

Motor Montaj Fabrikasında Subap Sarma Sorunu Üzerine Proses Hata Türleri ve Etkileri Analizi (PFMEA) ve İyileştirmeleri Çalışması

Taha Cüneyd MENDİ^{1*}, Hasan AYDOĞAN²

¹ Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Konya

² Selçuk Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Konya

*Sorumlu yazar (Corresponding author): tahamendi@icloud.com

Geliş Tarihi (Received): 12.01.2025

Kabul Tarihi (Accepted): 26.02.2025

Özet

Bu çalışma, motor montaj fabrikasında içten yanmalı motorların üretim sürecinde karşılaşılan hataları analiz ederek iyileştirme çalışmaları gerçekleştirmektedir. Üretim sürecinde ortaya çıkan hataların tespiti, değerlendirilmesi ve minimize edilmesi amacıyla Proses Hata Türleri ve Etkileri Analizi (PFMEA) yöntemi kullanılmıştır. PFMEA'nın etkinliğini artırmak için 6M analizi, Ishikawa diyagramı, kök neden analizi ve istatistiksel proses kontrol (SPC) gibi kalite yönetim tekniklerinden yararlanılmıştır. Özellikle silindir kapağı montaj sürecinde meydana gelen supap sarması problemi ele alınmış, hataların kök nedenleri belirlenerek önleyici ve düzeltici aksiyonlar uygulanmıştır. Yapılan çalışmalar sonucunda, kritik hatalar önemli ölçüde azaltılmış, süreç verimliliği artırılmış ve hata kaynaklı yıllık maliyetlerde düşüş sağlanmıştır. Çalışma, otomotiv sektöründe kalite yönetimi ve üretim süreçlerinde sürekli iyileştirme sağlamak adına önemli katkılar sunmaktadır. PFMEA'nın sistematik uygulanması ile hataların önceden belirlenmesi, süreçlerin daha kontrollü yönetilmesi ve kalite standartlarının iyileştirilmesi hedeflenmektedir. Bu kapsamda elde edilen sonuçlar, benzer üretim süreçlerinde kalite yönetim sistemlerinin geliştirilmesine yönelik yol gösterici bir çerçeve sunmaktadır.

Anahtar Kelimeler: İçten yanmalı motorlar, motor montaj fabrikası, üretim montaj süreçleri

Process Failure Modes and Effects Analysis (PFMEA) and Improvements on Valve Seizure Issue in Engine Assembly

Abstract

This study analyzes and improves defects encountered in the production processes of internal combustion engines in an engine assembly plant. Process Failure Modes and Effects Analysis (PFMEA) was utilized to detect, assess, and minimize these defects. To enhance its effectiveness, 6M analysis, Ishikawa diagrams, root cause analysis, and statistical process control (SPC) techniques were applied. The research primarily focuses on the valve seizure issue in the cylinder head assembly process, identifying root causes and implementing preventive and corrective actions. As a result, critical defects were significantly reduced, process efficiency improved, and annual defect-related costs decreased. This study provides valuable insights into quality management and continuous improvement in the automotive industry. The systematic application of PFMEA enables proactive error detection, better process control, and enhanced quality standards. Findings contribute to developing a structured framework for quality management in similar manufacturing environments.

Keywords: Internal combustion engines, engine assembly factory, production assembly processes

1. Giriş

Dünya genelinde otomotiv sektörüne yönelik faaliyet gösteren 1700'den fazla montaj tesisi bulunmaktadır (Wang ve Hodges, 2021). Bu işletmelerin, rekabet avantajlarını sürdürebilmek için ürünlerini tasarım aşamasından satış sonrası hizmetlere kadar güvence altına almaları gerekmektedir. Ürün güvenilirliğini sağlamanın en etkili yollarından biri ise yüksek kalite standartlarına ulaşmaktır (Bowles ve Pelaez, 1995). Otomotiv endüstrisinde faaliyet gösteren ana üreticiler, üretim süreçlerini hızlandırmayı, maliyetleri düşürmeyi ve ürün kalitesini artırmayı hedeflemektedir. Bu gelişmelerin sağlanabilmesi için, belirlenen kalite anlayışının tedarikçi firmalara da aktarılması büyük önem taşımaktadır. Üretim süreçlerinde meydana gelen hataların hızla tespit edilerek çözülmesi ve gerekli iyileştirmelerin etkin bir şekilde uygulanabilmesi için tedarikçiler ile ana üreticiler arasında güçlü bir koordinasyon gerekmektedir. Bu tür kalite yönetimi uygulamalarını desteklemek amacıyla otomotiv sektöründe APQP (İleri Ürün Kalite Planlaması) ve IATF 16949 gibi belirli standartlar geliştirilmiştir (Johnson ve Khan, 2003; Corporation ve ark., 2008). ISO standartları birçok sektörde yeterli görülse de, otomotiv endüstrisinde bu standartlar yetersiz kabul edilmektedir. Bu nedenle Ford, GM ve Chrysler, ISO kalite standartlarının eksikliklerini gidermek amacıyla 1988 yılında harekete geçerek QS-9000 adlı bir el kitabını ABD'de yayınlamıştır. Bunu takiben, Alman Verband der Automobilindustrie (VDA) VDA standardını, İtalyan Associazione Nazionale Fra Industrie Automobilistiche (ANFIA) AVSQ'yu ve Fransız PSA Peugeot-Citroen ile Renault grubu ise EAQF el kitaplarını oluşturmuştur. Büyük otomotiv üreticilerinin her birinin farklı kalite standartları belirlemesi, sektörde uyumsuzluklara yol açmıştır. Bu durumu önlemek amacıyla 1999 yılında ISO/TS 16949 standardı geliştirilmiş ve zamanla güncellenerek günümüzde IATF 16949:2016 adıyla uygulanmaktadır (Hoyle, 2005). IATF 16949:2016 standardı, otomotiv parça tedarikçilerinin kalite süreçlerini iyileştirmelerine ve müşteri beklentilerini

karşılımlarına yardımcı olmak için çeşitli yöntem ve araçların kullanımını teşvik etmektedir. Bu yöntemler arasında 8D (Sekiz Disiplin Metodu), Ishikawa (Balık Kılıcı) Diyagramı, Altı Sigma (6σ), FMEA (Hata Türleri ve Etkileri Analizi), APQP (İleri Ürün Kalite Planlaması) ve PPAP (Üretim Parçası Onay Süreci) yer almaktadır. Bu araçların kullanımı sayesinde kalite yönetim süreçleri daha sistematik ve etkili bir şekilde yürütülmektedir (Johnson ve Khan, 2003; Trappey ve Hsiao, 2008). Otomotiv üretim süreçlerinde ortaya çıkan hata türleri ve bu hataların giderilmesi, doğrudan ürün güvenilirliğini ve müşteri memnuniyetini etkilemektedir. Bu bağlamda, Proses Hata Türleri ve Etkileri Analizi (PFMEA), üretim sürecinde meydana gelebilecek hata modlarını belirleyerek, bunları şiddet, olasılık ve tespit edilebilirlik kriterlerine göre değerlendiren önemli bir analiz yöntemidir (VDA, 2019) Otomotiv sektöründe kalite yönetimi standartlarını belirleyen IATF 16949, Hata Türleri ve Etkileri Analizi (FMEA) uygulamalarını kapsamlı şekilde ele almayı zorunlu kılmaktadır. Bu nedenle üretim aşamalarındaki olası hata kaynaklarının önceden belirlenmesi ve alınacak önleyici tedbirlerle bu hataların en aza indirilmesi gerekmektedir (Altinisik ve Hugul, 2020). FMEA, otomotiv sektöründe ilk kez 1977 yılında Ford Motor Company tarafından kullanılmıştır (Gilchrist, 1993). Bununla birlikte, bu yöntem yalnızca otomotiv endüstrisi ile sınırlı kalmamış, farklı sektörlerde de uygulanmıştır. Örneğin, gıda endüstrisinde HACCP (Tehlike Analizi ve Kritik Kontrol Noktaları) ile entegre edilerek süreç güvenilirliği artırılmıştır (Scipioni ve ark., 2002). Metal şekillendirme sektöründe üretim hatalarının azaltılması için kullanılmış (Pantazopoulos ve Tsinopoulos, 2005) tekstil endüstrisinde kalite kontrol süreçlerine entegre edilerek önemli iyileştirmeler sağlanmıştır (Pazireh, 2017). Ayrıca, Endonezya'da bir kontrplak fabrikasında, ürünlerdeki kusur nedenlerini belirlemek amacıyla FMEA analizi uygulanmıştır (Dyah Susanti, 2023). Geleneksel FMEA yöntemlerinde risk öncelik numarası (RPN), şiddet, oluşum ve tespit

edilebilirlik kriterlerinin çarpımıyla hesaplanmaktadır. Bu kriterlerin her biri 1 ile 10 arasında bir puan alır ve çarpımları sonucunda elde edilen RPN değeri, hataların öncelik sırasını belirlemek için kullanılır (AIAG, 2008). Ancak bu yöntem bazı sınırlamalara sahiptir. Aynı RPN değerine sahip farklı hata türleri, kritiklik açısından belirsizlik oluşturabilmektedir (Liu ve ark., 2019). Örneğin, şiddeti yüksek ancak oluşum ve tespit olasılığı düşük bir hata, şiddeti düşük ancak daha sık meydana gelen veya tespiti kolay olan bir hata ile aynı RPN değerine sahip olabilir. Bu durum, hata türleri arasında doğru bir önceliklendirme yapılmasını zorlaştırmaktadır. Bu sınırlamaların önüne geçmek için AIAG ve VDA (Alman Otomotiv Birliği), 2019 yılında AIAG & VDA FMEA standardını yayımlayarak, eylem önceliklendirmesi temelli yeni bir metodoloji

geliştirmiştir. Bu yaklaşımda riskler yalnızca RPN değeri üzerinden değil, özellikle şiddet faktörünü ön plana çıkaran bir matris yöntemiyle değerlendirilmektedir. Böylece, yüksek şiddet seviyesine sahip hatalar, oluşum ve tespit puanlarından bağımsız olarak daha öncelikli hale getirilmektedir (VDA, 2019; Kök ve Yıldız, 2023). Maisano ve arkadaşlarının (2020) araştırmalarında ortaya koyduğu gibi, bu yeni metodoloji, FMEA'nın daha etkin uygulanmasını sağlayarak kaynakların daha verimli kullanılmasına katkıda bulunmaktadır (Maisano ve ark., 2020). Otomotiv sektöründe birçok akademik çalışmada FMEA ve PFMEA metodu kullanılarak hata türleri ve etkileri analizi gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen bu çalışmaları ve özetleri Tablo 1.'de yer almaktadır.

Tablo 1. FMEA ile ilgili atıflar (Johnson ve Khan, 2003; Mikos ve ark., 2011; Shah ve ark., 2013; Lundgren ve ark., 2015; Pop ve Elod, 2015; Baghbani ve ark., 2019; Ouyang ve ark., 2022; Kök ve Yıldız, 2023; Yousaf ve ark., 2023; Alkaç, 2024; Kornek ve Bert, 2024)

Table 1. References related to FMEA (Johnson and Khan, 2003; Mikos et al., 2011; Shah et al., 2013; Lundgren et al., 2015; Pop and Elod, 2015; Baghbani et al., 2019; Ouyang et al., 2022; Kök and Yıldız, 2023; Yousaf et al., 2023; Alkaç, 2024; Kornek and Bert, 2024)

Yazar	Sektör	Yöntem	Amaç
Mikos ve ark. (2011)	Otomotiv	PFMEA	Üretim ve montaj süreçlerinde PFMEA aracılığıyla bilgi paylaşımını ve tekrar kullanımını kolaylaştırmak amacıyla, tanıma dayalı bir ontoloji kullanılarak bilgi çıkarımı ve geri kazanımı sağlayan bir sistem geliştirilmiştir.
Shah ve ark. (2013)	Otomotiv	PFMEA	Süreç odaklı bir risk değerlendirme metodolojisi geliştirilerek, PFMEA'daki kritik risklerin simülasyon teknikleriyle nicel analizler için süreç modeline entegre edilmesini ve alternatif süreç senaryolarının küresel bir risk göstergesi üzerinden değerlendirilmesini hedeflemiştir.
Pop ve Elod (2015)	Otomotiv	PFMEA	Otomotiv endüstrisinde büyük üreticilere doğrudan tedarikçi olmak isteyen bir kuruluşun, ISO/TS 16949 sertifikası alarak kalite yönetim sistemini iyileştirmeyi ve temel kalite araçlarını uygulamayı hedeflediğini vurgulamışlardır.
Lundgren ve ark. (2015)	Otomotiv	PFMEA	Model tabanlı bir yaklaşım kullanarak süreç planlaması ve kalite güvencesini entegre etmeyi, veri tutarsızlıklarını en aza indirerek mühendislerin günlük çalışmalarını desteklemeyi ve uzmanlar arasında daha verimli bir iş birliği sağlamayı hedeflemiştir.
Baghbani ve ark. (2019)	Otomotiv	PFMEA OEE	PFMEA ile Genel Ekipman Etkinliği (OEE) arasındaki ilişkiyi analiz ederek, öncelikli arızaların etkilerini azaltmaya yönelik önlemlerin etkinliğini OEE artışıyla değerlendirmeyi amaçlamışlardır.
Ouyang ve ark. (2022)	Otomotiv	FMEA	Geleneksel FMEA modelindeki eksiklikleri gidermek amacıyla, risk faktörlerinin ikili kombinasyonlarına dayalı yenilikçi bir sınıflandırma yöntemi önererek, bu yöntemin etkinliğini bir otomotiv üreticisinin buji montaj sürecine yönelik gerçek bir vaka çalışmasıyla göstermeyi amaçlamışlardır.
Yousaf ve ark. (2023)	Otomotiv	FMEA	Otomobillerin arka aks muhafazalarının tasarım ve üretim aşamalarında karşılaşılan kritik hata türlerini belirleyerek, FMEA yöntemiyle bu hataların risk seviyelerini azaltmayı ve süreç ile ürün kalitesini iyileştirmeyi amaçlamışlardır.
Kök ve Yıldız (2023)	Otomotiv	FMEA PFMEA	Otomotiv sektöründe sızdırmazlık elemanları üreten bir tedarikçi, kaplama sürecinde FMEA yöntemini kullanarak manuel işlemleri otomatik hale getirip riskleri minimize etmeyi ve FMEA değerlendirme yöntemlerine dair güncel bilgileri literatüre kazandırmayı hedeflemiştir.
Alkaç (2024)	Otomotiv	FMEA FFTA	Denizyolu taşımacılığında sivilaşma riski taşıyan yüklerin, özellikle nikel cevherinin, güvenliğini artırmak amacıyla, Bulanık Hata Ağacı Analizi (FFTA) ve Hata Türleri ve Etkileri Analizi (FMEA) yöntemleriyle sivilaşma kaynaklı riskleri değerlendirmeyi ve ilgili denizcilik standartlarına katkı sunmayı hedeflemiştir.

2. Bulgular ve Tartışma

Bu çalışmada, bir motor montaj fabrikasında subap sarmasına neden olan üretim hatalarını en aza indirmek amacıyla PFMEA yöntemi uygulanmıştır. PFMEA, montaj sürecinde meydana gelebilecek olası hataları sistematik olarak belirleyen, bu hataların nedenlerini analiz eden ve potansiyel etkilerini değerlendiren etkili bir yaklaşımdır. Bu yöntemin temel amacı, süreçteki riskleri önceliklendirerek iyileştirme çalışmalarına yön vermek ve gerekli aksiyonların alınmasını (Stamatis, 2003; Cândea ve ark., 2014). PFMEA, yedi aşamadan oluşan bir süreç izlemektedir. İlk olarak, planlama ve hazırlık aşamasında analiz edilecek süreçler belirlenir ve proje ekibinin görev dağılımı yapılır. Sonrasında, süreç ve hata analizleri gerçekleştirilerek hataların olasılığı ve şiddeti değerlendirilir. Son aşamada ise kritik hatalara yönelik düzeltici önlemler alınarak süreç iyileştirme çalışmaları uygulanır (Gueorguiev ve ark., 2020; Plinta ve ark., 2021). Bu yöntemin etkinliği, analiz edilecek verilerin doğru belirlenmesine bağlıdır. Bu doğrultuda, İstatistiksel Proses Kontrolü (SPC) yöntemi kullanılarak veri analiz edilirken, kök neden analizinin doğruluğunu artırmak için 4M (Malzeme, Yöntem, Makine ve İnsan) ve Ishikawa yöntemi uygulanmaktadır. Bu yaklaşımlar, sürecin daha güvenilir ve tutarlı hale gelmesini sağlamaktadır (Ishikawa, 1982; VDA, 2019; Mokhtarzadeh ve ark., 2024).

2.1. Proses hata türleri ve etkileri analizi (PFMEA)

2.1.1. Planlama ve hazırlık

Planlama ve hazırlık aşaması, analizin kapsamının netleştirilmesi ve sistematik bir yaklaşımın oluşturulması açısından büyük önem taşımaktadır (VDA, 2019). Bu aşamada, PFMEA çalışmasına dahil edilecek ürün ve süreçlerin belirlenmesi, analiz sürecinin amaçlarına uygun şekilde yapılandırılması gerekmektedir. Çalışma kapsamında, içten yanmalı motorların montajına ilişkin süreçler detaylı bir şekilde ele alınmış; alt bileşenler, montaj aşamaları ve test süreçleri gibi kritik

unsurlar belirlenerek analizde önceliklendirilmiştir.

Planlama aşamasında şu hedefler ön plana çıkmaktadır:

Proje tanımlama: Montaj hattında kalite ve güvenilirlik açısından kritik olan unsurlar ve motor üretim süreçleri belirlenmiştir. Bu aşama, özellikle motor montajındaki hassas süreçlerin ve olası hata kaynaklarının önceden tespit edilmesini sağlamıştır. Ayrıca, müşteri gereksinimleri ve yasal düzenlemeler göz önünde bulundurularak detaylı bir analiz gerçekleştirilmiştir.

Proje planı geliştirme: 5T Yöntemi (Niyet, Zamanlama, Ekip, Görev, Araçlar) esas alınarak proje planı oluşturulmuştur. Motor montaj fabrikasında, PFMEA analizinin tamamlanması gereken zaman dilimleri belirlenmiş ve montaj ile kalite kontrol süreçlerinde görev alacak çapraz fonksiyonlu ekipler atanmıştır.

Kapsam ve sınırların tanımlanması: PFMEA'nın kapsamı detaylı bir şekilde belirlenmiş ve böylece kaynakların en kritik süreçlere yönlendirilmesi sağlanmıştır. Bu doğrultuda, yüksek risk içeren bileşenler, özellikle emme ve egzoz subaplarını içeren ilindir kapakları gibi önemli parçalar, öncelikli analiz alanı olarak belirlenmiştir.

Planlamada odak alanları: Motor montaj fabrikasında, montaj sürecinde hata olasılığı yüksek olan adımlar ile kritik noktalar titizlikle değerlendirilmiştir. İnsan kaynaklı hatalar ve malzeme taşıma süreçleri detaylı bir şekilde analiz edilerek, PFMEA'nın uygulanmasıyla potansiyel hataların önlenmesi ve montaj hattının verimliliğinin artırılması amaçlanmıştır. Bu süreçte, önceki projelerden elde edilen tecrübelerden yararlanılarak kapsamlı bir PFMEA modeli oluşturulmuş ve süreç iyileştirme çalışmaları hızlandırılmıştır.

İstatistiksel proses kontrolünün (ipk) uygulanması: Planlama aşamasında İstatistiksel Proses Kontrolü'nün entegrasyonu kritik bir rol oynamaktadır (Zheng ve ark., 2025). İPK uygulamaları, olası hataların henüz üretim sürecindeyken belirlenmesine olanak tanıyarak, süreç içerisinde anında iyileştirme yapılmasını sağlamaktadır.

2.1.2. Yapısal analiz

Yapısal analiz, incelenecek süreçlerin ve bileşenlerin sistematik bir şekilde görselleştirilmesini içeren bir adımdır (VDA, 2019). Motor montaj fabrikasında, içten yanmalı motorların montaj süreçlerini etkili bir şekilde analiz edebilmek için proses akış diyagramı ve yapı ağacı oluşturulmuş, böylece tüm süreçler ve bileşenler ayrıntılı bir şekilde tanımlanmıştır. 6M (İnsan, Makine, Çevre, Malzeme, Yöntem, Ölçülebilirlik) faktörleri belirlenmiş ve Ishikawa diyagramı kullanılarak görselleştirilmiştir. Her montaj adımının sistem içindeki konumu ve genel işleyişi değerlendirilerek analiz kapsamı oluşturulmuştur.

Bu aşamanın temel amacı, analiz kapsamını netleştirerek her bileşenin üretim sürecine olası etkilerini belirlemek ve fonksiyon analizine sağlam bir temel oluşturmaktır. Sonuç olarak, montaj sürecindeki riskli noktaların tespit edilmesi açısından yapısal analiz, PFMEA sürecinde kritik bir aşama olarak öne çıkmaktadır.

2.1.3. Fonksiyon analizi

Fonksiyon analizi aşamasında, sürecin her adımı için işlevsel gereksinimler tanımlanmış ve bu gereksinimlerin karşılanıp karşılanmadığı değerlendirilmiştir. Motor montaj fabrikasında, özellikle silindir kapaklarının montaj süreci detaylı bir şekilde analiz edilmiştir. Her montaj adımının istenilen performans ve kalite şartlarını sağlayıp sağlamadığı incelenmiş, süreç detaylandırılarak tanımlanmıştır. Bu adım, kritik süreçlerin ve hata oluşabilecek noktaların belirlenmesi açısından önemli bir rol oynamaktadır. Çalışma kapsamında, motor montaj sürecinin alt bileşeni olan silindir kapağı montajına odaklanılmıştır.

Alt hazırlık (Proses 4.1 - 4.2 - 4.3 - 4.5): Ana montaj öncesinde, silindir kapağı alt hazırlık alanına taşınmıştır. Bu aşamada sırasıyla yatak pulları, supap keçeleri, supaplar, supap yağları ve üst yataklar kapağa monte edilmiştir. Küçük bileşenlerin montajı tamamlandıktan sonra, presleme işlemine hazır hale getirilmiştir.

Pres işlemi (Proses 4.6): Alt hazırlıkları tamamlanan silindir kapakları hidrolik pres altına alınmıştır. Yağlar pres yardımıyla sıkıştırılarak tırnak montajı gerçekleştirilmiş, ardından presleme tamamlanarak parçalar kontrol edilmiştir. Son aşamada, seri üretime hazır hale getirilmiş silindir kapakları set arabalarına yüklenmiştir.

Ana montaj (Proses 12): Set arabasından manipülatör yardımıyla alınan silindir kapakları, birleşim yüzeyleri gözle kontrol edilerek basınçlı hava ile temizlenmiş, gözle görülebilir tozlar bez yardımıyla giderilmiştir. Conta yerleştirildikten sonra, silindir kapağı motor bloğu üzerine monte edilmiş ve civatalar elektronik cihazlarla belirlenen tork değerlerinde sıkılmıştır. Parçaların montajı tamamlandıktan sonra supap ayarı yapılmış ve silindir kapağına ilişkin montaj süreci sonlandırılmıştır.

Her montaj adımının sonunda, olası etkiler dikkate alınarak risk değerlendirmesi yapılmış ve bu riskleri minimize etmek için önleyici aksiyonlar planlanmıştır. Kritik süreçler arasında, sistem üzerinde büyük etkiye sahip hata potansiyeli barındıran adımlar belirlenmiş ve bu adımlara yönelik derinlemesine analizler gerçekleştirilmiştir.

2.1.4. Hata analizi

Hata nedenleri sistematik bir şekilde belirlenmiş, her süreç adımında meydana gelebilecek hata türleri, bu hataların müşteri üzerindeki etkileri ve oluşumlarına yol açan kök sebepler detaylı olarak analiz edilmiştir. Silindir kapaklarının montaj sürecinde karşılaşılabilecek hatalar ayrıntılı şekilde ele alınmıştır.

Potansiyel hata türleri: Her süreç adımında oluşabilecek hata türleri belirlenerek sınıflandırılmıştır. Bu hatalar; sürecin işlevselliğini tamamen kaybetmesi, işlevin kısmen yerine getirilmesi ya da fonksiyonun bozulması gibi kategorilere ayrılmıştır. Örneğin, bir motor bileşeninin yanlış monte edilmesi veya montaj sırasında gerekli parçanın eksik takılması gibi durumlar bu aşamada değerlendirilmiştir.

Hata etkileri: Olası hata türlerinin üretim sürecine, sonraki aşamalara ve nihai ürünün

müşteri beklentilerine etkileri analiz edilmiştir. Örneğin, supap montajında meydana gelebilecek bir hatanın motor performansına ve verimliliğine olası etkileri incelenmiş, bu etkiler şiddet derecelerine göre sıralanarak değerlendirilmiştir.

Hata nedenleri: Hata türlerinin kök nedenlerini anlamak için detaylı analizler yapılmış, hatalar; insan, makine, malzeme, çevre ve yöntem gibi farklı faktörlere göre sınıflandırılmıştır. Kök nedenlerin belirlenmesinde 6M analiz yöntemi kullanılmıştır.

Sonuç olarak, bu aşamada hata türleri, bunların olası etkileri ve kök nedenleri tanımlanmıştır. Bu adım, montaj sürecinde karşılaşılabilecek hataların önceden tespit edilmesine ve bu hataların nasıl önlenebileceğine yönelik stratejilerin geliştirilmesine katkı sağlamaktadır.

2.1.5. Risk analizi

Risk analizi, hata türlerinin şiddet, olasılık ve saptanabilirlik açısından değerlendirilmesini kapsayan kritik bir aşamadır. Her bir hatanın potansiyel etkileri ve oluşma sıklığı analiz edilerek, riskler önceliklendirilmiştir. Motor montaj fabrikasında, silindir kapaklarının montajı sırasında meydana gelebilecek kritik hata türleri bu kriterlere göre incelenmiş ve süreç iyileştirmeleri için gerekli aksiyonlar belirlenmiştir.

Şiddet (Severity): Hata türü gerçekleştiğinde, sürece ve müşteriye olan etkileri değerlendirilmiştir. Şiddet derecesi, hatanın ciddiyetini belirleyen temel faktördür. Örneğin, motor montajında meydana gelen bir hata, motorun çalışmamasına veya performans kaybına yol açabileceği için yüksek şiddet derecesine sahip olarak sınıflandırılmıştır. Şiddet puanlaması, PFMEA el kitabındaki kriterler doğrultusunda yapılmıştır.

Olasılık (Occurrence): Hataya yol açan durumların üretim sürecinde ne sıklıkla meydana geldiği bu aşamada analiz edilmiştir. Olasılık değeri, hatanın tekrar etme ihtimalini gösterir. Örneğin, motor bileşenlerinin yanlış yerleştirilmesi gibi sıkça rastlanan hatalar daha yüksek bir olasılık puanı ile

değerlendirilmiştir. Olasılık puanlaması, PFMEA el kitabındaki standartlara göre belirlenmiştir.

Saptanabilirlik (Detection): Bir hata oluştuğunda, bu hatanın montaj sürecinde ne kadar erken tespit edilebileceği incelenmiştir. Tespit edilmesi zor olan hatalar, daha büyük risk oluşturduğundan daha yüksek bir risk derecesi ile değerlendirilmiştir. Saptanabilirlik puanı da PFMEA el kitabındaki kriterler baz alınarak belirlenmiştir.

Bu üç kriterin birleşimiyle, her hata türü için Aksiyon Önceliği (AP) hesaplanmıştır. Bu analiz, hangi hatalara öncelikli olarak müdahale edilmesi gerektiğini belirleyerek süreç iyileştirmeleri için kritik bir temel oluşturmuştur.

2.1.6. Optimizasyon

PFMEA'nın Optimizasyon aşaması, süreç risklerini azaltmaya yönelik aksiyonların belirlenmesi ve bu aksiyonların etkinliğinin değerlendirilmesini amaçlamaktadır. Bu aşamada, süreçte tespit edilen yüksek riskli hata türleri için önleyici ve düzeltici aksiyonlar kararlaştırılarak uygulanmıştır. Motor montaj fabrikasında, içten yanmalı motorların montaj sürecinde ortaya çıkabilecek hataları en aza indirmek için proses değişiklikleri yapılmış ve kontrol mekanizmaları geliştirilmiştir.

Aksiyonların belirlenmesi: PFMEA ekibi, süreçteki hataları azaltmak ve meydana gelme olasılıklarını düşürmek amacıyla çeşitli aksiyonlar belirlemiştir. Bu aksiyonlar; proses değişiklikleri, önleyici kontrollerin artırılması ve izlenebilirlik mekanizmalarının güçlendirilmesi şeklinde kategorize edilmiştir.

Sorumlulukların ve zaman çizelgesinin belirlenmesi: Uygulanacak aksiyonların sorumluları ve tamamlanma süreleri açık bir şekilde tanımlanmıştır. Aksiyonlar hayata geçirilirken, ilgili ekip üyeleri tarafından düzenli olarak takip edilerek süreçlerin sürekli iyileştirilmesi sağlanmıştır.

Aksiyonların izlenmesi ve değerlendirilmesi: Uygulanan aksiyonların etkinliği, süreç boyunca izlenmiş ve analiz edilmiştir. Yapılan iyileştirmelerin, belirlenen hataları önleyip önleyemediği değerlendirilmiş ve gerektiğinde ek önlemler alınmıştır. Sonuç

olarak, süreç iyileştirmelerinin üretim sürecine olumlu katkı sağladığı tespit edilmiş ve bu kontroller kalıcı uygulamalar haline getirilmiştir.

2.1.7. Sonuçların dokümantasyonu

PFMEA sürecinde elde edilen veriler ve gerçekleştirilen analizler ayrıntılı bir şekilde dokümente edilmiştir. AIAG & VDA PFMEA formu, 28 kolonlu yapısıyla bu dokümantasyonun temel aracını oluşturur (VDA, 2019). Sürecin her aşamasında, olası hata türleri, bu hataların şiddeti, olasılığı ve aksiyon öncelikleri belirlenerek forma kaydedilmiştir. Sonuçların dokümente edilmesi, süreç boyunca elde edilen verilerin izlenebilirliğini sağlamak ve gelecekte benzer çalışmalar için bir referans noktası oluşturmak amacıyla yapılmıştır. Bu kapsamda, form doldurma, aksiyonların izlenmesi ve raporlanması gibi faaliyetler düzenli olarak kayıt altına alınmıştır.

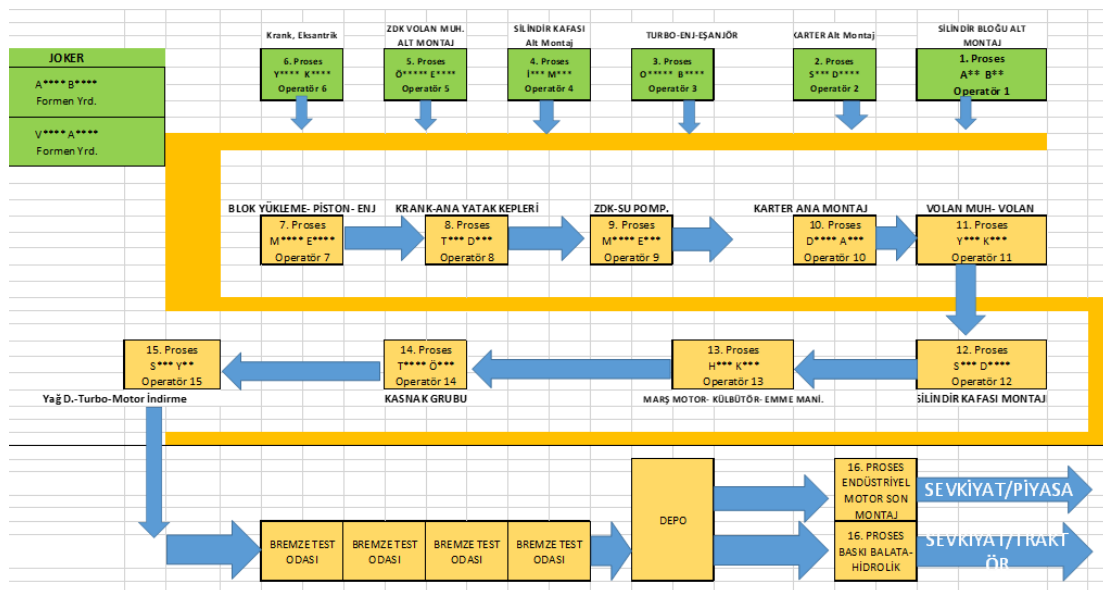
2.2. Uygulama bulguları

Motor montaj fabrikasında yürütülen hata analizi ve iyileştirme çalışmalarında PFMEA yöntemi tercih edilmiştir. Çalışmalar kapsamında, geçmişte farklı motor türlerinde meydana gelen ve şirkete en fazla zarar verme potansiyeline sahip hatalar üzerine odaklanılmıştır. Analiz sürecinin ilk

aşamasında, son dört yıl içerisinde motor dinamometre testlerinde en sık karşılaşılan 20 hata belirlenerek bir liste oluşturulmuştur. İkinci aşamada, satış sonrası hizmetlerde en yaygın görülen 20 hata incelenmiştir. Son olarak, müşteri fabrikası olan Traktör Montaj Fabrikası'na sevk öncesinde tespit edilen en sık rastlanan 20 hata sıralanmıştır.

Fabrika, müşteri fabrikası ve son kullanıcıdan elde edilen veriler doğrultusunda en kritik hata türleri tespit edilmiştir. Bu değerlendirme yalnızca hata sıklıklarına göre değil, aynı zamanda neden olabilecekleri hasarın ciddiyeti ve tekrarlanma olasılığı çerçevesinde gerçekleştirilmiştir. Ancak, şirketin gizlilik politikaları nedeniyle belirlenen hata türlerine ve karşılaşılan sıklıklarına dair ayrıntılar paylaşılmamaktadır. Yapılan analizler sonucunda, en kritik unsurun silindir kafası olduğu belirlenmiştir. Bu nedenle, silindir kafa alt montaj ve ana montaj süreçlerinde meydana gelebilecek yağ kaçağı arızalarına yönelik kapsamlı bir PFMEA çalışması yürütülmüştür.

Hata analizi, İstatistiksel Proses Kontrolü (İPK) aracılığıyla elde edilen veriler doğrultusunda gerçekleştirilmiş olup, ilgili süreçlerin analiz edilmesi amacıyla proses akış diyagramı ve yapı ağacı oluşturulmuştur. Şekil 1'de, süreç akış diyagramı görselleştirilmiştir.



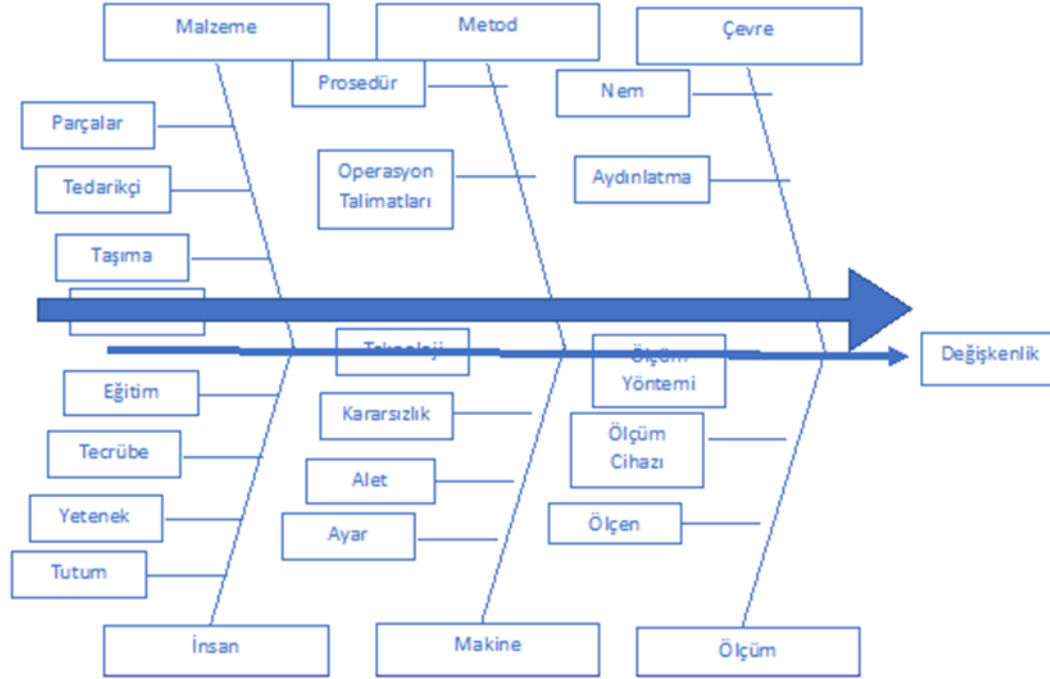
Şekil 1. Motor montaj fabrikası seri üretim hattı proses akış diyagramı
Figure 1. Engine assembly plant mass production line process flow diagram

Tablo 2. Silindir kafa montaj yapı ağacı**Table 2.** Cylinder head assembly structure tree

Proses No	Proses Adı
4. Proses	Silindir kafası alt montaj
4.1. Proses	Yatak pulu montajı
4.2. Proses	Subap keçesi montajı
4.3. Proses	Egzoz ve emme subap montajı
4.4. Proses	Silindir kafa çevirme operasyonu
4.5. Proses	Subap yayı ve üst yatak montajı
4.6. Proses	Yay presleme, tırnak montajı
12. Proses	Silindir kafası ana montaj
12.1. Proses	Silindir kafa oturma yüzeyi pim ve conta montajı
12.2. Proses	Silindir kafası montajı
12.3. Proses	Silindir kafası cıvata ve subap kepi montajı
12.4. Proses	İtici mil montajı
12.5. Proses	Silindir kafa cıvataları üç aşamalı torklama
12.6. Proses	Külbütör mekanikleri montajı

Yukarıda yer alan Tablo 2’de yapı ağacını gösterilmektedir. Silindir kapakları yağ kaçağına 4. Ve 12. Proseslerde meydana gelebilecek hataların sebep olabileceği

düşünüldüğü için bu prosesler özelinde 6M analizi gerçekleştirilmiştir. 6M elemanlarını içeren Ishikawa şablonunu Şekil 2’de gösterilmiştir.

**Şekil 2.** 6 M (Ishikawa) balık kılıçığı yöntemi figürü**Figure 2.** Figure 6 M (Ishikawa) fishbone method

Prosesle alakalı gerekli bilgiler toplandıktan ve bu bilgiler dokümanite edildikten sonra, yapısal analiz kısmına ait PFMEA tablosunun

ikinci adım kısmı doldurulmuştur. Tablo 3’te PFMEA formatında yapısal analiz kısmı yer almaktadır.

Tablo 3. PFMEA formatında yapısal analiz**Table 3.** Structural analysis in PFMEA format

Yapısal Analiz (İkinci Adım)		
1. Proses Parçası, Sistem, Alt Sistem, Parça, Bileşen ya da Proses Adı	2. Proses Adımı İstasyon No ve Odak Parça Adı	3. Proses İş Elemanları (6m)
Dört Silindirli İçten Yanmalı Dizel Motor 75-110bg Güçlerinde	4. İstasyon Silindir Kapağı Alt Montaj	Malzeme
		Metot
		Çevre
		Makine
		Ölçme
		İnsan

Üçüncü adım olan Fonksiyonel analiz kısmında Motor Montaj Hattını ‘Fabrika’ olarak, Traktör montaj hattını; ‘Müşteri Fabrikası’ olarak ve sevk edilen ve tarlada kullanılan traktörü de ‘Son Kullanıcı’ olarak tanımlanmıştır. İkinci adımdaki fonksiyon bu üç kavram için de tanımlanmıştır. Ardından

silindir kapağının montaj yapılış adımları tanımlanmıştır. Son olarak 6M elemanlarının fonksiyonları tanımlanarak bu adım sonuçlandırılmıştır. Aşağıda yer alan Tablo 4.’te PFMEA formatında fonksiyonel analiz kısmı yer almaktadır.

Tablo 4. Fonksiyonel analiz üçüncü adım**Table 4.** Functional analysis step three

Fonksiyonel Analiz (Üçüncü Adım)		
Birinci Proses Parçasının Fonksiyonu, Sistem, Alt Sistem, Parça , Bileşen yada Proses Fonksiyonu	İkinci Odak Parçanın Fonksiyonu ve Şartları	Üçüncü Sonraki Alt Seviye Fonksiyonu ve Şartları veya Karakteristiği
<p>Fabrika: Fabrika açısından, silindir kapaklarının motor bloğuna sorunsuz şekilde monte edilmesi ve motorun hedeflenen gücü üretirken herhangi bir performans ve emisyon sorunu yaşanmaması temel hedeftir</p> <p>Müşteri Fabrikası: Müşteri fabrikası için ise traktöre monte edilen motorun şanzımana sorunsuz bir şekilde güç aktarımı sağlaması beklenmektedir</p> <p>Son Kullanıcı : Son kullanıcı perspektifinden değerlendirildiğinde ise traktörün tarlada kullanımı sırasında arıza yaşanmaması kritik bir gerekliliktir.</p>	<p>Silindir kapaklarına supapların montaj süreci belirli adımları içermektedir. İlk olarak, paletler üzerinde gelen kapaklar montaj sehpasına yerleştirilir ve ardından pul ile supap keçeleri uygun aparat ve çekiç yardımıyla monte edilir. Sonrasında, emme ve egzoz supapları keçelere yerleştirilir ve özel bir aparat kullanılarak ters çevrilir. Montaj sürecinin devamında supap yayları ve şapkaları takılır, hidrolik pres yardımıyla yaylar sıkıştırılarak tırnaklar yerine monte edilir.</p>	<p>Parça : Fabrikaya ulaşan bileşenler, kalite kontrol sürecinden geçirildikten sonra montaj hatlarına yönlendirilerek montaj işlemi gerçekleştirilir.</p> <p>Talimat : Operatörler, kendilerine sağlanan çalışma talimatları doğrultusunda hareket ederek işlemleri standartlara uygun şekilde tamamlar.</p> <p>Ortam: Montaj sürecinin verimli ve güvenli şekilde yürütülebilmesi için uygun çalışma koşulları sağlanır.</p> <p>Hidrolik Pres: Yardımı ile yay ezme ve tırnak takma işlemi yapılır</p> <p>Keçe Çakma Aparatı: Keçeler, keçe çakma aparatı kullanılarak dik bir konumda yerleştirilir ve bakır çekiç yardımıyla sabitlenerek montaj işlemi tamamlanır.</p>

Dördüncü aşama olan hata analizi aşamasında, birinci sütunda odak parçanın fabrika, müşteri fabrikası ve son kullanıcı düzeyinde yol açabileceği hata etkileri (FE) değerlendirilmiş ve çalışmanın hangi aşamada gerçekleştirileceğine karar verilmiştir. Çalışmanın Motor Montaj Fabrikasında

yürütülmesi nedeniyle, bu süreçte fabrikanın karşılaşılabileceği olası sorunlar ele alınmış ve bu sorunlara yönelik önleyici tedbirler belirlenmiştir. Fabrikada meydana gelebilecek arızaların şiddet (S) derecesini belirlemek amacıyla PFMEA Şiddet Derecelendirme Tablosu incelenmiştir. Bu değerlendirme

kapsamında, "etkilenen üretimin %100'ünden az bir kısmının hurdaya ayrılması gerektiği ve hat hızının düşürülerek ek personel desteğiyle eksikliğin giderilmesi" kriterine uygun olarak, şiddet seviyesi orta-yüksek bir değer olan 7 olarak tanımlanmıştır. Üçüncü sütunda odak parçaya ait hata türü (FM) olarak "Motor

yağının, motor suyu ile karışması / Motorun yağ kaçırmaması" ifadesi kaydedilmiştir. Dördüncü sütunda ise 6M unsurlarının her birinin neden olabileceği hata nedenleri (FC) ayrıntılı olarak belirlenmiş ve değerlendirilmiştir. Tablo 5'te PFMEA formatında hata analizi bölümü yer almaktadır.

Tablo 5. Hata analizi dördüncü adım

Table 5. Error analysis fourth step

Hata Analizi (Dördüncü Adım)			
Birinci Bir Üst Seviye Eleman ve/veya Son Kullanıcı İçin Hata Etkileri (FE)	Şiddet (S) FE	İkinci Odak Parçanın Hata Türü (FM)	Üçüncü Sonraki Alt Seviye Elemanın veya Karakteristiğinin Hata Nedeni (FC)
<p>Fabrika: Operasyon Operasyon esnasında hata tespit edilmesi durumunda, silindir kapağı üretim hattından ayrılarak kalite kontrol birimine teslim edilir. Yapılan inceleme sonucunda, taşlama işlemi gerektiriyorsa Talaşlı İmalat birimine yönlendirilir. Revizyon işlemi tamamlanan kapak, üretim sürecine geri kazandırılır. Ancak, eğer revizyon mümkün değilse, ilgili parça hurdaya ayrılır.</p> <p>Test aşamasında hata belirlenirse, arızanın türüne göre farklı işlemler uygulanır. Eğer yalnızca yağ kaçağı tespit edilirse, kapak revize edilerek kullanıma uygun hale getirilir. Ancak, yağın motor soğutma suyu ile karışması durumunda, motorun su ile temas eden tüm bileşenleri sökülerek temizlenir ve ardından sıfırdan yeniden monte edilir.</p> <p>Müşteri Fabrikası: Traktör, motor kaynaklı bir arıza nedeniyle işlevini yerine getiremez. Bu durumda, motor ve traktör birbirinden ayrılır, motor fabrikaya sevk edilerek gerekli revizyon işlemleri gerçekleştirilir.</p> <p>Son Kullanıcı: Tarlada meydana gelen bir arıza nedeniyle traktörünü kullanamaz. Bu durumda, çiftçi servisi arar ve traktör çekici yardımıyla servise götürülür. Gerekli incelemelerin ardından fabrika tarafından geri çağırılabilir.</p>	7	Silindir kapaklarına subapların, montajlanması	Parça Kaynaklı (Emme ve Egzoz Subabı) Oluşabilecek Hatalar: Takılan parçalardan birinde ölçüsel hata olabilir
			Parça Kaynaklı (Subap Yay Yatağı) Oluşabilecek Hatalar: Takılan parçalardan birinde ölçüsel bir hata olabilir
			Depolama Kaynaklı Oluşabilecek Hatalar: Parçaları muhafaza ederken doğru şekilde muhafaza edilmemiş olabilir
			Metod Kaynaklı Oluşabilecek Hatalar: Operatörün hatalı işlem yapması kaynaklı olabilir
			Ortam Kaynaklı Oluşabilecek Hatalar: Kirli veya tozlu bir ortamda parçaların üzerlerini mikropartiküller yapışarak subap yolluklarını tıkkayabilir
			Pres Kaynaklı Oluşabilecek Hatalar: Subap yayları preslenirken eğişik basması kaynaklı tırnakların veya presin subaplara zarar vermesi
			Aparat Kaynaklı Oluşabilecek Hatalar: Pulların üzerine keçe çakma sırasında aparatın talaş parçası fırlayıp subap sardırabilir
Operatör Kaynaklı Oluşabilecek Hatalar: Operatör beceri eksikliği nedeni ile hatalı operasyon gerçekleştirebilir			

Beşinci aşama olan risk analizi aşamasında, mevcut önleme kontrolleri (PC) birinci sütuna kaydedilmiştir. Ardından, üçüncü sütuna hata türü ve nedenleri için mevcut saptama kontrolleri eklenmiştir. İlk olarak, önleme kontrolleri PFMEA Olasılık Tablosu kullanılarak puanlandırılmıştır. Daha sonra, saptama kontrolleri PFMEA Saptama Tablosu

doğrultusunda değerlendirilmiş ve puanlanmıştır. Son aşamada, şiddet, olasılık ve saptama puanları PFMEA Aksiyon Önceliği Belirleme (AP) Tablosu çerçevesinde analiz edilmiş ve buna göre Orta, Yüksek veya Düşük öncelik puanları atanarak nihai değerlendirme tamamlanmıştır.

Tablo 6. Risk analizi beşinci adım**Table 6.** Risk analysis fifth step

Risk Analizi (Beşinci Adım)				
Mevcut önleme kontrolleri (PC)	Olasılık (O)	Mevcut saptama Kontrolleri (DC)	Saptama (D) FC/FM	Aksiyon önceliği (AP)
Çıkış kalite kontrolü yapılmaktadır.	2	Fabrikaya sevk edilmeden önce kalite kontrol personelleri tarafından kontrol edilmektedir.	6	O
Parçalar fabrikaya gelirken streçlenmiş şekilde gelmektedir.	6	Operasyon sırasında montaj operatörü kapağı çevirerek kapak yüzeyini kontrol etmektedir.	6	Y
Montaj Operasyon sayfası adı altında operatöre talimatlar verilmektedir.	3	Otokontrol kartları ile operatörler yaptıkları işleri kayıt altına almaktadır.	1	D
-	10	Kapak Ana Montajı yapan operatör göz ile kontrol yapıyor ve montaj öncesi hava tutmaktadır.	6	Y
-	10	Operatör montaj sırasında gözle kontrol etmektedir.	6	Y
Yeni işe başlayan bir operatör, ilk beş iş günü boyunca bir usta ile birlikte çalışarak operasyonu çift kişi yürütür. Usta, süreç boyunca operatöre tüm teknik detayları öğretmekle sorumludur.	1	Operatörler, işe başlamalarından itibaren belirli periyotlarla performans değerlendirmesine tabi tutulur. İki aylık ve altı aylık süreçlerde yöneticiler tarafından yapılan değerlendirmeler, operatörün gelişimini takip etmeye ve motivasyonunu yüksek tutmaya yönelik bir sistem olarak uygulanmaktadır.	1	D

Optimizasyon adımında, Orta ve Yüksek Aksiyon Önceliği (AP) değerine sahip hatalara yönelik önleyici ve saptayıcı faaliyetler geliştirilmiştir. Bu faaliyetlerin uygulanmasından sorumlu kişiler ve tamamlanma süreleri bildirilmiştir. Sürecin ilerleyişi düzenli olarak izlenmiş ve her tamamlanan faaliyet için kanıt niteliğinde görseller eklenmiştir. FMEA çalışmaları

sonucunda, Şiddet, Olasılık ve Saptama puanları yeniden değerlendirilerek güncellenmiş, bu doğrultuda aksiyon öncelikleri tekrar sıralanmıştır. Bazı durumlarda mevcut aksiyonların yetersiz olduğu tespit edilmiş ve bu eksiklikleri gidermek amacıyla ilave tasarım değişiklikleri talep edilerek süreç iyileştirme çalışmaları sürdürülmüştür.

Tablo 7. Optimizasyon altıncı adım**Table 7.** Optimization step six

Optimization (Altıncı adım)									
FMEA Önleyici faaliyetler	FMEA Saptayıcı faaliyetler	Sorumlu kişiler	Termin	Durum	Tamamlama tarihi	Şiddet (S)	Olasılık (O)	Septama (D)	Aksiyon önceliği (AP)
Tedarikçiden mevcut kontrol seviyesinin artırılması ve sevkiyat sırasında oluşabilecek hataların önüne geçebilmek amacıyla daha iyi bir paketleme yöntemi uygulanması talep edilmiştir. Bu kapsamda, tedarikçi ziyareti gerçekleştirilmiş ve süreç yerinde incelenmiştir.	Tedarikçi parçalara %100 kontrol uygulamaktadır hatalı parçalar robotik sistem sayesinde fark edilerek ayrılmakta ve sevk öncesi saptanmaktadır	K*** K*** (Kalite Kontrol Amiri)	Haz.24	Ok	Haz.24	7	4	1	D
Tedarikçinin, parçaları talaşlı işlem sonrası paslanmayı önlemek amacıyla koruyucu yağ ile kaplandıktan sonra poşetlediği tespit edilmiştir. Ancak, işleme doğruluğu sağlansa dahi bu yağlı kalıntılar, subapların sıkışmasına neden olabilmektedir. Bu sorunu önlemek adına, yay tutucu pulların fabrikada yıkandıktan sonra seri üretim sürecine dahil edilmesi planlanmıştır.	Saptayıcı ek bir önleme ihtiyacı duyulmamıştır	K*** K*** (Kalite Kontrol Amiri)	Haz.24	Ok	Haz.24	7	1	4	D
Fabrikaya gelecek parçaların, belirlenen günlük üretim adetlerine uygun şekilde paketlenmesi sağlanmış ve bu parçalar, doğrudan operatörlerin kullanımına sunulacak şekilde düzenlenmiştir.	Saptayıcı ek bir önleme ihtiyacı duyulmamıştır	O*** Y*** A*** (Lojistik Müdürü)	Oca.26	Beklemede	Oca.26	7	1	8	D
Kritik parçaların montaj öncesinde yıkanmasına karar verilmiştir. Ayrıca, alt montaj ve montaj süreçleri arasında kirlenme veya hasar görme riski bulunan parçalar için ek önlemler alınmış, fabrikadaki belirli noktalara kuşların konumlanmasını önlemek amacıyla kuş kovucu çitler monte edilmiştir.	Saptayıcı ek bir önleme ihtiyacı duyulmamıştır		Oca.24	Ok	Oca.24	7	1	3	D
Hidrolik pres kaynaklı bir sorun olabileceği değerlendirilmiş ve uzun yıllardır kullanılan ekipman yenilenmiştir. Kullanım ömrünü tamamlamış olan eski aparat, öncelikle taşlanarak bir süre daha kullanılmış, ancak presleme cihazının yenilenmesiyle birlikte basma aparatı da değiştirilmiştir.	Saptayıcı ek bir önleme ihtiyacı duyulmamıştır		Ara.23	Ok	Ara.23	7	3	2	D
Yeni bir aksiyon gerekmiyor Risk kritik sınır altında	Yeni bir aksiyon gerekmiyor Risk kritik sınır altında		-	-	-	7	1	6	D

2.3. PFMEA aksiyonları ve kanıtları

Gerçekleştirilen analizler sonucu subap sarma probleminde sebebiyet verebilecek birçok hata nedeni bulunmuştur ve bu hata nedenlerini ve oluşturacağı etkileri azaltmak adına aksiyon alınmıştır. AP puanı O ve Y çıkan hatalara alınan aksiyonlar ve kanıtları bu bölümde bulunmaktadır.

2.3.1. Parça kaynaklı oluşan hata aksiyonları

Subap tutucu pullar, koruyucu yağ ve izole paketlemeye rağmen Şekil 3.'de görüldüğü gibi kirlenmektedir. Koruyucu yağın kaldırılması paslanmaya yol açabileceğinden alternatif bir çözüm gerekli görülmüştür. Pullardaki kir veya toz, subap sarma probleminde doğrudan neden olabilmektedir.



Şekil 3. Subap yayları kirliliği
Figure 3. Valve spring contamination

Bu sorunu önlemek için parçaların kutu halinde yıkanıp aynı gün içinde kullanılması kararlaştırılmıştır. Bu ek PFMEA önlemiyle O değeri 4'ten 1'e, AP değeri ise D seviyesine düşmüştür.

2.3.2. Depolama kaynaklı oluşan hata aksiyonları

Depolama kaynaklı hatalar, parçaların fabrikaya kabul edildikten sonra maruz

kalabileceği sorunları kapsar. Kapaktaki subap sarması incelenirken bazı parçaların toz ve dış etkenlere karşı korunmadan, çok adetli şekilde bekletildiği tespit edilmiştir. Özellikle subap keçelerinin Şekil 4'de görüldüğü gibi küçük kutularda uzun süre saklandığı ve operatör tarafından kontrol edilmediği belirlenmiştir.

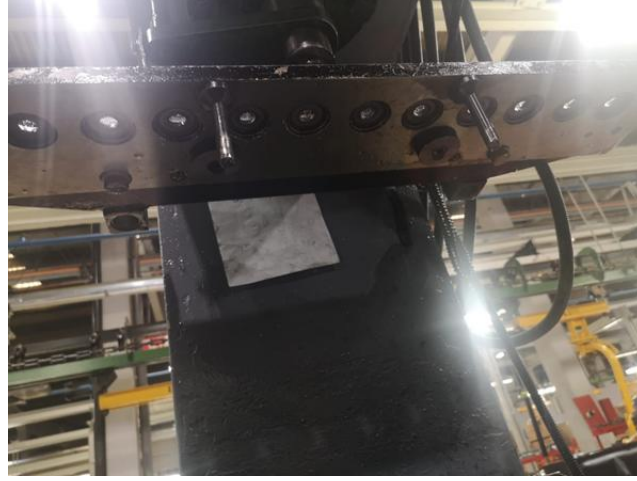


Şekil 5. Küçük parça süper marketi
Figure 5. Small parts supermarket

Düşük kontrol seviyesi nedeniyle Çizelge 3.4'e göre olasılık puanı 7, saptama puanı 8 olarak değerlendirilmiş ve aksiyon önceliği 'Y' olarak belirlenerek risk analizi tamamlanmıştır. Riskin 'Y' olması nedeniyle parçaların tedarikçi tarafından 1000 adetlik poşet veya kutularda paketlenerek sevk edilmesine karar verilmiştir. Bu önlem sonrasında önleyici puan 7'den 1'e düşürülmüş, AP puanı 'D' seviyesine gerilemiş ve PFMEA aksiyonu tamamlanmıştır.

2.3.3. Aparat kaynaklı oluşan hata aksiyonları

Çalışma ve test aşamalarında sıkışma ve sarma sorunları oluşabilmektedir. Silindir kapak alt montajında uzun yıllardır aynı aparat ve hidrolik pres kullanılmaktadır. Bu ekipmanların ömrünü tamamlamış olabileceği düşünülmektedir. Aparat kaynaklı hataları önlemek için merkezleme pimleri kullanılarak montaj yapılmaktadır. Ancak pres kaynaklı hataların önlenmesi neredeyse imkansızdır, bu nedenle önleyici aksiyon alınamamıştır. Buna karşın, hataların saptanması daha kolaydır. Ana montaj sırasında soğuk subap ayarı ile dönme kontrolü, dinamometre testlerinde ise sıcak subap ayarı yapılarak olası sorunlar tespit edilmektedir. Mevcut yay basma presini şekil 7 ve şekil 8 de görülmektedir.



Şekil 7. Silindir kapak subap pres işleminde kullanılan eski pres aparatının aşınmış görüntüsü
Figure 7. Worn image of the old press apparatus used in cylinder head valve pressing process



Şekil 8. Silindir kapak subap presi (eski)
Figure 8. Cylinder head valve press (old)

Hidrolik pres için önleme kontrolü bulunmadığından olasılığa '10' puan, aparat kaynaklı önleme kontrolü için merkezleme pimleri nedeniyle '4' puan verilmiştir. Saptayıcı faaliyet yeterli görüldüğünden saptama puanı '2' olarak belirlenmiş, aksiyon

önceliği 'O' olarak değerlendirilmiştir. Bu nedenle PFMEA kapsamında yeni önleyici ve saptayıcı faaliyetler tanımlanmıştır. Şekil 9'da görüldüğü gibi hidrolik pres ve yay tırnak montaj aparatı revize edilmiştir.



Şekil 9. Silindir kapak subap presi (yeni)
Figure 9. Cylinder head valve press (new)

Bu çalışmalar sonucunda hata oluşma ihtimali sıfıra indirgenmiştir. Yapılan iyileştirmeler ürün geliştirme departmanına aktarılmış ve kalıcı çözüm talep edilmiştir. PFMEA öncesinde '10' ve '4' olan önleyici puanlar '1' seviyesine düşürülmüştür. Bu nedenle ek saptayıcı aksiyon alınmamış, 'O' ve 'Y' olan aksiyon önceliği AP değeri 'D' olarak güncellenmiş ve proses kontrol altına alınmıştır.

3. Sonuçlar

Bu çalışmada 2022-2024 yılları arasında seri üretim montaj süreçlerini yürüten bir Türk otomotiv firmasındaki içten yanmalı motorlara ait hata analizleri gerçekleştirilmiş ve bu hatalara yönelik iyileştirme çalışmaları uygulanmıştır. Çalışma, Avrupa'nın önde gelen otomotiv üreticileri tarafından kabul gören IATF 16949 kalite standardı kapsamında yürütülmüş olup, montaj süreçlerinde en kapsamlı hata analizi yöntemlerinden biri olan PFMEA (metodu kullanılarak özellikle Silindir Kafalarında meydana gelen Subap Sarma arızalarına odaklanılmıştır. Gerçekleştirilen analizler sonucunda, yüksek öncelikli problemlere yönelik aksiyonlar

belirlenmiş ve uygulanan çözümlerin etkinliği gözlemlenerek çalışma tamamlanmıştır. Yapılan analizler, parça kaynaklı, depolama kaynaklı ve aparat kaynaklı olmak üzere üç temel hata türünü ortaya koymuştur. Bu hataların yüksek AP (Aksiyon Önceliği) puanına sahip olmasının temel sebepleri, fabrikada yaratabilecekleri ciddi etkiler ve mevcut önleyici-saptayıcı kontrollerin yetersizliğidir. Parça kaynaklı hatalar, tedarikçi firma ve fabrikada ek kalite kontrol önlemleri alınarak kullanılarak minimize edilmiştir. Depolama kaynaklı hatalar, parçaların bilinci bir şekilde günlük üretim adetlerince paketlenmesi ve kullanım miktarlarının düzenlenmesi ile çözülmüştür. Aparat kaynaklı hatalar ise, kullanılan hidrolik pres aparatındaki mekanik iyileştirmeler ve montaj alanındaki düzenlemeler ile çözümlenmiştir. Bu aksiyonlar, Tablo 7.'de detaylandırılmış olup, yüksek ve orta öncelikli hatalar için etkili çözümler sağlanmıştır.

Yapılan çalışma, fabrikadaki birçok süreçte yeterli önleyici kontrollerin bulunmamasının hata riskini artırdığını göstermiştir. Bu doğrultuda, hataları en aza indirmek için FMEA kapsamında önleyici faaliyetler uygulanmıştır. Ancak, saptayıcı faaliyetlerin

yalnızca belirli durumlarda artırıldığı tespit edilmiştir. Bunun temel nedenleri; mevcut saptayıcı kontrollerin yeterli seviyede olması, yeni saptama yöntemlerinin yüksek maliyetli olması ve önleyici aksiyonların hata çözümünde daha kritik rol oynamasıdır. Sonuç olarak, uygulanan önleyici önlemler hataları büyük ölçüde azaltarak süreç kalitesini yükseltmiş ve montaj hatalarını minimum seviyeye indirmiştir.

Yazarların Katkı Beyanı

Yazarlar makaleye eşit katkıda bulduklarını, makalenin yayına hazır son halini gördüklerini/okuduklarını ve onayladıklarını beyan ederler.

Çıkar Çatışması Beyanı

Tüm yazarlar, bu çalışma için herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Finansman

Bu çalışma, Bolu Abant İzzet Baysal Üniversitesi Rektörlüğü Bilimsel Araştırmalar Projeleri (BAP) Koordinatörlüğü tarafından "2016.10.07.1091" ve Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) tarafından "120O576" nolu proje ile desteklenmiştir.

Açıklama

Bu, çalışma ilk yazarın yüksek lisans tezinden üretilmiştir.

Kaynaklar

AIAG, 2008. Potential Failure Mode and Effects Analysis (FMEA) Reference Manual (4. ed). Chrysler LLC, Ford Motor Company, General Motors Corporation.

Alkaç, M., 2024. Deniz taşımacılığında nikel madeni yükünün sıvılaştırmadan kaynaklanan deniz kazalarının bulanık hata ağacı analizi (FFTA) ve hata türleri ve etkileri analizi (FMEA) yöntemleri ile incelenmesi. Yüksel Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.

Altınışık, A., Hugul, O., 2020. The seven-step failure diagnosis in automotive industry. *Engineering Failure Analysis*, 116: 104702.

Baghbani, M., Iranzadeh, S., Bagherzadeh Khajeh, M., 2019. Investigating the relationship between RPN parameters in fuzzy PFMEA and OEE in a sugar factory. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 60: 221-232.

Bowles, J.B., Pelaez, C.E., 1995. Fuzzy logic prioritization of failures in a system failure mode, effects and criticality analysis. *Reliability Engineering and System Safety*, 50(2): 203-213.

Cândeă, G., Kifor, S., Constantinescu, C., 2014. Usage of case-based reasoning in FMEA-driven software. *Procedia CIRP*, 25: 93-99.

Corporation, C., Company, F.M., Corporation, G.M., 2008. Advanced Product Quality Planning (Apqp) And Control Plan, 2. Baskı, s. 111.

Dyah Susanti, H., 2023. Risk prevention of plywood product defects using Failure Mode Effect Analysis (FMEA) in the Indonesian plywood processing industry. *Wood Material Science & Engineering*, 18(6): 2049-2059.

Gilchrist, W., 1993. Modelling failure modes and effects analysis. *International Journal of Quality & Reliability Management*, 10(5).

Gueorguiev, T., Kokalarov, M., Sakakushev, B., 2020. Recent trends in FMEA methodology. *2020 7th International Conference on Energy Efficiency and Agricultural Engineering (EE&AE)*, Konferans Bildiri Kitabı, 12-14 Kasım, Ruse, Bulgaristan, s. 1-4.

Hoyle, D., 2005. Automotive Quality Systems Handbook (Second Edition ed.).

Ishikawa, K., 1982. Guide to Quality Control.

- Johnson, K.G., Khan, M.K., 2003. A study into the use of the process failure mode and effects analysis (PFMEA) in the automotive industry in the UK. *Journal of Materials Processing Technology*, 139(1): 348-356.
- Kök, N., Yıldız, M.S., 2023. New generation FMEA method in automotive industry: an application. *Journal of Turkish Operations Management*, 7(1): 1630-1643.
- Kornek, D., Bert, C., 2024. Process failure mode and effects analysis for external beam radiotherapy: Introducing a literature-based template and a novel action priority. *Zeitschrift für Medizinische Physik*, 34(3): 358-370.
- Liu, H.C., Chen, X.Q., Duan, C.Y., Wang, Y.M., 2019. Failure mode and effect analysis using multi-criteria decision making methods: A systematic literature review. *Computers & Industrial Engineering*, 135: 881-897.
- Lundgren, M., Hedlind, M., Kjellberg, T., 2015. Model-driven process planning and quality assurance. *Procedia CIRP*, 33: 209-214.
- Maisano, D.A., Franceschini, F., Antonelli, D., 2020. dP-FMEA: An innovative failure mode and effects analysis for distributed manufacturing processes. *Quality Engineering*, 32(3): 267-285.
- Mikos, W.L., Ferreira, J.C.E., Botura, P.E.A., Freitas, L.S., 2011. A system for distributed sharing and reuse of design and manufacturing knowledge in the PFMEA domain using a description logics-based ontology. *Journal of Manufacturing Systems*, 30(3): 133-143.
- Mokhtarzadeh, M., Rodríguez-Echeverría, J., Zeren, Z., Van Noten, J., Gautama, S., 2024. Pure data-driven machine learning challenges for pFMEA: A case study. *IFAC-PapersOnLine*, 58(19): 658-663.
- Ouyang, L., Che, Y., Yan, L., Park, C., 2022. Multiple perspectives on analyzing risk factors in FMEA. *Computers in Industry*, 141: 103712.
- Pantazopoulos, G., Tsinopoulos, G., 2005. Process failure modes and effects analysis (PFMEA): A structured approach for quality improvement in the metal forming industry. *Journal of Failure Analysis and Prevention*, 5(2): 5-10.
- Pazireh, E., Sadeghi, A.H., Ahadi, H., 2017. Design and application of a quality control system using FMEA approach in textile production lines. *Journal of Textiles and Apparel*, 17: 89-94.
- Plinta, D., Golinska, E., Dulina, L., 2021. Practical application of the new approach to FMEA method according to AIAG and VDA reference manual. *Communications - Scientific Letters of the University of Zilina*, 23(4): B325-B335.
- Pop, L.D., Elod, N., 2015. Improving product quality by implementing ISO / TS 16949. *Procedia Technology*, 19: 1004-1011.
- Scipioni, A., Saccarola, G., Centazzo, A., Arena, F., 2002. FMEA methodology design, implementation and integration with HACCP system in a food company. *Food Control*, 13(8): 495-501.
- Shah, L.A., Etienne, A., Siadat, A., Vernadat, F.B., 2013. A process-oriented risk assessment methodology for manufacturing processes. *IFAC Proceedings Volumes*, 46(9): 216-221.
- Stamatis, D.H., 2003. Failure Mode and Effect Analysis. Quality Press.
- Trappey, A. J.C., Hsiao, D.W., 2008. Applying collaborative design and modularized assembly for automotive ODM supply chain integration. *Computers in Industry*, 59(2): 277-287.
- VDA, AIAG., 2019. AIAG & VDA FMEA Handbook-Automotive Industry Action Group, AIAG ve VDA, 237.
- Wang, L., Hodges., 2021. Automatic modeling and fault diagnosis of car production lines based on first-principle qualitative mechanics and semantic web technology. *Advanced Engineering Informatics*, 49: 101-248.

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.

Zheng, X., He, Y., Chen, Z., Li, J., Lu, J., Yu, S., 2025. Built-in reliability-oriented R-KQC intelligent identification based on SA-HHO and proactive reliability assurance strategy. *Computers & Industrial Engineering*, 200: 110817.

Atıf Şekli: Mendi, T.C., Aydođan, H., 2025. Motor Montaj Fabrikasında Subap Sarma Sorunu Üzerine Proses Hata Türleri ve Etkileri Analizi (PFMEA) ve İyileştirmeleri Çalışması. *MAS Uygulamalı Bilimler Dergisi*, 10(1): 161–178.

DOI: <http://dx.doi.org/10.5281/zenodo.15099329>.

To Cite: Mendi, T.C., Aydođan, H., 2025. Process Failure Modes and Effects Analysis (PFMEA) and Improvements on Valve Seizure Issue in Engine Assembly. *MAS Journal of Applied Sciences*, 10(1): 161–178.

DOI: <http://dx.doi.org/10.5281/zenodo.15099329>.
