

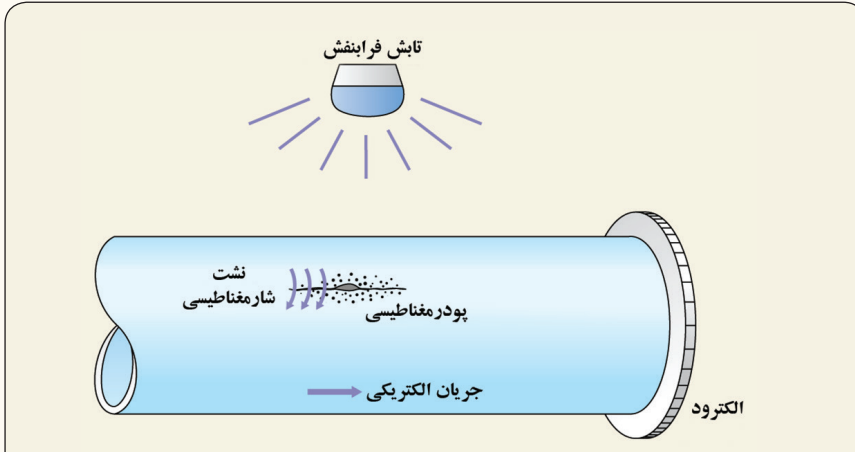
کنترل کیفیت در طراحی و ساخت پالایشگاه گاز

مهندس سیدمهدی میرجعفری، مدیر مهندسی شرکت پترو تدبیر پارس



از دیدگاه کیفیت در مبحث فناوری و تولید صنعتی می‌توان کل دوران زندگی صنعتی بشر را به سه دوره تقسیم نمود. دوره اول مربوط به شروع استفاده بشر از تجهیزات ساده صنعتی نظیر چرخ، چرخ آب و توسعه ابزارهای ساده جنگی می‌باشد. در این دوره بشر به سختی و به صورت ابتدایی با مفهوم فن و علم آشنا شده و بسیاری از ساخته‌های او نتیجه سخت کوشی، نبوغ و بعضاً حادثه بوده است. دوره دوم را می‌توان به دوران طلایی پیشرفت علم و فن در بلاد اسلامی و همچنین دوران بعد از انقلاب علمی، اختراع ماشین چاپ و رنسانس نسبت داد. این دوره تا بعد از انقلاب صنعتی و شروع جنگ جهانی اول تداوم می‌یابد. در این دوران به صورت مشخص مطالعه و تولید مقاله به تدریج در اکتشاف و اختراعات جایگاه خود را یافت و به تدریج علم به صورت مشخص از فن پیشی گرفت. در این دوره اگرچه بعضاً مستندات نظیر کتاب الحیل جرجی یا کارهای داوینچی فعالیت‌های مناسبی در جهت مستندسازی، طراحی مهندسی و ایجاد ارتباط میان علم و فن به وسیله مستندات مکتوب می‌باشد و برخی از مستندات نیز کاملاً پیشگویانه می‌باشند، اما در این دوره به دلیل پراکندگی ابداعات و نبود یک شبکه ارتباطی مناسب و در نهایت عدم توسعه مفهوم مهندسی، همچنان شاهد بلوغ مهندسی و مفاهیمی نظیر کیفیت مهندسی یا قابلیت اطمینان از طراحی و ساخت نیستیم. دوره سوم به تدریج بعد از جنگ جهانی اول شکل گرفت و پس از جنگ جهانی دوم شکوفایی علم و فناوری سرعت گرفت. در این دوره همزمان با آغاز جنگ سرد میان بلوک شرق و غرب، دانش و فناوری به سلاح اصلی این جنگ تبدیل گردید. صنایع نظامی، صنایع هوافضا و انرژی هسته‌ای نیازمند دانش و فن با سطح بالایی از قابلیت اطمینان بودند. به همین دلیل از این دوره مفهوم قابلیت اطمینان (Reliability) که برای اولین بار در سال ۱۸۱۶ میلادی توسط Samuel Taylor Coleridge ابداع گردیده بود، مورد توجه قرار گرفت. قابلیت اطمینان؛ طراحی، ساخت، بهره‌برداری و تولید را به مفاهیمی نظیر کیفیت، دقت، اطمینان، کارایی و بازده گره زد. گارانتی که برای اولین بار در سال ۱۷۷۶ میلادی مطرح گردید و یک دهه بعد در سال ۱۷۸۶ میلادی توسط سرجمز آلن پارک تبدیل به قانونی برای تضمین اجناس تجار شد به تدریج به عاملی برای افزایش کیفیت و قابلیت اطمینان تبدیل شد. فعالیت‌های راهبردی هنری فرد در سال‌های ۱۹۲۰ و ۱۹۲۱ میلادی در خصوص استفاده از خطوط تولید انبوه و استفاده از برنامه‌ریزی تولید و اجرای تعمیرات برنامه‌ریزی شده، را می‌توان آغاز عصر کیفیت و قابلیت اطمینان تلقی نمود. متأسفانه این فعالیت‌ها بلافاصله به رکود اقتصادی سنگین آمریکا برمی‌خورد و بعد از رکود، موقعیت ممتاز شرکت فورد بین خود این شرکت و شرکت‌های جنرال موتور و کرایسلر تقسیم می‌شود. تا اینجا موضوع قابلیت اطمینان مدیون خواست، علاقه و شاید اجبار صنایع خودروسازی اشاره شده بود. اما در طول دهه ۱۹۴۰ میلادی صنایع نظامی آمریکا این مفهوم را بازتعریف نمود و امروزه یکی از مراجع تعریف قابلیت اطمینان استاندارد نظامی آمریکا می‌باشد. از این دوره توسعه قابلیت اطمینان در صنایع نظامی و صنایع هوافضا و با پیشسازی ناسا استمرار یافت. در ایران نیز در حوزه هوافضا این موضوع شناخته‌تر می‌باشد. شرکت تویوتا نیز در توسعه مفهوم کیفیت مهندسی و به صورت مشخص قابلیت اطمینان در حوزه طراحی و ساخت خودرو کاملاً فعال می‌باشد. ایده‌های تویوتا برگرفته از کتاب هنری فورد به نام "امروز و فردا" و همچنین بازدید تایچی اهنو از مدیران تویوتا در سفر سال ۱۹۵۶ میلادی به کشور آمریکا می‌باشد. با وقوع جنگ جهانی دوم و همچنین تلاش شدید آمریکا، اروپا، شوروی و ژاپن برای برتری در فناوری و صنعت، تمام توان علمی و فناوری کشورهای یاد شده و منابع جهان ناخودآگاه در جهت توسعه و کاربردی شدن قابلیت اطمینان جمع شدند. در سال ۱۹۵۰ میلادی یک گروه از طرف صنایع نظامی آمریکا با نام AGREE با محوریت قطعات الکتریکی مامور مطالعه پیرامون ایجاد قابلیت اطمینان در سیستم‌ها گردید.

قدیمی‌ترین استفاده از مفهوم کیفیت به ۳۰۰۰ سال پیش برمی‌گردد. زمانیکه بابلی‌ها از واحدهای استاندارد برای توزین یا اندازه‌گیری کالاها به صورت توافقی بین هم استفاده می‌کردند. ردیابی از مفهوم کامل‌تر کیفیت را می‌توان در قرون وسطی و در اواخر قرن سیزدهم میلادی در اروپا مشاهده نمود. بازرسی کالای تولید شده به تدریج از اواسط قرن ۱۷ میلادی در کشور انگلستان شروع و با انقلاب صنعتی رشد فزاینده‌ای یافت. با آغاز قرن بیستم فرایندهای کنترل کیفیت و بازرسی در کارخانه‌ها جایگاهی برای خود ایجاد نمودند. در سال ۱۹۲۰ میلادی یک ایده مهم برای تحول کنترل کیفیت توسط والتر شوهارت محقق آزمایشگاه بل در آمریکا با عنوان "فقط روی محصول ساخته شده نباید کنترل شود بلکه کنترل واقعی باید در فرآیند تولید اعمال شود" مطرح گردید. والتر شوهارت که به عنوان پدر علم کنترل کیفیت شناخته می‌شود مطالعات خود را در این زمینه به صورت جدی تا سال ۱۹۳۱ میلادی ادامه داد و نتایج تحقیقات خود را در کتابی با نام "کنترل اقتصادی کیفیت محصول ساخته شده" منتشر کرد. با شروع جنگ جهانی دوم و به ویژه ورود آمریکا به این جنگ موضوع بازرسی و کنترل کیفیت با تأثیرپذیری از آموخته‌های شوهارت و ورود مفاهیم کنترل کیفیت به استانداردهای نظامی، موضوع کنترل کیفیت وارد یک عصر جدید شد. به گونه‌ای که دهه ۱۹۴۰ میلادی عملاً دوره بازرسی فنی تلقی می‌شود. در پی تولید خودروهای بی کیفیت در ژاپن و ورود Joseph M. Juran and W. Edwards Deming از آمریکا به ژاپن برای آموزش مفاهیم کنترل کیفیت به مهندسان این کشور عصری جدید آغاز شد که در نهایت به [TQI (Total Quality)] منتهی گردید. در موضوع کنترل کیفیت عملاً با ورود دمنینگ به ژاپن یک رقابت جدی میان صنایع ژاپن و صنایع کشورهای اروپا و آمریکا در گرفت که در مجموع در طی چند دهه باعث شدت گرفتن سرعت ارتقاء سطح کیفیت محصولات تولیدی این کشورها گردید. این دوره رقابت از دهه ۱۹۵۰ میلادی با عنوان دوره کنترل آماری شروع و تا دهه ۱۹۸۰ میلادی تحت عنوان دوره تضمین کیفیت ادامه پیدا نمود. در دهه ۱۹۹۰ میلادی دوره مدیریت کیفیت فراگیر [TQM (Total Quality Management)] آغاز شد و تا سال‌های اخیر ادامه یافته است. در سال‌های اخیر، به تدریج مفاهیم عمیق‌تری نسبت به TQM در حال نسج گرفتن بوده و علائم مربوط به شروع یک دوره جدید از کیفیت در حال هویدا شدن است. در این دوره جدید که از یک سو کنترل کیفیت بر پایه مهندسی قابلیت اطمینان استوار است. از سوی دیگر دامنه آن نسبت به TQM بسیار گسترده‌تر خواهد بود و علاوه بر محصول و فرایند تولید آن، ارائه خدمات به محصول و حوزه‌های آموزش و سلامتی و جامعه را نیز در بر می‌گیرد.



شکل ۱: آزمون ذرات مغناطیسی

کیفیت نزد افراد مختلف تفاوت دارد که این موضوع ربطی به مفهوم کیفیت ندارد و وابسته به مدیریت کیفیت و رویه‌ها و استانداردهایی دارد که به وسیله گروهی از کارشناسان با تمرکز بر تجارب و دانش فنی تهیه می‌شود. در این مبحث هدف معرفی موضوعات مرتبط با کیفیت و کنترل کیفیت در ارتباط با ساخت تاسیسات صنعتی نظیر پالایشگاه گاز در چند شماره و پس از بررسی موضوع در حوزهای مختلف جمع‌بندی و ارائه یک Checklist از عنوان‌ها و رویه‌ها می‌باشد.

۲ بازرسی

بازرسی اولین مفهومی است در حوزه مدیریت کیفیت به ذهن خطور می‌کند. بازرسی می‌تواند از بررسی چشمی شروع شده و تا استفاده از تجهیزات پیشرفته و دقیق برای کنترل کیفیت ادامه یابد. بازرسی لوله و اتصالات، بازرسی تجهیزات برقی، بازرسی بتن و سازه و ... نشان می‌دهد که در هر کدام از بخش‌های پروژه رویه و استانداردهایی برای بازرسی و کنترل کیفیت وجود دارد. بازرسی در همه بخش‌های یک پروژه می‌تواند به بررسی و ارتقاء کیفیت کمک کند. به عنوان مثال از اهمیت بازرسی و روش‌های آن اشاره مختصری به این موضوع در بخش جوشکاری و پایپینگ داریم و مطالب مربوط به سایر بخش‌ها در نسخه الکترونیک ارائه خواهد شد.

وجود یک لوله خراب به علت مشکل در تولید لوله یا وجود ایراد در جوشکاری، علاوه بر هزینه فراوان تعویض و توقف در بهره‌برداری، ممکن است موجب بروز خطرات جانی و مالی در پی نشت مواد قابل انفجار



شکل ۲: یک نمونه دستگاه تست اولتراسونیک

۱ کیفیت / مدیریت کیفیت

همانگونه که در مقدمه اشاره شد، کیفیت تولید محصول یا ارائه خدمات با دوره بازرسی یا بازرسی فنی در دهه ۱۹۴۰ میلادی آغاز شده و به TQM در دوره حاضر رسیده است. همچنین اشاره شد که در سال‌های اخیر دامنه TQM در حال گسترش می‌باشد. از سوی دیگر به مفهوم مهندسی قابلیت اطمینان اشاره شد که در سال‌های اخیر عملاً موضوع کیفیت نهایی محصول یا خدمات همزمان زیر مجموعه عناوین کنترل کیفیت، تضمین کیفیت و مهندسی قابلیت اطمینان قرار گرفته است.

امروزه می‌توان فرایند کیفیت را یک زنجیره از ایده اولیه و مواد اولیه تا مصرف نهایی محصول یا خدمات دانست. در ساخت یک پالایشگاه گاز کیفیت محصول نهایی را می‌توان اینگونه ردیابی نمود:

۱ « کیفیت ایده

این بخش مشخص کننده این موضوع است که هدف سرمایه‌گذار تولید محصول با چه کیفیتی است.

۲ « کیفیت مواد اولیه یا خدمات

این بخش دربرگیرنده کیفیت مواد اولیه ساخت، کیفیت تجهیزات و کالاها، کیفیت خدمات مدیریت، طراحی و مهندسی است.

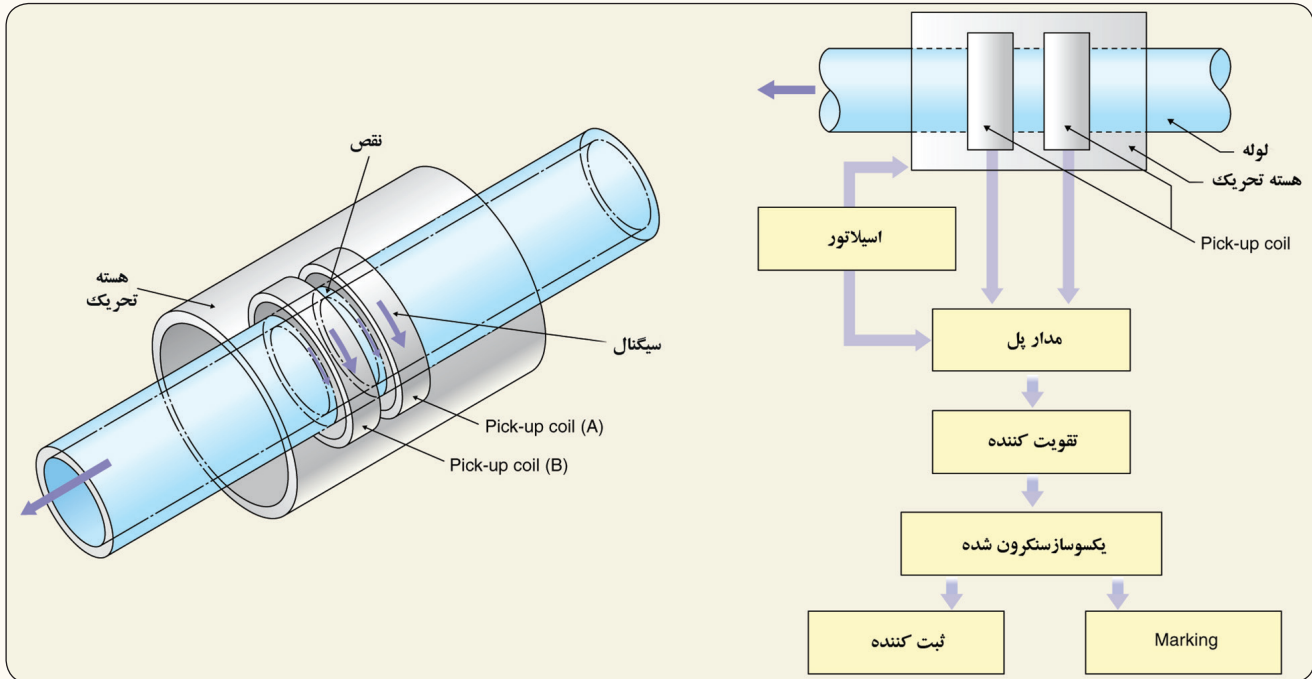
۳ « کیفیت ساخت، نصب، اجراء، راه‌اندازی و کیفیت نگهداری حین ساخت

۴ « کیفیت بهره‌برداری

۵ « کیفیت استفاده از تجارب و دانش فنی در چرخه دانش فنی

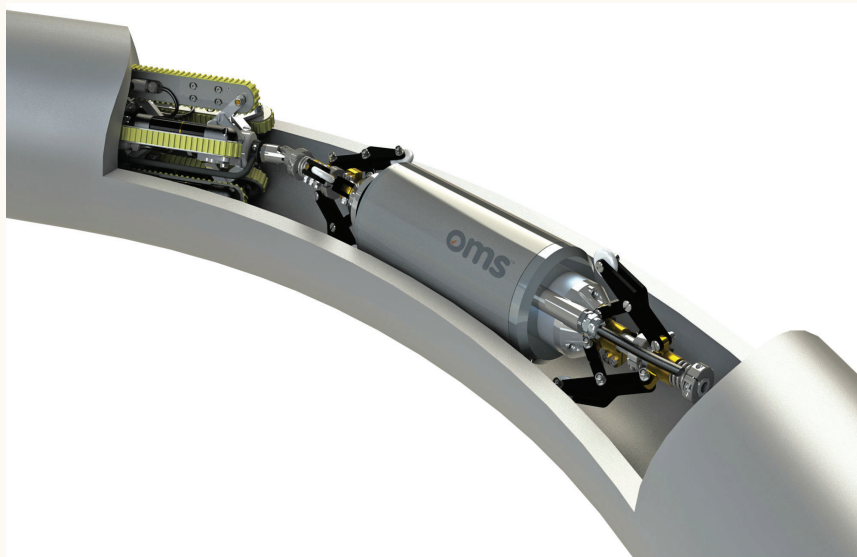
به هر حال امروزه تصور تولید یک محصول یا ارائه خدمات با کیفیت بدون توجه به ۵ مرحله بالا غیر ممکن است. به عنوان مثال ایجاد یک شرکت مهندسی برای ارائه خدمات مهندسی و تعطیل نمودن آن پس از ارائه خدمات به ساخت یک پروژه و تاسیس شرکتی جدید برای پروژه‌های جدید بی‌توجهی به ردیف ۵ دسته‌بندی بالا است. واضح است که در این میان تجارب از بین می‌رود و دستیابی به کیفیت مطلوب را دچار مشکل می‌کند.

تعریف واژه کیفیت مانند بسیاری از واژه‌های اولیه دیگر چندان آسان نیست، اما خوشبختانه بیشتر مردم بر این باور هستند که مفهوم کیفیت را می‌دانند و توان تشخیص آن را دارند. به صورت نمادین می‌توان کیفیت (Quality) را به معنای ارتقا و بهبود دائمی مشخصات کالا یا خدمات به منظور جلب اعتماد مشتری معنا نمود. البته درجه‌بندی و میزان



شکل ۳: آزمون جریان گردابی

کارخانه دیده نشود یا در مرحله حمل مشکلاتی برای لوله و اتصالات ایجاد شود. به همین دلیل منطقی است که به صورت اتفاقی تعدادی از قطعات آماده جوشکاری به صورت کامل مورد آزمون بازرسی قرار گیرند. این آزمون می‌تواند رادیوگرافی، تست اولتراسونیک یا آزمون ذرات مغناطیسی باشد. برای نظارت بر عملیات جوشکاری استانداردهای API 1104, ASW D 1.1, ASME IX, EN288 و روال تعریف شده در WPS، اسناد مورد استناد ناظرین و بازرسان می‌باشند. از بازرسی و آزمون‌های استاندارد می‌توان به بازرسی چشمی (Visual Inspection)، بازرسی ابعادی (Dimensional)، آزمون مایعات نافذ (Liquid Penetrant)، آزمون ذرات مغناطیسی (Magnetic Particle)، بازرسی جریان گردابی (Eddy Current)، آزمون اولتراسونیک (Ultrasonic)، آزمون رادیوگرافی (Radiographic)، آزمون اکوستیک (Acoustic)، آزمون نشت (Leakage)، آزمون ترموگرافی (Thermography)، متالوگرافی در محل (In-Situ Metallographic) و هیدروتست (Hydrotesting) اشاره کنیم. از میان روش‌های بیان شده، رادیوگرافی به وسیله اشعه X یا گاما از گذشته دارای کاربرد فراوانی بوده و دارای نتایج بسیار مطمئنی می‌باشد و برای بیشتر ضخامت‌های معمول لوله کشی مناسب است.



شکل ۴: بازرسی خط لوله و پایپینگ به وسیله PIG

یا مواد خطرناک و سمی شود. به همین دلیل سعی می‌گردد با انجام آزمایش و بازرسی‌های دقیق و مطابق استاندارد، میزان خطا در تولید یا جوشکاری و نصب را به حداقل رساند. برای نیل به این مقصود و حصول اطمینان از کیفیت تولید و تامین الزام‌های استاندارد، علاوه بر انجام بازرسی و آزمایش‌های مربوط به تولید لوله و اتصالات، در مرحله نصب نیز بازرسی جوش دارای اهمیت بسیار زیادی می‌باشد. هر یک از آزمون‌ها و بازرسی‌های استاندارد، محکم مناسبی در تایید کیفیت مواد اولیه استفاده شده و همچنین مناسب بودن مراحل جوشکاری می‌باشد. بازرسی جوش، فرایندی است که پس از اتمام عملیات جوش یک لوله انجام می‌پذیرد. این موضوع در حالی است که ناظر جوشکاری حین عملیات جوشکاری نیز بر رعایت استاندارد و پروسیجرهای تعریف شده نظارت می‌کند. نظارت این ناظر علاوه بر استاندارد، منطبق بر مدرک WPS می‌باشد. قبل از آغاز جوشکاری، از جوشکاران آزمون گرفته می‌شود و در صورت تایید ناظر، اجازه فعالیت می‌یابند.

یکی از مواردی که در بازرسی جوش معمول نمی‌باشد، بازرسی لوله یا اتصالات قبل از عملیات جوشکاری می‌باشد. غالباً پس از بررسی گواهی‌های صادر شده از سوی سازنده کالا و بازرسی چشمی، عملیات جوشکاری آغاز می‌شود. اما تجربه نشان داده ممکن است، در مرحله بازرسی نهایی تولید لوله و اتصالات برخی ایرادات کوچک توسط QC

۲ مهندسی قابلیت اطمینان

مطابق استاندارد MIL-STD-721C قابلیت اطمینان "احتمال کارکرد سالم و بدون اشکال سیستم برای یک مدت مشخص و در شرایط مشخص و از پیش تعیین شده" می‌باشد. قابلیت اطمینان به مفهوم احتمال عدم وقوع خطا و تواتر در رخداد آن می‌باشد. قابلیت اطمینان یک عنصر حیاتی و کلیدی در دوره ساخت و بهره‌برداری پالایشگاه بوده و می‌توان گفت مهندسی قابلیت اطمینان، حوزه‌ای از مهندسی است که وظیفه آن اعمال قابلیت اطمینان در مدیریت پروژه و بهره‌برداری می‌باشد. مهندس با مسئولیت یادشده وظیفه دارد تا در زمان طراحی، ساخت یا بهره‌برداری با مطالعه، بررسی، سنجش، آزمایش، کنترل کیفی و کمی فعالیت‌ها و ارزیابی آنها، قابلیت اطمینان را تضمین نماید. مهندسی قابلیت اطمینان در یک سیستم پیچیده نظیر پالایشگاه، نیازمند یک ساختار مدیریتی است که به صورت مناسب برای ایجاد شرایط اعمال قابلیت اطمینان طراحی شده باشد. مهندسی قابلیت اطمینان به صورت مشخص درگیر طراحی، ساخت، آزمایش، بازرسی، حمل و نقل، نگهداری در مرحله خرید، نگهداری ضمن ساخت، بهره‌برداری و نگهداری و تعمیرات می‌باشد. مهندسی قابلیت اطمینان، زمانی موثر است که شناخت، مهارت و تجربه مناسب و کافی از تجهیزات، فرایندها و سیستم‌ها وجود داشته باشد. همچنین لازم است دانش کافی از موضوعات مهم حوزه‌های مختلف بخش‌های مکانیک، پمپینگ، برق، شیمی، فیزیک و ایمنی و دانش بین بخشی نظیر الکترومکانیک وجود داشته باشد. مهندسی قابلیت اطمینان علاوه بر رابطه نزدیک با کنترل کیفیت، رابطه بسیار نزدیکی با مهندسی ایمنی و مدیریت ریسک نیز دارد. برای دستیابی به نتایج بهتر، غالباً مهندسين قابلیت اطمینان علاوه بر یک رشته تخصصی در سایر رشته‌های مرتبط نیز باید از اطلاعات کافی برخوردار باشند. کارشناسانی که امور مهندسی اطمینان را انجام می‌دهند باید نیازها و پیش‌نیازهای امور مربوط به مهندسی اطمینان را در طول توسعه سیستم و عملیات در نظر بگیرند. این نیازها معمولاً در قراردادها بیان می‌شوند. امور مهندسی اطمینان شامل انواع تحلیل‌ها، برنامه‌ریزی‌ها و گزارش‌های می‌باشند. انتخاب این امور بستگی به میزان حیاتی بودن سیستم و هزینه‌ها دارد. در یک سیستم با حساسیت بالا لازم است گزارشات شکست و

خطا در بازه‌های کوتاه اعلان گردند، در حالی که در یک سیستم غیر حساس، گزارش نهایی بعد از اتمام یک دوره عملیاتی به تنهایی کفایت می‌کند.

بخشی از وظایف اصلی و مهم مهندسی قابلیت اطمینان در پروژه عبارتند از:

« در هنگام طراحی اولیه برای جلوگیری از تداخل (Clash) و ناهماهنگی بین بخش‌های مختلف (در طول روند طراحی، مشاوره‌های مهندسی قابلیت اطمینان به سایر مهندسين، طراحی را به سمتی پیش می‌برد که حداکثر اطمینان (Reliability) با در نظر گرفتن صرفه اقتصادی برای پالایشگاه حاصل شود.)

« یافتن دلایل ریشه‌ای خطاها در مراحل نصب، راه‌اندازی و بهره‌برداری

« نظارت بر نصب تجهیزات در سایت پروژه، با توجه به اینکه در بیشتر موارد، نقرات با تجربه به تعداد کافی در هنگام نصب وجود ندارند.

« در هنگام خرید و انتخاب تجهیزات، این انتخاب باید بر اساس قابلیت اطمینان بالا برای هر تجهیز باشد و در حالت ایده‌آل نباید تجهیز به تعمیرات نیاز داشته باشد.

۵- این مهندسی با داشتن دانش به روز و پیش‌بینی و تحلیل از فناوری‌های موردنیاز می‌تواند به شرکت در کسب ارزش افزوده کمک نماید.

« این مهندسی در طول کلیه مراحل پروژه، اطلاعات مربوط به قابلیت اطمینان سیستم و تجهیزات را به روز می‌کند.

« در مرحله قبل از تولید محصول نهایی، تیم مهندسی اطمینان زیر سیستم‌های مختلف را با آزمایش‌های مخصوص به خود تایید می‌نماید.

« در هنگام راه‌اندازی وظیفه مهندسی اطمینان این است که با کمک دانش خود مانع خرابی و آسیب به تجهیزات و سیستم شود.

همچنین بخشی از فعالیت‌های مرتبط با مهندسی قابلیت اطمینان را می‌توان اینگونه بیان نمود:

« شناسایی جامع همه خطرات ممکن شامل شرایط بالقوه، حوادث، خطاهای انسانی، حالت و مکانیسم خرابی و دلایل ریشه‌ای به وسیله آزمایش‌ها یا تحلیل‌های ویژه.

« ارزش‌گذاری ریسک‌های سیستم مرتبط با انواع خطرات به وسیله تحلیل و آزمایش‌های ویژه

« ارائه پیشنهاد برای ایجاد تغییرات در طراحی، الزامات و... که به وسیله آنها ریسک‌ها پایین آمده و به سطح قابل قبولی برسند.

« انتخاب و تصمیم‌گیری برای بهترین کاهش یا تغییر و بدست آوردن توافق بر روی میزان احتمال ریسک نهایی با کمک آنالیزهای هزینه-منفعت.

در نهایت با در نظر گرفتن مفاهیم توضیح داده شده و آمار و اطلاعات ارائه شده مربوط به موضوع قابلیت اطمینان در مهندسی، همچنین با توجه به اینکه کارکرد مطمئن و ایمن یک سیستم در نهایت به کاهش هزینه‌ها، افزایش سود و ارزش یافتن نشان تجاری و سهام می‌انجامد، می‌توان گفت:

« مهندسی قابلیت اطمینان به سرعت به بخش‌های مختلف مهندسی با هدف توسعه روش‌ها و ابزارهای مناسب برای پیش‌بینی، ارزیابی و نمایش RAMS مولفه‌ها، تجهیزات و سیستم‌ها راه یافته است.

« مهندسی قابلیت اطمینان به تدریج به مجموعه‌ای از مستندات مهم قابل انتشار در مرحله طراحی برای شروع زنجیره فرایند قابلیت اطمینان تبدیل شده است.

« رقابت نزدیک جهانی در حوزه تولید و همچنین پارامترهای مهمی نظیر حفاظت از محیط‌زیست، صنایع را به تولید محصولات با قابلیت اطمینان و ایمنی بالا و نگهداشت پذیری و قابلیت تعمیر آسان و ارزان، مجبور کرده است.

منابع:

- 1: The Haynes Welding Manual by Jay Storer and John H Haynes
- 2: API Standard 1104 Welding of Pipeline and Related Facilities
- 3: www.aws.org
- 4: www.lincolnelectric.com
- 5: www.esab.com
- 6: Practical Plant Failure Analysis, L. L. Faulkner
- 7: Reliability, Maintainability and Risk, 7th Edition, Dr David J Smith, Elsevier Butterworth-Heinemann, 2005
- 8: Life Cycle Reliability Engineering, Guangbin Yang, John Wiley & Sons, 2007