrasyonu sonrası yapılan istatistiksel süreç kontrolü çalışması yinelenmiştir. Kulplu çay bardağı üretiminin yeni kampanyasında, tekrar 10 saat boyunca her saat 36 numune olmak üzere toplam 360 numune toplanarak ağırlık ölçümleri yapılarak veri seti oluşturulmuştur. (Çizelge 4.10)

Çizelge 4.10. Sistem Entegrasyonu Sonrası Kulplu Çay Bardağı Ağırlık Verileri

	O1	O2	O3	O4	O5	O6	O7	O8	O9	O10
Örnek 1	210	208	208	207	206	208	207	208	209	207
Örnek 2	207	207	206	208	208	208	208	209	209	206
Örnek 3	208	208	208	207	208	208	209	210	209	206
Örnek 4	208	208	208	206	207	207	207	208	210	207
Örnek 5	208	208	206	209	207	210	208	209	208	208
Örnek 6	210	208	207	208	208	208	209	207	210	207
Örnek 7	209	209	208	208	209	209	207	206	209	208
Örnek 8	207	208	206	207	207	207	209	210	208	207
Örnek 9	208	207	208	207	208	208	208	207	206	207
Örnek 10	209	206	206	208	209	208	207	207	209	208
Örnek 11	208	209	206	208	207	207	208	208	207	209
Örnek 12	207	207	208	207	209	207	206	206	208	209
Örnek 13	206	206	207	207	206	209	207	207	209	207
Örnek 14	207	209	207	208	207	208	208	210	210	207
Örnek 15	208	208	208	207	209	210	208	209	210	209
Örnek 16	207	208	207	208	208	209	208	208	209	208
Örnek 17	208	208	206	208	208	210	207	209	208	207
Örnek 18	207	207	208	209	208	209	207	208	210	208
Örnek 19	208	207	208	209	207	209	208	207	209	210
Örnek 20	209	208	207	208	208	208	210	206	209	209
Örnek 21	209	208	206	209	208	208	210	208	209	209
Örnek 22	208	207	207	210	206	207	207	207	208	208
Örnek 23	208	207	209	208	207	207	209	208	208	209
Örnek 24	207	206	208	210	208	208	207	208	209	209
Örnek 25	207	207	207	208	206	208	210	209	208	209
Örnek 26	206	208	207	208	208	206	208	208	207	210
Örnek 27	209	208	208	206	207	208	209	210	208	209
Örnek 28	208	207	209	208	207	206	208	209	210	209
Örnek 29	209	208	208	208	206	208	208	208	209	209
Örnek 30	207	206	208	207	208	207	208	209	207	210
Örnek 31	208	208	208	208	210	208	210	208	208	209
Örnek 32	208	207	208	209	208	206	210	209	207	209
Örnek 33	209	207	208	208	208	208	209	210	208	209
Örnek 34	207	206	207	207	207	208	209	209	209	210
Örnek 35	208	208	206	208	206	207	208	209	208	208
Örnek 36	206	208	208	207	208	206	207	207	207	210

Veriler analiz edildiğinde, kulplu çay bardağına ait ağırlık değerlerinin bu kez 206 gr. ve 211 gr. arasında değiştiği gözlemlenmiştir. Ağırlık spesifikasyon değeri  $208 \pm 5$  gr. olan kulplu çay bardaklarından alınan numune setindeki ürün ağırlıklarının önceki ölçümde olduğu gibi tolerans dahilinde olduğu gözükmektedir. Yeni oluşturulan veri seti için, örnek gruplarına ait ortalama, standart sapma, maksimum, minimum ve değişim aralığı değerleri hesaplanmıştır. Sonuçları Çizelge 4.11’de yer almaktadır.

**Çizelge 4.11. İyileştirme Sonrası Kulplu Çay Bardağı Ağırlıklarına Ait İstatistiksel Veriler**

	Ö1	Ö2	Ö3	Ö4	Ö5	Ö6	Ö7	Ö8	Ö9	Ö10	Ortalama	Standart Sapma	Maksimum	Minimum	Değişim Aralığı
Örnek 1	210	208	208	207	206	208	207	208	209	207	207,80	1,14	210	206	4
Örnek 2	207	207	206	208	208	208	208	209	209	206	207,60	1,07	209	206	3
Örnek 3	208	208	208	207	208	208	209	210	209	206	208,10	1,10	210	206	4
Örnek 4	208	208	208	206	207	207	207	208	210	207	207,60	1,07	210	206	4
Örnek 5	208	208	206	209	207	210	208	209	208	208	208,10	1,10	210	206	4
Örnek 6	210	208	207	208	208	208	209	207	210	207	208,20	1,14	210	207	3
Örnek 7	209	209	208	208	209	209	207	206	209	208	208,20	1,03	209	206	3
Örnek 8	207	208	206	207	207	207	209	210	208	207	207,60	1,17	210	206	4
Örnek 9	208	207	208	207	208	208	208	207	206	207	207,40	0,70	208	206	2
Örnek 10	209	206	206	208	209	208	207	207	209	208	207,70	1,16	209	206	3
Örnek 11	208	209	206	208	207	207	208	208	207	209	207,70	0,95	209	206	3
Örnek 12	207	207	208	207	209	207	206	206	208	209	207,40	1,07	209	206	3
Örnek 13	206	206	207	207	206	209	207	207	209	207	207,10	1,10	209	206	3
Örnek 14	207	209	207	208	207	208	208	210	210	207	208,10	1,20	210	207	3
Örnek 15	208	208	208	207	209	210	208	209	210	209	208,60	0,97	210	207	3
Örnek 16	207	208	207	208	208	209	208	208	209	208	208,00	0,67	209	207	2
Örnek 17	208	208	206	208	208	210	207	209	208	207	207,90	1,10	210	206	4
Örnek 18	207	207	208	209	208	209	207	208	210	208	208,10	0,99	210	207	3
Örnek 19	208	207	208	209	207	209	208	207	209	210	208,20	1,03	210	207	3
Örnek 20	209	208	207	208	208	208	210	206	209	209	208,20	1,14	210	206	4
Örnek 21	209	208	206	209	208	208	210	208	209	209	208,40	1,07	210	206	4
Örnek 22	208	207	207	210	206	207	207	207	208	208	207,50	1,08	210	206	4
Örnek 23	208	207	209	208	207	207	209	208	208	209	208,00	0,82	209	207	2
Örnek 24	207	206	208	210	208	208	207	208	209	209	208,00	1,15	210	206	4
Örnek 25	207	207	207	208	206	208	210	209	208	209	207,90	1,20	210	206	4
Örnek 26	206	208	207	208	208	206	208	208	207	210	207,60	1,17	210	206	4
Örnek 27	209	208	208	206	207	208	209	210	208	209	208,20	1,14	210	206	4
Örnek 28	208	207	209	208	207	206	208	209	210	209	208,10	1,20	210	206	4
Örnek 29	209	208	208	208	206	208	208	208	209	209	208,10	0,88	209	206	3
Örnek 30	207	206	208	207	208	207	208	209	207	210	207,70	1,16	210	206	4
Örnek 31	208	208	208	208	210	208	210	208	208	209	208,50	0,85	210	208	2
Örnek 32	208	207	208	209	208	206	210	209	207	209	208,10	1,20	210	206	4
Örnek 33	209	207	208	208	208	208	209	210	208	209	208,40	0,84	210	207	3
Örnek 34	207	206	207	207	207	208	209	209	209	210	207,90	1,29	210	206	4
Örnek 35	208	208	206	208	206	207	208	209	208	208	207,60	0,97	209	206	3
Örnek 36	206	208	208	207	208	206	207	207	207	210	207,40	1,17	210	206	4

Sonrasında 360 adetlik numune için ortalama, standart sapma, değişim aralığı değerleri hesaplanmıştır.

#### 4.6.1. Kontrol Grafikleri ile Sürecin İzlenmesi

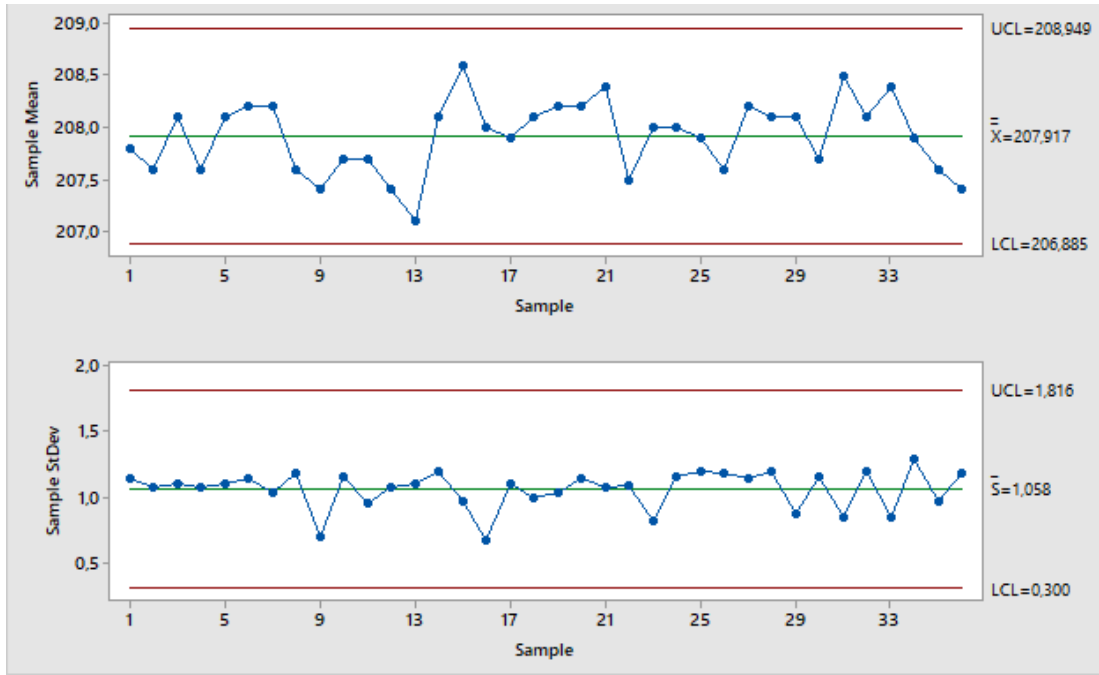
Alınan 10 adet örneğin genel ortalama değeri;

$$\bar{X} = \frac{7485}{36} = 207,92 \text{ gr olarak hesaplanmıştır.}$$

Standart sapmaların ortalaması ise,  $\bar{S} = 1,058$  gr olarak hesaplanmıştır.

N=10 için,  $\bar{U}KS_{\bar{X}} = 207,92 + 0,975*0,956 = 208,95$  gr,  $\bar{A}KS_{\bar{X}} = 207,92 - 0,975*0,96 = 206,89$  gr olarak hesaplanmıştır. olarak hesaplanmıştır.  $\bar{X}$  - kontrol grafiği, Alt Kontrol Sınırı ise,  $\bar{A}KS_{\bar{X}} = \bar{\bar{X}} - A_3\bar{S}$  formülünden hesaplanarak,

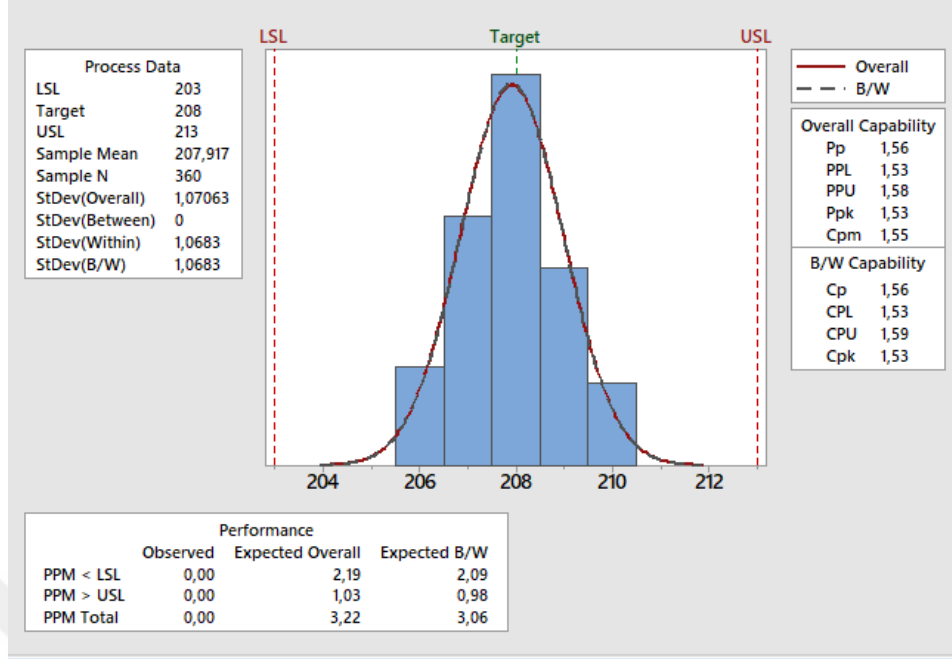
s - kontrol grafiği,  $\bar{U}KS_s = 1,716 * 1,058 = 1,815$  gr,  $\bar{A}KS_s = 0,284*1,058 = 0,30$  gr olmuştur. (Şekil 4.26)



Şekil 4.26. İyileştirme sonrası  $\bar{X}$  - s Kontrol Grafikleri

#### 4.6.2. Süreç Yetenek Analizi Çalışması

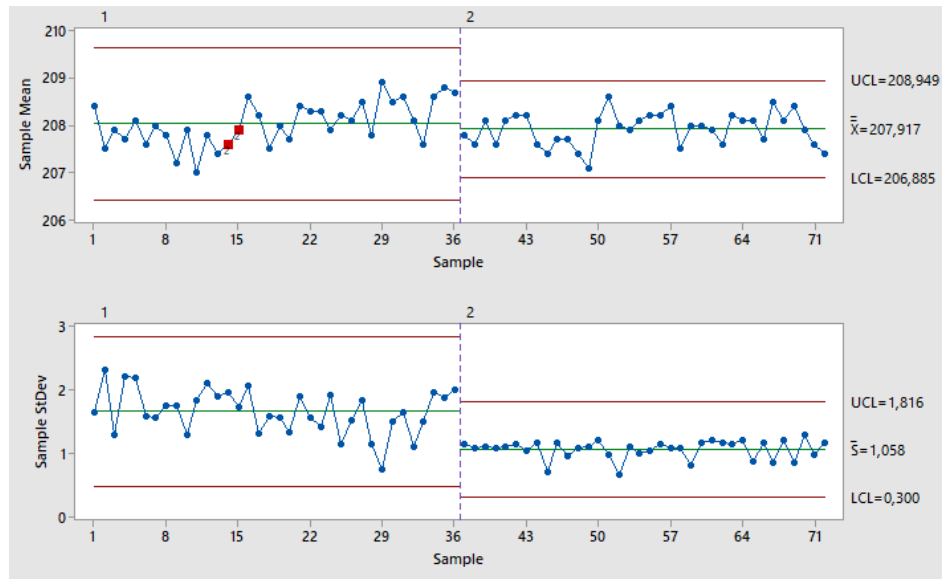
Otomatik damla sistemi entegrasyonu sonrası damla ağırlığının değişkenliğine yönelik süreç yeteneği ölçme çalışması tekrarlanmıştır. Alınan 10 ölçümdeki toplam 360 adet ürün için  $C_p$ ,  $C_{pk}$ ,  $C_m$  değerleri hesaplandığında, ortaya çıkan sonuçlar Şekil 4.27'de paylaşılmıştır.



Şekil 4.27. İyileştirme sonrası Süreç Yetenek Analizi Çalışması

Çalışma sonuçları incelendiğinde,  $C_p$  değerinin 1,56,  $C_{pk}$  değerinin 1,53 olduğu,  $C_m$  değerinin ise 1,55'e yükseldiği gözükmektedir.  $C_p$  ve  $C_{pk} > 1,33$  olması, otomatik damla sistemi entegrasyonu sonrası, damla ağırlığı sürecinin yeterli olduğu anlamına gelmektedir.

Otomatik sistem öncesi alınan ölçüm sonuçları ile, sistem entegrasyonu sonrası yapılan ölçümlerin karşılaştırmalı grafikleri Şekil 4.28'de verilmiştir.



Şekil 4.28. İyileştirme sonrası Süreç Yetenek Analizi Çalışması

Otomatik damla ağırlığı ölçüm sistemi öncesi ve sonrasına ait ortalama ağırlık, standart sapma, süreç yeterliliği ve süreç yeterlilik indeksi değerleri Çizelge 4.12’de yer almaktadır.

**Çizelge 4.12.** İstatistiksel Veri Karşılaştırma Çizelgesi

	Otomatik Damla Ağırlığı Ölçüm Sistemi Öncesi	Otomatik Damla Ağırlığı Ölçüm Sistemi Sonrası
Ağırlık Değerleri Ortalaması	208,03	207,92
Ağırlık Değerleri Standart Sapması	1,659	1,058
C <sub>p</sub>	0,98	1,56
C <sub>pk</sub>	0,98	1,53
C <sub>m</sub>	1,00	1,55

Haziran ayına ait üretim verileri incelendiğinde, otomatik ölçüm sisteminin entegrasyonu ile birlikte, en verimli aralıkta damla ağırlığı ve sıcaklığının gerçekleşmesiyle birlikte, toplam hatalı ürün oranının %6,54’ten %4,04’e düştüğü görülmüştür. Ağırlık kaynaklı hatalı ürün oranı ise %54,8’den, %17,5’e gerilediği ve bu kampanya için 2.067 adet olarak gerçekleştiği tespit edilmiştir. Haziran 2024 üretimine ait değerler Çizelge 4.13’te verilmiştir.

**Çizelge 4.13.** İyileştirme Sonrası Üretim Verileri Karşılaştırma Çizelgesi

	Sistem Öncesi Olası Üretim Analizi		Sistem Sonrası Gerçekleşen Üretim Analizi	
	Üretim Verileri	Birim	Üretim Verileri	Birim
Mayıs Toplam Üretim	291.696	adet	291.696	adet
Mayıs Palete Giren Ürün	279.911	adet	279.911	adet
Toplam Hatalı Ürün Adedi	19.077	adet	11.785	adet
Hatalı Ürün Oranı	6,54	%	4,04	%
Ağırlık Kaynaklı Hatalı Ürün Sayısı	10.454	adet	2.067	adet

Kulplu çay bardaklarının yıllık üretim adeti 25 milyon adet olmasından yola çıkılarak, toplam hatalı ürün içerisinde %54,8 olan ağırlık kaynaklı hatalı ürün oranının %17,5’e gerilemesiyle, 609.855 adetlik firenin önüne geçilebileceği ve ortalama kulplu çay bardaklarının 201 gr. olduğu düşünüldüğünde yaklaşık 130.000 € kazanç sağlanabileceği görülmüştür. Beklenen kazançlara ilişkin tablo, Çizelge 4.14’te paylaşılmıştır.

**Çizelge 4.14.** İyileştirme Sonrası Beklenen Kazanç Çizelgesi

	Üretim Verileri	Birim
Toplam Üretim	25.000.000	adet
Palete Giren Ürün	23.375.000	adet
Toplam Hatalı Ürün Adedi	1.635.000	adet
Hatalı Ürün Oranı	6,54	%
Ağırlık Kaynaklı Hatalı Ürün Sayısı	895.980	adet
Önlenecek Hatalı Ürün Sayısı	609.855	adet
Bir Ürün Ortalama Ağırlığı	201	gr
Fire Olmayacak Cam	122.581	kg
Ağırlık Hatası Kaynaklı Maliyet	131.162	€

Damla ağırlıklarının ve sıcaklıklarının optimizasyonuna yönelik yapılan iyileştirme sonrası, FMEA çalışması güncellenmiştir. Proje ekibinin yeniden değerlendirmesinde, aksiyon önceliği “Yüksek” olarak belirlenmiş 14 adet hata etkisinin, sistemin devreye alınması ile birlikte 7 adetinin “Orta”, 7 adetinin ise “Düşük” öncelikli olarak güncellenmesine karar verilmiştir. Güncellenen hata etkilerine ilişkin, şiddet, olasılık, tespit edilebilirlik ve aksiyon önceliklendirme değerleri Çizelge 4.15’te yer almaktadır.

**Çizelge 4.15.** FMEA Karşılaştırma Çizelgesi

Hata Etki Numarası	Otomatik Damla Ağırlığı Ölçüm Sistemi Öncesi				Otomatik Damla Ağırlığı Ölçüm Sistemi Sonrası			
	Şiddet	Olasılık	Tespit Edilebilirlik	Aksiyon Önceliklendirme	Şiddet	Olasılık	Tespit Edilebilirlik	Aksiyon Önceliklendirme
185	7	7	7	H	7	4	3	M
186	7	7	7	H	7	4	3	M
188	7	7	7	H	7	3	3	M
189	7	7	7	H	7	4	3	M
191	7	4	7	H	7	3	4	L
192	7	4	7	H	7	3	4	L
194	7	4	7	H	7	3	3	L
196	7	4	7	H	7	3	3	L
197	7	4	7	H	7	3	3	L
198	7	4	7	H	7	3	3	L
199	8	4	7	H	8	3	3	L
203	8	5	8	H	8	4	4	M
204	7	7	8	H	7	4	4	M
205	7	5	7	H	7	4	3	M

## 5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışma ile Cam Ev Eşyası Fabrikasında pres üretim tekniği ile üretilen kulplu çay bardağı ürünlerinde yaşanan operasyonel kayıpları analiz etmek için sürece yönelik bir FMEA çalışması yapılmıştır. Hata etkileri için AP'ler incelendiğinde, damla ağırlığının süreç yeteneğinin artırılmasına yönelik yapılacak çalışmaların, operasyonel hataların azaltılmasında önemli etkisinin olacağı öngörülmüştür.

Damla ağırlığına yönelik yapılan MSA çalışması ekipman ve ölçümcülerin yeterli olduğunu ortaya koysa da, yapılan istatistiksel süreç kontrolü çalışmasında  $C_p$  ve  $C_{pk}$  değerlerinin 1'in altında çıkması, iyileştirme çalışmalarının yapılması gerekliliğini göstermiştir. Yapılan araştırmalar sonucu, damla ağırlığını, sıcaklık, form, uzunluk ve çap parametrelerine göre istenilen aralıkta tutmayı başaran Otomatik Damla Ağırlığı Ölçüm Sistemi'ne yatırım yapılması yönünde karar alınmıştır. Kulplu çay bardaklarının üretimlerinin gerçekleştirildiği pres üretim hattı pilot hat olarak seçilmiştir. Sistemin hat üzerine entegrasyonu 27.05.2024 tarihinde tamamlanmıştır.

Otomatik Damla Ağırlığı Ölçüm Sistemi entegrasyonu sonrası ilk üretim kampanyasında 291.696 adetlik üretim gerçekleştirilmiştir. Bu üretim adetinin 279.911 adeti nihai ürün olarak palete girmiştir. Bu verilere göre, toplam hatalı ürün adetinin 11.785 olduğu ve toplam hatalı ürün oranının %4,04'e düştüğü görülmektedir. Oysa ki, sistem entegrasyonu öncesinde hatalı ürün oranının %6,54 olduğu düşünüldüğünde, iyileştirme öncesi duruma göre hatalı ürün adetinin 19.077 olarak gerçekleşmesi beklenmektedir. Hatalı ürünler içerisinde, damla ağırlığı kaynaklı hatalı ürün oranı sistem entegrasyonu öncesi %54,8 olduğundan, bu kampanya için 10.454 adete karşılık geleceği, ancak sistemin sağladığı iyileştirme ile 2.067 olarak gerçekleştiği ve oranın %17,5'e gerilediği tespit edilmiştir.

Sistem entegrasyonu sonrası, ilk üretim kampanyası için damla ağırlığına yönelik SPC çalışması tekrarlanmıştır. Tekrarlanan çalışmaya ait sonuçlar kontrol edildiğinde, öncesinde 208,03 gr. olan ortalama ağırlık değerinin, sistem entegrasyonu sonrasında 207,92 olduğu tespit edilmiştir. Ağırlık ölçümleri için öncesinde 1,659 gr. olan standart sapma değeri, sonrasında 1,058 gr. olmuştur. Süreç yeterlilik analizleri kapsamında,  $C_p$  değerinin

0,98'den 1,56'ya,  $C_{pk}$  değerinin ise 0,98'den 1,53'e yükseldiği görülmüştür. Bu değerler sürecin yeterli olduğunu göstermiştir.

Otomatik Damla Ağırlığı Ölçüm Sistemi entegrasyonu ile birlikte, optimum damla ağırlığı ve sıcaklıklarında üretimin gerçekleştirilmesiyle, yıllık üretimi yaklaşık 25 milyon adet olan kulplu çay bardağı üretimlerindeki %6,54 olan fire oranının yaklaşık %4,04'e indirilmesi hedeflenmiştir. Yıllık 895.980 adet olan ağırlık kaynaklı hatalı ürün sayısının % 68 oranında azaltılarak, 286.125 adete indirilebileceği öngörülmüştür. Bu durumda, ilgili kulplu çay bardağı üretim hatlarında çalışan kalıplar için ortalama ürün ağırlığının 201 gr. olduğundan hareketle, 122.581 kg cam kaybının önüne geçilmiş olunacaktır. Otomatik Damla Ağırlığı Ölçüm Sistemi entegrasyonu sonrası elde edilecek iyileştirmenin yaklaşık €130.000 olacağı hesaplanmıştır.

Yapılan iyileştirmeye sonrası, pres üretim süreci, şekillendirme adımı için yapılan FMEA çalışması da güncellenmiştir. Sonuçlar incelendiğinde, hata etkilerinin olasılık ve tespit edilebilirlik puanlarında ve bunlara bağlı olarak da aksiyon önceliklendirmelerinde değişimler ortaya çıkmıştır.

Yeni sistemin entegrasyonu öncesi, aksiyon önceliği "Yüksek" olarak belirlenmiş 14 adet hata etkisinin, sistemin devreye alınması sonrası yapılan yeniden değerlendirmede, 7 adetinin "Orta", 7 adetinin ise "Düşük" öncelikli olarak güncellenmesine karar verilmiştir.

Otomatik Damla Ağırlığı Ölçüm Sistemini başta pres hatları olmak üzere, verim artışı sağlanabileceği öngörülen tüm hatlara yaygınlaştırmanın, verimliliği ve dolaylı olarak kazancı artıracığı düşünülmektedir.

Literatürde, cam sektöründe kalite iyileştirmeye dönük çeşitli metodolojilere rastlansa da, cam ev eşyası üretimine yönelik risk analizi-FMEA, MSA ve SPC'nin entegre uygulamalarını ele alan ve detaylı maliyet analizini de içeren bütünlük bir çalışmaya rastlanamamıştır. Çalışma bu yönüyle, benzer alanda faaliyet gösteren sanayi kuruluşları için rehber niteliktedir.

Gelecekte, cam üretim süreçlerinde otomatik ölçüm sistemlerinden toplanan büyük verilerin analizini gerçekleştirebilen yapay zeka destekli kalite izleme modüllerinin kullanımı yaygınlaşabilir. Bu tür sistemler, makine öğrenmesi algoritmalarını kullanarak damla gramajı gibi kritik üretim parametreleri ile bu parametreler arasındaki karmaşık ilişkileri modelleyebilir ve verimliliği artırarak hataları en aza indirebilir. Regresyon modelleri ve karar ağaçları gibi algoritmaların doğruluğu, ortalama kare hatası (MSE), ortalama mutlak hata (MAE) ve  $R^2$  skoru gibi metriklerle değerlendirilir. Bu algoritmalar, üretim sürecinde sürekli öğrenme sağlayarak sistemin değişen koşullara adapte olmasına ve otomatik iyileştirmelerle daha yüksek kalite ve sürdürülebilirlik elde edilmesine katkı sağlar. Böylelikle, çalışma, yapay zeka destekli modüller aracılığıyla kalite yönetimi hedeflerine uygun şekilde güncellenebilir.

## KAYNAKLAR DİZİNİ

- Ahire, C.P., & Relkar, A.S., (2012). *Correlating Failure Mode Effect Analysis (FMEA) & Overall Equipment Effectiveness (OEE)*. Procedia Engineering, 38, 3482-3486. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2012.06.402>
- AIAG (2002). *Measurement Systems Analysis*. 3. Baskı. AIAG Yayınları.
- AIAG & VDA (2019). *Hata Türleri ve Etkileri Analizi FMEA El Kitabı*. 1. Baskı. AIAG Yayınları.
- Akyurt, İ. Z. (2020). *Gıda Sektöründe İstatistiksel Proses Kontrolü: Endüstriyel Ekmek Üretim Tesisi Uygulaması*. Erzincan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 13(1), 235–257. <https://doi.org/10.18185/erzifbed.605670>
- Alnahhal, M., Salah B., & Ali M. (2023). *Risk prioritization using a modified FMEA analysis in industry 4.0*. Journal of Engineering Research, 11, 460-468. <https://doi.org/10.1016/j.jer.2023.07.001>
- Andrade, C.J., Koop. B.L., S., da Silva, M.N., da Silva, F.D., Lima, K.T.S., Soares, S., Valencia, G.A., & Monteriro, A.R. (2022). *Flavonoids, anthocyanins, betalains, curcumin, and carotenoids: Sources, classification and enhanced stabilization by encapsulation and adsorption*. Food Research International, 153, 110929 . <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2021.110929>
- Aravind, S., Shunmugesh K., Akhil K.T., & Kumar, M.P., (2017). *Process Capability Analysis and Optimization in Turning of 11sMn30 Alloy*. Materials Today: Proceedings, 4, 3608-3617.
- Arnal-Velasco, D., & Barach, P., (2021). *Anaesthesia and perioperative incident reporting systems: Opportunities and challenges*. Ocean Engineering, 35, 93-103. <https://doi.org/10.1016/j.bpa.2020.04.013>
- Aslam M. & Bantan, R.A.R., (2020). *A study on measurement system analysis in the presence of indeterminacy* Measurement, 166, 108201. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2020.108201>
- Ateş, İ. (2016). *Metal sektöründe hata türü ve etkileri analizi* [Yüksek Lisans Tezi, Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü]. YÖK Ulusal Tez Merkezi. <https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/TezGoster?key=cbOXH84ZayrLjc0tI-QXKiJ0hVgA9reHLHc3pa2zNOiISj31yjIuEEc9Q78XN-5>
- Ayaz, H.İ., & Ervural B. (2023). *A fully data-driven FMEA framework for risk assessment on manufacturing processes using a hybrid approach*. Engineering Failure Analysis, 152, 107525. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2023.107525>

## KAYNAKLAR DİZİNİ

- Aygan, D. (2023). *Bir üretim işletmesinde ölçüm sistemleri analizi ve istatistiksel proses yeterliliği üzerine bir uygulama*. [Yüksek Lisans Tezi, Beykent Üniversitesi Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı]. YÖK Ulusal Tez Merkezi. [https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/TezGoster?key=S2eMu1TIwY\\_v4mYv58xAr8cI5gIFBXTB8TinsTiPsGLaYaCV8zfuAhS\\_SEHV3wZY](https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/TezGoster?key=S2eMu1TIwY_v4mYv58xAr8cI5gIFBXTB8TinsTiPsGLaYaCV8zfuAhS_SEHV3wZY)
- Basnet, S., BahooToroody, A., Chahal, M., Lahtinen, J., Bolbot, V., & Banda, O.A.V., (2023). *Risk analysis methodology using STPA-based Bayesian network- applied to remote pilotage operation*. *Ocean Engineering*, 270, 113569. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.113569>
- Bottani, E., Montanari R., Volpi A., Tebaldi L., & Di Maria, G., (2021). *Statistical Process Control of assembly lines in a manufacturing plant: Process Capability assessment*. *Procedia Computer Science*, 180, 1024-1033. <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0>
- Bouzemrak, Y., Liu, N., Mu, W., Gavai, A., Manning, L., Butler, F., & Marvin, H.J.P., (2024). *Data driven food fraud vulnerability assessment using Bayesian Network: Spices supply chain*. *Food Control*, 164, 110616. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2024.110616>
- Burnak N. & Aktar Demirtaş E., (2019). *Toplam Kalite Yönetiminde İstatistiksel Süreç Kontrolü*. 1. Baskı. ESOGÜ Basımevi.
- Can, B. (2022). *Servikal disk hernisi oluşumunu etkileyen hata ve risklerin HTEA ve pareto analizi sistematiğinde incelenmesi* [Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Okan Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü]. YÖK Ulusal Tez Merkezi. [https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/TezGoster?key=kScA8XnrRb0WogX-qPGFkhmk01\\_tsw7TD7y-4rZ7MU5ChY64EkHThCOKyYGdVIgt](https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/TezGoster?key=kScA8XnrRb0WogX-qPGFkhmk01_tsw7TD7y-4rZ7MU5ChY64EkHThCOKyYGdVIgt)
- Chang, K., & Cheng, C., (2010). *A risk assessment methodology using intuitionistic fuzzy set in FMEA*. *Springer Singapore*, 41 (12), 1457–1471. <https://doi.org/10.1080/00207720903353633>
- Çelik, B. (2023). *Measurement system analysis and application in the production industry*. [Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi İstatistik Anabilim Dalı]. YÖK Ulusal Tez Merkezi. [https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/TezGoster?key=S2eMu1TIwY\\_v4mYv58xAr5ND1-5HmYeLD5g14qUJtUMeKr4XgxdnQ0mO3Igr0rCp](https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/TezGoster?key=S2eMu1TIwY_v4mYv58xAr5ND1-5HmYeLD5g14qUJtUMeKr4XgxdnQ0mO3Igr0rCp)
- Dindaş, Z. (2018). *Ölçüm Sistemleri Analizinde Varyans Bileşenlerinin Tahminleri*. [Yüksek Lisans Tezi, Hacettepe Üniversitesi İstatistik Anabilim Dalı]. YÖK Ulusal Tez Merkezi. <https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/TezGoster?key=vbVkJXe1KChYWNElr1MuLZihT0JzIc1FjWs0Q5fHVYUftCrNEvt0X3a4OUlsSjoRM>

## KAYNAKLAR DİZİNİ

- Erginel N., (2020). *Kalite Mühendisleri İçin El Kitabı*. 1. Basım. Nobel Akademik Yayıncılık Eğitim Danışmalık Tic.Ltd.Şti.
- Gebel, A.S. (2023). *Uzaktan eğitim modelinde hata türü ve etkileri analizinin (HTEA) uygulanması* [Yüksek Lisans Tezi, Necmettin Erbakan Fen Bilimleri Enstitüsü]. YÖK Ulusal Tez Merkezi. [https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/TezGoster?key=a0OMTmEd\\_3mfOBxT8SiBTGWi8QRtJ\\_54wZobl711c367UdL4o4Rd2VCBJMq47Wuj](https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/TezGoster?key=a0OMTmEd_3mfOBxT8SiBTGWi8QRtJ_54wZobl711c367UdL4o4Rd2VCBJMq47Wuj)
- Göksu, S. (2021). *Emniyetli gemi operasyonları için hata türleri ve etkileri analizi (FMEA)'ne dayalı risk değerlendirme modeli geliştirilmesi* [Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Deniz Ulaştırma Mühendisliği Anabilim Dalı]. YÖK Ulusal Tez Merkezi. [https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/TezGoster?key=8tbPippmWV\\_b-Irrn9YEAvIB06emCZYXmqBhHIRMQaZqaWy4i2GypCu7Paubrk3Y](https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/TezGoster?key=8tbPippmWV_b-Irrn9YEAvIB06emCZYXmqBhHIRMQaZqaWy4i2GypCu7Paubrk3Y)
- Hansen, H., Kulahci M., & Nielsen, B.F., (2023). *Statistical process control versus deep learning for power plant condition monitoring*. Computer and Chemical Engineering, 178, 108391. <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2023.108391>
- Hassan, A., Siadat, A., Dantan, J-Y., & Martin, P., (2010). *Conceptual process planning – an improvement approach using QFD, FMEA, and ABC methods*. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 26, 392-401. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2009.12.002>
- Jafari-Marandi, R., Davarzani, S., Soltanpour Gharibdousti, M., & Smith, B.K. (2018). *An optimum ANN-based breast cancer diagnosis: Bridging gaps between ANN learning and decision-making goals*. Applied Soft Computing, 72, 108–120. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2018.07.060>
- Gan, T., Yu, X., Zhu, Y., Cao, J., Yang, X., Jin, B., Zhang, Y., & Zhan, W., (2021). *Healthcare failure mode and effect analysis (HFMEA) for improving the qualification rate of disinfection quality monitoring process*. Journal of Infection and Public Health, 13, 718-723. <https://doi.org/10.1016/j.jiph.2020.02.040>
- Gopal, P., Peddi S., & Lanka K. (2023). *Modified FMEA using machine learning for food supply chain*. Materials Today: Proceedings, 4, 353. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.04.353>
- Gradl, P.R., (2022). *Application of optical measurement techniques during various stages of pregnancy*, 24, 100453. <https://doi.org/10.1016/j.measen.2022.100453>
- Güzel, B. (2022). *Bir otomotiv tedarikçisinde IATF 16949 kapsamında APQP proje çalışması ve FMEA, SPC uygulaması* [Yüksek Lisans Tezi, Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü]. YÖK Ulusal Tez Merkezi. <https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/TezGoster?key=kScA8XnrRb0WogX-qPGFko6ZwocM7-NgHi-eoowO-AFe4mbv7kRurn0hdvn9wHdG>

## KAYNAKLAR DİZİNİ

- Kang, J., Li, H., Kong, X., Dong, Y., & Kang, H.S., (2024). *Risk analysis of offshore rocket launch propellant filling system under data and knowledge scarcities*. Ocean Engineering, 300, 117435. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2024.117435>
- Kavsara, H.K. (2019). *Geleneksel fermente içeceklerin üretim yöntemlerine hata türü ve etkileri analizinin uygulanması* [Yüksek Lisans Tezi, Yeditepe Üniversitesi Sağlık Bilimleri Enstitüsü]. YÖK Ulusal Tez Merkezi. [https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/TezGoster?key=4J\\_FzTwrMCH4qBR0pXPH\\_sUIBAqhdvn96EJz1Vo1DIap\\_1EMajj9v47iRglSgRp](https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/TezGoster?key=4J_FzTwrMCH4qBR0pXPH_sUIBAqhdvn96EJz1Vo1DIap_1EMajj9v47iRglSgRp)
- Kazula, S., (2024). *Common cause analysis of the air supply system of fuel cell-powered propulsion systems in electrified aviation*. Engineering Failure Analysis, 163, 108435. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2024.108435>
- Kolukırcık, N. (2021). *Düşük hacimli üretimde istatistiksel süreç kontrolü ve HTEA tabanlı bir kalite kontrol model önerisi* [Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Üniversitesi Cerrahpaşa Lisansüstü Eğitim Enstitüsü]. YÖK Ulusal Tez Merkezi. [https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/TezGoster?key=8tbPippmWV\\_b-Irrn9YEAowsiHo0hShat-FyCa2Smw1jetczl5QNO--L-sQQHAEf](https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/TezGoster?key=8tbPippmWV_b-Irrn9YEAowsiHo0hShat-FyCa2Smw1jetczl5QNO--L-sQQHAEf)
- Lim, C., & Kim, J. (2021). *Customer complaints monitoring with customer review data analytics: An integrated method of sentiment and statistical process control analyses*. Advanced Engineering Informatics, 49, 101304. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2021.107765>
- Loh, T.P., Cervinski, M.A., Katayev, A., Bietenbeck, A., van Rossum, H. & Badrick, T. (2019). *Recommendations for laboratory informatics specifications needed for the application of patient-based real time quality control*. Clinica Chimica Acta, 495 625–629, <https://doi.org/10.1016/j.cca.2019.06.009>
- Mohanty, A.R., (2014). *Machinery Condition*. 1st Edition. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781351228626>
- Montgomery, D.C., (2017). *Design and Analysis of Experiments*. John Wiley & Sons.
- Musubeyli Erginel, N., (2004). *Tasarım Hata Türü ve Etkileri Analizinin Etkinliği İçin Bir Model ve Uygulaması*. Endüstri Mühendisliği Dergisi, 15(3), 17-26.
- Önder, S. (2019). *Özel hastanelerde kalite iyileştirme sürecinde hata türü ve etkileri analizi (FMEA) ve bir uygulama* [Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Okan Üniversitesi Sağlık Bilimleri Enstitüsü]. YÖK Ulusal Tez Merkezi. [https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/TezGoster?key=4J\\_FzTwrMCH4qBR0pXPHwiAU92zD-LIZ8qaQXPbwhNY752iAj9Hv5n-Oo28v8Wq](https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/TezGoster?key=4J_FzTwrMCH4qBR0pXPHwiAU92zD-LIZ8qaQXPbwhNY752iAj9Hv5n-Oo28v8Wq)

## KAYNAKLAR DİZİNİ

- Özcan, A.M. (2021). *Uluslararası otomotiv iş gücü 16949 kalite yönetim sistem standardı temelinde kalite iyileştirme teknikleri ve ölçüm sistemleri analizi*. [Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü]. YÖK Ulusal Tez Merkezi. <https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/TezGoster?key=f10Kw4p1rmMDotyKRdYv1HzZiDKWcrkUp9mGWpiyRTzQ9dqSnOTHsPexwf3wVXn4>
- Özdemir, A. (2013). *İstatistiksel süreç kontrolü ile otomotiv yan sanayiindeki problemlerin çözümü* [Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü]. YÖK Ulusal Tez Merkezi. <https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/TezGoster?key=iTkOhwevEenJZ3onUvs52usxgzZM7dfiIpDIZgcYvGda0-E6nwDP9n02Hu035HvA>
- Özkılınç, Y.M. (2023). *Yeni tasarlanan bir buzdolabı için eş zamanlı mühendislik uygulamaları: DFMA, FMEA, TRIZ entegrasyonu* [Yüksek Lisans Tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü]. YÖK Ulusal Tez Merkezi. [https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/TezGoster?key=nLNfCsWgUluh5T2iyudShg7z5BfPM1IuGh6TqcYM9SGuG8Bvp2\\_tc9o5K6Og5JJH](https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/TezGoster?key=nLNfCsWgUluh5T2iyudShg7z5BfPM1IuGh6TqcYM9SGuG8Bvp2_tc9o5K6Og5JJH)
- Park, C., Ouyang, L., & Wang, M. (2021). *Robust g-type quality control charts for monitoring nonconformities*. *Computers & Industrial Engineering*, 162, 107765. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2021.107765>
- Peters, R., Pasel, J., & Samsun, R.C., (2024). *Technology transfer from fuel processing for fuel cells to fuel synthesis from hydrogen and carbon dioxide*. *International Journal of Hydrogen Energy*, 49, 943-961. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.08.022>
- Qu, X., Ye, M., Tang, F., Chien, C-W., Chuang, Y-C., & Liou, J.J.H., (2024). *Application of failure mode and effect analysis in ICU admission of potentially COVID-19 infected patients*. *American Journal of Infection Control*, 52, 552-562. <https://doi.org/10.1016/j.ajic.2023.12.012>
- Rocha, A., Romero F., Miranda D., Amorim M., & Lima, R.M., (2023). *Quality management practices to direct and control the accomplishment of project objectives in R&D units*. *Procedia Computer Science*, 219, 36-43. <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0>
- Ross, R.A., Foley, C.M., Jones, H.M., & Osinski, M.A., (2022). *A method for assessing and monitoring consistency of nonclinical ECG analysis*. *Journal of Pharmacological and Toxicological Methods*, 116, 107189. <https://doi.org/10.1016/j.vascn.2022.107189>
- Samuelsen, T.A., Ahmad, R., Oterhals, A., Xue, Y., & Skodvin, T. (2019). *Impact of fish protein concentrate on apparent viscosity and physical properties of soy protein concentrate subjected to thermomechanical treatment*. *Journal of Food Engineering*, 162, 107765. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2019.04.014>

## KAYNAKLAR DİZİNİ

- Sargınoğlu, B. (2023). *Santrifüj döküm tekniğinde karşılaşılan kalite hatalarının istatistiksel proses kontrol yöntemleri kullanılarak azaltılması* [Yüksek Lisans Tezi, Konya Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü]. YÖK Ulusal Tez Merkezi. [https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/TezGoster?key=G\\_oJ1rKE4SgJUkomyAKpRzK7HR9ebwt1AMP48SZQMFi7XfKDObSuaAmyOBjXUk4-](https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/TezGoster?key=G_oJ1rKE4SgJUkomyAKpRzK7HR9ebwt1AMP48SZQMFi7XfKDObSuaAmyOBjXUk4-)
- Singhvi, G., Waghule, T., Dabholkar, N., Gorantla, S., Rapalli, V.K., & Saha, R.N., (2020). *Quality by design (QbD) in the formulation and optimization of liquid crystalline nanoparticles (LCNPs): A risk based industrial approach*. *Biomedicine & Pharmacotherapy*, 14, 111940. <https://doi.org/10.1016/j.biopha.2021.111940>
- Soares, C.G., Diaz H., & Li, H., (2021). *A failure analysis of floating offshore wind turbines using AHP-FMEA methodology*. *Best Practice & Research Clinical Anaesthesiology*, 234, 109261. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2021.109261>
- Soysal, H. (2014). *Bulanık süreç yeterlilik analizi ve uygulaması*. [Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü]. YÖK Ulusal Tez Merkezi. <https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/TezGoster?key=gyLHMouPes-CvnhRcjQsKa6mgEjzSjiJOZ46qsmQRyTdzdhATvD1PPmA4PITGHU5>
- Şale, İ., (2023). *APQP&PPAP&MSA&SPC&FMEA Eğitimi*. TÜVSÜD.
- Taşkan, B., Karatop B., Adar, E., & Kubat C. (2021). *Decision analysis related to the renewable energy investments in Turkey based on a Fuzzy AHP-EDAS-Fuzzy FMEA approach*. *Computers & Industrial Engineering*, 151, 106958. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2020.106958>
- Thomas P.R., (2000). *Statistical Methods For Quality Improvement*, 2.Basım, New York, John Wiley& Sons.
- Toptancı, Ş., & Erginel, N. (2017). *Hata Türü ve Etkileri Analizi ve Kalite Fonksiyon Yazılımı ile Bir İnşaat Firması İçin Risk Değerlendirmesi*. *Journal of Engineering Sciences and Design*, 5(SI: Ergonomi2016), 189-199. <https://doi.org/10.21923/jesd.95198>
- Wang, B., Duan, X., Zhang, C., Tan, X., Pan, B., & Guo, W. (2024). *Exploring optimization algorithms for establishing patient-based real-time quality control models*. *Clinica Chimica Acta*, 554, 117774. <https://doi.org/10.1016/j.cca.2024.117774>
- Yacan, I., Bayhan, M., & Demirel, A. (2022). *Üretim Süreçlerinde İstatistiksel Kalite Kontrolü Uygulamaları Üzerine Bir Araştırma*. *International Journal of Academic Research and Ideas*, 28(14), 159-172. <https://dergipark.org.tr/tr/pub/yenifikirjournal/issue/71498/1126280>

## KAYNAKLAR DİZİNİ

- Yılmaz, F., & Ersöz, T. (2018). *Kalitenin İyileştirilmesi Amacıyla İstatistiksel Kalite Kontrol Yöntemlerinin Kullanılması Üzerine Havacılık ve Uzay Sektöründe Bir Uygulama*. Gaziosmanpaşa Bilimsel Araştırma Dergisi, 3(7), 28-35. [https://dergipark.org.tr/tr/pub/gbad/issue/39083/415065#article\\_cite](https://dergipark.org.tr/tr/pub/gbad/issue/39083/415065#article_cite)
- Yousaf, M.U., Aized, T., Shabbir, A., Ahmad, M., & Nabi, H.Z, (2023). *Automobile rear axle housing design and production process improvement using Failure Mode and Effects Analysis (FMEA)*. Engineering Failure Analysis, 154, 107649. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2023.107649>
- Yee, T.M., Ahmed S., & Quader, M.A, (2014). *Process behaviour and capability analysis for improvement of product quality in car-door glass manufacturing*. 5th Brunei International Conference on Engineering and Technology (BICET 2014), <https://doi.org/10.1049/cp.2014.1059>
- Zhao, J.B., Zhou, B., Tian, T.T., Zhu, G., & Liu, D.H., (2022). *An ultrasonic testing method for wall thickness of turbine blades*. Measurement, 198, 111357. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2022.111357>
- Zwetsloot, I.M., Mahmood, T., Wittenberg, P., Wang, H., & Tsui, K.L., (2019). *Monitoring data quality for telehealth systems in the presence of missing data*. International Journal of Medical Informatics, 126, 156-163. <https://doi.org/10.1016/j.ijmedinf.2019.03.011>

## EK AÇIKLAMALAR

### Ek Açıklamalar-A : FMEA Versiyon 5 Şiddet (S) Skor Çizelgesi

Proses Genel Değerlendirme Kriteri – Şiddet (S)					
Potansiyel Hata Etkileri, aşağıdaki kriterlere göre derecelendirilmiştir.					
5	Etki	Kuruluşunuzun Sahası Üzerindeki Etki	Sevk Edilecek Saha Üzerindeki Etki (biliniyorsa)	Son Kullanıcı Üzerindeki Etki (biliniyorsa)	Kurum veya Ürün Hattı Örnekleri
10	Çok Yüksek	Hata, üretim veya montaj çalışanları açısından şiddetli sağlık ve/veya emniyet risklerine neden olabilir.	Hata, üretim veya montaj çalışanları açısından şiddetli sağlık ve/veya emniyet risklerine neden olabilir.	Aracın ve/veya diğer araçların emniyeti kullanımını, sürücünün, yolcuların veya yol kullanıcılarının veya yayaların sağlığını etkiler.	
9		Hata, kuruluş-içi düzenlemelere uygunsuzlukla sonuçlanabilir.	Hata, kuruluş-içi düzenlemelere uygunsuzlukla sonuçlanabilir.	Yasal düzenlemelere uygunsuzluk.	
8	Kısmen yüksek	Etkilenen üretim operasyonlarının %100'ünün hurda edilmesi gerekebilir.	Tüm üretim vardiyasından daha uzun bir hat duruşu; sevkியatın durması olasıdır; Düzenlemelere uygunsuzluğa ilâveten saha tamiri veya değişimi gerekebilir (Son Kullanıcıya Montaj).	Beklenen hizmet ömrü içerisinde, aracı normal kullanımı için gereken birincil araç fonksiyonunun <b>kaybı</b> .	
7		Ürünün ayıklanması ve bir kısmının (%100'den az) hurdaya ayrılması gerekebilir; Birincil prosesten sapma; Hat hızında düşüş veya ilave iş gücü gerekebilir.	Hattın 1 saatten, tam üretim vardiyasına kadar durdurulması; Sevkiyatın durdurulması olasıdır; Düzenlemelere uygunsuzluğa ilâveten saha tamiri veya değişimi gerekebilir (Son Kullanıcıya Montaj).	Beklenen hizmet ömrü içinde aracın normal kullanımı için gereken birincil araç fonksiyonunun <b>bozulması</b> .	
6	Yüksek	Üretim parçalarının %100'ü hat dışında yeniden işlenmesi ve kabulü gerekebilir.	Bir saate kadar süreyle hat duruşu.	İkincil araç fonksiyonunun <b>kaybı</b> .	
5		Üretim parçalarının bir kısmının hat dışında yeniden işlenmesi ve kabulü gerekebilir.	Ürünlerin %100'ünden daha az bir miktardan etkilenir; Ciddi oranda ilave hatalı ürün oluşur; Ayıklama gerekebilir; Hat duruşu gerekmez.	İkincil araç fonksiyonunun <b>bozulması</b> .	
4		İşleme alınmadan önce üretim parçalarının %100'ünün hatta yeniden işlenmesi gerekebilir.	Hatalı ürün, önemli bir reaksiyon planını harekete geçirir; İlave hatalı ürün beklenmez; Ayıklama gerekmez.	Çok ciddi şekilde itiraz edilebilir görünüş, ses, titreşim, sarsıntı veya dokunsal algı.	
3	Düşük	İşleme alınmadan önce üretim parçalarının bir kısmının hatta yeniden işlenmesi gerekebilir.	Hatalı ürün, minör bir reaksiyon planını harekete geçirir; İlave hatalı ürün beklenmez; Ayıklama gerekmez.	Kısmen itiraz edilebilir görünüş, ses, titreşim, sarsıntı veya dokunsal algı.	
2		Proses, operasyon veya operatör açısından hafif uygunsuzluk.	Hatalı ürün reaksiyon planını harekete geçirmez; İlave hatalı ürün beklenmez; Ayıklama gerekmez; Tedarikçiyeye geri bildirimde bulunulması gerekir.	Az oranda itiraz edilebilir görünüş, ses, titreşim, sarsıntı veya dokunsal algı.	
1	Çok düşük	Görülebilir etki yok.	Görülebilir bir etki yok veya hiç etki yok.	Görülebilir etki yok.	

## Ek Açıklamalar-B : FMEA Versiyon 5 Olasılık (O) Skor Çizelgesi

Proses İçin Olma Olasılığı Potansiyeli (O)						
Potansiyel Hata Sebepleri aşağıdaki kriterlere göre derecelendirilmiştir. En iyi Olma Olasılığı tahminini belirlerken, Önleyici Kontrolleri de göz önünde bulundurun. Olma Olasılığı değerlendirme sırasında yapılan kestirimci bir sayısal derecelendirme olup, fiili oluşma oranını yansıtmayabilir. Olma Olasılığı derecelendirme numarası, FMEA kapsamında (değerlendirilen proses) göreceli bir derecelendirme değildir. Çoklu Olma Olasılığı derecelendirmelerine sahip Önleyici Kontroller için, kontrolün sağlamlığını en iyi yansıtan derecelendirmeyi kullanın.						Kullanıcı tarafından doldurulacaktır
O	Hata Nedeni Olma Olasılığı Tahmini	Her 1000 Parçada/Araçtaki Vaka Sayısı	Zaman Bazlı Hata Tahmin Değeri	Kontrol Türü	Önleyici Kontroller	Kurum veya Ürün Hattı Örnekleri
10	Aşırı Yüksek	≥ Binde 100'den büyük	Her Zaman	Yok	Önleyici kontrol yok.	
9	Çok Yüksek	≥ 10'da 1	Neredeyse Her Zaman	Davranışsal	Önleyici kontroller, hata sebebinin önlenmesinde küçük bir etkiye sahip.	
8		Binde 50	Vardiyada 1 Defadan Fazla			
7	Yüksek	20'de 1	Günde 1 Defadan Fazla	Davranışsal veya Teknik	Önleyici kontroller, hata sebebinin önlenmesinde bir şekilde etkili.	
6		Binde 20	Haftada 1 Defadan Fazla			
5	Orta	50'de 1	Ayda 1 Defadan Fazla			
4		Binde 10	Yılda 1 Defadan Fazla			
3	Düşük	100'de 1	Yılda 1 Defa	En iyi Uygulamalar: Davranışsal veya Teknik	Önleyici kontroller, hata sebebinin önlenmesinde çok etkili.	
2	Çok Düşük	Binde 2	Yılda 1 Defadan Az			
1	Aşırı Düşük	500'de 1	Asla	Teknik	Önleyici kontroller, tasarımdan (Örn. Parça geometrisi) veya prosesten (Örn. fikstür veya kalıp tasarımı) kaynaklanan hata sebebinin önlenmesinde aşırı derecede etkili. Önleyici kontrollerin amacı – Hata Sebebinden dolayı, Hata Türünün fiziksel olarak üretilememesi.	

## Ek Açıklamalar-C : FMEA Versiyon 5 Tespit Edilebilirlik (D) Skor Çizelgesi

Süreç Tasarımının Geçerli Kılınması İçin Tespit Etme Potansiyeli (D)				
Tespit Etmeye Yönelik Kontroller, Tespit Yöntemi Olgunluğuna ve Tespit Etme Olanığına göre derecelendirilmiştir.				Kullanıcı tarafından doldurulacaktır
D	Tespit Etme Yeteneği	Tespit Yöntemi Olgunluğu	Tespit Etme Olanığı	Kurum veya Ürün Hattı Örnekleri
10	Çok düşük	Oluşturulmuş veya bilinen herhangi bir test veya muayene yöntemi mevcut değil.	Hata Türü tespit edilemeyecek veya edilemeyecektir.	-
9		Test veya muayene yönteminin, hata türünü tespit etme olasılığı çok düşüktür.	Hata Türünün, rastgele veya ara sıra yapılan denetlemeler ile tespit edilmesi kolay değildir.	-
8	Düşük	Test veya muayene yönteminin, etkin veya güvenilir olduğu <b>henüz</b> kanıtlanmamıştır. (Örn. Tesisin yöntem hakkında tecrübesi çok az veya yok, G R&R sonuçları karşılaştırılabilir süreç veya bu uygulama üzerinde düşük, vb.)	Hata türünü veya hata nedenini tespit etmesi gereken bireysel muayene (görsel, dokunsal, işitsel), veya manuel ölçüm (niteliksel veya niceliksel) kullanımı.	Kontrol yöntemi <1 Yıllık Geçmiş Sahip GRR
7		Test veya muayene yönteminin, etkin veya güvenilir olduğu <b>kanıtlanmıştır</b> (Örn. Tesisin yöntem hakkında tecrübesi var, GR&R sonuçları karşılaştırılabilir süreç veya bu uygulama üzerinde kabul edilebilir, vb.)	Hata türünü veya hata nedenini tespit etmesi gereken makine-bazlı kontrol (ışıklı veya sesli uyarılı otomatik veya yarı-otomatik) veya koordinat ölçüm makinesi gibi bir kontrol ekipmanı kullanımı.	% 10 -% 20 aralığında Niteliksel Etkinlik % 85 -%90 aralığında
6	Orta	Test veya muayene yönteminin etkin veya güvenilir olduğu <b>kanıtlanmıştır</b> (Örn. Tesisin yöntem hakkında tecrübesi var, GR&R sonuçları karşılaştırılabilir süreç veya bu uygulama üzerinde kabul edilebilir, vb.)	Hata türünü veya hata nedenini tespit edecek olan bireysel muayene (görsel, dokunsal, işitsel), veya manuel ölçüm (niteliksel veya niceliksel) kullanımı. (Ürün numunesi kontrolü de dahil)	Kontrol yöntemi >1 Yıllık Geçmiş Sahip GRR % 10 altında Niteliksel Etkinlik >% 90
5		Test veya muayene yönteminin, etkin veya güvenilir olduğu <b>kanıtlanmıştır</b> (Örn. Tesisin yöntem hakkında aynı proses veya bu uygulama üzerinde tecrübesi var G R&R sonuçları karşılaştırılabilir süreç veya bu uygulama üzerinde kabul edilebilir, vb.)	Hata türünü veya hata nedenini tespit edecek olan makine-bazlı kontrol (ışıklı veya sesli uyarılı otomatik veya yarı-otomatik) veya koordinat ölçüm makinesi gibi bir kontrol ekipmanı kullanımı. (Ürün numunesi kontrolü de dahil)	
4	Yüksek	Sistemin etkili ve güvenilir olduğu kanıtlanmıştır (Örn. Tesisin yöntem hakkında aynı proses veya bu uygulama üzerinde tecrübesi var G R&R sonuçları karşılaştırılabilir süreç veya bu uygulama üzerinde kabul edilebilir, vb.)	Hata türünü <b>sonraki işlemde</b> tespit edecek olan makine-bazlı otomatik tespit yöntemi, daha fazla işlem yapılmasını engelleyecek veya sistem ürünü farklı olarak tanımlayacak ve proses içinde belirlenmiş ret alanına kadar otomatik olarak iletilmesine olanak sağlayacaktır. Farklı ürün, ürünün tesis dışına çıkmasını engelleyecek olan güçlü bir sistem tarafından kontrol edilecektir.	
3		Sistemin etkili ve güvenilir olduğu kanıtlanmıştır (Örn. Tesisin yöntem hakkında aynı proses veya bu uygulama üzerinde tecrübesi var G R&R sonuçları karşılaştırılabilir süreç veya bu uygulama üzerinde kabul edilebilir, vb.)	Hata türünü <b>istasyonda</b> tespit edecek olan makine-bazlı otomatik tespit yöntemi, daha fazla işlem yapılmasını engelleyecek veya sistem ürünü farklı olarak tanımlayacak ve proses içinde belirlenmiş ret alanına kadar otomatik olarak iletilmesine olanak sağlayacaktır. Farklı ürün, ürünün tesis dışına çıkmasını engelleyecek olan güçlü bir sistem tarafından kontrol edilecektir.	
2		Tespit yönteminin etkili ve güvenilir olduğu kanıtlanmıştır (Örn. Tesisin yöntem hakkında tecrübesi var, hatasızlaştırma doğrulamaları, vb.).	Sebebi tespit edip, ortaya çıkmakta olan hata türünü (farklı ürün) önleyecek olan makine-bazlı tespit yöntemi.	
1	Çok yüksek	Hata türü tasarımı edildiği gibi veya işlenmiş şekilde fiziksel olarak üretilemez veya kanıtlanmış tespit yöntemleri, hata türünü veya hata nedenini daima tespit eder.		

## Ek Açıklamalar-D : FMEA Versiyon 5 Aksiyon Önceliklendirme (AP) Çizelgesi

DFMEA ve PFMEA için Faaliyet Önceliklendirme (AP)							
Aksiyon Önceliklendirmesi, Risklerin azaltılmasına yönelik faaliyetlerin önceliklendirilmesi açısından Sübet, Orta Otusallığı ve Tespit Edilebilirlik derecelendirmelerinin birliğine kavandırılmıştır.						Kullanıcı tarafından doldurulacaktır	
Etki	S	Hata Nedeni Orta Otusallığı Tahmini	O	Tespit Edile Yeterliliği	D	Aksiyon Önceliği (AP)	
Ürün veya Tezisi Üzerindeki Etkisi Çok Yüksek Düzeyde	9-10	Çok Yüksek	8-10	Düşük-çok düşük	7-10	H	
				Orta	5-6	H	
				Yüksek	2-4	H	
				Çok yüksek	1	H	
		Yüksek	6-7	Düşük-çok düşük	7-10	H	
				Orta	5-6	H	
				Yüksek	2-4	H	
				Çok yüksek	1	H	
		Orta	4-5	Düşük-çok düşük	7-10	H	
				Orta	5-6	H	
				Yüksek	2-4	H	
				Çok yüksek	1	M	
	Düşük	2-3	Düşük-çok düşük	7-10	H		
			Orta	5-6	M		
			Yüksek	2-4	L		
			Çok yüksek	1	L		
	Çok Düşük	1	Çok yüksek-Çok Düşük	1-10	L		
	Ürün veya Tezisi Üzerindeki Etkisi Yüksek Düzeyde	7-8	Çok Yüksek	8-10	Düşük-çok düşük	7-10	H
					Orta	5-6	H
					Yüksek	2-4	H
Çok yüksek					1	H	
Yüksek			6-7	Düşük-çok düşük	7-10	H	
				Orta	5-6	H	
				Yüksek	2-4	H	
				Çok yüksek	1	M	
Orta			4-5	Düşük-çok düşük	7-10	M	
				Orta	5-6	M	
				Yüksek	2-4	M	
				Çok yüksek	1	M	
Düşük		2-3	Düşük-çok düşük	7-10	M		
			Orta	5-6	M		
			Yüksek	2-4	L		
			Çok yüksek	1	L		
Çok Düşük		1	Çok yüksek-Çok Düşük	1-10	L		

Ürün veya Tezisi Üzerindeki Etkisi Orta Düzeyde	4-6	Çok Yüksek	8-10	Düşük-çok düşük	7-10	H
				Orta	5-6	H
				Yüksek	2-4	M
				Çok yüksek	1	M
		Yüksek	6-7	Düşük-çok düşük	7-10	M
				Orta	5-6	M
				Yüksek	2-4	M
				Çok yüksek	1	L
		Orta	4-5	Düşük-çok düşük	7-10	M
				Orta	5-6	L
				Yüksek	2-4	L
				Çok yüksek	1	L
Düşük	2-3	Düşük-çok düşük	7-10	L		
		Orta	5-6	L		
		Yüksek	2-4	L		
		Çok yüksek	1	L		
Çok Düşük	1	Çok Düşük-Çok Düşük	1-10	L		
Ürün veya Tezisi Üzerindeki Etkisi Düşük Düzeyde	2-3	Çok Yüksek	8-10	Düşük-çok düşük	7-10	M
				Orta	5-6	M
				Yüksek	2-4	L
				Çok yüksek	1	L
		Yüksek	6-7	Düşük-çok düşük	7-10	L
				Orta	5-6	L
				Yüksek	2-4	L
				Çok yüksek	1	L
		Orta	4-5	Düşük-çok düşük	7-10	L
				Orta	5-6	L
				Yüksek	2-4	L
				Çok yüksek	1	L
Düşük	2-3	Düşük-çok düşük	7-10	L		
		Orta	5-6	L		
		Yüksek	2-4	L		
		Çok yüksek	1	L		
Çok Düşük	1	Çok yüksek-Çok Düşük	1-10	L		
Park edilebilir etki yok	1	Çok Düşük - Çok Yüksek	1	Çok yüksek - Çok düşük	1-10	L

### Ek Açıklamalar-E : Kontrol Grafikleri İçin Katsayılar Çizelgesi

Örnek büyüklüğü	Ortalama Diyagramı			Standart Sapma Diyagramı					Aralık Diyagramı					
	Kontrol Limitleri İçin Faktörler			Orta Çizgi İçin Faktör	Kontrol Limitleri İçin Faktörler				Orta Çizgi İçin Faktör	Kontrol Limitleri İçin Faktörler				
	A	A <sub>2</sub>	A <sub>3</sub>	c <sub>4</sub>	B <sub>3</sub>	B <sub>4</sub>	B <sub>5</sub>	B <sub>6</sub>	d <sub>2</sub>	p	D <sub>1</sub>	D <sub>2</sub>	D <sub>3</sub>	D <sub>4</sub>
2	2,121	1,880	2,659	0,7979	0	3,267	0	2,606	1,128	0,853	0	3,686	0	3,267
3	1,732	1,023	1,954	0,8862	0	2,568	0	2,276	1,693	0,888	0	4,358	0	2,574
4	1,500	0,729	1,628	0,9213	0	2,266	0	2,088	2,059	0,88	0	4,698	0	2,282
5	1,342	0,577	1,427	0,9400	0	2,089	0	1,964	2,326	0,864	0	4,918	0	2,114
6	1,225	0,483	1,287	0,9515	0,030	1,970	0,029	1,874	2,534	0,848	0	5,078	0	2,004
7	1,134	0,419	1,182	0,9594	0,118	1,882	0,113	1,806	2,704	0,833	0,204	5,204	0,076	1,924
8	1,061	0,373	1,099	0,9650	0,185	1,815	0,179	1,751	2,847	0,820	0,388	5,306	0,136	1,864
9	1,000	0,337	1,032	0,9693	0,239	1,761	0,232	1,707	2,970	0,808	0,547	5,393	0,184	1,816
10	0,949	0,308	0,975	0,9727	0,284	1,716	0,276	1,669	3,078	0,797	0,687	5,469	0,223	1,777
11	0,905	0,285	0,927	0,9754	0,321	1,679	0,313	1,637	3,173	0,787	0,811	5,535	0,256	1,744
12	0,866	0,266	0,886	0,9776	0,354	1,646	0,346	1,610	3,258	0,778	0,922	5,594	0,283	1,717
13	0,832	0,249	0,850	0,9794	0,382	1,618	0,374	1,585	3,336	0,770	1,025	5,647	0,307	1,693
14	0,802	0,235	0,817	0,9810	0,406	1,594	0,399	1,563	3,407	0,7630	1,118	5,696	0,328	1,672
15	0,775	0,223	0,789	0,9823	0,428	1,572	0,421	1,544	3,472	0,756	1,203	5,741	0,347	1,653
16	0,750	0,212	0,763	0,9835	0,448	1,552	0,440	1,526	3,532	0,750	1,282	5,782	0,363	1,637
17	0,728	0,203	0,739	0,9845	0,446	1,534	0,458	1,511	3,588	0,744	1,356	5,82	0,373	1,622
18	0,707	0,194	0,718	0,9854	0,482	1,518	0,475	1,496	3,640	0,739	1,424	5,856	0,391	1,608
19	0,688	0,187	0,698	0,9862	0,497	1,503	0,490	1,483	3,689	0,734	1,487	5,891	0,403	1,597
20	0,671	0,180	0,680	0,9869	0,510	1,490	0,504	1,470	3,735	0,729	1,549	5,921	0,415	1,585