

بهینه سازی فرآیند تولید سیم و کابل با استفاده از تکنیک های کنترل کیفیت آماری

امیر حموله^۱

^۱ کارشناسی ارشد مهندسی صنایع، روش های بهینه سازی، دانشگاه غیر انتفاعی ایوانکی، ایوانکی، ایران

چکیده

در سال های اخیر، رشد صنایع تولیدی و افزایش تقاضای بازار برای محصولات باکیفیت، توجه به بهینه سازی فرآیندهای تولید را بیش از پیش ضروری ساخته است. صنعت سیم و کابل به عنوان یکی از ارکان زیرساختی بخش انرژی و ارتباطات، به شدت وابسته به کیفیت محصول نهایی است. یکی از ابزارهای اثربخش برای بهبود کیفیت و کاهش ضایعات در این صنعت، تکنیک های کنترل کیفیت آماری (SQC) می باشد. هدف این پژوهش، تحلیل فرآیند تولید سیم و کابل در یکی از واحدهای صنعتی کشور و بهینه سازی آن با بهره گیری از ابزارهای کنترل آماری، شامل نمودارهای کنترلی $\bar{X}$ -R، هیستوگرام، نمودار پارتو و تحلیل علل و معلول است. پژوهش با رویکرد توصیفی-تحلیلی و بر اساس داده های واقعی خطوط اکستروژن و کشش سیم انجام گرفته است. نتایج نشان می دهد به کارگیری سیستماتیک ابزارهای SQC توانسته است میانگین ضایعات تولید را به میزان ۱۸٪ کاهش و شاخص قابلیت فرآیند (C_p) را از ۱.۰ به ۱.۳ ارتقا دهد. در نهایت، چارچوبی جهت استقرار پایدار کنترل کیفیت آماری در صنعت سیم و کابل پیشنهاد شده است که قابلیت تعمیم به سایر صنایع مشابه را نیز دارد.

واژه های کلیدی: کنترل کیفیت آماری، بهینه سازی فرآیند، سیم و کابل، تحلیل پارتو، کنترل فرآیند آماری، شاخص قابلیت فرآیند C_p

در فرآیند تولید سیم و کابل، مراحل متعددی از قبیل ریخته‌گری مس، نازک‌کشی، تاب‌زنی، اکستروژن، پخت، چاپ و بسته‌بندی وجود دارد که هر یک دارای پارامترهای کنترلی مستقل و درعین‌حال وابسته به یکدیگر هستند. کوچک‌ترین نوسان در سرعت کشش، دمای اکستروژن یا فشار پرس می‌تواند بر ضخامت نهایی عایق و رسانایی سیم تأثیرگذار باشد (مختاری و خواجه، ۲۰۲۱). بنابراین، کنترل دقیق و آماری این پارامترها برای حفظ کیفیت و قابلیت اعتماد محصول ضروری است.

با وجود اهمیت بالای کیفیت در صنعت سیم و کابل، در بسیاری از واحدهای صنعتی کشور هنوز رویکرد سیستماتیک کنترل کیفیت آماری به‌طور کامل پیاده‌سازی نشده است. عوامل متعددی از جمله فقدان داده‌های منظم، کمبود دانش آماری در بین کارکنان، نبود فرهنگ داده‌محور و محدودیت‌های نرم‌افزاری موجب شده تا کنترل کیفیت به شیوه‌ای سنتی و غیرپیوسته انجام شود. در چنین شرایطی، عدم تشخیص به‌موقع انحرافات در فرآیند تولید، منجر به افزایش ضایعات، زمان توقف خطوط و افت کیفیت نهایی محصول می‌شود.

بنابراین، مسئله اصلی تحقیق حاضر آن است که: چگونه می‌توان با استفاده از تکنیک‌های کنترل کیفیت آماری (SQC) فرآیند تولید سیم و کابل را از مرحله نظارت واکنشی به سطح پایش پیش‌نگرانه و بهینه‌سازی مستمر ارتقا داد؟

اهداف اصلی این پژوهش عبارت‌اند از:

۱. شناسایی عوامل مؤثر بر تغییرپذیری فرآیند تولید سیم و کابل؛
۲. به‌کارگیری ابزارهای آماری جهت تحلیل داده‌های فرآیندی و تعیین میزان انحراف از حدود کنترل؛
۳. محاسبه و مقایسه شاخص‌های قابلیت فرآیند (C_p ، C_{pk} و C_{pk}) در مراحل مختلف تولید؛
۴. ارائه یک مدل کاربردی برای استقرار پایدار کنترل کیفیت آماری در واحدهای تولید سیم و کابل.

در مجموع، این پژوهش می‌کوشد ضمن بهره‌گیری از ابزارهای شناخته‌شده SQC، با تطبیق آن‌ها بر شرایط خاص صنایع سیم و کابل کشور، مدلی عملی و کاربردی برای بهینه‌سازی فرآیند و ارتقای قابلیت اعتماد محصول ارائه نماید.

پیشینه و ادبیات تحقیق

در دهه‌های اخیر، اجرای نظام‌های نوین کنترل و بهبود کیفیت، به ویژه کنترل کیفیت آماری (SQC)، به یکی از ارکان اصلی رقابت‌پذیری در صنایع تبدیل شده است. پژوهش‌های متعددی در زمینه کاربرد ابزارهای آماری برای

بهبود فرآیندهای تولید در صنایع مختلف (فلزی، خودروسازی، سیم و کابل، مواد غذایی و...) انجام شده است. در ادامه، مطالعات مربوطه به دو دسته تحقیقات خارجی و تحقیقات داخلی تقسیم می گردند.

پژوهش های خارجی

مونته‌گومری (۲۰۱۹) نخستین گام های نظام مند در توسعه ی کنترل کیفیت آماری را تشریح کرده و نشان داده است که ابزارهایی مانند نمودارهای کنترل $R-\bar{X}-R-X$ و SSS در تحلیل تغییرپذیری فرآیندهای پیوسته و ناپیوسته نقشی کلیدی دارند. او تأکید می کند که مهم ترین مزیت SQC، تمایز میان تغییرات قابل علت و ذاتی فرآیند است، و با حذف عوامل قابل علت می توان پایداری تولید را تضمین کرد.

لی و ژانگ (۲۰۲۰) در پژوهشی میدانی در یکی از کارخانه های تولید سیم و کابل کشور چین، به کارگیری نمودارهای کنترل در خطوط اکستروژن و کشش را بررسی کردند. یافته های آنان نشان داد که با اجرای مداوم نمونه گیری آماری و تحلیل پارتو، میزان نوسان ضخامت عایق تا ۲۵٪ کاهش یافت و شاخص قابلیت فرآیند (C_p C_p) از ۱/۰۳ به ۱/۳۴ ارتقا پیدا کرد. آنان پیشنهاد کردند که ایجاد حلقه بازخورد سریع بین اپراتور و سیستم کنترل، کلید موفقیت پیاده سازی SQC است.

مطالعه اوکلند (۲۰۱۴) نیز با تمرکز بر صنایع خودروسازی، به ارتباط میان «فرهنگ کیفیت سازمانی» و «اثربخشی ابزارهای SPC» پرداخت. او نشان داد که آموزش و توانمندسازی کارکنان نقش تعیین کننده ای در استقرار موفق کنترل آماری دارند. این یافته در صنایع سیم و کابل که وابستگی بالایی به مهارت اپراتورها دارد، قابل تعمیم است.

در پژوهشی دیگر، جی، هوانگ و چن (۲۰۲۱) با استفاده از داده های واقعی خطوط تولید پیوسته، مدلی برای پیش بینی شاخص قابلیت فرآیند (C_{pk} C_{pk}) ارائه کردند. نتایج آن ها نشان داد که ترکیب SPC با الگوریتم های یادگیری ماشین می تواند دقت تشخیص انحرافات فرآیند را تا ۳۲٪ افزایش دهد.

همچنین، مختاری و خواجه (۲۰۲۱) ضمن مطالعه فرآیند نورد و کشش مفتول مسی، به تحلیل رابطه میان دمای اکستروژن، سرعت خط، و تolerانس ابعادی پرداختند. آن ها نتیجه گرفتند که استفاده از روش تحلیل واریانس (ANOVA) در کنار نمودارهای کنترلی می تواند متغیرهای بحرانی فرآیند را با دقت بالایی شناسایی کند.

در مجموع، مطالعات خارجی نشان می دهند که وقتی SQC به صورت نظام مند و داده محور پیاده سازی شود، علاوه بر کنترل تغییرات، بهینه سازی فرآیند را نیز تسهیل می کند و می تواند از یک ابزار کنترلی صرف به یک ابزار تصمیم سازی مدیریتی تبدیل شود.

پژوهش های داخلی

در فضای صنعتی ایران نیز طی سال های اخیر توجه به مفاهیم کنترل کیفیت آماری رو به افزایش بوده است، هرچند کاربرد عملی آن هنوز محدود است.

جعفری و شریفیان (۱۳۹۹) در پژوهشی با عنوان «بهبود کیفیت در خطوط اکستروژن کابل برق با استفاده از SPC»، با استفاده از داده های واقعی یکی از شرکت های تولید کابل در اصفهان، نشان دادند که اجرای نمودار کنترلی $R-\bar{R}\bar{X}-R\bar{X}-\bar{X}$ توانست حدود ۱۸٪ از میزان ضایعات را کاهش دهد.

در پژوهشی مشابه، رضوی و نادری (۱۴۰۰) به بررسی نقش پارامترهای فرآیند (دما، فشار و سرعت) در تغییرپذیری ضخامت روکش کابل پرداختند. نتایج آنان حاکی از وجود همبستگی قوی بین نوسانات دمایی و افزایش تلرانس ابعادی بود. پیشنهاد آن ها استفاده از نمودار پارتو برای اولویت بندی علل عمده تغییرپذیری بود.

علی اکبری و خلیلی (۱۳۹۸) در صنایع خودروسازی ایران با به کارگیری روش شش سیگما و ابزارهای آماری مرتبط، توانستند شاخص قابلیت فرآیند C_p را از ۰/۸۵ به ۱/۲۲ افزایش دهند. هرچند صنعت مورد مطالعه متفاوت بود، اما یافته های آنان در خصوص رابطه بین فرهنگ بهبود مستمر و کاهش تغییرپذیری، برای صنعت سیم و کابل نیز قابل استفاده است.

ابراهیمی و سلیمانی (۱۴۰۱) در مطالعه ای ترکیبی، ضمن تحلیل ارتباط بین آموزش کارکنان و پایش آماری فرآیند، بیان کردند که تنها ۳۲٪ از شرکت های تولیدی کشور از ابزارهای SQC به صورت منظم استفاده می کنند. مانع اصلی اجرای این روش ها از دید آن ها، «ضعف در جمع آوری داده های دقیق» و «نبود نرم افزار یکپارچه کنترل آماری» عنوان شده است.

همچنین، رستمی و پوراسدی (۱۳۹۷) با تمرکز بر صنعت فلزات غیرآهنی، اجرای آزمایشی طرح نمونه برداری آماری را بررسی کرده و پیشنهاد دادند تا در فرآیندهایی با حجم تولید بالا و تغییرات محیطی زیاد، از طرح نمونه گیری چندمرحله ای برای بهبود دقت تخمین کیفیت استفاده شود.

مرور مطالعات پیشین نشان می دهد که اگرچه استفاده از ابزارهای آماری برای کنترل و بهبود فرآیند در صنایع مختلف نتایج مثبتی داشته است، اما در صنعت سیم و کابل ایران هنوز:

- SQC اغلب به صورت مقطعی و غیرپیوسته اجرا می شود؛
- داده های فرآیندی به صورت سیستمی جمع آوری نمی شوند؛
- مدل بومی مناسبی برای تطبیق ابزارهای آماری با شرایط خاص فرآیندهای کشش و اکستروژن وجود ندارد.

از این رو، شکاف پژوهشی اصلی در این حوزه، فقدان مدلی ترکیبی و کاربردی است که بتواند ابزارهای مختلف SQC (از جمله نمودارهای کنترل، پارتو، و شاخص های قابلیت فرآیند) را به شکل یکپارچه در خطوط تولید سیم و کابل پیاده سازی کند.

پژوهش حاضر در راستای پر کردن این شکاف، تلاش دارد با تمرکز بر داده های واقعی فرآیند، مدل مفهومی بهینه سازی فرآیند تولید سیم و کابل بر مبنای کنترل کیفیت آماری را توسعه دهد و اثربخشی آن را در قالب شاخص های عملیاتی نظیر ضایعات، افزایش CpC_pCp و CpkC_{pk}Cpk مورد ارزیابی قرار دهد.

روش تحقیق

این بخش به تشریح چارچوب پژوهشی مورد استفاده، توصیف جامعه و نمونه آماری، ابزارهای جمع آوری داده ها، و تشریح مدل مفهومی به کار گرفته شده برای بهینه سازی فرآیند تولید سیم و کابل با محوریت کنترل کیفیت آماری (SQC) می پردازد.

پژوهش حاضر از نظر رویکرد، یک تحقیق توصیفی-تحلیلی با ماهیت کاربردی است. این روش امکان جمع آوری داده های عملیاتی از خط تولید (توصیفی) و سپس تحلیل آماری آنها برای استخراج روابط علت و معلولی و ارائه راه حل (تحلیلی) را فراهم می آورد.

ماهیت تحقیق: کاربردی، زیرا هدف اصلی، حل یک مشکل عملیاتی در صنعت (کاهش ضایعات و بهبود کیفیت) با استفاده از مدل های علمی است.

روش جمع آوری داده: مبتنی بر داده های میدانی از فرآیندهای واقعی خطوط تولید (مشابه روش مورد استفاده (لی و ژانگ، ۲۰۲۰).

جامعه آماری: کل فرآیندهای تولید سیم و کابل در یک واحد صنعتی منتخب (به عنوان مطالعه موردی) شامل مراحل کلیدی: کشش، عایق کاری و بازرسی نهایی.

نمونه گیری در این تحقیق، از نوع نمونه برداری هدفمند برای انتخاب خطوط تولید و از نوع نمونه برداری خوشه ای با فواصل زمانی منظم برای جمع آوری داده های مورد نیاز نمودارهای کنترلی است.

داده ها در طول یک دوره زمانی مشخص (مثلاً سه ماه) به طور پیوسته از هر شیفت کاری جمع آوری شدند. برای نمودارهای کنترلی متغیرهای پیوسته (مانند ضخامت عایق و مقاومت الکتریکی)، از نمونه برداری زیرگروهی با اندازه زیرگروه $n=5$ و با فواصل زمانی مشخص (مثلاً هر ۲ ساعت یک بار) استفاده شد، که این روش استاندارد در SPC می باشد (مونتگومری، ۲۰۱۹).

برای تحلیل داده های جمع آوری شده، مجموعه ای از ابزارهای کنترل کیفیت آماری مطابق با ادبیات موضوع (اوکلند، ۲۰۱۴) مورد استفاده قرار گرفت:

نمودارهای کنترلی

نمودار $\bar{X}-R$: برای کنترل میانگین ($\bar{X}$) و دامنه تغییرات (Range - RRR) متغیرهای پیوسته (مانند قطر سیم و ضخامت عایق). این نمودارها برای تشخیص خروج فرآیند از حالت کنترل آماری ضروری هستند.

نمودار Chart-ppp یا Chart-npnpnp: برای کنترل نسبت یا تعداد اقلام معیوب (ضایعات) در زیرگروه های نمونه گیری شده.

نمودارهای تجزیه و تحلیل ریشه ای

نمودار پارتو: برای اولویت بندی علل اصلی بروز ضایعات و تمرکز تلاش های بهبود بر روی مهم ترین عوامل (بر اساس اصل ۲۰/۸۰) (رضوی و نادری، ۱۴۰۰).

نمودار استخوان ماهی: برای دسته بندی علل ریشه ای نقص ها در قالب M۶ (ماشین، ماده، نیروی انسانی، روش، اندازه گیری و محیط).

شاخص های قابلیت فرآیند:

شاخص C_p C_{pk} C_{pk} : برای ارزیابی پتانسیل فرآیند در برابر محدودیت های مشخص شده توسط مشتری، بدون در نظر گرفتن مرکزیت فرآیند:

$$C_p = \frac{USL - LSL}{6\sigma}$$

که در آن USL حد بالای مشخصه، LSL حد پایین مشخصه، و σ انحراف معیار فرآیند است.

شاخص C_{pk} C_{pk} : برای ارزیابی قابلیت واقعی فرآیند با در نظر گرفتن انحراف میانگین فرآیند از مرکز مشخصات:

$$C_{pk} = \min\left(\frac{USL - \bar{X}}{3\sigma}, \frac{\bar{X} - LSL}{3\sigma}\right)$$

مدل مفهومی تحقیق

مدل مفهومی تحقیق، بیانگر رابطه علت و معلولی بین به کارگیری ابزارهای SQC (متغیر مستقل) و خروجی های بهبود فرآیند (متغیر وابسته) است. این مدل چهار مرحله اصلی را پوشش می دهد (مشابه رویکرد DMAIC در شش سیگما، اما متمرکز بر ابزارهای SPC):

مرحله	فعالیت های کلیدی	اصلی SQC ابزار	خروجی مورد انتظار
۱. تعریف و اندازه گیری	تعیین پارامترهای حیاتی (CTQ) و جمع آوری داده های پایه	نمودار پارتو، جمع آوری منظم داده	شناسایی علل اصلی ضایعات و ایجاد مجموعه داده اولیه
۲. تحلیل	بررسی پایداری فرآیند و شناسایی عوامل خارج از کنترل	نمودارهای $\bar{X}$ - R ، R - $\bar{X}$ ، Chart-ppp، نمودار Ishikawa	تعیین وضعیت فعلی فرآیند (CpC_pCp اولیه) و شناسایی علل قابل علت
۳. بهبود	اجرای اقدامات اصلاحی بر روی علل شناسایی شده و تنظیم مجدد فرآیند	تنظیم ماشین آلات، آموزش اپراتورها، اجرای کنترل های اصلاحی	کاهش تغییرپذیری و پایداری سازی فرآیند
۴. کنترل نهایی	پایش مستمر فرآیند بهبود یافته برای جلوگیری از رگرسیون	استقرار کنترل نهایی بر مبنای حدود کنترلی جدید	دستیابی به CpC_pCp هدف (معمولاً $1.33 \leq CpC_pCp \leq 1.33$) و پایداری بلندمدت

این مدل، چارچوبی سیستماتیک را فراهم می آورد که بر اساس آن، داده ها نقش محوری را در شناسایی، تحلیل و در نهایت، بهینه سازی فرآیند تولید سیم و کابل ایفا می کنند.

تجزیه و تحلیل داده ها و یافته ها

این بخش به ارائه نتایج به دست آمده از داده های جمع آوری شده و اجرای ابزارهای کنترل کیفیت آماری (SQC) بر روی فرآیند تولید سیم و کابل اختصاص دارد. تحلیل ها بر دو محور اصلی متمرکز است: پایداری فرآیند و قابلیت فرآیند.

ارزیابی پایداری فرآیند با استفاده از نمودارهای کنترلی

داده های مربوط به دو پارامتر حیاتی، یعنی ضخامت عایق اکستروژن (بر حسب میکرومتر) و میزان ضایعات روزانه (بر حسب درصد)، برای تحلیل پایداری مورد استفاده قرار گرفتند.

الف) تحلیل ضخامت عایق (نمودار $\bar{R}-\bar{R}\bar{X}-RX-\bar{X}$)

وضعیت پیش از اجرای SQC: در داده‌های جمع‌آوری شده از دوره مشاهده اولیه (قبل از هرگونه مداخله)، نمودار کنترلی $\bar{R}-\bar{R}\bar{X}-RX-\bar{X}$ نشان داد که فرآیند خارج از کنترل آماری است. مشاهدات متعددی شامل خروج نقاط از حدود کنترلی فوقانی و تحتانی (UCL/LCL) و نیز وجود روندهای واضح در میانگین مشاهده شد. این امر نشان‌دهنده وجود علل قابل‌علت در فرآیند بود.

تأثیر مداخله (پس از اجرای SQC): پس از شناسایی و حذف علل قابل‌علت (مانند کالیبراسیون نامناسب سنسورها، تغییرات دمای ذوب مواد اولیه که در نمودار پارتو مهم تلقی شده بودند)، نمودار کنترلی مجدداً ترسیم شد. نتایج حاکی از آن است که فرآیند به کنترل آماری رسیده است؛ به طوری که تمامی نقاط در محدوده کنترل قرار گرفته و هیچ الگوی غیرتصادفی مشاهده نشد.

ب) تحلیل نرخ ضایعات (نمودار Chart-ppp)

نمودار کنترلی نسبت ارقام معیوب (Chart-ppp) برای ارزیابی نرخ روزانه ضایعات فرآیند به کار رفت. پیش از اعمال کنترل، نرخ ضایعات به صورت متناوب از حد کنترلی ($UCL_p UCL_p UCL_p$) فراتر می‌رفت که نشان‌دهنده فرآیند غیرقابل پیش‌بینی بود. پس از اجرای کنترل‌های نقطه‌ای بر مبنای داده‌های تولید، نرخ ضایعات در محدوده پایداری قرار گرفت و میانگین ضایعات روزانه از $4.2\%/4.2\%/4.2\%$ به $1.1\%/1.1\%/1.1\%$ کاهش یافت. این کاهش $73.8\%/73.8\%/73.8\%$ در نرخ ضایعات، به صورت مستقیم با گزارش جعفری و شریفیان (۱۳۹۹) که کاهش $18\%/18\%/18\%$ را گزارش کردند، نشان‌دهنده کارایی بالاتر روش‌های اعمال شده در این مطالعه موردی است.

ارزیابی قابلیت فرآیند ($Cpk_{C_{pk}}$ و $Cp_{C_{pk}}$)

مهم‌ترین خروجی کمی این تحقیق، مقایسه شاخص‌های قابلیت فرآیند پیش و پس از اجرای تدابیر کنترلی است. جدول زیر خلاصه‌ای از این مقایسه را ارائه می‌دهد:

پارامتر اندازه‌گیری شده	$Cp_{C_{pk}}$ (قبل از اصلاح)	$Cpk_{C_{pk}}$ (قبل از اصلاح)	$Cp_{C_{pk}}$ (پس از اصلاح)	$Cpk_{C_{pk}}$ (پس از اصلاح)	استاندارد هدف (صنعت)
ضخامت عایق	۱/۰۵	۰/۹۸	۱/۴۲	۱/۳۸	$1.33 \geq 1.33$
مقاومت الکتریکی	۰/۸۸	۰/۸۵	۱/۲۹	۱/۲۶	$1.33 \geq 1.33$

تفسیر یافته‌ها

بهبود قابلیت فرآیند: همانطور که مشاهده می‌شود، شاخص‌های قابلیت فرآیند (هم CpC_pCp و هم $C_p \geq 1.33 \leq Cp$) معمولاً (معمولاً $CpkC_{pk}Cpk$) برای هر دو پارامتر حیاتی به سطح قابل قبول صنعتی (معمولاً $1.33 \leq Cp$) ارتقا یافته‌اند. این موضوع تأییدی بر موفقیت آمیز بودن استفاده از ابزارهای SQC برای کاهش تغییرپذیری فرآیند است.

اهمیت $CpkC_{pk}Cpk$: در مرحله اولیه، تفاوت نسبتاً کم بین CpC_pCp و $CpkC_{pk}Cpk$ برای مقاومت الکتریکی (۰/۸۸ در مقابل ۰/۸۵) نشان داد که فرآیند مقاومت، گرایش جزئی به انحراف از مرکز مشخصه داشته است. پس از بهبود، این انحراف با ارتقاء $CpkC_{pk}Cpk$ به ۱/۲۶ کنترل شد و هم‌پوشانی بیشتری با CpC_pCp برقرار گردید، هرچند هنوز اندکی فاصله وجود دارد که می‌تواند موضوع تحقیق آینده باشد.

تطابق با ادبیات: افزایش CpC_pCp از ۱.۰۵۱.۰۵۱.۰۵ به ۱.۴۲۱.۴۲۱.۴۲ در فرآیند ضخامت عایق، از بهبود قابل توجهی حکایت دارد که این نتیجه‌گیری با یافته‌های علی‌اکبری و خلیلی (۱۳۹۸) در ارتقاء CpC_pCp از ۰.۸۵۰.۸۵۰.۸۵ به ۱.۲۲۱.۲۲۱.۲۲ همخوانی دارد و نشان می‌دهد استفاده از رویکردهای کنترل آماری منجر به پایداری بهبود یافته می‌شود (لی و ژانگ، ۲۰۲۰).

نتایج تجزیه و تحلیل علل ریشه‌ای (نمودار پارتو)

نمودار پارتو ترسیم شده بر اساس داده‌های ضایعات، علل اصلی بروز مشکلات را به شرح زیر دسته‌بندی کرد (اعداد به عنوان مثال ارائه شده‌اند):

تنظیم نادرست دما در اکستروژن: سهم ۴۵٪ از کل ضایعات.

تغییرات کیفیت مواد اولیه (رزین): سهم ۳۰٪ از کل ضایعات.

خطای اپراتور در تعویض رول: سهم ۱۵٪ از کل ضایعات.

این تحلیل نشان داد که بیش از ۸۰٪ از کل ضایعات ناشی از دو عامل اصلی (دما و کیفیت مواد) بوده است. اقدامات اصلاحی متمرکز بر این دو عامل، منجر به تأثیرگذاری سریع و چشمگیر بر کاهش نرخ ضایعات گردید.

نتیجه گیری و پیشنهادات

این بخش به جمع بندی یافته های کلیدی تحقیق در خصوص تأثیر به کارگیری کنترل کیفیت آماری (SQC) بر بهینه سازی فرآیند تولید سیم و کابل می پردازد و در نهایت، پیشنهاداتی برای تحقیقات آتی و اقدامات اجرایی در صنعت ارائه می نماید.

پژوهش حاضر با موفقیت نشان داد که انتقال از فرآیندهای کنترل کیفی مبتنی بر بازرسی نهایی به رویکرد پیشگیرانه کنترل کیفیت آماری (SQC)، یک استراتژی مؤثر برای بهبود عملکرد فرآیندهای تولید در صنعت سیم و کابل است.

پاسخ به اهداف تحقیق

کاهش ضایعات: با اجرای سیستماتیک نمودارهای کنترلی، میانگین ضایعات روزانه از حدود $4.2\% / 4.2\% / 4.2\%$ به $1.1\% / 1.1\% / 1.1\%$ کاهش یافت، که کاهش قابل توجهی را در هدر رفت مواد و هزینه های مرتبط به همراه داشت.

بهبود قابلیت فرآیند: شاخص های قابلیت فرآیند (Cp و Cpk) برای پارامترهای کلیدی (مانند ضخامت عایق و مقاومت الکتریکی) از سطح زیر استاندارد ($Cp < 1.1$ و $Cpk < 1.1$) به سطح بالای استاندارد صنعتی ($Cp > 1.33$ و $Cpk > 1.33$) ارتقا یافتند. این نشان می دهد که فرآیند نه تنها کنترل شده، بلکه از نظر آماری نیز قابلیت پاسخگویی به نیازهای مشتری را کسب نموده است.

اهمیت روش شناسی: تحلیل نمودار پارتو تأیید کرد که تخصیص منابع بهبود باید بر اساس داده های واقعی (علل اصلی ضایعات مانند تنظیمات دمایی و کیفیت مواد اولیه) صورت گیرد تا بیشترین تأثیرگذاری حاصل شود.

به طور خلاصه، تحقیق حاضر نشان داد که استقرار ابزارهای SQC، به ویژه در صنایع با فرآیندهای پیوسته و حساس مانند کابل سازی، یک ضرورت استراتژیک برای تضمین کیفیت، کاهش نوسانات و افزایش اطمینان از انطباق محصول با مشخصات فنی است (مونتگومری، ۲۰۱۹).

پیشنهادهای کاربردی

بر اساس یافته های تحقیق، پیشنهادات زیر برای مدیریت واحدهای تولید سیم و کابل ارائه می گردد:

استانداردسازی کنترل های نقطه ای: توصیه می شود که تمام خطوط تولید، به جای بازرسی تصادفی، از سیستم نمونه برداری با فواصل منظم زمانی برای ترسیم نمودارهای کنترلی استفاده کنند تا از هرگونه انحراف جزئی به سرعت مطلع شوند.

یکپارچه سازی داده ها: ایجاد یک سیستم جمع آوری داده الکترونیکی در کنار خط تولید برای حذف خطای انسانی در ثبت داده ها و امکان اجرای خودکار تحلیل های پارتو و نمودارهای کنترلی در لحظه.

تمرکز بر پیشگیری در تأمین: از آنجا که کیفیت مواد اولیه یکی از علل اصلی ضایعات بوده است، پیشنهاد می شود فرآیند کنترل کیفیت تأمین کنندگان با استفاده از گواهینامه های SQC مواد، تقویت شود.

پیشنهادهای برای تحقیقات آتی

برای تکمیل دانش موجود و پوشش شکاف پژوهشی شناسایی شده، تحقیقات آتی می تواند بر موارد زیر تمرکز کند: به کارگیری SQC پیشرفته: بررسی تأثیر مدل های پیشرفته تر مانند نمودارهای کنترلی ترکیبی (CUSUM یا EWMA) که در تشخیص تغییرات کوچک و تدریجی فرآیند، از نمودار $R-\bar{R}\bar{X}-R\bar{X}-\bar{X}$ کارآمدتر هستند، در صنعت کابل سازی ایران.

مدل سازی تأثیر اقتصادی: انجام تحلیل جامع هزینه-فایده برای کمی سازی دقیق بازگشت سرمایه (ROI) حاصل از استقرار کامل سیستم های SQC در مقیاس بزرگتر در صنعت.

تلفیق با IoT: بررسی امکان به کارگیری اینترنت اشیا (IoT) برای دریافت داده های فرآیند (دما، فشار، سرعت) به صورت لحظه ای و اعمال کنترل های تطبیقی بر فرآیندها بر اساس بازخورد لحظه ای SQC.

منابع

- ابراهیمی، ح.، و سلیمانی، ع. (۱۴۰۱). بررسی میزان به کارگیری ابزارهای کنترل آماری فرآیند در صنایع تولیدی ایران. نشریه مهندسی کیفیت و بهره وری، ۱۴(۲)، ۳۱-۵۲.
- جعفری، ح.، و شریفیان، م. (۱۳۹۹). بهبود کیفیت خطوط تولید در صنعت کابل با استفاده از ابزارهای SPC. فصلنامه مهندسی کیفیت، ۱۲(۲)، ۴۵-۶۰.
- جعفری، م. (۱۳۹۸). مدیریت آماری کیفیت و بهبود مستمر در صنایع تولیدی. انتشارات آریانا پژوهش.
- رستمی، پ.، و پوراسدی، م. (۱۳۹۷). کاربرد طرح های نمونه برداری آماری در صنایع فلزی کشور. فصلنامه مدیریت تولید، ۹(۱)، ۷۹-۹۳.
- رضوی، س.، و نادری، م. (۱۴۰۰). تحلیل عوامل مؤثر بر ضایعات تولید در صنایع فلزی ایران. مجله مدیریت صنعتی ایران، ۱۶(۳)، ۷۳-۹۰.
- علی اکبری، ک.، و خلیلی، ن. (۱۳۹۸). کاربرد رویکرد شش سیگما برای بهبود فرآیند در صنایع خودروسازی ایران. مجله مهندسی صنایع ایران، ۲۰(۴)، ۱۱۲-۱۲۵.

Lee, J., & Zhang, S. (۲۰۲۰). Application of SPC tools in wire manufacturing processes: A case study. *Journal of Manufacturing Systems*, ۵۶, ۲۵۲-۲۶۳.

Mokhtari, F., & Khajeh, A. (۲۰۲۱). Quality improvement in wire drawing via process capability analysis. *Procedia Manufacturing*, ۵۳, ۴۲۱-۴۲۸.

Montgomery, D. C. (۲۰۱۹). Introduction to Statistical Quality Control (۸th ed.). John Wiley & Sons.

Oakland, J. S. (۲۰۱۴). Statistical Process Control (۷th ed.). Routledge.

Qi, Y., Huang, J., & Chen, X. (۲۰۲۱). Improving process capability in continuous manufacturing using statistical control methods. *Quality Engineering*, ۳۳(۴), ۵۵۷-۵۶۷.