



İş Makinası Parçalarında Üretim Hatalarının İstatistiksel Proses Kontrol Teknikleri ile Stratejik Kalite Yönetimi Açısından Analizi

Hacı SARI^{1*}

¹Pi Makina Otomotiv, Genel Müdür, GOP Mah.79/1. Sok. No:6 Gölbaşı Ankara, Turkey

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 08/01/2026
Düzeltilme: 02/02/2026
Kabul: 11/02/2026

Anahtar Kelimeler

İstatistiksel Proses
Kontrolü
İş Makinaları
Kalite Kontrol
Üretim Sistemleri

Article Info

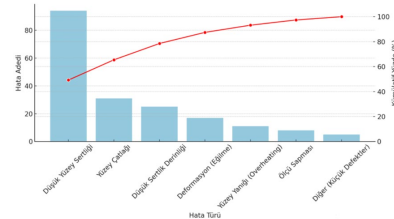
Research article
Received: 08/01/2026
Revision: 02/02/2026
Accepted: 11/02/2026

Keywords

Statistical Process Control
Construction Machinery
Quality Control
Production Systems

Grafik Özet (Graphical/Tabular Abstract)

Bu çalışmada, 4140 çeliği iş makinası millerinde yüksek frekanslı indüksiyon sertleştirme sonrası kalite hataları istatistiksel proses kontrol ile analiz edilmiş, 3.100 parçadan elde edilen verilere göre en kritik hata düşük yüzey sertliği ve belirli bir partide sürecin kontrol dışı olduğu belirlenmiştir. / This study analyzed quality defects in 4140 steel construction machinery shafts after high-frequency induction hardening. Based on data from 3,100 parts, low surface hardness was identified as the most critical defect, and one batch was out of control.



Şekil A: Yüksek Frekanslı İndüksiyon Sertleştirme Sonrası Ortaya Çıkan Hataların Pareto Analizi
/ **Figure A:** Pareto Analysis of Defects in High-Frequency Induction-Hardened Part

Önemli noktalar (Highlights)

- İndüksiyonla sertleştirilen 4140 çeliği iş makinası millerinde kalite hataları analiz edilmiştir. / Quality defects in induction-hardened 4140 steel construction machinery shafts were analyzed.
- Pareto analizi sonuçlarına göre hataların %78,53'ü üç ana hata türünden kaynaklanmaktadır. / According to the Pareto analysis results, 78.53% of the defects originate from three main defect types.
- Histogram ve dağılım diyagramı ile indüksiyon gücü ile sertlik arasındaki ilişki ortaya konmuştur. / The relationship between induction power and hardness was revealed using a histogram and a scatter diagram.
- Proses yeterlilik analizinde kontrol dışı partide Cp ve Cpk değerlerinin kabul edilebilir seviyenin altında olduğu görülmüştür. / In the process capability analysis, it was observed that the Cp and Cpk values in the out-of-control batch were below the acceptable level.

Amaç (Aim): Bu çalışma, yüksek frekanslı indüksiyonla sertleştirilen 4140 çeliği iş makinası millerindeki kalite hatalarını istatistiksel proses kontrol ile analiz ederek üretim performansını değerlendirmeyi amaçlamaktadır. / This study aims to analyze quality defects in high-frequency induction-hardened 4140 steel construction machinery shafts using statistical process control and evaluate production performance.

Özgünlük (Originality): Bu çalışma, indüksiyonla sertleştirilen iş makinası parçalarındaki kalite hatalarını, istatistiksel proses kontrol araçlarıyla (Pareto, p Kontrol, Balık Kılçığı, Histogram, Dağılım ve Proses Yeterlilik Analizi) değerlendirir. / This study evaluates quality defects in induction-hardened construction machinery parts using statistical process control tools (Pareto, p Control, Fishbone, Histogram, Scatter, and Process Capability Analysis).

Bulgular (Results): Analizlere göre, düşük yüzey sertliği en yaygın hatadır; p kontrol diyagramında beşinci örneklem üst kontrol limitini aşmıştır. Histogram ve dağılım diyagramı, indüksiyon gücündeki düşüşün sertliği etkilediğini göstermiştir. / Low surface hardness was the most common defect; the fifth sample in the p control chart exceeded the upper control limit. Histogram and scatter plots indicated that reduced induction power affected hardness.

Sonuç (Conclusion): Sonuçlar, indüksiyon sertleştirmedeki kalite hatalarının istatistiksel proses kontrol ile analiz edilebileceğini ve indüksiyon gücü, proses parametreleri ve operatör eğitimleriyle süreç performansının artırılabilirliğini göstermektedir. / Results indicate that quality defects in induction hardening can be analyzed via statistical process control, and process performance can be improved by stabilizing induction power, controlling parameters, and operator training.



İş Makinası Parçalarında Üretim Hatalarının İstatistiksel Proses Kontrol Teknikleri ile Stratejik Kalite Yönetimi Açısından Analizi

Hacı SARI^{1*}

¹Pi Makina Otomotiv, Genel Müdür, GOP Mah.79/1. Sok. No:6 Gölbaşı Ankara, Turkey

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 08/01/2026
Düzeltilme: 02/02/2026
Kabul: 11/02/2026

Anahtar Kelimeler

İstatistiksel Proses
Kontrolü
İş Makinaları
Kalite Kontrol
Üretim Sistemleri

Öz

Yüksek üretim maliyetine sahip olmaları nedeniyle iş makinelerini oluşturan parçaların hatalı üretimi önleyici kalite kontrol maliyetinden daha yüksek olmaktadır. Hataları ürün üretilmeden önce önlemek, günümüz kalite anlayışının temelini oluşturmaktadır. Bu çalışmada, indüksiyon yöntemi ile sertleştirilen iş makinası parçalarında üretim sonrası karşılaşılan hatalar incelenmiş ve analiz edilmiştir. 4140 çeliğinden imal edilen parçalar, belirlenen teknik spesifikasyonlara uygun olarak ısıtılma tabi tutulmuş ve yüzey sertliği, sertlik derinliği gibi kriterler üzerinden kalite değerlendirmesi yapılmıştır. Sertleştirme sonrası gözlemlenen hatalar, kalite kontrol aşamasında toplanan veriler ışığında Pareto Analizi, p Kontrol Diyagramı, Balık Kılçığı Diyagramı, Histogram, Dağılım Diyagramı ve Proses Yeterlilik Analizi gibi istatistiksel proses kontrol yöntemleri kullanılarak değerlendirilmiştir. Analiz sürecinde, bir örneklem grubunda hata oranının kontrol limitlerinin üzerine çıkarak sürecin istatistiksel olarak kontrol dışına çıktığı belirlenmiştir; yapılan kök neden analizleri sonucunda operatör kaynaklı ayar hataları, ekipman parametre düzensizlikleri ve malzeme homojenliğindeki problemler başlıca etkenler olarak tespit edilmiştir. Proses yeterlilik analizinde ilgili dönemde spesifikasyon dışı üretim eğilimi gözlenmiş ve Proses Yeterlilik İndeksi (C_p) değerinin kabul edilebilir seviyenin altına düştüğü görülmüştür. Elde edilen bulgular, proses kaynaklı kalite düşüşlerinin anlaşılması, kritik hata türlerinin önceliklendirilmesi ve süreç iyileştirme faaliyetlerine veri sağlanması açısından önem arz etmektedir.

Analysis of Production Defects in Construction Machinery Parts Through Statistical Process Control Techniques in the Context of Strategic Quality Management

Article Info

Research article
Received: 08/01/2026
Revision: 02/02/2026
Accepted: 11/02/2026

Keywords

Statistical Process Control
Construction Machinery
Quality Control
Production Systems

Abstract

Due to the high production costs of construction equipment components, the cost of defective production exceeds the cost of preventive quality control. Preventing defects before production is the foundation of today's understanding of quality. In this study, defects encountered after the production of machine parts hardened by the high-frequency induction method were examined and analyzed. The components manufactured from 4140 steel were subjected to heat treatment in accordance with defined technical specifications, and quality assessments were carried out based on criteria such as surface hardness and case depth. The defects observed after hardening were evaluated using various statistical process control methods, including Pareto Analysis, p Control Charts, Fishbone (Ishikawa) Diagram, Histogram, Scatter Diagram, and Process Capability Analysis. During the analysis process, it was determined that the defect rate in one sample group exceeded the control limits, indicating that the process had statistically deviated from control. Root cause analyses revealed that operator-related adjustment errors, equipment parameter inconsistencies, and material homogeneity issues were the main contributing factors. Process capability analysis showed a tendency for out-of-specification production during the relevant period, and the Process Capability Index (C_p) value was found to be below acceptable levels. The findings obtained are significant in terms of understanding process-related quality losses, prioritizing critical defect types, and providing data for process improvement activities.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Sanayi, inşaat, madencilik ve altyapı alanlarında yaşanan hızlı gelişmeler, iş makinalarının üretimi ve

kullanımında belirgin bir artış sağlamıştır. Kazıcılar, ekskavatörler, vinçler ve greyderler gibi ağır hizmet makinelerinin, yüksek dayanım ve uzun ömür gerektiren uygulamalarda kritik rolleri vardır.

Türkiye'de iş makinası üretim sektörü, son yıllarda yerli üretim kapasitesinin artışı ve ihracat odaklı yaklaşımlar ile gelişme göstermektedir. Özellikle komponent ve yedek parça üretiminde faaliyet gösteren firmaların, uluslararası pazarlarda rekabet gücü kazandığı gözlemlenmektedir. İş makinası parçaları, yüksek darbe yükleri, sürtünme ve yorulma gibi zorlu koşullarda çalıştığı için, bu parçaların imalatında kullanılan malzeme ve mukavemet artırma yöntemleri büyük önem taşır. Orta karbonlu çelikler yüksek mukavemet ve tokluk sağlayarak bu alandaki gereksinimleri karşılamaktadır. İndüksiyon yöntemi ile sertleştirmede, yüzeyde sertlik ve derinlik sağlanırken çekirdek yapının tokluğu korunur, bu nedenle mil ve pim gibi parçaların yüzey özelliklerini iyileştirmek amacıyla yaygın şekilde tercih edilmektedir. İndüksiyonla sertleştirme, manyetik alan etkisiyle parça yüzeyinin kısa sürede hedef sıcaklığa çıkarılması ve ardından hızlı soğutma (genellikle su ya da polimer çözeltileriyle) uygulanması esasına dayanır. Bu yöntemde kullanılan frekans, uygulanan güç, ısıtma süresi, bobin tipi ve parça geometrisi gibi faktörler sertlik değeri ve dağılımı üzerinde doğrudan etkili olmaktadır. Yüksek frekanslı sistemlerde (100 kHz üzeri) daha düşük sertlik derinlikleri (yaklaşık 1–3 mm) elde edilirken; düşük frekanslı sistemlerde bu derinlik artabilir. İşlem parametrelerinde meydana gelen küçük sapmalar, yüzey çatlağı, düşük sertlik veya istenmeyen sertlik derinliği gibi kalite problemlerine neden olabilmektedir.

Üretim aşamalarında kalite hatalarının azaltılması ve süreçlerin güvenilirliğinin artırılması için yaygın biçimde kullanılan yöntemlerden biri İstatistiksel Proses Kontrol'dür. Bu yöntem, üretimin önceden tanımlanmış kalite standartlarına uygunluğunu sağlamak, standart dışı ürünlerin oluşumunu en aza indirmek ve sürekli iyileştirme süreçlerine katkıda bulunmak amacıyla uygulanır. İstatistiksel Proses Kontrol, yalnızca hatalı ürünleri tespit etmeye yönelik bir denetim sistemi olmayıp, asıl hedefi hatalı üretimin ortaya çıkmasını önlemektir. Kullanılan bu teknikler; hammadde, yöntem, süreç, makine, ürün ve insan kaynaklı değişkenleri izleyerek nicel ve nitel veriler aracılığıyla sonuçların değerlendirilmesine olanak tanır [1]. Ayrıca, İPK yöntemi üretim sürecinin istatistiksel olarak kontrol altında olduğu dönemleri ve özel sebeplerle oluşan sapmaları tespit ederek etkili bir analiz aracı işlevi görmektedir [2].

İPK'nin sistematik uygulanmasında önemli katkılar sağlayan Prof. Dr. Kaoru Ishikawa'ya göre, üretim sürecinin kontrol altında tutulabilmesi için yedi temel aracın etkin biçimde kullanılması

gerekmektedir. Yedi Kalite Aracı olarak da bilinen bu yöntemlerin, üretim süreçlerinde karşılaşılan problemlerin yaklaşık %95'ini çözebileceği öngörülmektedir [2]. Bu araçlar arasında Pareto Analizi, Kontrol Diyagramları, Balık Kılçığı Diyagramı, Histogram, Dağılım Diyagramı, Kontrol Listeleri ve Sebep-Sonuç Analizi yer almaktadır. Bu çalışmada, hataların önceliklendirilmesi, kök nedenlerin tespiti, hata dağılımının görselleştirilmesi ve sürecin yeterliliğinin belirlenmesi amacıyla bu araçlardan Pareto Analizi, Kontrol Diyagramları, Balık Kılçığı Diyagramı, Histogram, Dağılım Diyagramı ve Proses Yeterlilik Analizi birlikte uygulanmıştır.

Bu araştırma, Türkiye'de iş ve inşaat makineleri sektöründe uzun yıllardır faaliyet gösteren, entegre üretim tesislerine sahip bir sanayi kuruluşunda yürütülmüştür. Firma bünyesindeki yüksek frekanslı indüksiyon sertleştirme tezgahında, 2024 yılının Ağustos ayında işlem gören iş makinası millerine ait kalite kontrol verileri detaylı bir şekilde değerlendirilmiştir. Çalışma kapsamında toplam 3100 adet mil parçası ısıtma işlemine tabi tutulmuş ve bu parçalarda gözlemlenen kalite hataları sistematik olarak analiz edilmiştir. Uygulanan sertleştirme prosesi sonrası parçalar üzerinde gerçekleştirilen yüzey sertliği ve sertlik derinliği ölçümleri sonucunda ortaya çıkan hatalar kayıt altına alınmıştır. Elde edilen veriler, öncelikle hata türlerinin dağılımını ve önceliğini belirlemek amacıyla Pareto Analizi ile incelenmiştir. Süreç değişkenliğinin izlenmesi için p Kontrol Diyagramı, hata oranının kontrol limitlerini aştığı durumların tespiti için Histogram ve Dağılım Diyagramı, sapmaların temel nedenlerinin ortaya konması amacıyla Balık Kılçığı Diyagramı, ayrıca sürecin spesifikasyonlara uygunluk düzeyini değerlendirmek için Proses Yeterlilik Analizi (C_p ve C_{pk} değerleri) uygulanmıştır. Bu sayede üretim sürecinin istatistiksel kontrol durumu ve proses yeterliliği çok yönlü olarak değerlendirilmiş, kalite iyileştirme çalışmalarına veri sağlayacak kapsamlı sonuçlar elde edilmiştir.

1.1. Literatür Özeti (Literature Review)

İstatistiksel Proses Kontrolü (İPK), üretim süreçlerinde kalite dalgalanmalarını izlemek ve potansiyel sapmaları tespit ederek önlem almak amacıyla geliştirilen önemli bir kalite güvence aracıdır. Son yıllarda ulusal ve uluslararası çalışmalar, bu yöntemin üretim verimliliğini ve kalite standardizasyonunu artırmadaki rolünü ortaya koymuştur.

Bu kapsamda, [3] numaralı çalışmada kozmetik sektöründe faaliyet gösteren bir firmanın parfüm üretim hattında, İPK yöntemlerinin uygulama adımları incelemiştir. İlk olarak, üretim sürecinin daha iyi anlaşılması ve analizin kolaylaştırılması için sürecin akış şeması ile genel yerleşim planı çizilmiştir. Daha sonra, üretim hattındaki hata türlerini ve sıklığını belirlemek amacıyla çetele yöntemiyle veriler toplanmıştır. Hataların önem derecelerine göre önceliklendirilmesi amacıyla Pareto analizi gerçekleştirilmiştir. Başlıca hata sebeplerinin tespiti için balık kılçığı diyagramı oluşturulmuş, hata sayılarının dağılım yapısını anlamak üzere histogramdan faydalanılmıştır. Ayrıca en sık görülen hatalar arasındaki ilişkiyi belirlemek amacıyla serpilme (korelasyon) diyagramları çizilmiştir. Son aşamada, üretim hattının istatistiksel olarak kontrol altında olup olmadığını değerlendirmek için kusurlu ürün oranlarına ilişkin veriler kullanılarak p kontrol diyagramı hazırlanmıştır.

[4] numaralı çalışmada Sivas Dikimevi'nde üretim sürecinden elde edilen veriler üzerinde İPK yöntemleri uygulamıştır. Uygulanan analizler sonucunda üretim hatalarının kök sebepleri detaylı olarak araştırılarak, hataların mevcut spesifikasyonlarla uyumlu olup olmadığı değerlendirilmiştir. Bu çalışma, proses kontrol araçlarının etkin kullanımının üretim kalitesini artırmada kritik rol oynadığını göstermektedir.

[5] numaralı çalışmada Seyitömer Linyitleri İşletmesi (SLİ)nde üretilip Seyitömer Termik Santrali'nde kullanılan 1. ve 2. grup kömürlerin kalorifik değerlerinin istatistiksel olarak kontrol altında olup olmadığı, İstatistiksel Proses Kontrolünün temel araçlarından olan kontrol diyagramları ile değerlendirmiştir. Sürecin kontrol durumunun tespiti için X ve R kontrol diyagramları kullanılmış ve elde edilen sonuçlar varyans analizi (ANOVA) ile desteklenmiştir. Ayrıca üretim sürecinin belirlenen kalite spesifikasyonlarını karşılama yeteneğini ölçmek amacıyla Proses Yeterlilik Analizi uygulanmış ve bu analiz sırasında verilerin normal dağılıma uygun olduğu kanıtlanmıştır. Son aşamada ise spesifikasyon limitleri dışında kalan oranlar değerlendirilerek, kömür satış sözleşmelerindeki prim ve ceza uygulamaları ile harmanlama süreçleri dikkate alınarak işletmenin gelirleri üzerindeki etkiler incelenmiştir.

[6] numaralı yürütülen çalışmada, elektronik sektöründe faaliyet gösteren ve yangın ile gaz algılama sistemleri üretimi gerçekleştiren bir işletmede İstatistiksel Proses Kontrol yöntemlerinin

uygulanmasına yönelik bir araştırma gerçekleştirilmiştir. Çalışma kapsamında, üretim sürecinde ortaya çıkan arıza türlerinin, kaynaklarının ve sebeplerinin sistematik biçimde incelenmesi amacıyla düzenli veri toplama aracı olarak çetele tablosu kullanılmıştır. Kritik arıza sebeplerinin önceliklendirilmesi için Pareto analizi uygulanmış; arızaların oluşumunda etkili olan temel faktörlerin belirlenebilmesi için ise neden-sonuç diyagramından yararlanılmıştır. Ayrıca, üretim sürecinin istatistiksel açıdan kontrol altında bulunup bulunmadığının değerlendirilmesi amacıyla kalite kontrol biriminden elde edilen veriler doğrultusunda kontrol diyagramları oluşturulmuştur.

[7] numaralı çalışmada ise İstatistiksel Proses Kontrol tekniklerinin; toplam verimli bakım (TPM) ve otomatik proses kontrol sistemleriyle entegre bir şekilde kullanıldığında, üretim süreçlerinin teknik kontrolünde etkili ve uyumlu bir yapı oluşturduğunu vurgulamıştır.

Bir mikronize kalsit öğütme tesisinde faaliyet gösteren konvansiyonel bilyeli değirmen sürecinde İstatistiksel Proses Kontrol çalışmaları uygulanmıştır. Çalışma sonucunda elde edilen bulgular, incelenen mikronize kalsit değirmen ünitesinin renk parametreleri bakımından homojen ve istikrarlı bir üretim gerçekleştirdiğini ortaya koymuştur [8].

[9] numaralı gerçekleştirilen çalışmada, beyaz eşya sektöründe faaliyet gösteren bir firma incelenmiştir. Söz konusu firma, üretim sürecinde müşteri beklentilerini ve kalite gerekliliklerini ön planda tutmaktadır. Çalışma kapsamında, çamaşır makinesi üretimi yapılan fabrikada montaj hattında meydana gelen hata verileri analiz edilmiştir. Bu veriler, Pareto analizi ve kontrol grafikleri kullanılarak değerlendirilmiştir. Pareto analizi ile öncelikli olarak ele alınması gereken hata türleri belirlenmiş, kontrol grafiklerinin yardımıyla ise üretim sürecinin kontrol dışı olduğu noktalar tespit edilmiştir. Çalışmasında istatistiksel proses kontrol ile ilgili bilgileri inceleyerek tedarik süreci içindeki yerini deşinmiştir [10].

[11] numaralı çalışmada, idari hastane veri tabanlarında veri kalitesi sorunlarının kök nedenlerini tespit etmek amacıyla sistematik bir inceleme yapmışlardır. Bu inceleme kapsamında, potansiyel kök nedenler belirlenmiş ve ardından bu nedenler balık kılçığı diyagramı teknikleri kullanılarak personel, malzeme, yöntem, makine, görev ve yönetim gibi alt kategorilerde sınıflandırılmıştır. Sınıflandırma sonuçları, veri

kalitesi sorunlarının büyük çoğunluğunun personel ile ilgili olduğunu, ancak bu sorunların hastane belgelerinin kalitesi ve finansal teşvikler gibi diğer kategorilerde de önemli bir yer tuttuğunu ortaya koymuştur. Bu makale, tespit edilen kök nedenlerin bir kataloğunu sunarak veri kalitesini iyileştirme çabalarına katkı sağlamayı hedeflemektedir.

Yapay zekâ modelleri, özellikle ChatGPT gibi modellerin, istatistiksel proses kontrolü uygulamaları ile öğrenme ve araştırmalar üzerindeki etkilerinin nasıl devrim yaratabileceği konusunda bazı sorular gündeme gelmiştir [12]. Bu modellerin henüz gelişme aşamasında olduğu ve yanlış kullanımları veya yanlış anlaşılmalrı kolayca tetikleyebileceği ifade edilmiştir. Çalışmada, gelişmekte olan yapay zekâ modellerinin genel bir özeti sunulurken, özellikle ChatGPT'nin istatistiksel proses kontrolü uygulamaları bağlamında öğrenme ve araştırmalara dair temel kavramları açıklama ve kod sağlama yetenekleri incelenmiştir. Ayrıca, yapılandırılmış ipuçlarına verilen yanıtlar analiz edilerek, bu yanıtların avantajları ve sınırlamaları vurgulanmıştır.

Norplex/Oak Fabrikası'nda ürün kalitesi, müşteri memnuniyeti ve proses yeterliliğini artırmaya yönelik olarak istatistiksel analiz yöntemlerinden faydalanılmış ve bu doğrultuda kapsamlı bir sistem geliştirilmiştir [13]. Bu sistem; üretim sürecinin performansını izlemeye, müşteri beklentileriyle uyum düzeyini değerlendirmeye ve kalite parametrelerini sürekli iyileştirmeye olanak tanıyacak şekilde yapılandırılmıştır.

Uniroyal lastik fabrikasında yürüttüğü çalışmada, ince tabakalı bakırların geri kazanımı ve yeniden kullanımı amacıyla istatistiksel yöntemlerden yararlanarak yeni bir üretim süreci tasarlanmıştır [14]. Benzer şekilde, Austin motorlu araç fabrikasında gerçekleştirilen uygulamada, İstatistiksel Proses Kontrol teknikleri kullanılarak iki yıl içerisinde ıskarta oranında %56'lık kayda değer bir azalma sağlanmıştır [15].

Yukarıda özetlenen çalışmalar, İstatistiksel Proses Kontrol tekniklerinin farklı sektörlerde ve çeşitli üretim süreçlerinde kalite iyileştirme amacıyla etkin biçimde kullanılabildiğini ortaya koymaktadır. Bununla birlikte, literatürde yer alan çalışmaların büyük bir kısmı, İPK araçlarını genellikle tekil veya sınırlı kombinasyonlar hâlinde ele almakta ve proses kontrol durumunu çoğunlukla genel üretim süreci üzerinden değerlendirmektedir. Bu çalışma ise, yüksek frekanslı indüksiyon ile sertleştirilen 4140 çeliği iş makinası millerinde ortaya çıkan

kalite hatalarını, Pareto Analizi, p Kontrol Diyagramı, Balık Kılçığı Diyagramı, Histogram, Dağılım Diyagramı ve Proses Yeterlilik Analizi gibi İPK araçlarını entegre bir yaklaşımla kullanarak kapsamlı biçimde incelemektedir. Ayrıca, p kontrol diyagramı ile istatistiksel olarak kontrol dışı olduğu belirlenen örneklem grubuna odaklanılarak, özel nedenlere bağlı sapmaların süreç performansı ve proses yeterliliği üzerindeki etkisi detaylı olarak analiz edilmiştir. Bu yönüyle çalışma, kontrol dışı üretim partilerinin kalite performansının değerlendirilmesine ve iyileştirme stratejilerinin geliştirilmesine yönelik uygulamaya dönük özgün bir katkı sunmaktadır.

2. MATERYAL VE METOT (MATERIALS AND METHODS)

2.1. İstatistiksel Proses Kontrol (Statistical Process Control)

Bir ürünün hatalı işlenmesi durumunda, bu ürünün yeniden işlenmesi veya atılması, hatalı üretimi önlemek için yapılacak önleyici faaliyetlerin maliyetinden çok daha yüksek olacaktır. Bu nedenle, hataları ürün ortaya çıkmadan önce önlemek, günümüz kalite anlayışının temelini oluşturur. Bu yaklaşıma göre, ideal olan, süreç üzerinde önleyici tedbirler alarak hatalı ürünün üretimini engellemektir.

İstatistiksel Proses Kontrol teknikleri, malzemeler, yöntemler, süreçler, makineler, ürünler ve insan faktörlerindeki değişimleri kontrol altına alarak, nicel ve niteliksel özellikleri sayısal verilerle ölçmeyi amaçlar.

Bu tekniklerin kullanılmasının iki temel sebebi vardır. Birincisi prosesi sürekli denetim altında tutarak verimliliği artırmaktır. Böylece sürekli kontrol ile kayıplar önlenmiş olur. Üretim maliyetlerini düşürerek karlılığı artırmak ve rekabet ortamında rakiplere karşı avantajlı bir duruma geçilir. İkincisi ise kaliteyi geliştirmektir. Böylece, sürekli gelişme ile müşteri tatminsizliklerini önlemek, şirket imajını korumak ve yükseltmek, ürün maliyetlerini düşürerek rekabet ortamında ayakta kalabilmek mümkün olur.

Bu teknikler ile makina ve proses bazında elde edilecek çeşitli kazanımlar vardır. Bunlar [10]:

- Tezgah bazında uygulanan İstatistiksel Proses Kontrol ile hataların gecikmeye meydan vermeden düzeltilmesi,
- Numune alma sıklığının tayini. Gerekliğinde düşürülmesi veya artırılması,

- Tolerans sınırlarının irdelenerek gerekli düzeltmelerin yapılması,
- Sahalara daha sağlıklı ve daha hızlı bilgi akışının sağlanması,
- Karakteristik verilerde artan hata tiplerinin tespiti ve erken müdahalenin mümkün kılınması,
- Karakteristik verilerde kontrol limitlerinin giderek daraltılarak imalatın daha az fireyle çalışmasının sağlanması ve numune alma sayısının giderek düşürülmesi,

Prodüksiyon maliyetinin düşürülmesi ve

- Bütün prosesin optimize edilmesi.

2.1.1. Pareto analizi (Pareto analysis)

Pareto analizi, İtalyan ekonomist Vilfredo Pareto tarafından geliştirilen ve 80–20 kuralı olarak bilinen bir analiz yöntemidir. Bu prensibe göre, sonuçların %80'i, nedenlerin %20'sinden kaynaklanmaktadır. Analizinin problemleri ve nedenlerini önem sırasına göre derecelendirerek verimlilik analizlerinde önceliklendirme sağladığını belirtmektedir [16]. [17] numaralı çalışmada da bu yöntemin, sınırlı kaynakların en etkili şekilde kullanılması amacıyla en önemli birkaç konuya odaklanılmasını sağladığını ifade etmektedir.

Bununla birlikte, Pareto analizinin sınırlamaları da bulunmaktadır. Sistemde az sayıda olumsuzluk yaratan durumların etkilerinin çok büyük olduğu bazı durumlarda Pareto analizinin yanıltıcı olabileceğini vurgulamıştır [18]. Bu tür durumlarda, sadece hata sayıları değil, hataların etkileri de dikkate alınarak ağırlıklı bir Pareto analizi yapılması gerektiği önerilmektedir.

Pareto diyagramının oluşturulması şu kademelerden geçer [19]:

- Olayı etkileyen faktörler belirlenip, sıklık veya parasal değerleriyle ölçülerek yatay eksenle gösterilir,
- Olayla ilgili en güncel veriler toplanır,
- Veriler, değerlerine göre azalan şekilde sıralanır (Değerler birbirine yakınsa, verilere ağırlık noktaları atanabilir. Ancak bu noktaların atanmasında dikkatli olunmalıdır.),
- Pareto diyagramı, gerekirse dağılım ve kümülatif eğrileriyle birlikte çizilir.

Pareto Analizi, hata sebeplerini, önem derecesi daha az olan hata ile önem derecesi yüksek olanları hatayı birbirinden ayırmak için kullanılan bir tekniktir [20].

Pareto grafiğinin amacı, hata çeşitlerini tespit ederek hataların yoğunlaştığı nedenleri bulmak ve emeklerin en verimli sahalarda yoğunlaşmasını sağlamaktır [21]. Pareto grafiğinde hata türleri yatay eksen ve büyüktür küçüğe doğru sıralanmış şekilde aynı zamanda her hatanın toplam hata içindeki payını gösteren bir “Pareto Eğrisi” çizilir [21].

2.1.2. Kontrol diyagramları (Control diagrams)

İstatistiksel kalite kontrolü yöntemleri arasında yer alan kontrol diyagramları, istenilen özelliklere sahip ürün veya hizmetlerin üretilmesi amacıyla süreçlerin istatistiksel analiz ve kontrolünde kritik bir rol oynar. Bu diyagramların ilk uygulamaları 1924 yılında Walter A. Shewhart tarafından yapılmıştır. Bu nedenle, diyagramlar “Shewhart grafikleri” olarak da bilinir [10].

Kontrol diyagramları, geçmiş verilerden elde edilen bilgilere dayanarak belirlenen limitlere göre, kronolojik olarak süreç performansının karşılaştırılmasına olanak tanıyan grafiksel araçlardır.

Üretim tasarım aşamasında, kalite spesifikasyonları için belirli kurallara göre tolerans sınırları belirlenir. Bu sınırlar dahilinde, ağırlık, boyut, şekil, renk ve performans gibi spesifikasyonlarda meydana gelen değişimlerin normal olduğu kabul edilir. İdeal bir senaryoda, süreçteki bu değişimlerin belirlenen sınırlar içinde kalması beklenir, bu da sürecin kontrol altında olduğunu gösterir. Eğer değişimler bu sınırları aşarsa, süreci tekrar kontrol altına almak için düzeltici eylemler uygulanmalıdır. Bu düzeltici önlemlerin alınmasında en etkili araçlardan biri kontrol diyagramlarıdır.

Ancak, diyagramların yalnızca bir sorunun varlığını gösterdiğini ve sorunun olası nedenleri hakkında ipuçları verdiğini, doğrudan sorunun kaynağını göstermediğini unutmamak gerekir.

Kontrol diyagramlarının etkili bir şekilde kullanılabilmesi için, süreçten düzenli ve sistemli bir şekilde veri toplanması şarttır.

Kontrol diyagramlarının kullanımıyla elde edilebilecek faydalar ise genel olarak şu şekilde özetlenebilir [10]:

- Operatörün operasyonunu gözden geçirmesi sağlanır,
- Operasyonun, kalite ve maliyet açısından sabit ve hatası önceden tespit edilebilir olması sağlanır,
- Operasyonun performansı üzerinde açık dilin konuşulmasını sağlar,
- Özel ve genel nedenlerin birbirinden ayrılmasını sağlar,
- Proses önemli değişimler meydana getirmeyen tesadüfi faktörlerin etkisi altında olur,
- Prosesi etkileyen özel faktörler varsa zamanında farkına varılarak düzeltici önlem alınır. Iskarta veya hatalı parçalar azaltılır,
- Proses ile ilgili geçerli ve güvenilir tahminler yapılabilir,
- Hatalı parça çıkma olasılığı azaltılarak verim artışı sağlanır,
- Kalite güvenliğini sağlanmasına yardımcı olur.

2.1.2.1. Kontrol grafiği (Control chart)

Endüstride sıklıkla kullanılan niteliksel kontrol çizelgelerinden biri p çizelgesidir. Bu çizelge, incelenen bir grup ürün içerisindeki hatalı ürünlerin oranını ölçer. Örneklem büyüklüğü (n) sabit veya değişken olabilir. Eğer n sabitse, kontrol limitleri de sabit kalır.

Eğer örneklem büyüklüğü değişkenlik gösteriyorsa:

Kontrol limitleri her örneklem için ayrı ayrı hesaplanır.

Yakın gelecekteki ortalama alt örneklem grubu için bir tahmin yapılır ve bu tahmine göre kontrol limitleri belirlenir. Eğer elde edilen alt örneklem sayısı tahmini ortalama sayıdan belirgin şekilde farklıysa, o örneklem için kontrol limitlerinin yeniden hesaplanması gerekir.

Farklı alt örneklem grupları esas alınarak birden fazla kontrol limiti hesaplanabilir. Bu limitler, alt örneklem gruplarının tahmini minimum, ortalama ve maksimum değerlerine dayanarak hesaplanmalıdır.

p çizelgesi oluşturma adımları şunlardır:

1. Kontrol çizelgesine süreçle ilgili bilgiler eklenir.
2. En az 50 olması gereken örneklem büyüklüğü belirlenir.
3. Örneklem büyüklüğü (n) ve hatalı ürün sayısı (np) kaydedilir.
4. Her bir alt grup için p oranı ($p = np/n$) ile hesaplanır.
5. Kontrol limitleri Eşitlikler 1-3 ile hesaplanır:

$$\bar{p} = (np_1 + np_2 + \dots + np_n) / (n_1 + n_2 + \dots + n_n) \quad (1)$$

$$UCL = \bar{p} + 3\sqrt{\bar{p}(1 - \bar{p})/n} \quad (2)$$

$$LCL = \bar{p} - 3\sqrt{\bar{p}(1 - \bar{p})/n} \quad (3)$$

Bazı durumlarda alt kontrol limiti eksi çıkabilir. Bu durumda alt kontrol limiti sıfır alınır

6. Merkez çizgi ($\bar{p}$) ile kontrol limitleri (UCL, LCL) çizelgeye işlenir.
7. Hesaplanan p noktaları çizelgeye yerleştirilerek birleştirilir.

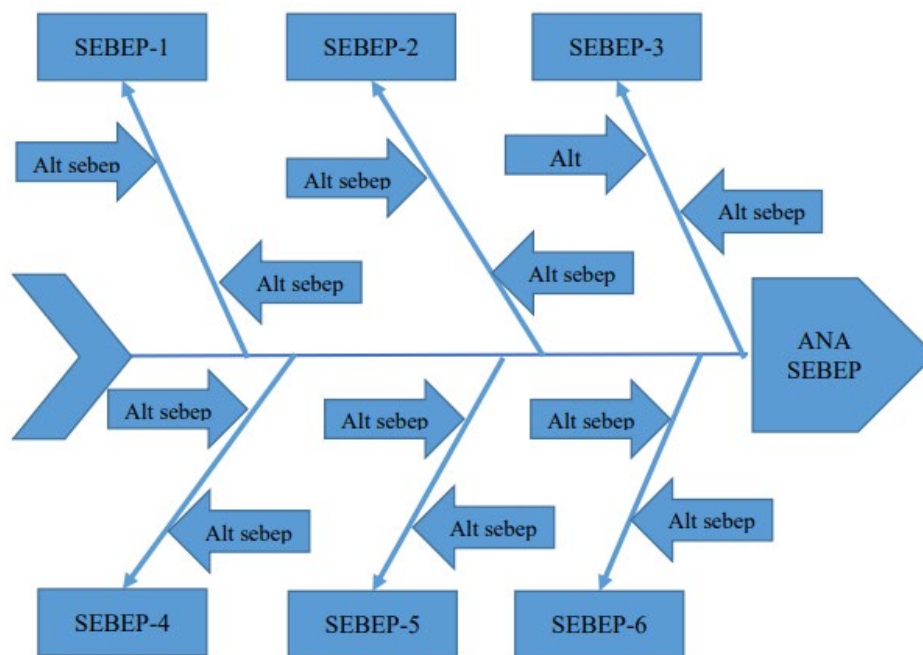
Çizelgedeki ilk kararlar için kontrol dışı durumlar incelenir. Kontrol dışı durumlar varsa, özel nedenler araştırılır. Bu nedenler bulunduğunda, kontrol dışı veriler çıkarılarak merkez çizgi ve limitler yeniden hesaplanır. Eğer süreçte özel bir neden yoksa mevcut koşullar üzerinden çizelgeye işaretleme devam eder [10].

2.1.3. Balık kılçığı (ishikawa) diyagramı (Fishbone/ishikawa diagram)

Balık kılçığı diyagramı, literatürde Ishikawa diyagramı olarak da bilinen ve bir problemin temel nedenleri ile alt nedenlerini sistematik olarak analiz etmeye yarayan görsel bir araçtır. Bu diyagram, özellikle kalite problemlerinin kök nedenlerini ortaya koymak ve çözüm geliştirmek amacıyla fikir üretme sürecini yapılandırmak için kullanılır. Diyagramın yapısı, problemin merkezde yer aldığı ve nedenlerin ana kategoriler hâlinde dallandığı bir balık iskeletini andırır; bu yönüyle sezgisel ve analitik bir problem çözme yöntemi olarak öne çıkar [22]. Ishikawa diyagramı, adını bu yöntemi geliştiren Japon kalite uzmanı Profesör Kaoru Ishikawa'dan almaktadır. Diyagramın karakteristik yapısı, problemin ana nedenlerini ve bunlara bağlı alt nedenleri sınıflandırarak görsel biçimde ortaya koyar. Sorun analizinde; grafik üzerinde belirlenen

her bir ana kategoriye, ilgili alt ve detaylı nedenler eklenerek sebep-sonuç ilişkisi katmanlı bir yapıyla açıklanır. Şekil 1’de, indüksiyonla sertleştirilen iş makinası parçalarında düşük yüzey sertliği hatasına neden olabilecek potansiyel faktörlerin dağılımı Balık Kılıcı diyagramı aracılığıyla gösterilmiştir. Diyagramın şeklinin balık iskeletine benzemesi nedeniyle literatürde yaygın olarak “balık kılıcı diyagramı” olarak da adlandırılmaktadır. Bu yapı, problem çözme sürecine sistematik bir yaklaşım getirerek, kök neden analizlerinin daha sağlıklı yürütülmesini sağlar [23].

İshikawa diyagramlarının sınıflandırılmasında en yaygın kullanılan modellerden bazıları 4M, 5M ve 6M yaklaşımlarıdır. Bu modeller, analiz edilen problemin ana nedenlerini sistematik biçimde gruplandırmaya yardımcı olur. İlgili sınıflandırmalar; Malzeme (Material), Yöntem (Method), İnsan (Man), Makine (Machine) ve isteğe bağlı olarak Çevre (Environment) gibi üretim sürecine doğrudan etki eden temel faktörlerden oluşur. Her bir “M” kategorisi, sürecin farklı bir boyutunu temsil eder ve bu yapı sayesinde problemin kök nedenleri bütüncül bir yaklaşımla değerlendirilerek analiz sürecine derinlik kazandırılır [24].



Şekil 1. Balık kılçığı diyagramı (Fishbone diagram)

2.1.4. Histogram (Histogram)

Histogramlar, frekans dağılımını ifade eden ve dikdörtgen çubuklardan oluşan grafik türleridir. Bu grafikler, veri setindeki değerlerin sınıf aralıklarına göre dağılımını görselleştirerek, kullanıcıya verilerin genel yapısı hakkında sezgisel bilgi sunar. Sınıf aralıklarının genişliği eşit olup, çubukların alanları verinin frekansına bağlı olarak değişir.

Verilerin dağılım özelliklerini sade ve anlaşılır bir biçimde sunmak amacıyla histogramlar sıklıkla tercih edilir. Özellikle sürekli nicel verilerde kullanılan bu grafikler; boyut, ağırlık, sıcaklık gibi ölçülebilir değişkenlerin zaman içerisindeki dağılımını ve olası

değişkenliklerini izlemek için etkilidir. Böylece, süreçlerdeki dalgalanmalar görünür hale gelir ve bu değişimlerin nedenleri üzerine analizler yapılarak iyileştirme stratejileri geliştirilebilir.

Kalite kontrol süreçlerinde histogramlar oldukça işlevsel bir araçtır. Ortalama, medyan, mod, sınıf genişliği, standart sapma gibi istatistiksel parametrelerle birlikte kullanılarak sürecin değişkenliği detaylı şekilde analiz edilebilir. Görsel ve sayısal açıdan bilgi sunması sayesinde süreçlerin performansı hakkında kapsamlı değerlendirmeler yapılmasına olanak sağlar [4].

2.1.5. Dağılım diyagramı (Scatter diagram)

Dağılım diyagramları, bir sürecin iki değişkeni arasındaki ilişkiyi değerlendirmek amacıyla kullanılan önemli istatistiksel araçlardandır. Bu diyagramlar, iki faktörün birbirini nasıl etkilediğini ya da etkileyip etkilemediğini görsel olarak ortaya koyma imkânı sağlar. Genellikle x-y düzleminde oluşturulan dağılım diyagramlarında, yatay eksen (x) neden olarak değerlendirilen değişken, dikey eksen (y) ise sonuç değişkeni yer alır. Bu yapı sayesinde, neden-sonuç ilişkisi ölçülebilir hale gelir ve sürece dair problem alanları daha net biçimde analiz edilebilir.

Etkin bir dağılım diyagramı oluşturulabilmesi için, sürece etki eden muhtemel nedenlerin belirlenmesi ve bu nedenlerin istenmeyen sonuçlarla olan ilişkilerinin analiz edilmesi gerekmektedir. Özellikle kalite kontrol süreçlerinde, belirli bir problemin kaynağını saptamak adına dağılım diyagramları, sebep-sonuç analizlerine destek olarak kullanılır. Bu bağlamda, ilişki düzeyinin sağlıklı bir şekilde tespit edilebilmesi adına ardışık değerlerin sistematik olarak kaydedilmesi ve karşılaştırılması önem arz etmektedir.

Dağılım diyagramlarının yorumlanmasına yönelik iki temel yaklaşım bulunmaktadır. Bunlardan ilki, diyagram üzerinde oluşan noktaların belirgin bir doğrultuda sıralanması durumunda iki değişken arasında pozitif ya da negatif yönlü bir ilişkinin var olduğu yönündedir. Diğer yaklaşım ise, noktaların rastlantısal şekilde dağılmış olması durumunda iki değişken arasında anlamlı bir ilişkinin bulunmadığını kabul eder.

Sonuç olarak, dağılım diyagramları özellikle üretim ve kalite kontrol alanlarında sürecin analiz edilmesi, sorunların kaynağının ortaya konulması ve iyileştirme fırsatlarının belirlenmesi açısından son derece işlevseldir. Görsel olarak güçlü bir anlatım sunması ve yeni bakış açıları geliştirmeye olanak tanınması nedeniyle, dağılım diyagramları literatürde sık başvurulan grafiksel analiz yöntemlerinden biri olmuştur [4].

2.1.6. Proses yeterlilik analizi (Process capability analysis)

Proses yeterlilik analizi, bir üretim sürecinin kalite standartlarına uygun ürün üretme yeteneğini değerlendirmeye yönelik temel yöntemlerden biridir. Literatürde, proses yeterliliği genellikle “bir prosesin sağlayabildiği en düşük kalite değişkenliği” olarak tanımlanır. Bu yeterlilik; insan, ekipman, malzeme, yöntem ve çevresel faktörlerdeki değişimlerden doğrudan

etkilenmektedir. Analizin güvenilir sonuçlar verebilmesi için, süreç verilerinin normal dağılım göstermesi ve sürecin istatistiksel kontrol altında bulunması gereklidir.

Proses yeterliliği analizine başlanmadan önce ilk olarak sürecin net bir biçimde tanımlanması gerekir. Bunu takiben, proses çıktılarının ölçülebilirliğini sağlayacak şekilde teknik spesifikasyonların belirlenmesi önem arz eder. Spesifikasyonlar, müşteri beklentilerini karşılayacak tolerans limitlerini içermelidir.

Proses yeterlilik analizi, müşteriler tarafından belirlenen ürün veya süreç şartnamelerinin, gerçek üretim performansı ile ne ölçüde örtüştüğünü nesnel biçimde değerlendirme imkânı sunar. Bu analizde temel istatistiksel problem, süreci kontrol altına alabilmektir. Bununla birlikte, ürünlerin tümü için gereken kalite kriterlerini karşılayacak şekilde sürecin optimize edilmesi de diğer önemli bir gerekliliktir [25].

Temel İndeksler:

- **Cp İndeksi:** Prosesin teorik potansiyel kabiliyetini temsil eder. Eşitlik 4'te gösterildiği üzere Spesifikasyon aralığının, proses varyasyonuna (6σ) oranı ile hesaplanır.

$$Cp = (USL - LSL)/6\sigma \quad (4)$$

- **Cpk İndeksi:** Cp indeksine ek olarak prosesin ortalamadan sapmasını (merkezlenmesini) dikkate alır. Eşitlik 5'te gösterildiği gibi prosesin her iki spesifikasyon sınırına olan uzaklıklarını değerlendirerek, en küçük değeri esas alır:

$$Cpk = \min[(USL - \mu)/3\sigma, (\mu - LSL)/3\sigma] \quad (5)$$

Cp veya Cpk 1,33'e eşit veya büyük ise yeterli proses kabiliyeti var demektir. Eğer Cp veya Cpk 1,33'ten küçük ise marjinal kabiliyet vardır ve iyileştirme önerilir. Son olarak Cp veya Cpk 1,00'den küçük ise potansiyel kabiliyet yoktur, müdahale gerekir.

Proses yeterlilik analizi, süreç kalitesinin nesnel olarak ölçülmesini sağlar, müşteri gereksinimlerinin karşılama düzeyini ifade eder ve iyileştirme stratejilerine bilimsel bir temel oluşturur.

2.2. Uygulama Adımları (Application Steps)

Bu çalışmada, indüksiyonla sertleştirme işlemine tabi tutulan iş makinası parçalarında ortaya çıkan kalite hataları, İstatistiksel Proses Kontrol teknikleri kullanılarak kapsamlı şekilde analiz edilmiştir. Uygulama süreci aşağıdaki adımlar çerçevesinde gerçekleştirilmiştir:

Adım 1: İncelenen parçaların üretim süreci gözlemlenmiş ve özellikle yüksek frekanslı indüksiyon ile yüzey sertleştirme işleminden sonra karşılaşılan hata türleri belirlenmiştir.

Adım 2: Sertleştirme işlemine tabi tutulan toplam 3100 adet parçaya ait üretim verileri toplanmış, tüm parçalar kalite kontrol sürecinden geçirilmiş ve gözlemlenen 191 adet hata türlerine göre sınıflandırılmıştır; indüksiyonla sertleştirilen iş makinası parçalarında tespit edilen hata türleri ve bu hataların görülme sıklıklarına ilişkin özet bilgiler Tablo 1’de sunulmuştur.

Adım 3: Hataların dağılımı Pareto Analizi ile değerlendirilmiş ve toplam hataların yaklaşık %78,53’ü belirli hata türlerinden kaynaklandığı belirlenmiş; bu analiz sonucunda önceliklendirilen kritik hata türleri ve bu hata türlerinin toplam hata oranı içerisindeki önem düzeyleri Şekil 2’de görsel olarak sunulmuştur.

Adım 4: Pareto analizinde öne çıkan düşük yüzey sertliği hatası için p kontrol diyagramı oluşturularak süreç kontrol sınırları değerlendirilmiş; bu değerlendirmede kullanılan örneklem büyüklükleri, hatalı parça sayıları ve hesaplanan kontrol limitlerine ilişkin sayısal veriler Tablo 2’de sunulmuştur. Buna bağlı olarak, Şekil 3’te, düşük yüzey sertliği hatalarına ait p kontrol diyagramı üzerinden örneklem gruplarına göre hesaplanan hata oranlarının kontrol limitleri ile karşılaştırılması görsel olarak gösterilmiş olup, analiz sonucunda beşinci örneklem grubunda hata oranının (%8,33), örneklem büyüklüğüne bağlı olarak hesaplanan üst kontrol limitlerini aşarak sürecin istatistiksel olarak kontrol dışına çıktığı tespit edilmiştir.

Adım 5: Kontrol dışına çıkan örneklem grubunda sapmanın nedenlerini belirlemek amacıyla kök neden analizi yapılmıştır. Balık Kılçığı Diyagramı kullanılarak makine, malzeme, insan, metot, ölçüm ve çevre faktörleri detaylı şekilde değerlendirilmiş ve muhtemel hata kaynakları belirlenmiştir.

Adım 6: Kontrol dışı örnekleme ait yüzey sertliği değerlerinin dağılımı incelenmiş ve değerlerin beklenen aralık olan 58–62 HRC yerine 48–52 HRC arasında yoğunlaştığı görülmüş; Şekil 4’te, kontrol dışı örneklem grubuna ait yüzey sertliği

ölçümlerinin dağılımı histogram diyagramı aracılığıyla görsel olarak sunulmuştur. Ayrıca uygulanan indüksiyon gücü ile yüzey sertliği arasındaki ilişki değerlendirilmiş ve güç düşüşüne bağlı sertlik azalması tespit edilmiş; Şekil 5’te, kontrol dışı örneklem grubunda uygulanan indüksiyon gücü ile elde edilen yüzey sertliği değerleri arasındaki ilişki dağılım diyagramı ile gösterilmiştir.

Adım 7: Bu adımda gerçekleştirilen proses yeterlilik analizi, p kontrol diyagramında istatistiksel kontrol dışı kalan 5. örneklem grubuna ait veriler kullanılarak yapılmış; analiz sonucunda prosesin spesifikasyonlara uygun üretim kabiliyetinin yetersiz olduğu, Cp değerinin 1’in altında kaldığı belirlenmiş ve özel nedenlere bağlı sapmanın proses yeterliliği üzerindeki etkisi doğrultusunda süreç parametrelerinin iyileştirilmesine yönelik öneriler geliştirilmiştir.

3. BULGULAR (RESULTS)

Bu bölümde, yüksek frekanslı indüksiyon yöntemiyle sertleştirilen 4140 çeliği iş makinası millerinde tespit edilen kalite hataları, İstatistiksel Proses Kontrol teknikleri kullanılarak analiz edilmiştir. Ankara’da faaliyet gösteren iş makinası üreten bir firmada, Ağustos 2024 döneminde üretilen toplam 3100 adet iş parçası incelenmiş ve 191 adet hata kaydedilmiştir.

Hataların dağılımı ve öncelik düzeyi Pareto Analizi ile değerlendirilmiş, en sık karşılaşılan hata türü olarak düşük yüzey sertliği belirlenmiştir. Süreç kontrol durumunu incelemek amacıyla oluşturulan p kontrol diyagramında, üretim partileri hata oranlarına göre ayrı ayrı analiz edilmiştir.

Analiz sonuçlarına göre, 5. örneklem grubunda (600 parçalık parti) hata oranı %8,33 olarak tespit edilmiştir. Bu oran, örneklem büyüklüğüne bağlı olarak hesaplanan üst kontrol limitlerini aşarak prosesin istatistiksel kontrol dışına çıktığını göstermektedir. Bu durum, süreçte rastlantısal değişkenliğin ötesinde özel bir nedene bağlı sapma olduğuna işaret etmektedir.

Bu durumun nedeninin detaylı incelenmesi için Balık Kılçığı Diyagramı, Histogram ve Dağılım Diyagramı oluşturulmuştur. Kontrol dışı örneklem grubuna ait yüzey sertliği ölçümlerinin histogram analizinde, sertlik değerlerinin hedeflenen 58-62 HRC aralığından kayarak 48-52 HRC aralığında yoğunlaştığı tespit edilmiştir. Ayrıca, uygulanan indüksiyon gücü ile yüzey sertliği arasındaki ilişkiyi gösteren dağılım diyagramında, güç seviyesindeki

düşüşün yüzey sertliğinde belirgin azalmaya yol açtığı belirlenmiştir.

Proses yeterlilik analizi sonucunda, kontrol dışı örneklem verileri dahil edildiğinde C_p değerinin 1'in altına düştüğü görülmüş, bu durum spesifikasyon dışı üretim eğilimini ortaya koymuştur.

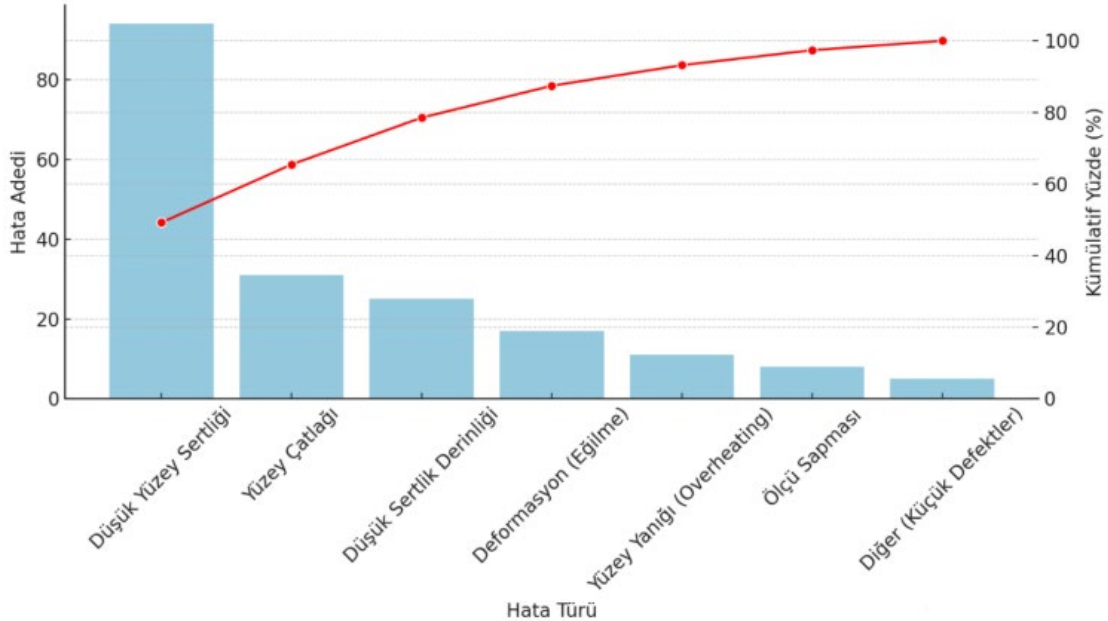
3.1. Veri Toplama Süreci (Data Collection Process)

Veriler, 2024 yılı Ağustos ayında üretilen iş makinası pimlerinin kalite kontrol sürecinde toplanmıştır. Üretim boyunca rastgele örneklem alınarak %100 görsel muayene, sertlik ölçümü ve manyetik parçacık testi uygulanmıştır. Toplam 3100 parçadan 191 hata tespit edilmiş, veriler haftalık periyotlara ayrılarak analiz edilmiştir.

3.2. Hata Türlerinin Dağılımı (Distribution of Error Types)

Tablo 1. İndüksiyonla sertleştirilen iş makinası parçalarında tespit edilen hata türleri ve görülme sıklıkları (Types of defects detected in induction-hardened construction machinery parts and their frequency of occurrence)

Hata No	Hata Türü	Hata Adedi	Yüzdelik (%)	Kümülatif Adet	Kümülatif Yüzde (%)
1	Düşük Yüzey Sertliği	94	49,21	94	49,21
2	Yüzey Çatlağı	31	16,23	125	65,44
3	Düşük Sertlik Derinliği	25	13,09	150	78,53
4	Deformasyon (Eğilme)	17	8,90	167	87,43
5	Yüzey Yanığı (Overheating)	11	5,76	178	93,19
6	Ölçü Sapması	8	4,19	186	97,38
7	Diğer (Küçük Defektler)	5	2,62	191	100,00



Şekil 2. Yüksek frekanslı indüksiyon sertleştirme sonrası ortaya çıkan hataların pareto analizi (Pareto analysis of defects in high-frequency induction-hardened parts)

3.3. Pareto Analizi Sonuçları (Pareto Analysis Results)

Pareto Analizi ile hataların önem sırası belirlenmiş ve en çok görülen hatalara öncelik verilmiştir. Güncel dağılıma göre, ilk üç hata türü (düşük yüzey sertliği, yüzey çatlağı ve düşük sertlik derinliği) toplam hataların %78,53'ünü oluşturmaktadır. Kritik hatalar ise aşağıda sıralanmıştır:

1. Düşük Yüzey Sertliği
2. Yüzey Çatlağı
3. Düşük Sertlik Derinliği
4. Deformasyon (Eğilme)

Bu sonuçlar, hata azaltma çalışmalarının özellikle bu dört hata türü üzerinde yoğunlaştırılması gerektiğini göstermektedir.

Pareto Analizi sonuçlarına dayanarak aşağıdaki önlemler alınması planlanmıştır;

- İndüksiyon sertleştirme parametrelerinin yeniden kalibre edilmesi ve kontrol sıklığının artırılması,
- Ön ısıtma sürecinin standardizasyonu ve proses stabilitesinin sağlanması,
- Soğutma (quenching) hızının hassas şekilde izlenmesi ve sapmaların anında müdahale edilmesi,
- Operatör eğitim programlarının güncellenmesi, süreç parametreleri ve kalite kontrol prosedürleri konusunda bilgi düzeyinin yükseltilmesi.

3.4. p Control Diyagramının Oluşturulması
(Creating the p Control Diagram)

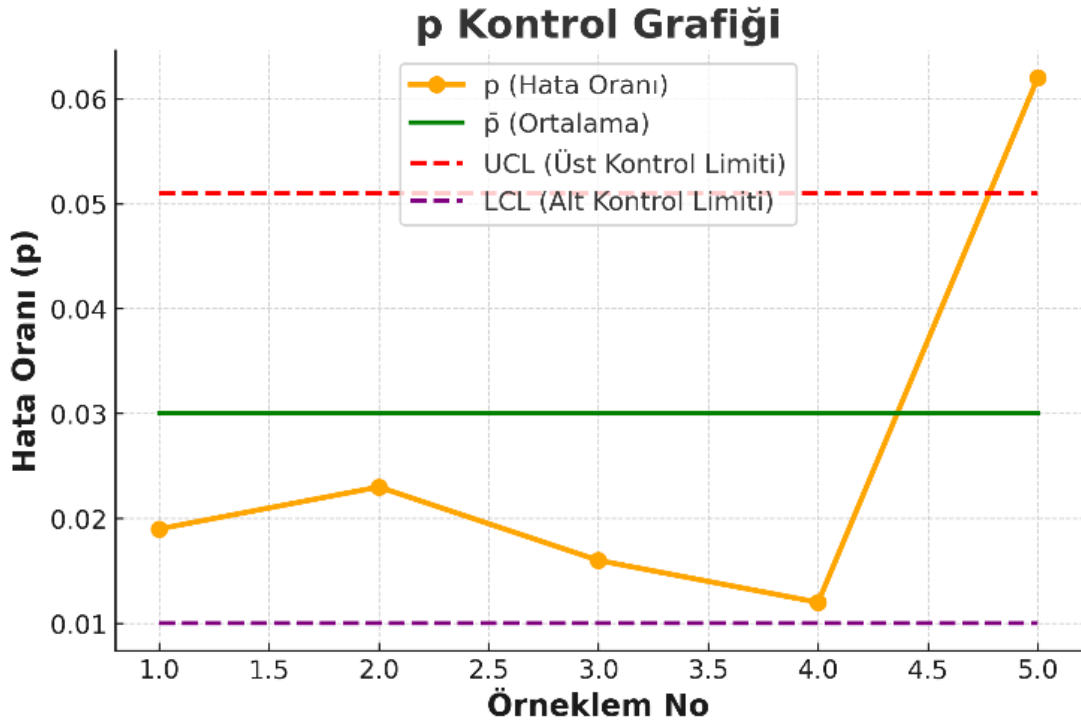
Yüzey sertliği değerleri üzerinden düşük sertlik hatalarını analiz etmek amacıyla p kontrol diyagramı oluşturulmuştur. Her biri farklı örneklem büyüklüğüne sahip beş üretim grubuna ait veriler kullanılmıştır. Toplamda 3100 adet parça incelenmiş ve bu parçaların 94'ünde yüzey sertliğinin istenilen aralığın (<58 HRC) altında kaldığı tespit edilmiştir. Ortalama hata oranı ($\bar{p}$) %3,03 olarak hesaplanmıştır.

Bu çalışmada p kontrol diyagramının oluşturulmasında kullanılan alt gruplar, Ağustos 2024 döneminde aynı üretim parametreleri altında ve aynı vardiya süresince (zaman temelli) üretilen ardışık parça grupları esas alınarak tanımlanmıştır. Her bir alt grup, ilgili üretim partisinin kalite performansını temsil edecek şekilde oluşturulmuş olup, alt grupların örneklem büyüklükleri üretim miktarına bağlı olarak değişkenlik göstermektedir. Çalışma kapsamında toplam beş alt grup kullanılmıştır. Alt grup sayısının sınırlı olması nedeniyle p kontrol diyagramı, sürecin uzun dönemli zaman içi davranışını analiz etmekten ziyade, istatistiksel olarak kontrol dışı özel neden içeren üretim partisinin tespitine odaklanacak şekilde kullanılmıştır. Kontrol limitleri, örneklem büyüklükleri dikkate alınarak hesaplanmış; alt kontrol limiti (LCL) değeri 0, üst kontrol limiti (UCL) ise %5,0–%5,1 olarak belirlenmiştir.

Tablo 2'de, düşük yüzey sertliği hatalarına ait p kontrol diyagramının oluşturulmasında kullanılan örneklem büyüklükleri, hatalı parça sayıları ve hesaplanan kontrol limitleri sunulmaktadır.

Tablo 2. Düşük yüzey sertliği hatalarının p kontrol diyagramı verileri (p-Control chart data for low surface hardness defects)

Örneklem No	Örneklem Büyüklüğü (ni)	Hatalı Sayısı (Di)	Hatalı Oranı (Pi)	$\bar{p}$	LCL	CL	UCL
1	620	12	0,0194	0,0303	0	0,0303	0,0502
2	640	15	0,0234	0,0303	0	0,0303	0,0497
3	630	10	0,0159	0,0303	0	0,0303	0,0499
4	610	7	0,0115	0,0303	0	0,0303	0,0504
5	600	50	0,0833	0,0303	0	0,0303	0,0506
Toplam	3100	94	0,0303	—	—	—	—



Şekil 3. p Kontrol diyagramı- düşük yüzey sertliği hataları (p-Control chart – low surface hardness defects)

Ağustos 2024 döneminde üretilen iş makinası pimlerinde gözlemlenen düşük yüzey sertliği hatalarının istatistiksel kontrol durumunu analiz etmek amacıyla oluşturulmuştur. Her bir örneklem grubuna ait hata oranı (p), sürecin ortalama hata oranı ($\bar{p}$), üst kontrol limiti (UCL) ve alt kontrol limiti (LCL) ile karşılaştırılarak değerlendirme yapılmıştır.

Grafikte, turuncu çizgi ile gösterilen hata oranlarının 1., 2., 3. ve 4. örneklerde kontrol sınırları ($UCL \approx 0,0506/LCL = 0$) içinde kaldığı, ancak 5. örnekte hata oranının üst kontrol limitini aşarak istatistiksel olarak kontrol dışına çıktığı görülmektedir. Ortalama hata oranı olan $\bar{p} = 0,0303$, yeşil çizgi ile gösterilmiş ve süreç içi varyasyonun referans değeri olarak kullanılmıştır.

Bu durum, sürecin genel olarak istatistiksel kontrol altında olduğunu ancak 5. örnekleme ait üretim partisinde özel nedenlere dayalı bir sapma meydana geldiğini göstermektedir. Bu sapmanın potansiyel nedenlerinin detaylı biçimde incelenmesi, özellikle indüksiyon sertleştirme parametreleri, operatör değişkenliği veya ekipman stabilitesi açısından ek analizlerin yapılması önerilmektedir.

Genel olarak değerlendirildiğinde, p kontrol grafiği düşük yüzey sertliği hatalarının çoğunlukla kabul edilebilir düzeyde gerçekleştiğini göstermekle birlikte, belirli örneklerde oluşabilecek kontrol

dışı varyasyonların süreç istikrarını olumsuz etkileyebileceğine işaret etmektedir. Bu nedenle, sürekli izleme ve kök neden analizi süreçlerinin sürdürülmesi önem arz etmektedir.

3.5. Kök Neden Analizi Bulguları (Root Cause Analysis Findings)

p kontrol diyagramında 5. örneklem grubunda tespit edilen kontrol dışı sapma üzerine, söz konusu varyasyonun kaynağını belirlemek amacıyla balık kılçığı diyagramı kullanılarak bir kök neden analizi gerçekleştirilmiştir. Bu analiz kapsamında; makine, malzeme, insan, metot, ölçüm ve çevre faktörleri detaylı biçimde incelenmiştir.

Bulgular:

- **Makine:** İndüksiyon bobininde aşırı ısınma ve güç dengesizliği gözlemlenmiştir. Bu durumun, parça yüzeyinde homojen olmayan sertleşmeye yol açtığı düşünülmektedir.
- **Malzeme:** Bazı pimlerde normalize işlemin eksik uygulanması sonucu sertleşme potansiyelinin düşük olduğu değerlendirilmiştir.
- **İnsan:** Operatörün proses süresini doğru uygulamadığı ve sertlik test prosedürlerinde

standart dışı yorumlamalar yaptığı belirlenmiştir.

- Metot: Ön ısıtma ve sertleştirme sürecinde parametre farklılıklarına neden olabilecek prosedür eksiklikleri tespit edilmiştir.
- Ölçüm: Sertlik test cihazının kalibrasyonunun zamanında yapılmadığı, bu nedenle ölçüm belirsizliğinin artmış olabileceği gözlemlenmiştir.
- Çevre: Soğutma sisteminde ani sıcaklık değişimleri ve ortam sıcaklığındaki dalgalanmaların süreci etkilediği değerlendirilmiştir.

Bu faktörlerin bir ya da birkaçının birlikte etkili olması sonucunda, kontrol dışına çıkan örneklerde hata oranının yükseldiği sonucuna varılmıştır.

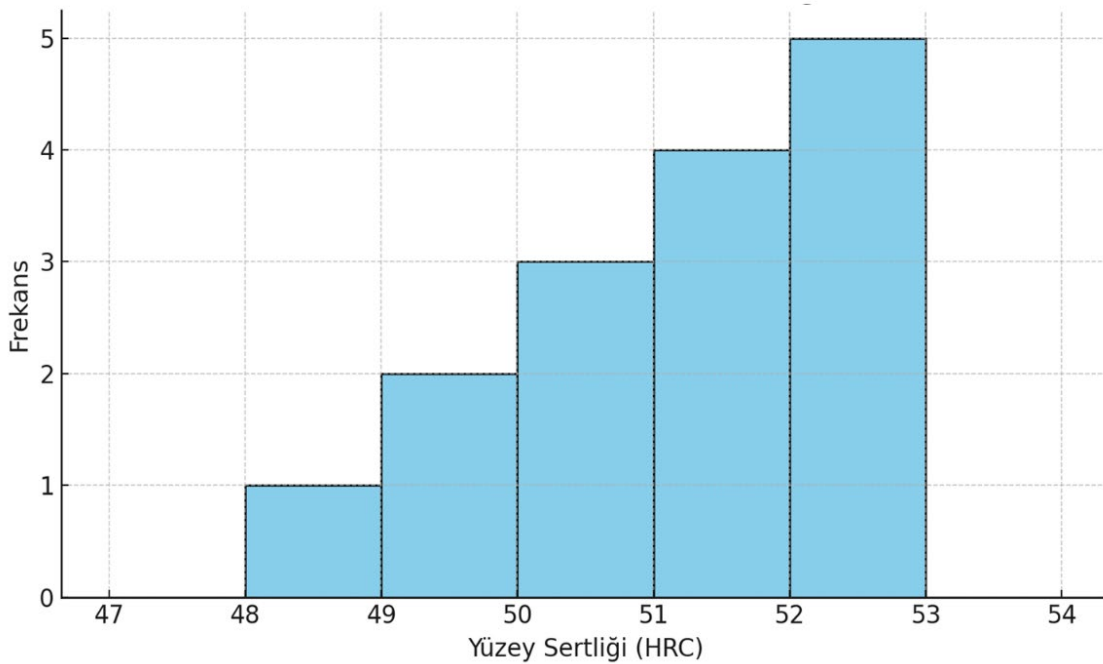
3.6. İyileştirme Önerileri (Improvement Suggestions)

Kontrol dışına çıkan örneklem grubuna ait yüzey sertliği verilerinin dağılımı ve indüksiyon gücü ile olan ilişkisi incelendikten sonra, sürecin kalite hedeflerinden sapmasına neden olan faktörlerin ortadan kaldırılması amacıyla aşağıdaki iyileştirme önerileri geliştirilmiştir:

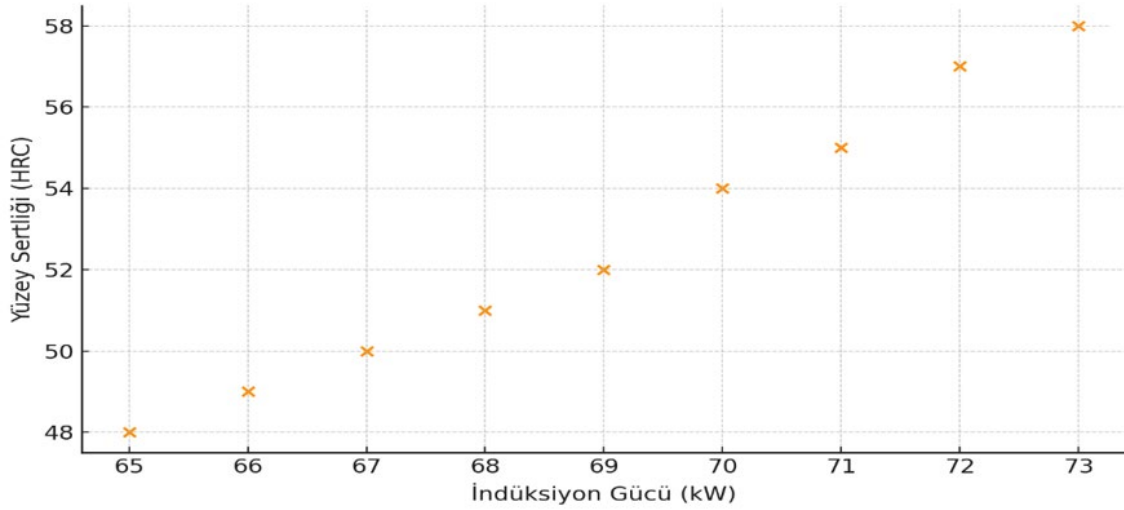
- İndüksiyon Gücü Stabilizasyonu: Dağılım diyagramı sonuçlarına göre, yüzey sertliği değerleri doğrudan uygulanan indüksiyon

gücüne bağlı olarak değişmektedir. Bu nedenle, indüksiyon sistemine enerji izleme ve kayıt modülü entegre edilerek ani voltaj/güç düşüşleri kontrol altına alınmalıdır.

- Reel Zamanlı Proses Takibi: Sertlik hedef aralığının dışına çıkan parçalar, üretim sırasında anlık izleme sistemi ile tespit edilmeli ve proses dışına yönlendirilmelidir. Bu sistem, kontrol dışı üretimi minimize etmek için otomatik uyarı mekanizmalarıyla desteklenmelidir.
- Yüzey Sertliği İçin Gelişmiş Kontrol Planı: Histogram analizine göre sertlik değerleri beklenenin altında yoğunlaşmaktadır. Bu nedenle, proses başlangıcında yapılacak örneklem sertlik kontrolleri ile “ilk parça onay” süreci oluşturulmalı, proses sabitlenmeden seri üretime geçilmemelidir.
- Eğitim ve Proses Farkındalığı: Operatörlerin indüksiyon gücünün sertliğe etkisi konusunda bilinçlendirilmesi amacıyla uygulamalı eğitim programları hazırlanmalı, proses çıktılarının görsel olarak izlenebilir hale getirilmesi sağlanmalıdır.
- Periyodik Makine Kalibrasyonu ve Önleyici Bakım: Sertlik düşüklüğünün tekrar etmemesi için indüksiyon ünitesine ait ekipmanların (bobin, jeneratör, soğutma devresi) düzenli kontrol ve kalibrasyon planları güncellenmelidir.



Şekil 4. Düşük yüzey sertliği değerlerinin histogramı (Histogram of low surface hardness values)



Şekil 5. p Kontrol diyagramı - düşük yüzey sertliği hataları (p Control chart – low surface hardness defects)

3.7. Kontrol Dışı Örneklem Grubu İçin Proses Performansı Değerlendirmesi ve İyileştirme Stratejileri (Process Performance Assessment and Improvement Strategies for the Statistically Out-of-Control Sample Group)

İndüksiyonla sertleştirilen iş makinası parçalarının üretim kabiliyeti Proses Yeterlilik Analizi (PYA) aracılığıyla değerlendirilmiştir. Spesifikasyon sınırları 58–62 HRC olarak belirlenen süreçte, p kontrol diyagramında istatistiksel kontrol dışı kalan 5. örneklem grubuna ait veriler için ölçülen ortalama yüzey sertliği 54 HRC ve standart sapma 2,67 HRC olarak bulunmuştur. Bu verilere dayanarak hesaplanan Cp değeri Eşitlik 6'da gösterildiği üzere 0,25 olarak bulunmuştur. Cpk değeri ise Eşitlik 7'de görüldüğü üzere -0,5 olarak hesaplanmıştır.

$$Cp = (USL - LSL)/(6\sigma) = (62 - 58)/(6 \times 2,67) \approx 0,25 \quad (6)$$

$$Cpk = \min\left(\frac{USL - \mu}{3\sigma}, \frac{\mu - LSL}{3\sigma}\right) = \min((62 - 54)/8,01, (54 - 58)/8,01) \approx -0,50 \quad (7)$$

Bu bölümde kullanılan $\mu = 54$ HRC değeri, p kontrol diyagramında istatistiksel olarak kontrol dışı olduğu belirlenen 5. örneklem grubuna ait ortalama yüzey sertliğini ifade etmektedir. Bu noktada vurgulanması gereken önemli bir husus, gerçekleştirilen proses yeterlilik analizinin tüm üretim sürecinin genel yeterliliğini temsil etmediğidir. Cp ve Cpk indeksleri, p kontrol diyagramında istatistiksel olarak kontrol dışı olduğu belirlenen 5. örneklem grubuna ait ölçüm verileri kullanılarak hesaplanmıştır. Bu nedenle elde edilen $Cp = 0,25$ ve $Cpk = -0,50$ değerleri, yalnızca ilgili

partinin proses performansını yansıtmakta olup, özel nedenlere bağlı olarak gerçekleşen bu sapmanın proses yeterliliği üzerindeki etkisini ortaya koymayı amaçlamaktadır. Kontrol dışı bir sürece ait verilerle yapılan bu analiz, genel proses yeterliliğinin değerlendirilmesi amacıyla değil, kontrol dışı örneklem grubunun kalite performansının incelenmesi amacıyla kullanılmıştır.

Cp değerinin 0,25 olması, proses varyasyonunun çok geniş bir alana yayıldığını; Cpk değerinin negatif çıkması ise ortalamanın spesifikasyon alt sınırının dışında kaldığını ve merkezlenmenin ciddi şekilde bozulduğunu göstermektedir. Bu durum, sürecin kararsız ve hedef dışı çalıştığını ortaya koymakta ve kalite açısından kabul edilemez bir tabloya işaret etmektedir.

3.7.1. Temel bulgular (Key findings)

- Dar varyasyon yeteneği: Proses doğal varyasyonunu 4 HRC'lik geniş bir alana yaymakta, bu da spesifikasyon dışında üretim riskini artırmaktadır.
- Merkez sapması: Ortalama sertlik, spesifikasyon aralığının merkezine yakın değil, daha düşük bir ortalama kalmaktadır.
- Özel nedenler: Bobin ısınması, operatör kaynaklı zamanlama hataları ve normalize eksikliği, proses merkezini de etkileyerek Cpk'yı daha da düşürmüştür.

3.7.2. İyileştirme stratejileri (Improvement strategies)

- Otomatik Proses Kontrolü: İndüksiyon frekansı ve güç seviyesinin $\pm \%1$ hassasiyetle korunmasını sağlayacak kontrol algoritmaları ve sensör tabanlı geri besleme sistemleri geliştirilmelidir.
- Ara Kontrol Noktalarının Tanımlanması: “İlk parça onayı” uygulamasının ötesine geçilerek, her 200 parçada bir yüzey sertliği ölçümü gerçekleştirilmesi ve C_p ve C_{pk} değerlerinin izlenmesi önerilmektedir.
- Proses Merkezinin Kaydırılması: Ortalama sertliğin 60 HRC’ye yükseltilmesi adına ısıtma süresi ve güç parametrelerinde kademeli artışlar planlanmalı; bu sayede C_{pk} indeksinin iyileştirilmesi hedeflenmelidir.
- Periyodik Kalibrasyon ve Bakım: Bobin, jeneratör ve sertlik ölçüm cihazları için aylık kalibrasyon ve bakım planları hazırlanarak, ekipman kaynaklı sapmaların önüne geçilmelidir.
- Personel Eğitimi ve Sürekli Gelişim: Operatörlere C_p ve C_{pk} kavramları ve proses yeterlilik gereksinimleri konusunda sürekliliği sağlamak üzere eğitim programları düzenlenmeli; PUKÖ döngüsü çerçevesinde her üretim partisinden sonra iyileştirme faaliyetleri başlatılmalıdır.

Bu önerilerin uygulanması, prosesin merkezini spesifikasyon aralığının tam ortasına yaklaştırmayı ve varyasyon aralığını daraltarak C_p ve C_{pk} değerlerinin 1,33 hedefine ulaşmasını mümkün kılacaktır. Böylelikle, indüksiyonla sertleştirme sürecinin, güvenilir ve tekrarlanabilir bir performans göstermesi sağlanacaktır.

4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışmada, yüksek frekanslı indüksiyon ile sertleştirilen iş makinası parçalarında meydana gelen kalite hataları İstatistiksel Proses Kontrol teknikleri ile sistematik olarak incelenmiştir. 4140 çeliğinden imal edilen toplam 3100 adet mil parçası üzerinden elde edilen veriler, Pareto Analizi, p Kontrol Diyagramı, Balık Kılçığı Diyagramı, Histogram, Dağılım Diyagramı ve Proses Yeterlilik Analizi gibi çok yönlü istatistiksel araçlarla değerlendirilmiştir.

Yapılan analizler sonucunda en yaygın hata türünün “düşük yüzey sertliği” olduğu belirlenmiş ve bu

hataya neden olan süreç dışı sapmalar detaylı biçimde analiz edilmiştir. Özellikle beşinci örneklem grubunda hata oranının kontrol limitlerini aşması, üretim sürecinde özel nedenlere dayalı değişkenlik olduğunu ortaya koymuştur. Kök neden analizleri sonucunda, operatör kaynaklı zamanlama hataları, ekipman parametre dengesizlikleri ve normalize işlemindeki eksiklikler gibi faktörlerin hataların başlıca sebepleri olduğu tespit edilmiştir.

Proses Yeterlilik Analizi sonuçları, istatistiksel olarak kontrol dışı olduğu belirlenen örneklem grubunda, ilgili üretim koşulları altında sürecin spesifikasyonlar dâhilinde tutarlılık sağlamakta yetersiz kaldığını ve C_p ile C_{pk} değerlerinin kabul edilebilir minimum seviye olan 1,00’in altında olduğunu göstermiştir.

Elde edilen bulgular doğrultusunda, üretim sürecinin iyileştirilmesine yönelik kapsamlı öneriler sunulmuştur. Bunlar arasında indüksiyon gücü stabilizasyonu, anlık proses takibi, gelişmiş kontrol planları ve operatör eğitim programları öne çıkmaktadır. Ayrıca, ara kontrol noktalarının tanımlanması ve periyodik ekipman kalibrasyonlarının sistematik hale getirilmesi gibi teknik müdahalelerle süreç kontrolünün ve ürün kalitesinin artırılması hedeflenmektedir.

Bu çalışmada elde edilen bulgular, yüksek frekanslı indüksiyon ile sertleştirilen 4140 çeliği iş makinası millerine ait Ağustos 2024 dönemine özgü üretim verileri üzerinden gerçekleştirilmiştir. Analizler, beş örneklem grubundan elde edilen kalite kontrol verileri ile sınırlı olup, süreç davranışı p kontrol diyagramı aracılığıyla değerlendirilmiştir. Bu kapsamda gerçekleştirilen proses yeterlilik analizi, istatistiksel olarak kontrol dışı olduğu belirlenen örneklem grubuna odaklanmış ve genel üretim sürecinin tamamı için genellenebilir bir proses yeterliliği değerlendirmesi sunma amacı taşımamaktadır. Ayrıca elde edilen sonuçlar, kullanılan malzeme türü, indüksiyon sertleştirme parametreleri ve üretim koşulları ile sınırlı olup, farklı malzeme grupları veya üretim süreçleri için doğrudan genellenmemelidir. Bununla birlikte, çalışma kapsamında kullanılan entegre İstatistiksel Proses Kontrol yaklaşımı, kontrol dışı üretim partilerinin tespit edilmesi, kök nedenlerin analiz edilmesi ve iyileştirme stratejilerinin geliştirilmesi açısından uygulamaya dönük önemli bir metodolojik çerçeve sunmaktadır.

Gelecek çalışmalarda, istatistiksel proses kontrol analizlerinin daha uzun zaman periyotlarını kapsayacak şekilde genişletilmesi ve farklı üretim dönemlerine ait verilerin karşılaştırmalı olarak

değerlendirilmesi önerilmektedir. Ayrıca, farklı çelik türleri, indüksiyon frekansları ve güç seviyeleri gibi proses parametrelerinin yüzey sertliği ve proses yeterliliği üzerindeki etkilerinin deneysel olarak incelenmesi, elde edilen sonuçların genellenebilirliğini artıracaktır. Sürecin istatistiksel olarak kontrol altına alınmasının ardından, Cp ve Cpk indekslerinin kontrol altında bir proses için yeniden hesaplanması, iyileştirme faaliyetlerinin etkinliğinin nicel olarak değerlendirilmesine olanak sağlayacaktır. Bununla birlikte, gerçek zamanlı veri toplama sistemleri ve sensör tabanlı izleme altyapıları ile desteklenen çevrim içi (online) İPK uygulamalarının geliştirilmesi, kontrol dışı durumların erken tespit edilmesine katkı sağlayabilir. Son olarak, literatürde giderek önem kazanan yapay zekâ ve makine öğrenmesi tabanlı yaklaşımların İPK uygulamaları ile entegre edilmesi, proses sapmalarının öngörülmesi ve önleyici kalite stratejilerinin geliştirilmesi açısından gelecek çalışmalar için önemli bir araştırma alanı olarak değerlendirilmektedir.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGMENTS)

Hacı Sarı, çalışma için teşekkür beyanında bulunmamışlardır.

ETİK STANDARTLARIN BEYANI (DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS)

Bu makalenin yazarı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler.

The author of this article declares that the materials and methods they use in their work do not require ethical committee approval and/or legal-specific permission.

YAZARLARIN KATKILARI (AUTHORS' CONTRIBUTIONS)

Hacı Sarı: Deneyleri yapmış, sonuçlarını analiz etmiş ve maklenin yazım işlemini gerçekleştirmiştir.

Hacı Sarı: Conducted the experiments, analyzed the results, and carried out the writing of the manuscript.

ÇIKAR ÇATIŞMASI (CONFLICT OF INTEREST)

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

There is no conflict of interest in this study.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

[1] Şahin, O. (2013), İstatistiksel Proses Kontrolünde Kontrol Grafiklerinin Kullanımı ve Tekstil Sanayinde Bir Uygulama. Dicle

Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi (10), 53-75.

https://dergipark.org.tr/tr/pub/diclesosbed/article/920142#article_cite

- [2] Kumurkan, H., İstatistiksel Proses Kontrol ve Kalite Yönetimi Uygulamaları. Nobel Akademik Yayıncılık, 2021
- [3] Güzel, B.K. ve Köksal, M. (2024), İstatistiksel Süreç Kontrolü Teknikleri Üzerine Bir Parfüm Üretim Hattında Örnek Uygulama Çalışması, Journal of Technology and Applied Sciences 7(2) s.145-161, <https://doi.org/10.56809/icujtas.1488363>
- [4] Gedik, H. (2003), İstatistiksel Proses Kontrol Teknikleri ve Sivas Dikimevinde Bir Uygulama. Cumhuriyet Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü, Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi, Sivas.
- [5] Eleveli, S. ve Behdioğlu, S. (2006), İstatistiksel proses kontrolü teknikleri ile kömür kalitesindeki değişkenliğin belirlenmesi. Bilimsel Madencilik Dergisi, 45(3), 19-26. <https://dergipark.org.tr/tr/pub/madencilik/article/361212>
- [6] Yıldırım, H. ve Karaca, E. (2013), Üretim Sürecinde İstatistiksel Proses Kontrol (İpk) Uygulamaları ve Elektronik Sektöründe Bir İnceleme. Öneri Dergisi, 10(39), 77-87. <https://dergipark.org.tr/tr/pub/maruoneri/article/187804>
- [7] Schippers, W.A.J. (2001), An Integrated Approach to Process Control, International Journal of Production Economics, Vol 69, P93-105 [https://doi.org/10.1016/S0925-5273\(98\)00243-6](https://doi.org/10.1016/S0925-5273(98)00243-6)
- [8] Uçurum, M. ve Özer, F. (2016), Konvansiyonel Bilyeli Değirmende Kalsitin Mikronize Öğütmesinin Renk Parametreleri Kullanılarak İstatistiksel Proses Kontrolü. MT Bilimsel (10), 1-10. <https://dergipark.org.tr/tr/pub/mtb/article/354896>
- [9] Ö Öngelen, B. ve Köksal, M. (2024), Bir Üretim Hattında Meydana Gelen Hataların Pareto Analizi ve Kontrol Diyagramı ile Değerlendirilmesi. İstanbul Ticaret Üniversitesi Teknoloji ve Uygulamalı Bilimler Dergisi, 7(1), 19-33. <https://doi.org/10.56809/icujtas.1387097>
- [10] Umur, E. (2000), İstatistiksel Proses Kontrolü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi. <http://hdl.handle.net/11527/23899>
- [11] Carvalho, R., Lobo, M., Oliveira, M., Oliveira, A. R., Lopes, F., Souza, J., Ramalho, A., Viana, J., Alonso, V., Caballero, I., Santos, J. V. ve Freitas, A. (2021), Analysis of root

- causes of problems affecting the quality of hospital administrative data: A systematic review and Ishikawa diagram. *International journal of medical informatics*, 156, 104584, <https://doi.org/10.1016/j.ijmedinf.2021.104584>
- [12] Megahed, F. M., Chen, Y. J., Ferris, J. A., Knoth, S. ve Jones-Farmer, L. A. (2024), How generative AI models such as ChatGPT can be (mis)used in SPC practice, education, and research? An exploratory study. *Quality Engineering*, 36(2), 287–315, <https://doi.org/10.1080/08982112.2023.2206479>
- [13] Chaudry, S.S. ve Higbie, J.R. (1989), Practical Implementation of Statistical Process Control in Chemical Industry, *International Journal of Quality and Reliability Management*, 6(5), 37-48.
- [14] Cantello, F.X., Chalmers, J.E ve Evans, J.E. (1990), Evolution to an Effective and Enduring SPC Systems, *Quality Progress*, 23(2), 60-64.
- [15] KUMAR, S. ve GUPTA, Y.P. (1993), Statistical Process Control at Motorola's Austin Assembly Plant, *Interfaces*, 23(2), 84-92. <https://www.jstor.org/stable/25061730>
- [16] Gümüőğlu, S. (2000), *Toplam Kalite Yönetimi*. Alfa Yayınları, Ankara.
- [17] Prokopenko, J. (2005), *Verimlilik El Kitabı*. MESS Yayınları, İstanbul.
- [18] Şimşek, R. (2000), *İstatistiksel Süreç Analizi*. Ege Üniversitesi Yayınları, İzmir.
- [19] Akkurt, S. (2002), *Kalite Kontrol Teknikleri*. XYZ Yayıncılık, İstanbul.
- [20] Şirin Aydın, M. ve Teke, Ç. (2016), Lastik Endüstrisinde Makine Duruş Analizi. *Uluslararası Mühendislik ve Teknoloji Araştırmaları Dergisi*, 1(1), 38-43.
- [21] Zeyveli, M. ve Selalmaz, E. (2008), İstatistiksel Proses Kontrol Yöntemlerinden Pareto Analizi ve Sebep-Sonuç Grafiğinin Zincir İmalatına Uygulanması. *Fırat Üniversitesi Doğu Araştırmaları Dergisi*, 6(3), 36-45. <https://dergipark.org.tr/en/pub/fudad/article/593732>
- [22] T. N. Pamungkas ve I. Made Aryantha Anthara (2023), Identification of the causes of work accidents in industry mining with method fishbones diagram. *AIP Conf. Proc.* 19 October 2023; 2882 (1): 050005. <https://doi.org/10.1063/5.0178980>
- [23] Botezatu, C., Condrea, I., Oroian, B., Hrițuc, A., Ețcu, M. ve Slătineanu, L. (2019), Use of the Ishikawa diagram in the investigation of some industrial processes. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/682/1/012012>
- [24] Liliana, L. (2016), A new model of Ishikawa diagram for quality assessment. *IOP conference series: Materials science and engineering*. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/161/1/012003>
- [25] Bayraklı, İ. (2001), *İstatistiksel Proses Kontrolü ve Bir Metal İşkolunda Uygulanması*, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, Tez No: 176001