Www.iepnu.com

٦

مدل‌های تولید

۱ ـ مقدمه

هدف از تولید حداقل در معنای ایده‌آل آن غنی سازی اجتماع از طریق تولید محصولاتی با عملکرد مطلوب، زیبایی مطلوب، ایمن از لحاظ محیط زیست، از نظر اقتصادی قابل تهیه، قابل اطمینان و با کیفیت بالا است. اهداف اصلی همچون صلح جهانی، ایمنی مالی و شهروندان مسئولیت پذیر، اغلب مضامینی متناقض هستند. تعریف واقع بینانه‌تری از هدف تولید، رسیدن به عملکرد، کیفیت و قابلیت اطمینان موردنظر مشتری با حداقل هزینه است. مسئولیت مدیریت تولید برقراری اولویت‌ها، اهداف ونظارت بر اجرای کار است. مهندسین تولید یا صنایع تعیین می‌کنند که چگونه می‌توان از ورودی‌های در دسترس همچون کارگران، تکنولوژی، سرمایه، مواد و اطلاعات برای دستیابی به اهداف فوق بهره جست. نگرش مطرح شده در این کتاب حول استفاده از مدل‌های تحلیلی و تجربی سیستم تولیدی است که به تصمیم‌گیری‌های مهندسی و تولیدی کمک می‌کنند.

هدف دیگر تولید فراهم آوردن کارگرانی سودرسان برای به حرکت درآوردن چرخ‌های اقتصادی است. با این وجود در طول قرن بیستم، درصد استخدام داخلی ایالات متحده در صنایع تولیدی به سرعت رو به کاهش گذارده است. این کاهش تدریجی بوده و در حدود سال‌های ۱۹۶۰ به ۳۰ درصد رسیده است. سپس نرخ کاهش با تأثیرپذیری بخش خدمات روند عکس طی کرده است. در سال‌های ۱۹۸۰ تنها ۲۱ درصد استخدام داخلی ایالات متحده در بخش تولید بوده‌است. کاهش‌های پیشین به میزان زیادی با بهره‌وری فزاینده امروز مورد توجه قرارگرفته است. در سال‌های اخیر کارایی بهبود یافتهٔ شرکای تجارت بین‌المللی امریکا، موقعیت رقابتی صنایع تولیدی ایالات متحده را به فرسایش کشانده است. کافی است نگاهی به بر چسب‌های «ساخت» خودروها، ضبط صوت، دوربین، لباس و سایر کالاهای مصرفی بیاندازیم تا این وضعیت دشوار را درک کنیم. روبات‌ها و دستگاه‌های خودکار بجای آنکه موجب از دست رفتن مشاغل گردند تبدیل به بخش ضروری فعالیت‌های تجاری شده‌اند. بدون مزایای بهره‌وری حاصل از خودکارسازی (اتوماسیون) همچنان مشاغل بیشتری از دست می‌رفتند. اقتصاد رو به رشد دهه ۱۹۶۰ حاکی از آن بود که هر محصولی که تولید می‌شد بطور بالقوه قابلیت فروش و سودآوری را داشت. انگیزه بهبود اندک اندک محصول رو به تحلیل گذاشت و کاهش بهره‌وری نیز کاملاً نادیده گرفته شد. در بازارهای جهانی امروز دیگر کالاهای تجملاتی قابل تهیه نیستند. صنعت به ما آموخت که بهبود مستمر برای تداوم بقا، یک پیش نیاز اجتناب ناپذیر است.

تولید را می‌توان بصورت تولید بخش‌های مجزا و یا فرآوری پیوسته طبقه‌بندی نمود. تولید بخش‌های مجزا با قطعات مجزایی مانند مدارهای چاپی و یاقطعات موتور که به وضوح قابل تشخیص هستند، شناخته می‌شود. صنایع فرآوری بر اساس محصولی کار می‌کنند که بطور مستمر در حال جریان است. واضح‌ترین مثال‌های این نوع صنعت، پالایشگاه نفت و صنایع شیمیایی است. این کتاب از دیدگاه تولید قطعات مجزا تحریر شده است. با این

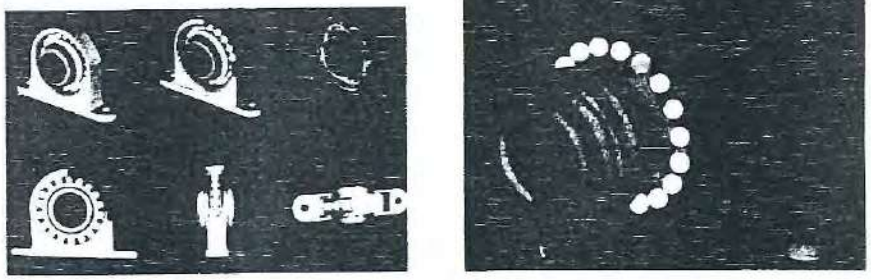
پرتال تخصصی مهندسی صنایع

Www.iepnu.com

حال بسیاری از مدل‌های این کتاب را می‌توان در صنایع فرآوری نیز بکار بست. با این وجود، معمولاً صنایع فرآوری جاذب سرمایه بوده و با ظرفیت سروکار دارند. تولید قطعات مجزا عمدتاً با زمانبندی، کنترل مواد و تخصیص نیروی کار سروکار دارد. البته انواع سیستم‌های مختلف با یکدیگر همپوشانی نیز دارند. به عنوان مثال تولید انبوه قطعات مجزا، با بسیاری از ویژگی‌های صنایع فرآوری مشترک است.

یک سیستم تولیدی را می‌توان به پنج عملکرد مرتبط تقسیم نمود. این عملکردها عبارتند از طراحی محصول، طراحی فرآیند، عملیات تولیدی، چیدمان جریان مواد، چیدمان تجهیزات و برنامه‌ریزی و کنترل تولید. جریان اطلاعات امری است که این پنج عملکرد را به حرکت درمی‌آورد، بر هماهنگی بین آن‌ها نظارت کرده و تطابق آن‌ها را با اهداف مشترک می‌سنجد. سیستم اطلاعاتی با عملکردهای حسابداری، خرید، بازاریابی، مالی، منابع انسانی و سایر عملیات اداری و پشتیبانی در تعامل است.

وظیفهٔ طراحی محصول، اخذ ورودی‌ها از بازاریابی با توجه به خواسته‌های مشتریان و تهیه و تدوین شرحی از محصول است که بتوان آن را بطور سودآوری برای تأمین خواسته‌ها تولید نمود. سابقاً از لیست‌های کنترلی که حاشیه نویسی شده بودند برای تشریح محصول استفاده می‌شد. امروزه سیستم‌های نوین طراحی به کمک کامپیوتر (CAD) جایگزین آن‌ها شده‌اند. مدل CAD را می‌توان در یک ایستگاه کاری گرافیکی به همراه یادداشت‌های موردنظر نمایش داد. این سیستم‌ها قابلیت نمایش تصاویر سه بعدی از محصول و یا برش‌های آن را از هر زاویه و با هر نورپردازی دارا هستند. مدل ذخیره شده در کامپیوتر به صورت مجموعه‌ای از لبه‌ها تعریف می‌شود که رئوس قرار گرفته در فضا را به یکدیگر پیوند می‌دهند. سطوح همواره که لبه‌ها را به هم پیوند می‌دهند با استفاده از معادلات ریاضی تعریف می‌گردند. نتیجه حاصل یک تصویر سه بعدی است که هندسه و توپولوژی (جانمایی) آن را می‌توان با نقاط، ساختار داده‌های مرتبط با نقاط و پارامترهای مرتبط با عبارت ریاضی نمایش داد. برخی از سیستم‌های CAD بجای این کار شیء را بصورت مجموعه‌ای از اشیای ابتدایی نظیر کره، مکعب و مخروط مقیاس‌بندی شده در فضا نشان می‌دهند. با تلفیق و انتقال شکل‌های اصلی، می‌توان محصول را طراحی نمود و سپس با استفاده از ابزارهای کامپیوتری مبتنی بر ریاضیات نظیر تحلیل عددی برای تعیین خواصی نظیر جرم و مقاومت تحلیل نمود. شکل ۶ ـ ۱ نماهای مختلفی از مدل CAD یک قطعه مرتاژی را نشان می‌دهد.



شکل ۶ ـ ۱ : مدل‌های طراحی محصول به کمک کامپیوتر

برنامه‌ریزی فرآیند، مشخصات توالی عملیات مورد نیاز برای تبدیل مواد خام به قطعات و مونتاژ قطعات به صورت محصول را مشخص می‌نماید. برنامه‌ریزی فرآیند به درک عمیقی از قابلیت دسترسی و قابلیت توانمندی عملیات تولیدی و نیازهای عملیاتی که توسط طراح محصول تعیین شده نیاز دارد. در انتخاب ماشین‌آلات باید عواملی نظیر اندازه قطعه، نرخ تقاضا، هزینه‌های ابزار و مصرف انرژی را درنظر گرفت. برای مثال برنامه‌ریز باید بداند که آیا یک ابزار یا ماشین خاص می‌تواند به محدودهٔ انحرافات تعیین شده دست پیدا کند. آیا یک سوراخ باید خیلی ساده ایجاد شود و یا باید یک عملیات برقوزنی روی آن انجام گیرد؟ آیا این قطعه را می‌توان قبل از لحیم‌کاری روی یک برد مدار نصب کرد ویا باید ابتدا عملیاتی انجام داد و سپس قطعه را در عملیات لحیم‌کاری نهایی به آن اضافه نمود. برنامه فرآیند نهایی مجموعه‌ای از دستورالعمل‌ها است که تعیین می‌کنند چگونه یک قطعه باید ساخته شود، این دستورالعمل‌ها شامل توالی ابزارهای ماشین، ابزارهای موردنیاز و تنظیمات ماشین است. شکل ۶ ـ ۲ یک برنامه عمومی فرآیندی را نشان می‌دهد. هر سطر حاوی اطلاعاتی است که کارگر برای تولید قطعه به آن نیاز دارد. موقعیت (مکان) نقشه‌های تفصیلی قطعه و شماره نواری که برای اجرای برنامه روی دستگاه NC مورد نیاز است نیز ممکن است به آن اضافه گردد.

نام قطعه: شفت
شماره: AS34967
برنامه‌ریز: حسینی
تاریخ: ۱۳۸۰/۱۱/۹
برگه: ۱ از ۱

بخش	ماشین	شمارهٔ عملیات	شرح عملیات	نام ابزار	شمارهٔ ابزار	زمان نصب و راه‌اندازی	واحد زمانی
۱۲۰	پرس سوراخکاری	۱۰۰	سوراخکاری با قطر "۳/۸	فیکسچر Bit	D1۴۱۵ P۹۶۷	۰/۱۰ ساعت	۰/۰۰۲
۱۲۰	سنگ عمودی	۱۱۰	سنگ‌زنی بخش جلویی	فیکسچر سنگ نهایی	GC۱۱۱ S۳۶۴۱	۰/۱۵ ساعت	۰/۰۰۱
۱۲۰	تراش	۱۲۰	برش با قطر ۱/۵۴۰±۰/۰۰۱	فیکسچر برش	HS۳۴۰ LC۹۶۷	۰/۲۰ ساعت	۰/۰۱۴
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮

شکل ۶ ـ ۲ : یک برنامه فرآیند نمونه

Www.iepnu.com

عملیات تولیدی عموماً یا ماهیت ساختنی دارند و یا مونتاژی. ساخت به برداشت مواد از مواد اولیه (خام) و یا تغییر در حالت (فرم) آن به منظور دستیابی به قالبی مفیدتر اطلاق می‌گردد. تزریق پلاستیک اکستروژن آلومینیوم، تراش قطری یک قطعه، ایجاد یک سوراخ و یا خم کردن یک لبه مثال‌هایی از این دسته هستند. مونتاژ به تلفیق مجزا و یا مواد خام اولیه به منظور تولید یک واحد تلفیقی با ارزش‌تر اطلاق می‌گردد. نصب یک برد روی شاسی یک کامپیوتر و یا اضافه کردن پایه به میز مثال‌هایی از این دسته هستند. در عمل ضروری است که تعاریف خود را قدری ساده‌تر کرده و یک سیستم نمونهٔ تولیدی را بصورت سیستمی در نظر بگیریم که ابتدا قطعات را تولید کرده وسپس آن‌ها رادر قالب یک محصول نهایی مونتاژ می‌کند. با این حال، فعالیت‌های اضافه کردن لایه‌هایی به یک برد که پس از آن روی برد سوراخکاری خواهد شد تمام بخش‌های ساخت یک برد را تشکیل می‌دهند. علاقه ما این است که از سطح فرآوری (فرآیند) منفرد، گامی به عقب گذاشته و دریابیم که چگونه مواد در یک سیستم تولیدی جریان پیدا می‌کنند و چگونه فرآیندها به منظور دستیابی به حجم مطلوب تولید با کیفیت مورد نظر با یکدیگر ارتباط پیدا می‌کنند. واضح است که مواردی نظیر آماده‌سازی ابزار و تواقص عملیاتی در تولید اهمیت دارند، ولی این موارد در قلمرو هدف این کتاب نیست.

اگرچه محتوای این کتاب صرفاً به بحث در مورد جابجایی مواد و طرح‌ریزی تجهیزات اختصاص داده نشده است (می‌توانید به Tompkins, White [1984] مراجعه کنید) ولی با این موارد مرتبط می‌باشد که در صورت لزوم اشاره‌ای به آن‌ها خواهد شد. با این که اغلب به دو مورد اخیر از دیدگاه عمومی طراحی سیستم می‌اندیشیم، ولی در اینجا مایلیم پیکربندی‌های خاص سیستم را مورد ارزیابی قرار دهیم. حمل و نقل مواد با تکنیک‌های مورد استفاده برای حمل قطعات، تجهیزات و ابزارها و ضایعات در کارخانه سر و کار دارد. چیدمان تجهیزات با نحوهٔ قراردهی فیزیکی فرآیند تولید از طریق تجهیزات، روابط فرآیندهای مرتبط، ارایهٔ خدمات مورد نیاز نظیر هوای فشرده، روشنایی، برق و تهویه مطبوع به محیط کار و حذف محصولات زائد نظیر دود، رنگ، براده‌ها و مواد خنک کننده از محیط سروکار دارد. در این فرآیند، طراح سیستم جریان مواد نباید مورد بی‌توجهی قرارگیرد. طراحی محصول می‌تواند به دلیل توجه ناکافی به چیدمان و انتقال مواد با شکست مواجه شود.

برنامه‌ریزی، زمانبندی و کنترل تولید، اجزاء با اهمیتی از سیستم تولیدی را تشکیل می‌دهند. برنامه‌ریزی تولید مسئول تلفیق اطلاعات مربوط به تقاضای بازار، ظرفیت تولید و سطوح فعلی موجودی به منظور تعیین سطوح تولید برنامه‌ریزی شده بر حسب گروه (خانواده) محصول و برای دوره‌های میان مدت تا بلند مدت است. این برنامه جامع از طریق گام‌های متعددی نهایتاً به برنامه‌های زمانبندی کوتاه مدت تجزیه می‌شوند و اهداف هر مرکز کاری را نشان می‌دهند. سپس کارهایی را که به مرکز کاری اختصاص داده شده‌اند بر حسب توالی و ترتیب بارشدن روی ماشین‌آلات تهیه می‌شوند. هدف این کتاب تعیین چگونگی دستیابی به بهترین برنامهٔ سیستم تولیدی با کارایی مطلوب است. در این کتاب دربارهٔ فرآیند برنامه‌ریزی، زمانبندی و کنترل تولید بحث نخواهیم کرد. خوانندهٔ برای کسب اطلاعات بیشتر می‌تواند به کتب متعددی که در این زمینه وجود دارد و تعدادی از آن‌ها نیز در منابع این کتاب ذکر شده‌اند، رجوع کند.

در بسیاری از این کتاب‌ها فرض بر این است که برنامه‌های طراحی و فرآوری محصول شناخته شده هستند. فرض بر این است که سیستم اطلاعاتی نیز وجود دارد. تمام مدل‌هایی که در این کتاب‌ها ذکر شده‌اند به وجود

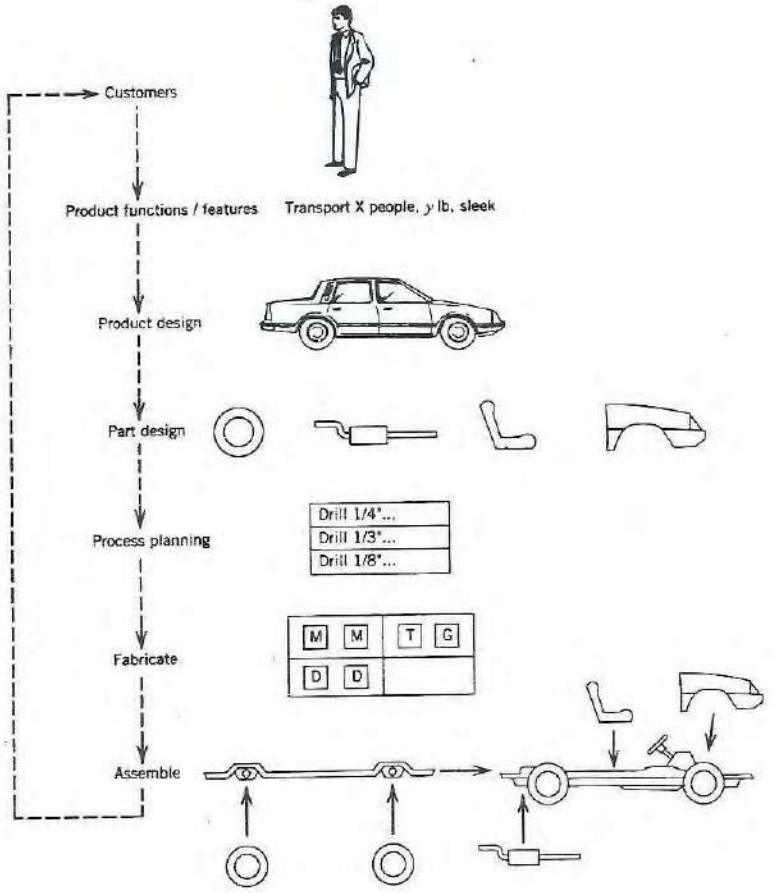
داده‌هایی قابل اطمینان نیاز دارند که در حالت ایده‌آل بتوان آن‌ها را از طراحی محصول، برنامه‌های تولید و سیستم اطلاعاتی گردآوری نمود. گردآوری ورودی‌های مدل یکی از مشکل‌ترین جنبه‌های هر مدل سازی است. ممکن است نیاز به استفاده از داده‌های مختلف از منابع متعدد باشد و حتی لازم باشد که عدم سازگاری منابع داده‌ها اصلاح گردد. سیستم‌های حسابداری با نگاهی به تنظیم اظهارنامه‌های مالی برای مالیات و اهداف موردنظر سهامداران طراحی شده‌اند. علیرغم اینکه مدیریت سطح بالا با جمع‌آوری داده‌های جامع از سطوح میانی اقدام به برنامه‌ریزی می‌نماید با این وجود تصمیم‌گیری‌های مدیریتی اغلب جایگاه دوم را به خود اختصاص می‌دهند. در سطوح پایینی سازمان، مهندسین تولید وقتی درخواست هزینه یا مقدار بهره‌وری خاصی را می‌کنند. البته ممکن است به علت عدم وجود داده‌های مناسب به جواب مطلوبی نرسند. فقدان داده باعث اصلاح و یا تغییر مدل می‌گردد. هیچ روش استانداردی برای جمع‌آوری ورودی‌های یک مدل وجود ندارد. با اینهمه داشتن ورودی‌های قابل اطمینان برای موفقیت یک مدل امری حیاتی است؛ امروزه نیز همانند همیشه قانون "GIGO"[1] صادق است. در نهایت، فردی که مدلسازی می‌کند مسئول اعتبار مدل نیز هست. بنابراین درک ورودی‌هایی مورد نیاز مدل و ورودی‌هایی که در دسترس هستند و یا فراهم خواهند شد برای مدلسازی امری واجب است. تعاریف پارامترها باید و به منظور اجتناب از ارتباط غلط بین تولیدکننده و استفاده کنندهٔ داده‌ها، واضح و روشن باشد. مدل‌ها باید برای تضمین صحت ورودی‌ها بررسی شوند. پارامترهای مدل باید به طور تصادفی تغییر کرده و حساسیت مدل نسبت به پارامترها تعیین گردد. پارامترهایی که حساسیت زیاد نسبت به تغییرات دارند باید به دقت مورد مداقه قرار گیرند.

شکل ۶ ـ ۳ نقش عملکردهای اصلی فرآیند تولید را نشان می‌دهد. این عملکردها مستقیماً به توالی فعالیت‌های تولیدی مرتبط هستند. اگر چه این عملکردها طوری نشان داده شده‌اند که گویی متوالیاً رخ می‌دهند، ولی تجربیات فعلی حاکی از گرایش **مهندسی همروند** (یا مهندسی همزمان یا موازی) دارند، که در آن گروه‌های طراحی سعی در یکپارچه‌سازی طراحی و گام‌های توسعه دارند. با در نظر گرفتن ابزارآلات، مونتاژ و نقل و انتقال در طول طراحی محصول، امید است که با اجتناب از طراحی محصولی که قابل تولید نیست بتوانیم زمان مورد نیاز برای ورود محصول به بازار را کاهش دهیم.

البته عملکردهای اجرایی نظیر حسابداری، دریافت سفارش، مالی (اعتبار) و فروش نیز ضروری هستند. کل سیستم تولیدی در شکل ۶ ـ ۴ نشان داده شده است. عملکردهای اجرایی بطور خلاصه نشان داده شده‌اند ولی بقدر کافی شامل جزئیات هستند تاسیستم تولیدی و ارتباطات داخلی آن را نشان دهند. تعمداً از تضمین کیفیت به عنوان یک عملکرد جداگانه صرفنظر کرده‌ایم. کیفیت بخشی از کار هر یک از افراد است و در هر عملکرد وجود دارد. یکی از اجزاء کلیدی در شکل ۶ ـ ۴ استفاده از پایگاه داده‌های یکپارچه است. این شکل پایگاه داده‌های یکپارچه‌ای را پیشنهاد می‌کند که برای سیستم‌های تولیدی یکپارچهٔ کامپیوتری[2] (CIMS) آینده پیش‌بینی شده است. فایل‌های داده‌ها را می‌توان روی شبکه توزیع نمود به طوری که تمام کاربران قابلیت دستیابی به داده‌ها و اطلاعات بطور همزمان داشته باشند. یک واحد سازمانی مسئولیت صحت و بهنگام سازی هر داده را به عهده دارد ولی تمام عملکردهایی که این داده‌ها مربوط به آن‌ها می‌شوند، به داده‌ها دسترسی خواهند داشت. چنین سیستم‌هایی به قالب

1. *Garbage In Garbage Out*
2. *Computer Integrated Manufacturing Systems*

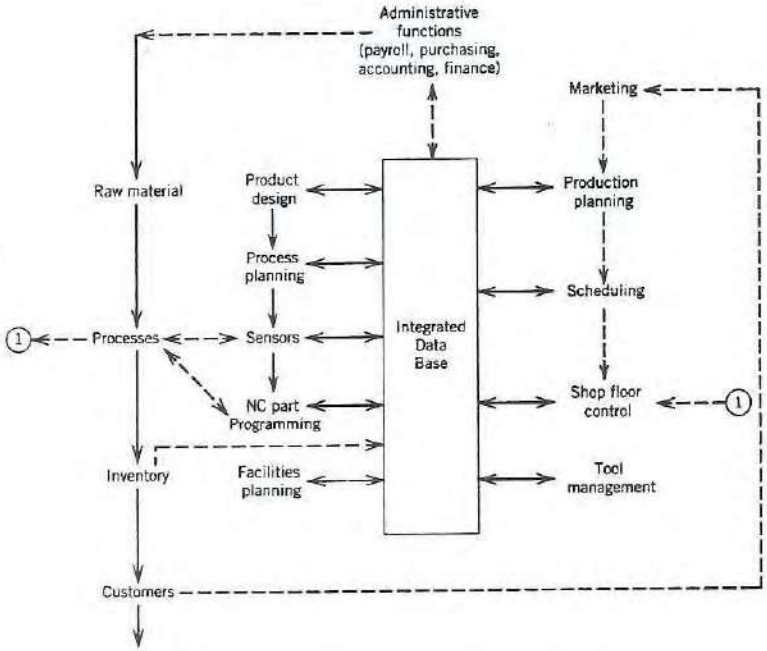
Www.iepnu.com



شکل ۶ـ ۳ : نمای طراحی محصول در فرآیند تولید

جهانی داده‌ها، استانداردهای ارتباطی و پروتکل‌ها وابسته خواهند بود.

به منظور ساخت و استفاده بهتر از مدل‌ها، باید به سیستم تولیدی به صورت گروه مرتبطی از *فعالیت‌ها، مواد، منابع، محصولات، برنامه‌ها و وقایع* نگاه کرد. برنامه‌ها، شامل برنامه‌های فرآیند و برنامه‌های تولیدی هستند. مواد از طریق منابعی نظیر کارگران، سیستم نقل و انتقال و ماشین‌آلات جریان می‌یابند و تبدیل به محصولات می‌شوند. منابع نیز برای اثرگذاری روی تبدیلات به فعالیت‌ها تخصیص می‌یابند. غالباً منابع فعالیت‌ها را شروع کرده و خاتمه می‌بخشند. اطلاعات وضعیت منابع و مواد/ محصولات نشان دهندهٔ وضعیت سیستم تولیدی در هر لحظهٔ زمانی است.



شکل ۶ـ ۴ : فعالیت‌های تولید و جریان اطلاعات

۲ ـ انواع سیستم‌های تولیدی

در این بخش هدف ما تشریح انواع مختلف پیکربندی فرآیندها و یا چیدمان تجهیزات است. توجه داشته باشید که سیستم‌های تولیدی ماهیتا سلسه مراتبی هستند. در نظرگرفتن چهار سطح در این رابطه می‌تواند برای خوانندگان مناسب باشد. در سطح بالا کل تجهیزات قراردارند. تجهیزات متشکل از دپارتمان‌ها است. در این کتاب ما با ساماندهی دپارتمان‌ها سروکار خواهیم داشت. یک دپارتمان می‌تواند شامل ۱۰ ماشین سنگ‌زنی در کارگاه بوده و یا محوطه‌ای باشد که در آن محصولی ساخته می‌شود و انواع مختلفی از ماشین‌آلات در آن قرار دارد. به انتخاب چگونگی شکل‌دهی دپارتمان‌ها، نوع چیدمان گفته می‌شود.

دپارتمان‌ها شامل مراکز تولیدی هستند. یک مرکز تولیدی نیز شامل یک یا چند ماشین است که نوعاً به صورت یک موجودیت (زمانبندی) می‌شوند. مرکز کاری همچنین شامل کنترل کننده ماشین، حس‌گرها، آدمواره‌ها (Robot) و یا سایر تجهیزات حمل و نقل است. گزارش زمان و کار صرف شده معمولاً در سطح مرکز کاری انجام تهیه می‌گردد، که برای این منظور هر مرکز کاری یک نفر را در اختیار دارد. پایین‌ترین سطح دربرگیرنده قطعات منفرد تجهیزات نظیر ماشین ابزارها، کنترل‌کننده‌ها یا آدمواره‌ها می‌باشد.

Www.iepnu.com

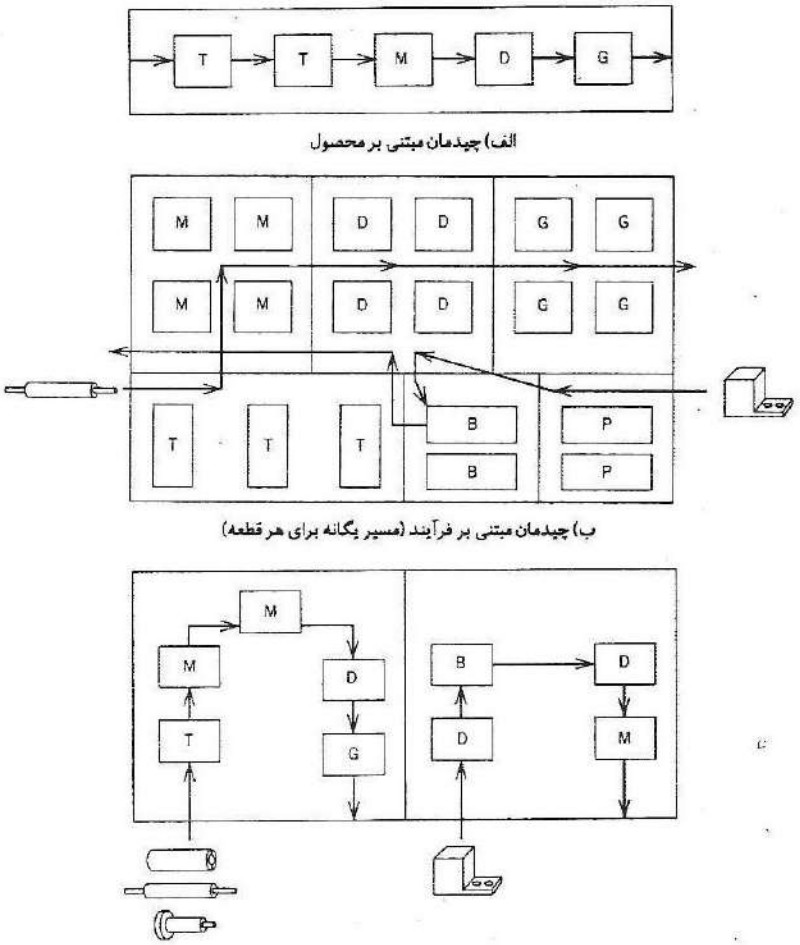
سیستم‌های تولیدی را می‌توان با تعدادی ویژگی طبقه‌بندی نمود. در این کتاب در مورد صنایع تکنیکی و فرآیندی و همینطور صنایع ساخت و مونتاژ به عنوان یک دسته‌بندی بالقوه بحث شده است. مواد خام و اولیه نیز یکی از مشخصه‌های با اهمیت می‌باشد. قطعاً قطعات پلاستیک به فرآیندهایی کاملاً متفاوت از ورقه‌های فلزی نیاز دارند و قطعات آلومینیومی بطریقی متفاوت از قطعات ریخته‌گری شدهٔ آهنی فرآوری می‌گردند. از نظر ما آنچه اهمیت دارد راهکاری است که برای گروه‌بندی فیزیکی فرآیندها و پیکربندی چیدمان تجهیزات بکار می‌رود. بسیاری از مدل‌هایی را که در این کتاب ارایه شده اند، می‌توان برای مراکز کاری ساخت و مونتاژ و حتی برای بسیاری از انواع مواد خام بکار برد. با این وجود هر مدل برای یک نوع از ساختار (سازمان) تجهیزات طراحی شده است. پیکربندی‌های متداول چیدمان تجهیزات عبارتند از : چیدمان مبتنی بر ***محصول، فرآیند، تکنولوژی گروهی و مکان ثابت.***

تفاوت بین این چهار راهکار در سیستم جریان مواد آنها بسادگی قابل رؤیت است. شکل ۶ ـ ۵ جریان مواد را برای چیدمان مبتنی بر محصول، فرآیند و تکنولوژی گروهی نشان می‌دهد. چیدمان مبتنی بر مکان ثابت برای محصولات بزرگی همچون کشتی، ساختمان و هواپیما کاربرد دارد، چرا که اندازهٔ محصول انتقال آن را بین عملیات مختلف تولیدی غیرعملی می‌سازد. تمام قطعات و فرآیندها، نظیر وسایل عملیات جوشکاری در کنار محصول انجام می‌شوند. در چیدمان مبتنی بر محصول، فرآیند و تکنولوژی گروهی، محصول در بین فرآیندها حرکت می‌کند. در این فصل به بررسی سه نوع چیدمان اول خواهیم پرداخت و بیشتر از این در مورد چیدمان مکان ثابت بحث نمی‌کنیم.

چیدمان مبتنی بر محصول برای یک محصول خاص طراحی می‌شود. گاهی به چیدمان مبتنی بر محصول، خطوط جریان نیز اطلاق می‌گردد، چرا که ماشین‌آلات به گونه‌ای قرار می‌گیرند که محصول از اولین ماشین به دومین و از دومی به سومی و تا آخر جریان پیدا می‌کند. مواد خام از ابتدای خط وارد فرآیند تولید می‌شود. با تکمیل فرآوری در آخرین دستگاه، مواد خام به محصول نهایی تبدیل شده است. با تعدیل پیچیدگی و حجم محصول، خطوط تولید مبتنی بر محصول بدون شک مؤثرترین و کاراترین چیدمان هستند. خطوط مونتاژ و خطوط انتقال مثال‌هایی از چیدمان‌های مبتنی بر محصول می‌باشند. مزیت چیدمان مبتنی بر محصول، زمان عملکرد بسیار پایین و سرمایه کار در جریان پایین است. کار در جریان [1] (WIP) دسته‌هایی از مواد است که برای تولید به کف کارگاه ارسال شده‌اند ولی تاکنون تکمیل نشده‌اند. چیدمان مبتنی بر محصول به دلیل جلوگیری از صرف این هزینه‌ها، مؤثرترین راه می‌باشد. شکل‌دهی به یک چیدمان مبتنی بر محصول به معنی اختصاص فرآیندهای مورد نیاز تولیدی به محصول است. تقاضای بسیاری از محصولات آنچنان نیست که وجود خود تولید را توجیه نماید. خطوط جریان برای تولید انبوه مورد نظر هستند. ماشین‌آلات در خطوط جریان اغلب بطور خاص برای محصول طراحی شده‌اند و بسادگی قابل تطبیق با محصولات دیگر نیستند. این کار از لحاظ اقتصادی امکان‌پذیر نیست مگر آن که محصول حجم مناسبی داشته باشد که بتواند هزینهٔ آرایش مجدد تجهیزات در خط جدید و هزینه استهلاک کامل تجهیزات در تولید را جذب نماید.

---

1. Work In Process



الف) چیدمان مبتنی بر محصول

ب) چیدمان مبتنی بر فرآیند (مسیر یگانه برای هر قطعه)

ج) چیدمان مبتنی بر تکنولوژی گروهی (سلولی)

شکل ۶ ـ ۵ : انواع چیدمان تولیدی

برآوردها نشان می‌دهند که بیش از ۷۵ درصد تولید در دسته‌هایی کمتر از ۵۰ قلم بوقوع می‌پیوندد، در چنین محیط‌هایی، ماشین‌الات باید قابلیت انجام عملیات تولیدی متعددی را روی قطعات متعدد داشته باشند. پاسخ قدیمی برای این کار استفاده از یک سیستم کارگاهی و یا همان راهکار چیدمان براساس فرآیند بود. دپارتمان‌ها شامل ماشین‌آلاتی با قابلیت‌های مشابهی هستند که عملکردهای یکسانی را انجام می‌دهند. از اینرو، به این راهکار ***چیدمان عملیاتی*** نیز اطلاق می‌گردد. برای مثال ممکن است دپارتمانی از ماشین‌های تراش، ماشین‌های سنگ‌زنی و ماشین‌های منگنه‌زنی تشکیل شده باشد. ممکن است دسته‌های بعدی که به یک مرکز کاری تخصیص می‌یابند به

Www.iepnu.com

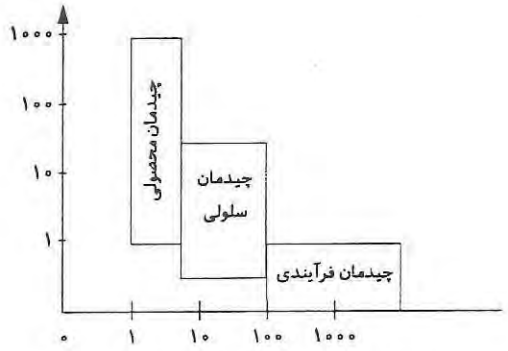
پرتال تخصصی مهندسی صنایع

ابزارها و تنظیمات بسیار متفاوت نیاز داشته باشند. در این حالت نیاز به اپراتورهای بسیار ماهر نیز می‌باشد. برخلاف چیدمان‌های مبتنی بر محصول، چیدمان مبتنی بر فرآیند با زمان توان عملیات بالا و WIP زیاد مشخص می‌گردد. پراکندگی جغرافیایی عملیات مورد نیاز هر محصول منجر به پیچیده شدن تنظیم اولویت‌های مربوطه می‌شود که ناشی از انجام کارهای غلط توسط مراکز کاری است. یافتن مرزی که مزایای موجود در چیدمان فرآیندی را ارتقاء بخشد، دشوار است. وقتی که چیدمان محصولی قابل توجیه نباشد، چیدمان فرآیندی اجتناب ناپذیر می‌گردد. انباشت تجربهٔ فرآیند به صورت کارگاهی، یکی از مزایای این نوع چیدمان است. تکنولوژی گروهی و یا تولید سلولی را می‌توان برای تبدیل سایر روش‌های چیدمان فرآیندی در محیطی مجازی برای چیدمان محصولی بکار برد. قطعات مشابه با هم و به مقدار مناسبی گروه‌بندی می‌شوند تا ماشین‌آلات مربوط به خود را توجیه نمایند. آنگاه چیدمان یک سلول فقط برای تولید همین گروه از قطعات شکل می‌گیرد. ذکر این نکته با اهمیت است که تولید سلولی بعنوان یک نوآوری تکنولوژیکی بطور بالقوه اهمیتی برابر با کنترل عددی و روباتیک دارد. ممکن است آرایش ماشین‌آلات در یک سلول با یک الگوی جریان کامل امکان‌پذیر باشد و یا نباشد؛ یعنی اینکه ممکن است تمام قطعات از توالی یکسانی در استفاده از ماشین‌آلات پیروی نکنند. با این وجود در این مورد هم استفاده از ماشین‌آلات در محیط فیزیکی اختصاص داده شده برای تولید مجموعهٔ قطعات خاص باعث تسهیل زمانبندی و کنترل شده و به طور اساسی مجهز به کاهش زمان راه‌اندازی، جابجایی مواد، wip و افزایش توان عملیاتی می‌گردد.

نقاط ضعف و قوت هر یک از انوع چیدمان مبتنی بر محصول، فرآیند و سلولی در جدول ۶ ـ ۱ نشان داده شده است. هر سیستم را می‌توان به عنوان بهترین گزینه برای محیط مناسب آن در نظر گرفت. محیط را می‌توان با در نظر گرفتن تنوع و حجم محصول مشخص نمود. چیدمان مناسب برای ترکیبی از حجم تقاضای محصول و تنوع محصولات یا قطعات تولید شده، در شکل ۶ ـ ۶ نشان داده شده است. به عنوان یک قاعده کلی و عملی، امکان انتخاب بین سلول‌های موجود در چیدمان فرآیند و سلول‌های خطوط جریان (یک خط محصول، ضرورتاً سلول یک خط جریان است) و سلول‌های ساختار نیافته (به شکل جریان مواد) است. در آخر خاطرنشان می‌شود که این سلول‌ها تنها به هنر تحلیل‌گر و نه به محدودیت‌های ذاتی روش محدود می‌شوند.

جدول ۶ ـ ۱ : ویژگی‌های عمومی انواع چیدمان

ویژگی	محصول	فرآیند	گروهی	مکان ثابت
زمان توان عملیات	پایین	بالا	پایین	متوسط
کار در جریان	پایین	بالا	پایین	متوسط
سطح مهارت	انتخابی	بالا	بالای متوسط	مرکب
انعطاف‌پذیری تولید	پایین	بالا	بالای متوسط	بالا
انعطاف‌پذیری تقاضا	متوسط	بالا	متوسط	متوسط
کارایی ماشین	بالا	زیر متوسط	بالای متوسط	متوسط
کارایی کارگر	بالا	بالا	بالا	متوسط
هزینه تولید هر واحد	پایین	بالا	پایین	بالا



شکل ۶ ـ ۶ : مقایسهٔ حجم و تنوع

۳ ـ مبانی سیستم‌های تولید

نظام علوم و مهندسی بر قوانین یا اصول ابتدایی استوارند. بنابراین مطالعه سیستم‌های تولیدی نیز از این قاعده مستثنی نیست. در این بخش چندین قاعده و مثال را عنوان خواهیم کرد و خواننده باید توجه داشته باشد که در بسیاری از مثال‌ها از قواعد ابتدایی علمی نظیر قوانین اول و دوم ترمودینامیک[1] استفاده شده است. متأسفانه تمیز دادن مبانی خاص سیستم‌های تولیدی بسیار دشوار است و تلاش زیادی برای استخراج وسیع‌تر قواعد مورد پذیرش برای طراحی سیستم و عملیات مبتنی بر این قواعد انجام نشده است.

محیط طبیعی به آهستگی تغییر می‌کند. پدیده‌های فیزیکی نظیر گرانش به طور ثابت در طول زمان و در فضا ادامه دارند که تشخیص و توصیف مسائل را تسهیل می‌کنند. انسان‌ها برای هزاران سال این سیستم‌های ایستای مطلق را مطالعه کرده‌اند. از سوی دیگر سیستم‌های تولیدی نسبتاً جدید، پیچیده و پویا هستند. بجای مشخصات ذاتی، کارایی این سیستم‌ها با تغییر در دانش و نیازهای بشری تغییر کرده است. اتم‌ها، مولکول‌ها و ... به صورت عناصر مشخص تعریف می‌شوند. اگر جرم یک شیء را بدانید، نیروی گرانش آن را نیز خواهید دانست. با این حال در یک سیستم تولیدی، تعدادی ماشین‌آلات یکسان می‌توانند نرخ تولید، زمان عملکرد و کیفیت کاملاً نامتجانسی را ارایه نمایند. قواعد ثابت طبیعی، راهنمای تغییر شکل مواد، تحت حرارت و فشار هستند. همین مطلب در مورد انتقال مواد از طریق فرآیندهای ابتدایی تولید نیز صادق است.

با این حال در زمان طراحی سیستم، انسان برای تبدیل و یکپارچه‌سازی اجزاء، ساختاری مصنوعی ایجاد می‌کند. این ساختار شامل چگونگی قرارگیری و نگهداری ماشین‌آلات، چگونگی دسته‌بندی و ارسال قطعات و چگونگی اندازه‌گیری کارایی می‌گردد. حتی اصطلاحات و چارچوبه کاری که از آن طریق به سیستم نگاه می‌کنیم نیز

---

۱. *قانون اول ترمودینامیک عنوان می‌کند که انرژی در یک سیستم ذخیره شده است و قانون دوم حاکی از آن است که آنتروپی هر سیستم به طور طبیعی در طول زمان افزایش پیدا می‌کند.*

Www.iepnu.com

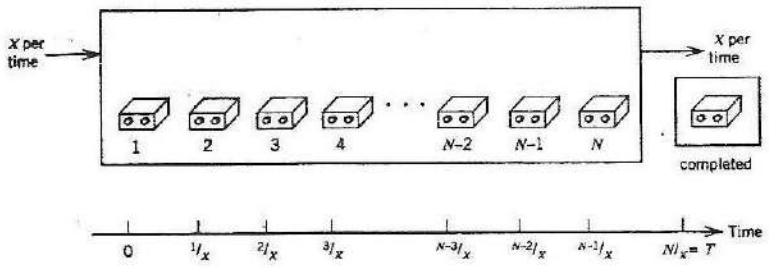
مصنوعی و دستخوش تغییر در طول زمان می‌باشد. حرارت را می‌توان بطور مطلق اندازه‌گیری نمود که تعریفی استاندارد برای آن وجود دارد. ولی چگونه می‌توان کارایی ماشین را در نظر گرفت؟ آیا چنین اندازه‌گیری از کارایی ماشین‌آلات شامل زمانی که اپراتور صرف جستجو برای ابزارآلات مناسب، تولید محصول معیوب و یا باراندازی ماشین در سرعتی پایین‌تر از سرعت بهینه می‌نماید نیز می‌شود؟ چگونه می‌توانیم در عمل بدانیم که چه تعریفی بکار برده شده است؟ با وجود فقدان تجربه و چارچوبه کاری استاندارد، مهم است که مبانی سیستم‌های تولیدی را درک نموده و شروع به بیان درک فعلی خود نماییم. خوشبختانه آینده آگاهی و تعاریف استاندارد بیشتری به همراه خواهد داشت و لذا امکان وجود چارچوبه کاری ثابتی برای توصیف و ارزیابی سیستم را بوجود خواهد آورد.

قانون اول : (قانون Little) "نرخ تولید × زمان عملکرد = WIP"

شاید قانون لیتل ([Little [1961) به عنوان اصل شناخته شدهٔ سیستم‌های تولیدی است که به صورت گسترده مورد استفاده قرار می‌گیرد. سطوح WIP و زمان عملکرد مرتبط با آن، مقادیر میانگین هستند. این قانون در تمام سطوح کاربرد دارد: قطعات مجزای تجهیزات، مراکز کاری، دپارتمان‌ها و سیستم‌ها. تنها لازم است که سیستم را در حالت ثبات خود در نظر بگیریم. WIP با زمان نسبت مستقیم دارد که ثابت این نسبت، نرخ تولید است. از آنجا که ما حالت ثبات را درنظر می‌گیریم، نرخ تولید نیز نرخ ورود محصول به سیستم تولیدی در نظر گرفته می‌شود. البته اثبات این امر چندان دشوار نیست. اما بجای اثبات این قانون از شکل ۶ ـ ۷ استفاده می‌کنیم. سیستم را بعنوان یک فرآیند مجزا در نظر بگیرید. فرض کنید که نرخ تولید در حالت ثبات برابر با X باشد. N کار در سیستم وجود دارد. فرض کنید که سیستم شامل N فضای خالی است که هر یک توسط یک کار اشغال شده است. در هر 1/X واحد زمانی، کار جدیدی وارد سیستم شده و هر کار در سیستم، یک محل به جلو می‌رود. به نظر شما چقدر طول می‌کشد که یک کار از سیستم عبور کند؟ با صرف 1/X واحد زمانی در هر یک از نقاط N گانه سیستم، مدت زمان عبور کار مطابق با قانون Little برابر است با :

$$T = N(1/X) \qquad \text{و یا} \qquad N = XT$$

قانون Little نتایج بسیار مهمی دارد. معمولاً افزایش سطح WIP با ارسال مواد بیشتر به کف کارگاه، هم نرخ تولید و هم زمان عملکرد را افزایش خواهد داد. با نزدیک شدن نرخ تولید به ظرفیت (که حداقل یک ماشین کاملاً



شکل ۶ ـ ۷ : نمایش قانون Little

مورد استفاده قرار گرفته باشد)، افزایش نرخ تولید کاهش یافته و افزایش بیشتر WIP نیز افزایش زمان عملکرد را نتیجه خواهد داد. به همین ترتیب اگر زمان عملکرد زیاد بنظر می‌رسد، نمی‌توان آن را با اضافه کردن کارهای بیشتر جبران نمود. ارسال زود هنگام کارها، ممکن است براحتی زمان عملکرد را افزایش دهد. اگر سطوح WIP باید تحت کنترل درآیند، باید در پایین‌ترین سطحی که تقاضا را برآورده می‌کنند، باقی بمانند. مدیرانی که ادراک آن‌ها به آنان جز این می‌گوید به خطا می‌روند. به همین ترتیب متوازن کردن حجم کار و جریان کار همانند یک خط مونتاژ می‌تواند نرخ تولید را برای یک سطح فرضی WIP افزایش دهد، لذا کاهش زمان عملکرد و WIP مشخصه‌های یکسانی در هر چیدمان دارند.

قانون دوم : «ماده ثابت است»

سیستم‌های تولیدی برای فرآوری مواد از حالت خام به وضعیت محصول ساخته شده طراحی شده‌اند. فرآوری در یک ایستگاه کاری مانند برش فلزات اغلب بخشی از مواد را از بین می‌برد. برای روشن شدن وضعیت کار این براده‌ها و هر ابزار قابل مصرف، باید پیش‌بینی‌هایی صورت گیرد. تولیدات مناسب به ایستگاه کاری بعدی انتقال می‌یابند، در حالی که قطعات تولیدی رد شده، جزء ضایعات محسوب می‌شوند و یا باید دوباره روی آن‌ها کاری صورت گیرد. مدل‌های تولیدی باید معادلات توازن را برآورده کنند و نشان دهند که تفاوت بین ورود و خروج مواد از ایستگاه کاری برابر جمع کل موجودی است. یک سیستم با ثبات در بلند مدت نمی‌تواند انباشت موجودی داشته باشد. ورودی باید برابر خروجی باشد.

این قانون نه تنها در ایستگاه‌های کاری بلکه برای کل کارخانه و فضای مرتبط با مواد و ابزار نیز صادق است. بسط این موضوع در مورد اینکه مقدار انرژی ثابت است می‌تواند جالب باشد. این کار برای تعیین شرایط محیطی در ایستگاه کاری بسیار اهمیت دارد، چرا که انسان‌ها تنها مقداری انرژی برای مصرف دارند و باید فعالیت‌هایی را که به آن‌ها تخصیص داده می‌شوند، عاقلانه انتخاب کرد.

قانون سوم : «هرچه حوزهٔ کاری سیستم بزرگتر باشد، قابلیت اعتماد آن کمتر است»

طراحی، هماهنگ سازی و حفظ و ابقای سیستم‌های بزرگ ذاتاً دشوار است. اصل حاصل از تئوری قابلیت اطمینان این است که اگر (بطور آماری) N قطعهٔ مستقل (مجزا) در سیستم داشته باشیم که هر یک قابلیت اطمینانی برابر r_i به ازای $i = 1, ..., N$ دارند، آنگاه احتمال عمل کردن کل سیستم برابر با $\prod_{i=1}^{N} r_i$ می‌باشد. این احتمال را قابلیت دسترسی به سیستم و یا A می‌نامیم. اگر $r_i \leq 1$ باشد، اضافه کردن قطعات فقط می‌تواند قابلیت دسترسی سیستم را کاهش دهد. البته اجزای موازی را می‌توان به سیستم اضافه کرد و به منظور افزایش هر یک از r_iها تعدیلاتی در آن انجام داد، ولی کار فقط برای کاهش نرخ از دست دادن دسترسی با بزرگ شدن سیستم بکار می‌رود و نمی‌تواند جهت آن را تغییر دهد.

فرض کنید که حوزهٔ کاربری سیستم را دوبرابر بزرگتر کنیم. به عبارت دیگر تعداد اجزایی را که باید برای عملکرد سیستم، حالت عملیاتی دارند، دو برابر نماییم. در این حالت تعداد اجزاء $N' = 2N$ خواهد شد. باز هم فرض کنید

Www.iepnu.com

که دسترسی به هر یک از اجزاء یکسان و $r_i = r$ و $r'_i = r'$ باشند. دو سیستم در صورتی که $A_N = A'_N$ یا $r'^N = r'^{2N}$ باشند، قابلیت دسترسی یکسانی خواهند داشت. این حالت وقتی حاصل می‌شود که $r' = r^{\frac{1}{2}}$. اگر $r = ۰/۹$ باشد، آنگاه $r' \approx ۰/۹۵$ خواهد بود. در این حالت، دو برابر کردن اندازهٔ سیستم مستلزم کاهش زمان خرابی هر یک از اجزاء به میزان نصف مقدار قبلی است!

پیش از آن که بحث در مورد قانون سوم (مبتنی بر اندازه) را ادامه دهیم، بهتر است که قانون مکمل (مبتنی بر زمان) آن را معرفی نماییم.

قانون چهارم : «خرابی اشیاء»

یک تعمیرکار می‌تواند به شما بگوید که ماشین‌آلات را نمی‌توان با ثبات نگاه داشت. یاتاقان‌ها، قطعات تعویضی یکسانی نیستند و خرابی‌هایی نیز پدید می‌آیند. در ابتدا باور بر این بود که فن‌آوری‌های انعطاف‌پذیر که در حال حاضر در حال توسعه بوده و در «کارخانجات آینده» بکار گرفته می‌شوند طول عمرهای بسیار بالاتری را تجربه خواهند کرد. در واقع این تشبیهات اغلب برای توجیه سیستم‌های جدید بکار می‌رود. مریدیت (Meredith [1987]) بیان می‌کند که سیستم‌های انعطاف‌پذیر جدید با همان سرعت ماشین‌آلات قدیمی مستهلک می‌شوند. انعطاف‌پذیری، قابلیت تطابق با محیط متغیر را می‌دهد ولی طول عمر تغییر اندکی دارد.

فیزیکدانان می‌دانند که اشیاء از بین می‌روند. با کنار هم گذاشتن این مطلب و این که تمام اشیاء متاثر از نیروهای خارجی محیط خود اعم از تغییر دما و گرد و غبار تا اثرات بسیار زیاد دیگر نظیر درگیر شدن ابزار یا قطعه و یا یک نسخهٔ جدید از سیستم عامل می‌باشند، می‌توان تشخیص داد که اشیاء نرم‌افزاری و سخت‌افزاری در طول زمان دچار خرابی می‌شوند. ما هیچگاه نمی‌توانیم پایا باقی بمانیم.

قانون پنجم : «رشد نمایی پیچیدگی»

اگر سیستمی M جزء داشته باشد که هر یک را بتوان در N وضعیت در نظر گرفت، آنگاه سیستم N^M وضعیت ممکن خواهد داشت. هر یک از این وضعیت‌ها را باید در زمان طراحی و عملیاتی کردن سیستم در نظر گرفت. سه جزء که هر یک دارای دو وضعیت است منجر به هشت وضعیت ممکن می‌گردند، ولی شش جزء با چهار وضعیت ۴۰۹۶ وضعیت ممکن برای سیستم بوجود می‌آورند. دو برابر کردن M و N منجر به افزایشی معادل $۲^{۲۴}$ برابر تعداد وضعیت‌های ممکن می‌گردد! با در اختیار داشتن M جزء، $M(M-۱)/۲$ حلقه ارتباطی ممکن بین اجزاء وجود خواهد داشت. بنابراین تعداد ارتباطات بین مولفه‌ها در یک شبکه سریعتر از یک سیستم خطی افزایش خواهد داشت.

قانون ششم : «پیشرفت‌های فن‌آوری»

به نظر می‌رسد که ما با نرخ‌هایی دائماً در حال افزایش، پیشرفت می‌کنیم. تصمیم‌گیری در مورد این که آیا فرایند زوال طبیعی، گونه‌ای از برکات است، را به فیلسوفان واگذار می‌کنیم که اعتقاد دارند بهترین‌ها اجازه بقا دارند. از آنجا که

طبیعت حالتی تصادفی داشته و دارای توزیع احتمالی است، بهترین که باقی می‌ماند نسبت به دیگر افراد عادی احساس برتری می‌کند. البته توجه داشته باشید که میانگین جدید بهتر از میانگین قبلی است.

معمول این است که برای رسیدن به بهبود مستمر باید کار کرد. قابلیت ما در فن‌آوری پیشرفته تنها داشتن مهندسینی است که با قانون قابلیت اطمینان و خرابی طبیعی محصول سر و کار دارند.

قانون هفتم : «اجزای سیستم بطور تصادفی رفتار می‌کنند»

چه جهان بطور ذاتی احتمالی بوده و یا برای درک کردن آن در سطح فعلی توسعهٔ بشری بسیار پیچیده باشد، تاثیر آن این است که وقایع را نمی‌توان با قطعیت تخمین زد. ما می‌توانیم شرحی در مورد طول عمر ابزار تیلور[1] بنویسیم که طول عمر ابزار را به سرعت برش ارتباط دهد، ولی هیچ کس باور نخواهد کرد که هر ابزار دقیقاً همان طول عمر را داشته باشد. ابزارهای برشی از نظر سختی متفاوتند، قطعات کاری با هم فرق می‌کنند، شرایط سیال برش تفاوت می‌کند و سرعت تنظیم ماشین‌آلات با هم متفاوند. ما اغلب در مورد مدلسازی سیستم‌ها چنان تصمیم‌گیری می‌کنیم که گویی قطعی هستند، ولی آنچه ما واقعاً فرض می‌کنیم این است که تغییرات احتمالی بطور بارز بر راه حل تاثیرگذار نخواهند بود. متعاقباً، ما از پارامترهایی نظیر هزینه بر ساعت یک ماشین برای انجام یک عملیات استفاده می‌کنیم. در حالت واقعی، در بسیاری از موارد از بهترین برآوردهای خود از ارزش میانگین پارامتر بهره می‌گیریم.

در مورد خدمت دهندگان یکسان و موازی بحث‌های زیادی شده است. همه می‌دانیم که در زمان انتخاب یک خط در یک فروشگاه مجبور نیستیم کارایی نسبی صندوقدارها در مقایسه با طول صف را در نظر بگیریم. آیا تاکنون در اثر سرعت خط ناامید و منفعل شده‌اید؟ ماشین‌آلات نیز یکسان نیستند. PC‌های موجود در یک آزمایشگاه نیازمندی‌های نگهداری یکسانی ندارند. در یک محیط ماشینی با ماشین‌آلات فرضی یکسان، اپراتورها بزودی درمی‌یابند که کدام ماشین‌ها بهترین کارایی را در کارهای دشوار دارند. به احتمال قوی انتظارات، این رخدادها را در طول زمان تشدید خواهند کرد.

قانون هشتم : «محدودیت‌های نسبیت (بشری)»

سیمون (Simon [1969]) محدودیت‌های قابلیت‌های ادراکی بشر را بوضوح تشریح نموده است. ما عادت به تفکر خطی داریم که تنها درگیر یک فعالیت در زمان است. حافظه کوتاه مدت ما محدود به هفت جزء است و دید مفهومی ما محدود به تجاربی است که در دنیای سه بعدی شکل گرفته است. همانطور که قبلاً نیز ذکر شد، طراحی مهندسی درگیر ساختارهای مصنوعی است که با زمان در حال تغییر است و با مشخصه‌های علوم طبیعی در تضاد می‌باشد. وقتی این محدودیت‌ها با واقعیت ترکیب شوند، پیچیدگی با سرعت بیشتری از نرخ خطی رشد کرده و منجر به این می‌شود که بجای راه حل بهینه، مجبوریم به رضایتبخش بودن آن بسنده کنیم. در حال حاضر حداقل لازم است بپرسیم، «چقدر خوب بودن مناسب است؟» و پاسخ ان را بپذیریم.

---

1. Taylor's TooL Life

Www.iepnu.com

قانون نهم : «ساده سازی و حذف، صرفه‌جویی در زمان، پول و انرژی»

بیش از این نمی‌توان در مورد مزایای حاصل از تلفیق و یا ساده‌سازی فعالیت‌های ضروری و حذف فعالیت‌های غیرضروری تأکید نمود. هر فعالیتی زمان، پول و انرژی صرف می‌کند. اگر یک انتقال دهندهٔ مواد بتواند دو محموله را بین دو نقطهٔ نزدیک به هم در یک حرکت جابجا کند، این کار زمان تحویل محصول و صرف انرژی را کاهش داده و باعث افزایش بهره‌وری جابجا کننده مواد می‌گردد. ساده‌سازی، تلفیق و حذف، مبانی اصولی مدیریت علمی در نخستین روزهای آن بودند و امروزه هم به قوت خود باقی هستند. بسیاری از روندهای موثر امروزی در تولید نیز به این توصیه می‌رسند. سلول‌های تولیدی به این دلیل ساخته می‌شوند که ساخت و به عمل درآوردن آن‌ها ساده‌تر از سیستم‌های بزرگ بوده و امکان تنظیم شدن همراه با خانواده محصولات و یا کلاً حذف شدن را می‌دهد. کنترل تولید کانبان (Kanban) ساده‌تر از برنامه‌ریزی نیازهای مواد توسط سیستم‌های اطلاعاتی بزرگ است که گزارش‌های داده‌ای بغرنج در مورد وضعیت کارگاه‌ها و محصول تولید می‌کنند. هدف از طراحی برای قابلیت تولید، ساده سازی تولید محصولات است.

در تجارت و مهندسی باور عمومی این است که یکپارچه سازی و اتوماسیون (خودکارسازی) سیستم‌ها راه حل فائق آمدن بر مشکلات رقابتی هستند. یکی از جنبه‌های اصلی این قوانین که مشکل زاست این است که سیستم‌های نرم‌افزاری بزرگ، شالودهٔ سیستم‌های تولیدی یکپارچهٔ غیرقابل اطمینان هستند. در واقع مشخص شده است که نرم‌افزار اغلب در طول پیاده‌سازی سیستم، عمده‌ترین مشکل فنی است (Meredith [1987]). ماهیت نامحسوس نرم افزار، برقراری تضمین کیفیت را بسیار دشوار می‌کند. در اتوماسیون، نرم‌افزار با عملیات تولیدی یکپارچه می‌شود. به عنوان مثال تعیین سرعت ماشین و نرخ تغذیهٔ آن و یا حرکت و هدایت تصمیمات نیاز به تعدیل نرم‌افزار دارد. بدون مستندات کامل و به روز، تخمین تاثیرات این سیستم‌ها ناممکن خواهد بود. ممکن است روابط درونی نرم‌افزار بطور ضمنی در برنامه‌ها نهفته باشد. علاوه بر پیچیدگی‌های نرم‌افزارهای بزرگ باید بخاطر داشت که افراد و سازمان‌های مختلف قابلیت‌ها و درخواست‌های مختلفی در مورد اطلاعات دارند. پیچیدگی سیستم، الزامات یکپارچه‌سازی و هزینه توسعه مستلزم استانداردسازی شدید در سیستم‌های بزرگ است. با این حال، ممکن است استفاده از قالب استاندارد در ارضای نیازهای کاربران معین با شکست مواجه شود که طبیعتاً موثر بودن سیستم نرم‌افزاری را محدود می‌کند.

راهکار نوین طراحی یک سیستم تولیدی (اطلاعاتی) اصطلاحاً سیستم‌های تولیدی یکپارچه مبتنی بر کامپیوتر (CIMS)[1] نام دارد و نشان دهندهٔ پیروی از قوانین ارایه شده است. هدف CIMS به حداکثر رساندن هماهنگی و آگاهی میان اجزاء سیستم می‌باشد. به این طریق، حرکت بین اجزای سیستم به حداقل می‌رسد. بنابراین باور بر این است که ارتباطات بی نقص می‌تواند منجر به حصول سیستم با کارایی بهینه گردد. با این وجود با افزایش پیچیدگی‌ها، عمل گردآوری و انتقال داده‌ها نیز منابع و زمان را صرف خواهند نمود. گذر زمان، به روز بودن داده‌ها را کاهش می‌دهد. به روز بودن داده‌ها، پیشنیاز وجود ارتباطات کامل است. با افزایش بیت‌های اطلاعات، قابلیت خطا نیز افزایش پیدا می‌کند. باید یک «انرژی» خارجی بطور مداوم روی سیستم اعمال گردد تا داده‌های جدید گردآوری و

1. *Computer - Integrated Manufacturing Systems*

مدیریت گردند، در غیر این صورت سیستم در طول زمان تخریب می‌گردد. منظور ما دلسرد کردن تلاش‌های CIM نیست، بلکه برعکس، اطلاعات بهبود یافته می‌توانند منجر به تصمیم‌گیری‌های بسیار بهتری گردند چرا که کامپیوترها نیز قابل اطمینان‌تر و کاراتر از انسان‌ها هستند. شاید در کودکی این بازی را کرده باشید که چند نفر دور دایره‌ای جمع می‌شوند و هر یک کلمه‌ای را از فرد کناری خود می‌شنود و به دیگری انتقال می‌دهد. وقتی که پیغام باز می‌گردد تحریف شده است به گونه‌ای که پیغام اصلی از بین رفته است. حافظه کامپیوتر این واژگان را به همان صورت که وارد می‌شوند دریافت می‌کند در حالی که قالب دقیق آن‌ها را مدت‌ها پس از آن که واژه از حافظه نویسنده پاک شده است حفظ می‌کنند. نکته‌ای که می‌خواهیم بیان کنیم این است که راهکارهای CIM برخلاف قواعد طبیعت عمل می‌کنند. استراتژی جایگزین که سعی در ساده‌سازی سیستم‌ها و رویه‌ها دارد با طبیعت سازگار است. اگر یک سیستم یکپارچه انتخاب گردد، کلید اصلی، درک روابط قطعی و تراکنش‌های بین اجزای سیستم است. یکی از موارد استفادهٔ با اهمیت این بحث تشخیص این است که «اگر نتوانیم یک ماشین ساده را به کار بیاندازیم یک ماشین پیچیده را هم نمی‌توانیم به کار بیاندازیم» پاسخ ابتدایی به مشکل نباید خرید یک ماشین بهتر باشد. تا زمانی که تکنولوژی فعلی درک شود، نمی‌توان بطور مناسب به مسئله کفایت آن پاسخ داد.

۴ ـ انواع مدل‌های تولید و کاربرد آن‌ها

پیش از آنکه علم و هنر مدلسازی را تشریح نماییم باید به تحلیل‌گر هشداری بدهیم. یکی از مفاهیم با اهمیتی که باید در زمان تحلیل هر سیستمی به خاطر داشت تمایز بین «کارایی» و «موثر بودن» است. کارایی به انجام صحیح فعالیت اطلاق می‌گردد در حالی که موثر بودن به انجام فعالیت صحیح اطلاق می‌شود. اگرچه هر دوی این‌ها مهم هستند، ولی همیشه این کارگر موثر است که پاداش می‌گیرد. کارگران کارایی که موثر نیستند ممکن است روزی خود را در صف بیکاران بیابند و در حالی که دست‌هایشان را تکان می‌دهند و دربارهٔ مدیران نالایقی که مجبور به کار با آنان بودند حرف بزنند. می‌توان این تفاوت را با مسئله زمانبندی یک ماشین نشان داد. یک مهندس کارا، کارها را طوری زمانبندی می‌کند که حداکثر زمان کارکرد و حداقل زمان انتظار در کنار ماشین تضمین گردد. متاسفانه دستگاه یکی از چندین دستگاه موجود بوده و قطعاتی که تولید می‌شوند با قطعات بسیار دیگری در مونتاژ نهایی بکار گرفته می‌شوند. از آن گذشته، ظرفیت نیز ممکن است از تقاضا بیشتر باشد. کارگر کارا اولویت‌های واقعی مربوط به دسته‌های قطعات متعدد را تخمین می‌زند و تعیین می‌کند که اولویت واقعی مربوط به دسته‌های متعددی که کنار ماشین در انتظار هستند، کدامند و قطعات را مطابق نیاز زمانبندی می‌کند. حتی ممکن است ماشین بیکار بماند در حالی که دسته‌هایی از قطعات در صورتی که به هیچکدام در آینده نیاز نباشد، متوقف باشند. در این مثال، برنامه‌ریزی کارا ما را با انبوهی از موجودی غیر ضروری مواجه می‌کند که فضا را اشغال می‌کنند، کاغذ بازی را افزایش داده و کلاً فرآیند تولید را مختدوش می‌کنند و از طرف دیگر در همین زمان ایستگاه‌های کاری بعدی در انتظار قطعات هستند. این مثال بیان می‌کند که در تلاش برای کارا بودن باید در مورد چگونگی تعیین اهداف بسیار دقیق بود. سوزاکی (Suzaki [1987]) هفت نوع اتلاف را مشخص می‌کند :

۱ ـ اتلاف بر اثر تولید مازاد

۲ ـ اتلاف زمان انتظار

Www.iepnu.com

۳ ـ اتلاف بر اثر حمل و نقل
۴ ـ اتلاف بر اثر فرآوری
۵ ـ اتلاف موجودی
۶ ـ اتلاف بر اثر حرکت
۷ ـ اتلاف بر اثر خرابی محصول.

بطور کلی، اگر عملیاتی به محصول قابل ارایه به بازار مستقیماً ارزشی اضافه نکند، آن عملکرد اتلاف‌آور می‌باشد. نباید هیچگاه هدف چنان نزدیک بینانه باشد که هدف غایی یعنی رسیدن به رضایت مشتری به همراه سودآوری است را تحت‌الشعاع قرار دهد.

یک مدلسازی کارا شرحی ریاضی از سیستم بوجود می‌آورد و راه حل بهینه‌ای نیز برای این مدل ارایه می‌کند. مدلساز کارا، یک مدل ریاضی برای سیستم بوجود آورده و از آن برای درک عوامل مهم سیستم واقعی استفاده می‌کند. راه حل بسیار مناسب برای سیستم واقعی، مدل را تعدیل می‌کند! بطور خلاصه، کارگر موثر با یافتن یک راه حل خیلی خوب برای مسائل مهم سروکار دارد نه یافتن راه حل‌های بهینه برای زیر سیستم‌ها بدون در نظر گرفتن روابط بین آن‌ها. مدلساز کارا مدلی برای سیستم‌ها ارایه می‌کند. بخاطر داشته باشید که اگر حداکثر با ۸۰ درصد حالت بهینه شروع بکار کنیم، رسیدن به ۵۰ درصد سیستم با ۹۰ درصد کارایی تاثیر بسیار بزرگتری از رسیدن ۱۰ درصد سیستم به ۱۰۰ درصد کارایی خواهد داشت. به همین طریق کسر ۵۰ درصد هزینه در یک حوزهٔ ۵ درصدی از کل هزینه تنها نیمی از صرفه‌جویی ۱۰ درصدی از بودجه را تشکیل می‌دهد. در گذشته، سیستم‌های تولید انبوه تا حد زیادی با موضوع کارایی درگیر بودند. چرخه حیات بلند مدت محصول و تجهیزات تولید انبوه جاذب سرمایه، نیاز داشتند که از قبل «چیز درست» در حیات سیستم تعریف گردد. از سوی دیگر، موثر بودن کلید اصلی عملیات تولید داخلی در ابعاد کم است. در این محیط باید مدام گوش به زنگ مشتری بود و آنچه را که بازار خواهان آن است، تولید نمود. نکته در این است که موثر بودن باید فرض اصلی باشد. موثر بودن به انعطاف پذیری نیاز دارد تا بتواند با جهان پویا مطابقت داشته باشد. انعطاف‌پذیری موضوع اصلی فصول آتی خواهد بود.

این بخش از کتاب معنای توسعه و استفاده از مدل‌های طراحی و کنترل سیستم‌های تولیدی را پوشش می‌دهد. حال که مشخص نمودیم چه چیزی یک سیستم تولیدی را تشکیل می‌دهد، باید تعریف کنیم که منظور از «مدل» چیست؟ یک مدل، نمایش تجریدی از سیستم واقعی است. مدل‌ها می‌توانند انتزاع فیزیکی یا ریاضی از واقعیت باشند.

۱.۴ ـ مدل‌های فیزیکی

مدل‌های فیزیکی برای سال‌ها مورد استفادهٔ وسیع بوده‌اند. همهٔ ما مدل‌هایی را که توسط طراحان برای نمایش ساختمان در حال احداث بوجود آمده‌اند، مشاهده کرده‌ایم. اینگونه مدل‌ها واسطی برای بررسی مناسب بودن طرح‌های بالقوه و تضمینی برای ساخت کامل را فراهم می‌آورند. یک تصویر، ارزش هزاران کلمه را دارد و می‌توان به بسیاری از ابهامات و ارتباطات کلامی با استفاده از مدل‌های فیزیکی ساده غلبه نمود.

مدل‌های فیزیکی می‌توانند دو یا سه بعدی باشند. مدل‌های دو بعدی شامل شرح مشخصات قطعات و نقشه

طراحی کارخانه باشند. در طراحی چیدمان تجهیزات اغلب از مدل‌های نمادین دو بعدی استفاده می‌شد. نماد منابعی نظیر ماشین‌آلات، کارگران و محدودهٔ خدمات در چارچوبه مقیاس بندی شده‌ای از تجهیزات به حرکت در می‌آیند تا زمانی که چیدمان رضایت بخشی حاصل گردد.

استفاده از مدل‌های سه بعدی در حال متداول شدن است. برای مثال امروزه بسیاری از سیستم‌های CAD از مدل‌های سه بعدی استفاده می‌کنند. آزمایشگاه‌های دپارتمان‌های مهندسی تولید و صنایع از ماشین‌آلات کوچک رومیزی و یا بخش‌های بهم پیوسته برای ساخت مدل‌های سه بعد فیزیکی از عملکرد واقعی سیستم‌های تولیدی استفاده می‌کنند.

۲.۴ ـ مدل‌های ریاضی

این بخش از کتاب شامل مدل‌های ریاضی است. این مدل‌ها روی یک کامپیوتر یا تنها روی یک صفحه کاغذ قرار دارند. این مدل‌ها گروهی از معادلات ریاضی و یا روابط منطقی هستند که به منظور شرح سیستم واقعی توسعه می‌یابند. پارامترهای مدل‌ها، نظیر زمان‌های تولید استاندارد، زمان بین دو خرابی ماشین و اندازه محموله نیز از داده‌های حسابداری و ... بدست می‌آیند.

مدل‌های ریاضی از نظر کاربرد متغیرهای تصمیم‌گیری با مدل‌های فیزیکی متفاوتند. برای مدل‌های ریاضی باید استفادهٔ نظری وجود داشته باشد که بتوان متغیرهایی را کنترل کرد. این متغیرها، متغیرهای تصمیم‌گیریِ مدل هستند. ساخت مدل‌های مفید و مناسب مستلزم انتخاب متغیرهای تصمیم‌گیری مناسب است. این کار رابطهٔ تنگاتنگی با تعریف و تلفیق مسئله دارد. به عنوان یک راهنمای عمومی در تعیین متغیرهای تصمیم‌گیری، مدلساز باید از خود بپرسد: "سعی می‌کنم به چه سئوالی پاسخ دهم؟" ممکن است متغیرهای تصمیم‌گیریِ تعداد ماشین‌آلات مورد نیاز و یا گروهی از فعالیت‌ها باشد که به یک ماشین تخصیص داده شده‌اند.

مدل‌های ریاضی می‌توانند ماهیتاً توصیفی و یا نمایشی باشند. مدل‌های شبیه‌سازی در طیف مدل‌های تشریحی قرار دارند. با در دست داشتن گروهی از مقادیر برای متغیرهای تصمیم‌گیری می‌توان مدل را فعال نمود و در نتیجه برآوردی از کارایی سیستم بدست آورد. مدل‌های برنامه‌ریزی ریاضی نظیر برنامه‌ریزی خطی نمایشی هستند. مدل را حل کنید و خروجی مدل را به دست آورید که پاسخی به چگونگی تنظیم متغیرهای تصمیم‌گیری است.

در این مدل‌ها یک تابع هدف نظیر هزینه وجود دارد و با توجه به محدودیت‌های مشخص شده مقادیر مرتبط برای متغیرهای تصمیم‌گیری که تابع هدف را بهینه می‌کنند، بدست می‌آیند. مدل‌های توصیفی اغلب راهی برای ایجاد مدل‌های بسیار واقع گرایانه فراهم می‌آورند و اگر چه احتمالاً یک مدلساز باهوش بتواند یک مدل از پیش تعیین شده در همان سطح جزئیات تعریف کند، این مدل‌ها از لحاظ اندازه رشد داشته و هرگاه که با جزئیات تلفیق شوند به سرعت حالتی غیر خطی به خود می‌گیرند که بدین‌ترتیب حل بهینه آن‌ها غیر واقعی می‌شود.

مدل‌های از پیش تعیین شده لزوماً راه حل‌های بهینه‌ای ارایه نمی‌کنند. اندازه مسئله و فقدان روش‌های حل کارا اغلب به معنی آن است که باید از راهکار مکاشفه‌ای[1] استفاده نمود. راهکارهای مکاشفه‌ای سعی در استفاده از

1. *Heuristic*

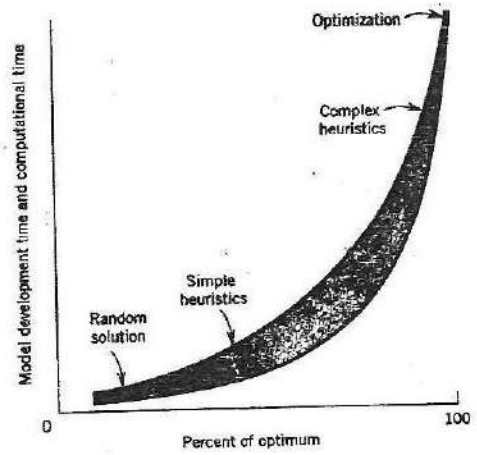
Www.iepnu.com

پرتال تخصصی مهندسی صنایع

روشی منطقی برای یافتن یک راه حل خوب (تقریباً بهینه) برای مسئله دارند. ممکن است یافتن پاسخ بهینه امکانپذیر بوده و یا نباشد، حتی اگر راه حلی پیدا شود، ممکن است قادر به تایید اینکه راه‌حل برای مدل بهینه است، نباشیم. بارتُولدی (Bartholdi) و پلاتزمن (Platzman [1998]) روش‌های مکاشفه‌ای را با توصیف زیر بخوبی بیان کرده‌اند:

«می‌توان یک روش مکاشفه‌ای را به عنوان یک پردازشگر اطلاعات که تعمداً ولی با آگاهی از اطلاعات خاصی صرفنظر می‌کند، در نظر گرفت. با صرف نظر از اطلاعات، روش مکاشفه‌ای از هر تلاشی که ممکن است برای خواندن داده‌ها و استفاده از کامپیوتر نیاز باشد، آزاد می‌شود. از آن گذشته، راه حلی که توسط چنین روشی ایجاد گردد مستقل از اطلاعات صرفنظر شده بوده و لذا از تغییراتی که در این اطلاعات پدید می‌آیند تاثیر نمی‌پذیرد. البته هنر طراحی روش‌های مکاشفه‌ای در آگاهی دقیق از اطلاعاتی است که باید از آن‌ها صرفنظر کرد.»

علاوه بر قوی بودن تغییر داده‌ها در روش‌های مکاشفه‌ای معمولاً توسعه و حل مسائل از طریق این روش‌ها نسبت به روش‌های رویه‌ای بهینه‌سازی آسانتر است. شکل ۶ ـ ۸ توازن اصلی موجود در بسیاری از مسائل را نشان می‌دهد.



شکل ۶ ـ ۸ : مقایسهٔ بین روش‌های مکاشفه‌ای و بهینه‌سازی

حل بسیاری از مسائل جهان واقعی در زمان موجود بسیار وسیع و پیچیده است و این موضوع مخصوصاً در مسائل کنترل عملیات که به نظارت پی‌درپی نیاز دارند صدق می‌کند. می‌توان تا پایان هفته صبر کرد تا یک کامپیوتر طرح بهینه یک کارخانه جدید را تعیین کند ولی این نوع نگرش برای زمانبندی تولید عصر امروز کارایی ندارد. کدگذاری و درک قواعد مکاشفه‌ای ساده‌تر است، لذا این مدل‌ها را می‌توان با سرعت بیشتری توسعه داده و به اجرا

درآورد. راه حل بهینه اغلب مشخصه‌های معینی را داراست که می‌توان آن‌ها را از راه‌های مکاشفه‌ای نیز کسب نمود. یکی از مثال‌های کلاسیک در این زمینه مسئله تعیین اندازه محموله پویا است. می‌دانیم که انتقال موجودی به یک دورهٔ زمانی هیچگاه بهینه نیست مگر آنکه موجودی بتواند کل تقاضای دوره را پوشش دهد. در غیر این صورت دیگر لزومی به تحمل هزینه‌های انبارداری علاوه بر هزینه‌های ضروری تنظیم فرآیند نیست. از این رو روش‌های مکاشفه‌ای هر بار که برای برنامه‌ریزی مورد استفاده واقع شوند تنها تولید باندازه تقاضا را برای تعداد صحیحی از دوره‌ها در نظر می‌گیرند.

نباید استنباط کرد که رویه‌های مکاشفه‌ای لزوماً الگوریتم‌های بهینه نیستند. روش‌های مکاشفه‌ای عموماً مسائل خاصی دارند. فرآیند توسعه قواعد مناسب برای راه حل‌های مکاشفه‌ای مسائل می‌تواند دیدی نسبت به عوامل با اهمیت مسئله ایجاد کند. این نگرش می‌تواند در مدیریت روزانه بسیار مفید باشد. اگر ما یک کد پیچیده را که مبتنی بر رویه‌های استاندارد است، ایجاد کرده باشیم و آن را به عنوان یک جعبه سیاه برای حل مسئله بکار بریم، به این نگرش دست نیافته‌ایم. از آن گذشته، تکنیک‌هایی که به مدلساز امکان دانستن این را می‌دهند که راه حل مکاشفه‌ای چقدر از حالت بهینه فاصله دارد را محدود سازیم، تجربه خوبی در حین به کارگیری روش‌های مکاشفه‌ای بدست می‌آید. محدودیت‌ها می‌توانند مبتنی بر تحلیل بدترین حالت و یا حالت متوسط باشند. حاصل محدودیت‌های بدترین حالت عموماً از لحاظ تئوریک بیانگر ضعیف‌ترین نتایج نسبت به حالت بهینه هستند و طبق این نتایج روش مکاشفه‌ای با شکست مواجه می‌شود. این نتایج به عنوان نمونه مسئله حفظ خواهند شد. نمونه مسئله به گروه خاصی از داده‌ها اطلاق می‌گردد که می‌توان برای آن‌ها راه‌حلی یافت. حالات متوسط (میانگین) مبتنی بر تجربه بوده و نشانگر انحراف انتظاری از حالت بهینه در زمانی است که داده‌های مسئله در گستره خاصی قرار می‌گیرند.

مثال ۱

فرض کنید که سه کار و سه ماشین داریم. به هر ماشینی یک کار اختصاص داده شده است. هدف یافتن تخصیص کارها با حداقل هزینه است. هزینه‌های تخصیص کار در جدول ۶ ـ ۲ نشان داده شده‌اند.

کار	ماشین		
	۱	۲	۳
۱	۱۰	۲۵	۱۲
۲	۱۳	۵	۱۲
۳	۸	۱۳	۲۱

جدول ۶ ـ ۲ : هزینه‌های تخصیص کار به ماشین

فرض کنید که کار ۱ را اختیار کرده و آن را به ماشینی با حداقل هزینه تخصیص بدهیم و سپس این کار را کنار بگذاریم. این رویه را تا زمانی ادامه دهیم که تمام کارها تخصیص یابند. راه حل مکاشفه‌ای به شرح زیر خواهد بود:

Www.iepnu.com

گام ۱. کار ۱ را به ماشین ۱ اختصاص دهید اگر ۲۵>۱۲>۱۰.

گام ۲. کار ۲ را به ماشین ۲ اختصاص دهید اگر ۱۲>۵.

گام ۳. کار ۳ را به ماشین ۳ اختصاص دهید.

کل هزینه این نوع تخصیص کار ۳۶ = ۲۱ + ۵ + ۱۰ خواهد بود. می‌توان محدوده پایین‌تری از هزینه را با توجه به این نکته که هر کاری باید حداقل به اندازه کمینه هزینه ماشین خود هزینه داشته باشد، بدست آورد. لذا هزینه کار ۱ باید حداقل ۱۰، هزینه کار ۲ حداقل ۵ و هزینه کار ۳ حداقل ۸ باشد. بنابراین هر راه حلی حداقل دارای هزینه ۲۳ = ۸ + ۵ + ۱۰ خواهد بود. به همین ترتیب هر ماشینی باید یک کار را انجام دهد. با جمع حداقل هزینه‌ها در هر ستون محدوده حداقل هزینه ۲۵ = ۱۲ + ۵ + ۱۲ را خواهد داشت. از این‌رو هر راه حل امکان‌پذیری که وجود داشته باشد باید حداقل هزینه ۲۵ را داشته باشد. هزینه راه حل پیشنهادی ما ۳۶ است. بنابراین این راه حل ما ۱۱ واحد بیش از حالت بهینه است.

توجه کنید روشی که برای یافتن محدوده پایین یعنی ۲۵ بکار رفته است در واقع یک راه حل امکان‌پذیر ایجاد نموده است: همه کارها تخصیص داده شده‌اند و هر ماشینی یک کار دارد. بنابراین راه حل می‌تواند بهینه باشد.

می‌توان بجای دسته‌بندی مدل‌های ریاضی بر مبنای خروجی آن‌ها (تشریحی یا از پیش تعیین شده) مدل‌ها را براساس شکل محاسباتی آن‌ها دسته‌بندی نمود. با این طبقه‌بندی، مدل‌ها ***تحلیلی و یا تجربی*** هستند. مدل‌های تحلیلی نشان دهنده انتزاع ریاضی از سیستم واقعی می‌باشند. در اینجا گروهی از معادلات بوجود می‌ایند که کارایی کلی سیستم را به طور خلاصه بیان می‌کنند ولی جزئیات را تشریح نمی‌کنند. به عنوان مثال می‌توان به تئوری صف، برنامه‌ریزی ریاضی و روش‌های مکاشفه‌ای اشاره کرد. مدل‌های شبیه‌سازی تجربی هستند. مدل‌های شبیه‌سازی وقایعی را که در سیستم واقعی رخ می‌دهند، به نمایش درمی‌آورند و در کنار پارامترهای عملیاتی به تجربیات نیز امکان کنترل منطق را می‌دهند. مدل‌های شبیه‌سازی کامپیوتری و شبیه‌سازی فیزیکی که در بالا نیز به آن‌ها اشاره شد در این گروه قرار می‌گیرند. ممکن است از مدل‌های تلفیقی نیز استفاده شود.

۳.۴ ـ کاربری مدل‌ها

مدل‌ها برای مقاصد مختلف ساخته می‌شوند. کاربردهای ابتدایی مدل‌ها شامل موارد زیر هستند :

۱ ـ ***بهینه‌سازی*** : یافتن بهترین مقادیر برای متغیرهای تصمیم‌گیری

۲ ـ ***پیش‌بینی کارایی*** : بررسی برنامه‌ها و حساسیت‌های بالقوه

۳ ـ ***کنترل*** : کمک به انتخاب قواعد کنترلی مناسب

۴ ـ ***دیددهی*** : امکان درک بهتری از سیستم

۵ ـ ***توجیه*** : کمک به تصمیم‌گیری‌های مربوط به فروش و نکات حمایتی

تاکنون در مورد بهینه‌سازی در مفهوم مدل‌های از پیش تعیین شده بحث کردیم. مدل‌ها ساخته می‌شوند و به منظور تعیین بهترین ترکیب ممکن از متغیرهای تصمیم‌گیری به اجرا درمی‌آیند. مسائلی همچون انتخاب اندازه دسته و شبکه‌های حداقل هزینه حمل و نقل مثال‌های خوبی برای بهینه‌سازی هستند. با این حال باز هم خاطرنشان می‌کنیم که نباید از خروجی مدل‌ها استفاده کورکورانه کرد. مسئولیت نهایی بر دوش تصمیم گیرنده است نه مدل.

گفته می‌شود که دو گروه تصمیم گیرنده دردسر آفرین در رابطه با مدل‌سازی (و کامپیوتر) وجود دارد، آن‌هایی که باور دارند که همه چیز از مدل بدست می‌آید و آن‌هایی که به هیچ چیز اعتقاد ندارند. اولین گروه را می‌توان به مرور زمان آموزش داد که به مدل اعتماد کنند ولی برای گروه دوم راهی نیست جز آن که آن‌ها را به دست تقدیر بسپاریم.

بسیاری از سیستم‌های واقعی رفتاری غیرخطی از خود نشان می‌دهند و به متغیرهای منفصل (عدد صحیح) نیاز دارند. حل مدل‌هایی با این مشخصه اغلب بسیار دشوار است و حتی ممکن است با آن که خواهان دستیابی به راه حل بهینه هستیم به راه‌حل‌های مکاشفه‌ای نزدیک به بهینه رضایت دهیم. از آنجا که هدف ما همچنان یافتن بهترین گروه مقادیر ممکن برای متغیرهای تصمیم‌گیری است، این مدل‌ها را در بخش بهینه‌سازی مطرح می‌کنیم. ممکن است در بعضی از موارد تنها به یافتن یک راه حل امکان‌پذیر رضایت دهیم، راه‌حلی که به محدودیت‌های تعیین شده در متغیرهای تصمیم‌گیر تمایل دارد.

هشدار: فرموله کردن مدل‌ها به منظور بهینه‌سازی آن‌ها نوعاً تبدیل به موضوعات مرتبط با هزینه می‌شود. مدل میزان سفارش مقرون به صرفه، موجودی انبار و هزینه‌های راه‌اندازی را با هم مقایسه می‌کند، این مدل نمونه‌ای از مثال‌های ابتدایی است. ایجاد چنین مدل‌هایی منجر به توجیه وجود چنین هزینه‌هایی در ذهن مدل‌ساز می‌شود. با این ذهنیت ممکن است فرصت‌هایی را در نظر داشته باشیم که برای کاهش هر دو هزینه در اختیارمان قرار دارد، در چنین حالتی مدل تبدیل به مدلی می‌گردد که در شیوه‌های تولید بهنگام (JIT) مطرح است.

دومین هدف ***تخمین تولید*** است. باید بطور ثابت به پرسش‌های "***چه می‌شود اگر***" پاسخ داده شود. اگر یک ماشین خراب شود چه می‌شود. چه می‌شود اگر یک تأمین کننده نتواند به تعهداتش عمل کند؟ چه می‌شود اگر تقاضا تغییر کند؟ مدیران در یک لحظه دربارهٔ همه چیز نمی‌توانند آگاهی داشته باشند، لذا برنامه‌های قدرتمندی باید ساخته شوند به طوری که اگر واقعه‌ای رخ دهد و شرایط تغییر نماید، منابع لازم موجود باشند. موفقیت مداوم به ایجاد ایده‌های جدید نیاز دارد. مدل‌های تشریحی نظیر شبیه‌سازی طبیعتاً برای این مقصود طراحی شده‌اند. آن‌ها برای آزمون این ایده‌ها خوب طراحی شده‌اند و خوب و بد را از یکدیگر جدا می‌کنند. با استفاده‌های از مدل‌های تشریحی مقادیری برای متغیرهای تصمیم‌گیری وارد مدل می‌شوند و خروجی مدل معیار کارایی سیستم خواهد بود. همچنین مدل‌های پیشگویی کارایی در فرآیند برنامه مورد استفاده قرار می‌گیرند. فرض کنید که واحد بازاریابی برنامهٔ تولید خاصی را پیشنهاد می‌کند. هدف تعیین زمانبندی امکان‌پذیر است و اگر چنین باشد هزینهٔ آن چقدر خواهد بود. یا مقایسهٔ خروجی مدل با بودجه و سایر محدودیت‌ها می‌توان زمانبندی را مورد ارزیابی قرار داد.

همچنین مدل‌های از پیش تعیین شده در تخمین کارایی بسیار اهمیت دارند. تحلیل حساسیت یکی از فعالیت‌های مهم تصمیم‌گیران است. با تغییر پارامترهای ورودی نظیر هزینه مواد، ساعات کاری کارکنان و عوامل بهره‌وری می‌توان تأثیر تغییرات یا عدم قطعیت روی مقادیر پارامترها را مورد ارزیابی قرار داد.

کنترل سومین هدف مدل‌سازی است. خط‌مشی‌های کنترلی را می‌توان از مدل‌ها استخراج نمود. آیا در زمانبندی یک مرکز کاری، باید از قاعدهٔ کوتاه‌ترین زمان فرآوری (SPT) استفاده شود و یا زودترین زمان سررسید (EDD) ملاک است؟ چگونه تصمیم بگیریم که چه وقت کار به کف کارگاه ارسال شود و جریان آن‌ها چگونه اولویت‌بندی می‌شود؟ مدل‌هایی می‌توان ایجاد نمود که امکان بررسی کارایی سیستم تحت خط‌مشی‌های کنترلی مختلف را

Www.iepnu.com

بدهد. با ارزیابی کارایی سیستم تحت سناریوهای مختلف برای هر خط‌مشی ممکن، می‌توان خط‌مشی نزدیک به بهینه را انتخاب کرد.

فرآیند ساخت مدل ارزش قابل توجهی دارد. تجاربی که در طول اعتبارسنجی مدل و تعیین مجدد مشخصات سیستم بدست می‌آیند نگرش قابل توجهی به سیستم واقعی بوجود می‌آورد. بدین صورت که متوجه می‌شویم که گلوگاه‌های حقیقی و روابط مهم سیستم صحیح هستند. لذا آگاهی کسب شده از طریق ساخت مدل، نگرش ما را به کارایی سیستم با تعیین نیاز به استفاده از مدل را بقدر کافی افزایش می‌دهد.

کسب بینش استفاده از مدل، در گروه ابزارهای تشخیص جای می‌گیرد. ممکن است مسائلی شناخته شوند که در مورد سیستم وجود دارند ولی دلایل اساسی (پایه‌ای) آن‌ها نامشخص بمانند. کار کردن با مدل می‌تواند شرایطی را بوجود بیاورد که تحت آن‌ها این مسائل پدید آیند، تشدید شوند و پراکنده گردند. وقتی نوع مسئله معین شد، می‌توان عملکردی اصلاحی اتخاذ کرد.

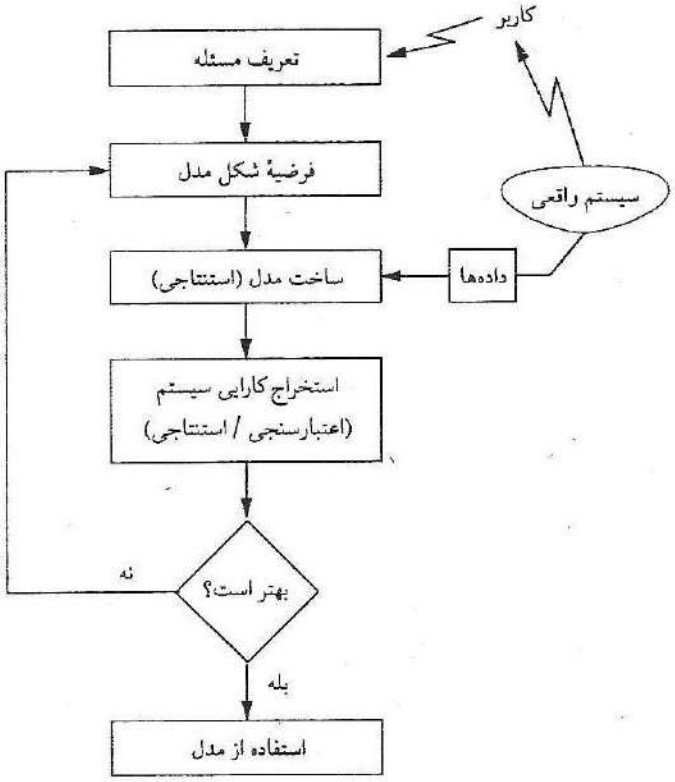
نهایتاً مدل‌ها را می‌توان به عنوان ابزارهای مؤثری در فروش بکار برد. شبیه‌سازی با استفاده از گرافیک متحرک می‌تواند برای متقاعد کردن یک مدیر یا ناظر شکاک در مورد اعتبار مدل بسیار مؤثر واقع شود. در واقع مواردی هستند که در آن‌ها از مدل‌های تحلیلی برای حل مسئله استفاده و مدل‌های شبیه‌سازی نیز برای فروش راه‌حل بکار می‌روند. ساخت یک مدل گرافیکی ساده به عنوان آخرین مرحله مدل‌سازی یک سیستم بزرگ و پیچیده غیرمعمول نیست. ممکن است یک مدیر در به کارگیری جعبه سیاهی از چند هزار معادله احساس راحتی نکند. با این وجود شبیه‌سازی شماتیک یا متحرک که خروجی این مدل پیچیده را نشان دهد می‌تواند یک ابزار بسیار مؤثر باشد.

اهمیت تحلیل حساسیت در بین تمام مدل‌ها مشترک است. برای هر یک از موارد استفاده اولیه، دانستن اثر تغییرات روی تقاضا یا قابلیت اعتماد ماشین اهمیت دارد. ممکن است در طراحی یک چیدمان بخواهیم ترتیب چندین دستگاه موجود را برای تعیین بهره‌وری حاصله در سیستم حمل و نقل مواد مورد بررسی قرار دهیم. طراحی مهندس باید ماهیت پویا و احتمالی جهان خارج (و داخل) را در نظر بگیرد. از این رو همیشه باید طراحی‌های بالقوهٔ متعددی انجام داد و آن‌ها را با سناریوهای مختلفی مورد ارزیابی قرار داد.

۴.۴ ـ ساخت مدل

ساخت مدل یک هنر است. علم در حل مدل نقش بیشتری بازی می‌کند تا ساخت آن. همانطور که شکل ۶ ـ ۹ نشان می‌دهد، مدل‌سازی استفاده از استدلال قیاسی و استدلال استقرایی را تکرار می‌کند. وقتی مسئله تعریف می‌شود جنبه‌های مهم سیستم را برای مشخص نمودن این مسئله در نظر می‌گیریم. این گام شامل استنتاج نیز می‌گردد. ما از تجربیات و استنتاجات خود در مورد چگونگی عملکرد سیستم به منظور به دست آوردن چکیده‌ای از مؤلفه‌های ضروری و روابط بین آن‌ها استفاده می‌کنیم. این مؤلفه‌ها و روابط در قالب روابط ریاضی و یا منطقی تشریح می‌شوند. قواعد تشریح سیستم اغلب استنتاجی بوده و از قوانین فیزیکی نیز بهره می‌برند. دانشجویان نیز اغلب بر این باورند که می‌توانند بسادگی مدل سیستم را بسازند. هیچ مدل یکتایی از سیستم وجود ندارد. مدل باید متناسب با سؤالاتی که پاسخ داده شوند، ساخته شوند. در محیط‌های پیچیده ممکن است برای روشن ساختن جنبه‌های مختلف مسئله، مدل‌های متعددی ساخته شوند. حتی مدل‌سازان خبره نیز ممکن است برای یک سؤال منفرد

مدل‌های مختلفی بوجود بیاورند. خوشبختانه در صورتی که اعتبار این مدل‌ها بخوبی احراز شوند، راه‌حل‌های یکسانی برای مسئله بوجود خواهند آورد. عموماً بهترین راه آن است که ساده‌ترین مدلی را انتخاب نماییم که بطور مناسب سیستم را تشریح نماید. ساخت، نگه‌داری و استفاده از مدل‌های ساده، آسان‌تر بوده و از آن گذشته برآورد پارامترهای مربوط به آن‌ها نیز ساده‌تر است. علاوه بر آن با وارد نکردن فاکتورهای خارجی که تنها بطور شانسی به برآورد کارایی گذشته کمک خواهند کرد احتمال این که تحت شرایط جدید برآوردکنندگان خوبی از کارایی باشیم بیشتر است.



شکل ۶ ـ ۹ : ساخت مدل

ممیزی و اعتبارسنجی گام‌های بعدی هستند. ممیزی تضمین می‌کند که مدلی که روی کاغذ معین شده و مدلی که روی کامپیوتر به اجرا درآمده یکسان هستند.

اعتبارسنجی تضمین می‌کند که مدل از لحاظ مشخصات و پیاده‌سازی کامپیوتری آن بطور کافی به سیستم پاسخ داده و بخوبی نتایجی معتبر و مفید برای تصمیم‌گیری فراهم می‌آورد. علاوه بر آن اعتبارسنجی باید تضمین کند که

Www.iepnu.com

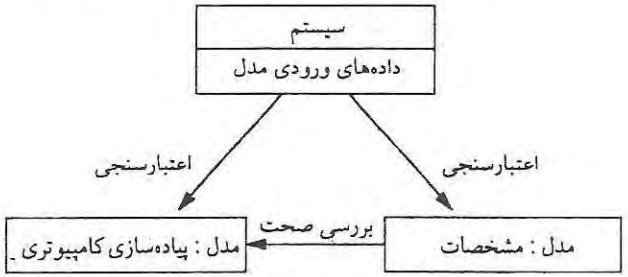
داده‌هایی که مورد استفاده قرار می‌گیرند مناسب، صحیح و کافی است. شکل ۶ ـ ۱۰ مفاهیم اعتبارسنجی و بررسی صحت را نشان می‌دهد. فرآیندهای بررسی صحت و اعتبارسنجی اغلب با یکدیگر همپوشانی داشته و یا دارای فعالیت‌های یکسان هستند. برخی از این فعالیت‌ها به شرح زیر هستند:

۱ ـ ***مقایسهٔ مدل و ساختار سیستم***: اجزای سیستم به همان صورتی که وجود دارند و یا طراحی شده‌اند با نمایش آن‌ها توسط مدل مقایسه می‌شوند.

۲ ـ ***مقایسهٔ نتایج و داده‌های متناظر سیستم***: نتایج تحلیل با برآوردهای حاصل از عملکرد سیستم یا مشخصه‌های طراحی با همان مقادیر مقایسه می‌شوند.

۳ ـ ***مقایسهٔ مدل و رفتار سیستم***: رفتار مدل با رفتار واقعی عملکرد سیستم و یا رفتار مورد نظر در طراحی سیستم مقایسه می‌شوند.

۴ ـ ***مقایسه ساختار مدل و نتایج آن با ساختار و نتایجی که از مدل دیگری از همان سیستم بدست آمده‌اند.***



شکل ۶ ـ ۱۰ : بررسی صحت و اعتبار مدل

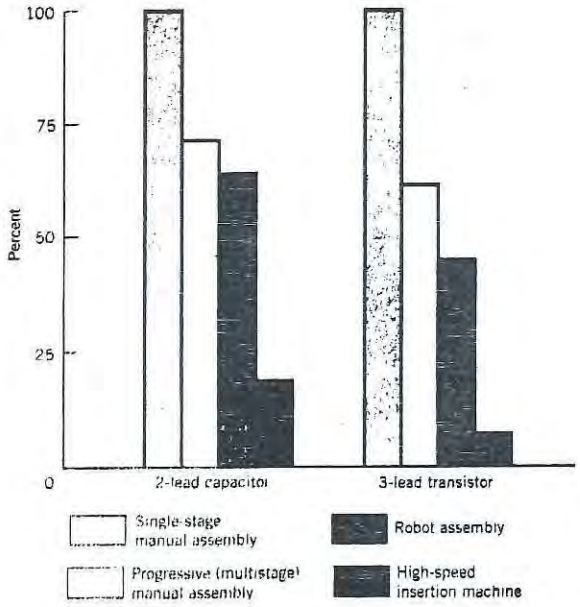
تعمیم نتایج فراتر از حدود ورودی‌هایی که مدل برای آن‌ها اعتبارسنجی شده است، می‌تواند منجر به نتایج گمراه کننده‌ای شود. بخاطر داشته باشید که مدل‌ها حاوی دو نوع خطا هستند:

تقریب سیستم و تقریب راه‌حل: مدل‌ها فقط بطور تقریبی سیستم را توصیف می‌کنند و عموماً بسیاری از جزئیات را رها کرده و اغلب فقط رفتار مجتمع گروهی از جزئیات عمده را شرح می‌دهند. ایمن‌ترین راه آن است که از ابتدای ساخت مدل در مورد سئوالات مربوط به اعتبارسنجی تصمیم‌گیری شود. استفادهٔ بعدی از مدل فراتر از این تلمرو، به اعتبارسنجی مجدد نیاز دارد. تقریب راه‌حل که به استفاده از رویه‌های مکاشفه‌ای و دقت عددی الگوریتم‌های بکار رفته اطلاق می‌گردد می‌تواند بد باشد.

مدل‌ها نباید به منظور یک نقطه نظر خاص ساخته شوند. مرحلهٔ اعتبارسنجی مدل باید دقت مدل را برای استفادهٔ موارد نظیر آن تضمین نماید. کسانی که با مقاصد آشکار یا نهان اقدام به مدل‌سازی می‌کنند خطر از دست دادن اجزای مقطعی مدل و پیاده‌سازی یک راه‌حل ضعیف را به جان می‌خرند. در حالی که ما ماهیت سیاسی تمام سازمان‌های انسانی را مشخص کرده‌ایم باید هدف از ساخت مدل مشخص باشد تا بتوان حقیقت را کشف و نه تحریف کرد. در جنگ رقابت‌های تولیدی چنین عملکردهایی شانس موفقیت را کاهش می‌دهد. از آن گذشته مدل‌ها

بزودی تأثیر خود را در این محیط از دست خواهند داد. کسانی که این دیدگاه را مورد تردید قرار می‌دهند باید تقدیر قدرت آمار را برای تسلط نظرات جمعی بسنجند. بدلیل این که سوء استفاده از آمار و تعریف نادقیق مسئله نظرات جمعی، بخوبی توسط کنایهٔ دیزریلی بیان شده‌اند : "سه نوع دروغ وجود دارد، دروغ، دروغ‌های نفرین شده، آمار".

به عنوان آخرین نکته نباید فراموش کرد که مدل یک ابزار است نه یک خاتمه. طراحی مهندسی شامل گام‌های مربوط به تعریف مسئله، تعیین داده‌ها و ایجاد راهکارهای جایگزین، تحلیل راه‌حل‌های آزمایشی، ارزیابی جایگزین‌ها، پیشنهاد راه‌حل، پیاده‌سازی و نظارت و نگهداری است. مدل‌ها برای تحلیل و ارزیابی بکار می‌روند. با این حال یک مدل نمی‌تواند منجر به راه‌حلی شود که خارج از حوزهٔ عملکرد است. برای مثال، مسئله قراردادن قطعات در یک برد مدار الکترونیکی را در نظر بگیرید. شاید سیستم موجود روی مونتاژ دستی تکیه داشته باشد. ممکن است یک مهندس کارا سعی در تسریع فرآیند دستی نماید، ولی مهندسین مؤثر یک گام به عقب برداشته و کل سیستم و طراحی‌های جایگزین ممکن را در نظر می‌گیرند. در این حالت، راه‌حل‌های جایگزین می‌توانند شامل خطی از عملگرها باشد که هر یک مسئول اجزای مختلف مونتاژ دستی، مونتاژ آدموارہ (روباتیک) و یا دستگاه‌های مونتاژ سریع هستند. Seifert [1988] شکل ۶ ـ ۱۱ را برای نشان دادن تفاوت در هزینه‌های این راهکارها ارایه کرده است. مدل‌سازی جایگزین تفکر و خلاقیت نمی‌شود، برعکس مدل‌ها و تحلیل کامپیوتری باید فرآیند خلاقیت و نوآوری را با تسهیل کردن درک رفتار سیستم و روابط آن ساده و قابل لمس و درک نماید.



شکل ۶ ـ ۱۱ : هزینه‌های مرتبط با راهکارهای انتخابی مونتاژ

Www.iepnu.com

۵ ـ خلاصه

سیستم‌های تولیدی را می‌توان برحسب نوع چیدمان آن‌ها طبقه‌بندی نمود. می‌توان چیدمان را طوری دسته‌بندی کرد که مبتنی بر محصول، فرآیند و یا تلفیقی (سلول‌های مربوط به خانواده محصول) و یا مکان ثابت باشند. چیدمان محصول عموماً مؤثرترین چیدمان برای تولید تکراری هستند.

چندین قانون طبیعی بر سیستم‌های تولیدی اثرگذار است. سطح موجودی، نرخ تولید و زمان توان عملیاتی را تعیین می‌کند. مواد و انرژی ثابت هستند. با افزایش اجزای متبادل بیشتر به سیستم، سیستم قابلیت اطمینان کمتری پیدا می‌کند. با این وجود، افزودن اجزای موازی یا اضافه می‌تواند قابلیت اطمینان را بالاتر ببرد، اشیاء به مرور زمان دچار تخریب می‌گردند ولی با این حال می‌توانیم با بهره‌گیری از مزایای تکنولوژیکی بر آن‌ها پیشی گیریم. طراحی‌های سیستم باید برای رفتار تصادفی مورد نظر قرار گیرند. در آخر، قابلیت‌های انسانی محدود هستند. گاه ممکن است ساده‌کردن سیستم و حذف اجزای غیر لازم بهترین راه حل باشد.

مدل‌ها یک مبنای منطقی برای طراحی سیستم‌های جدید و یادگیری سیستم‌های موجود را شکل می‌دهند. کار با مدل‌های سیستم بجای سیستم واقعی امکان آموختن سریع را داده و از خطر از هم گسیختگی پر هزینه سیستم‌های واقعی جلوگیری می‌کند. می‌توان از مدل‌ها برای بهینه‌سازی سیستم، تخمین کارایی، کنترل، گردآوری دیدگاه‌ها در مورد سیستم و یا به عنوان یک ابزار آموزشی استفاده کرد. مدل‌ها می‌توانند ماهیت ریاضی، نظیر برنامه‌ریزی خطی و یا فیزیکی، مثل مدل مقیاسی یک کارخانه که راهروها و ماشین‌آلات را نشان می‌دهد. مهمترین کار در مدل‌سازی تعریف مسئله و سپس تعیین هدف مدل است. آنگاه مدل‌ساز، مدل را با حوزه عملکرد و پیچیدگی مناسبی طراحی می‌نماید به طوری که با یکپارچه‌سازی اجزاء سیستم به اعتبارسنجی و بررسی صحت مدل می‌پردازد.

مدل‌سازی از دو منبع فقدان اطلاعات متأثر است. نخست این که مدل یک نماد انتزاعی و ساده شده‌ای از واقعیت است که بسیاری از جزئیاتی که رفتار واقعی را تحت تأثیر قرار می‌دهند در مدل گنجانده نمی‌شوند. ما بطور مکرر مدل‌ها را ساخته و مورد آزمون قرار می‌دهیم با این امید که تمام عوامل برجسته (با توجه به هدف مدل) در آن گنجانده شوند. دوم این که مدل‌ها بطور نسبی مورد ملاحظه قرار می‌گیرند. روش‌های مکاشفه‌ای ممکن است منجر به راه‌حل‌های غیربهینه گردند. تحلیل حساسیت لزوماً محدود به حوزهٔ مدل می‌شود. از این رو ما هیچگاه تمام اطلاعاتی را که مدل باید نمایش دهد، استخراج نمی‌کنیم. ما صرفاً امیدواریم تا بقدر کافی در مورد طراحی مؤثر بیاموزیم و سیستم را با مطالعه به عمل درآوریم.

پرتال تخصصی مهندسی صنایع

تمرین‌های فصل ششم

۱ ـ چرا مدل‌های سیستم تولیدی ساخته می‌شوند و منظور از استفاده از این مدل‌ها چیست؟

۲ ـ چهار نوع چیدمان اولیه سیستم‌های تولید کدامند؟

۳ ـ سیستم‌های بزرگ مجموعه‌ای از اجزاء و روابط متقابل هستند. مشکلات مدل‌سازی چنین سیستم‌هایی چیست؟

۴ ـ فرض کنید یک سیستم شامل هشت زیر سیستم مستقل است. هر یک از زیر سیستم‌ها ۹۵٪ از مواقع در حال کار است. احتمال کار کردن تمام زیر سیستم‌ها در هر لحظه چقدر است؟

۵ ـ یک رستوران محلی را در نظر بگیرید. وظایف، مواد، منابع، تولیدات، و هر رویداد متناظر در سیستم را شناسایی و بنویسید.

۶ ـ کارایی یک سیستم (ρ) بستگی زیادی به تنظیم یک پارامتر مانند X دارد. جدول ۶ ـ ۳ کارایی سیستم را در ارتباط با مقادیر X ارایه می‌دهد.

الف) نمودار $\rho - X$ را رسم کنید. آیا مدل سادهٔ $\rho = a + bx$ منطقی به نظر می‌رسد.

x	ρ
۰	۱۰۰
۱	۱۴/۹
۲	۱۹/۶
۳	۲۴/۱

جدول ۶ ـ ۳ : مقادیر کارایی

ب) یک مدل برای این سیستم بدست آورید.

ج) کارایی سیستم را اگر ۳۰ و ۲۰ و ۱۰ و ۲/۵ = x پیش‌بینی کنید.

د) مدل صحیح به صورت $\rho = ۱۰ + ۵x - ۰/۱x^۲$ می‌باشد. نتایج حاصل در قسمت ج را با نتایج حاصل از این مدل مقایسه کنید. چه نتیجه‌ای در مورد صحت مدل می‌توانید بگیرید؟

۷ ـ قوانین حاکم بر سیستم‌های تولید را با ارایه مثالی شرح دهید.

۸ ـ کارخانه‌ای ۲۵۰ قطعه در روز تولید می‌کند. متوسط کار در جریان (WIP) ۸۰۰ قطعه است. متوسط زمان توان عملیاتی را به دست آورید.

۹ ـ لیست فعالیت‌های هفتگی خود را با زمان مورد نیاز برای انجام آن‌ها بنویسید. اگر بخواهید ۴ ساعت اختصاص به مطالعه دهید، این زمان را چگونه به دست می‌آورید؟