مقاله

طراحی سیستم مونتاژ برای تنوع محصول

پویان قابـضی، دانشجوی دکتری مهندسی مکانیک، گرایش ساخت و تولیـد، دانشگاه تهران
Pouyan.ghabezi@ut.ac.ir

علیرضا آرائی، استادیار دانشکدهٔ مهندسی مکانیک، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران
alaraee@ut.ac.ir

چکیده

مونتاژ، فرایند نهایی برای تولید محصول است که در آن سوارش قطعات و اجزای گوناگون صورت می‌گیرد تا محصول نهایی حاصل شود. امروزه، در بازار رقابت، که تنوع محصول و تولید انبوه با کیفیت و قیمت مناسب شرط ماندگاری است، بهره‌گیری از روش‌های نوین مونتاژ از عوامل مؤثر پایداری در بازار رقابت است. بنابراین کاربرد سیستم‌های مونتاژ جدید برای دستیابی به تولید انبوه و تنوع امری الزامی به‌نظر می‌رسد. در این مقاله آخرین پیشرفت‌ها در حوزهٔ طراحی سیستم‌های مونتاژ، برنامه‌ریزی و بهره‌برداری با در نظر گرفتن تنوع محصول بررسی و روش‌های به‌کارگیری مونتاژ، تولید سری و توازن خط مونتاژ مرور شده است. همچنین وجود پیچیدگی‌های عملیاتی و نقش عوامل انسانی در سیستم‌های مونتاژ بر مبنای تنوع محصول، مورد بحث و بررسی قرار گرفته است. چالش‌های موجود در مونتاژ با تنوع بالا ارائه شده و سپس الگویی برای آیندهٔ تولید و ساخت محصولات شخصی (ویژهٔ یک فرد مشخص) ارائه و درباره چالش‌های مونتاژ برای این الگو بحث شده است. سرانجام فرصت‌ها و موقعیت‌های موجود برای به‌کارگیری سیستم‌های مونتاژ در پایان این مقاله آورده شده است.

واژگان کلیدی: مونتاژ، تنوع محصول، توازن خط، طراحی مونتاژگر

مقدمه

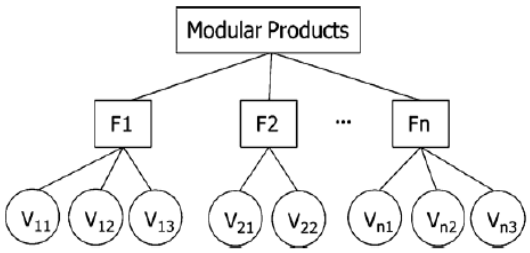
از اواخر دههٔ ۱۹۸۰، سفارش انبوه به‌دلیل تولید محصولات با هزینه‌ای نزدیک به تولید انبوه به‌صورت یک الگوی رایج در آمده است [۱]. طی دههٔ گذشته، به‌دلیل تغییر الگو از تولید انبوه به سفارش انبوه، تعداد متغیرهای ارائه‌شده توسط تولیدکنندگان برای مصرف‌کننده افزایش یافته است. مثلاً تعداد مدل‌های وسائل نقلیه در ایالات متحده از ۴۴ مدل در سال ۱۹۶۹ به ۱۶۵ مدل در سال ۲۰۰۶ افزایش یافته است [۲-۳]. در هر مدل، گزینه‌های زیادی در مورد انتخاب نیروی محرکه و ترکیبات داخلی وجود دارد. نمونهٔ دیگر در مورد تعداد مدل کفش‌های دو و میدانی است که از پنج مدل در اوائل سال ۱۹۷۰ به ۲۸۵ مدل در اواخر دههٔ ۹۰ افزایش یافت [۴]. این افزایش‌ها به‌دلیل تمایل به ایجاد تنوع بالا، تولید محصولات کاملاً سفارشی در پاسخ به

گوناگونی نیازها و اولویت‌های مصرف‌کننده، همچنین رقابت شدید در بازار جهانی رخ داده است. چون تولیدکنندگان تلاش می‌کنند تا عرضهٔ محصولات خود را با نیاز بازار سازگار کنند، محصولات متنوع‌تری ارائه شده است. تنوع می‌تواند در مراحل گوناگون تولید محصول، در زمان طراحی، ساخت، مونتاژ، فروش و یا در تنظیم فاز مصرف حاصل شود (شکل ۱). با تلفیق ورودی‌های طراحی برای مشتری و ایجاد تنوع در طراحی، بیشتر محصولات به‌سمت شخصی‌شدن (یک محصول برای یک شخص معین) میل کرده‌اند. تنوع می‌تواند در فرایند ساخت مانند استفاده از ماشین‌کاری یا روش نمونه‌سازی سریع نیز ایجاد شود. محصولات پزشکی بسیاری با تنوع بالا برای پاسخ به تنوع انسانی بالا ساخته می‌شوند (مثلاً ساخت دندان مصنوعی برای یک شخص خاص).

فاز	روش	مثال
طراحی	تنوع خصوصیات می‌تواند در طراحی محصول لحاظ شود	
ساخت	از روش‌های ساخت گوناگونی می‌توان استفاده کرد؛ روش‌هایی چون ماشینکاری، ریخته‌گری و یا نمونه‌سازی سریع و جز این‌ها	
مونتاژ	در مرحلهٔ مونتاژ ترکیبات گوناگونی از مدول‌ها را می‌توان ایجاد کرد.	
فروش	می‌توان طول چوب گلف را براساس ویژگی‌های فردی برش داد.	
کاربرد	ارتفاع صندلی دوچرخه را می‌توان متغیر ساخت.	

شکل ۱. روش‌های ایجاد تنوع

مونتاژ یکی از مقرون به‌صرفه‌ترین روش‌های تولید محصولات گوناگون است. با طراحی مناسب یک خانواده از محصولات[1] [۵]، هر مدول کاربردی از محصول مجهز به چندین متغیر می‌شود که در ترکیب با مونتاژ، طیف وسیعی از محصولات نهایی را فراهم می‌کند.



شکل ۲. ساختار درختی خانواده‌ای از محصولات برای ایجاد تنوع مونتاژ

چنین روشی تولید محصولات سفارشی با هزینهٔ نزدیک به هزینهٔ تولید انبوه را ممکن می‌سازد که با طراحی گزینه‌های پایه همراه است و به مشتریان اجازهٔ انتخاب ترکیبات مونتاژ متفاوت را می‌دهد. اقتصاد مقدار[2] (افزایش تولید به‌منظور سرشکن کردن هزینهٔ سربار) در سطح جزء حاصل می‌شود در حالی‌که اقتصاد با هدف تنوع[3] بالا در مونتاژ نهایی، با استفاده از سیستم‌های تولید انعطاف‌پذیر حاصل می‌شود. تنوع می‌تواند در زمان فروش یا مصرف نیز ایجاد شود. برای مثال، باشگاه‌های گلف می‌توانند در زمان خرید به طول چوب بازی توجه کنند تا با قد و الگوی ضربه‌زدن فرد به توپ متناسب باشد. ارتفاع نشستن روی دوچرخه را می‌توان در زمان استفاده با توجه به فیزیک بدنی فرد تنظیم کرد.

به‌کارگیری مونتاژ

به‌کارگیری مونتاژ محصول

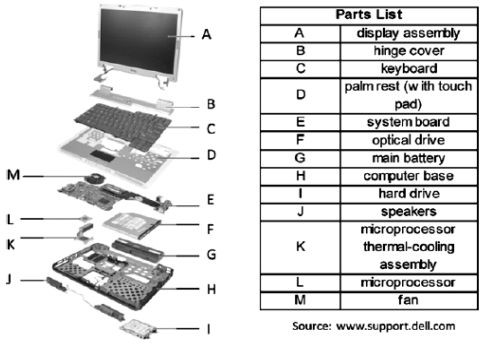
در این بخش به رایج‌ترین روش‌های ارائهٔ مونتاژ شامل نمودارهای رابطه و اولویت چگونگی به‌کارگیری این روش‌ها برای ارائهٔ محصولات متنوع اشاره شده است.

روش‌های رایج به‌کارگیری مونتاژ محصول

چندین روش برای بیان ارتباط بین قطعات در یک مجموعهٔ مونتاژی وجود دارد. این امر می‌تواند در زمان طراحی مفهومی سیستم و برنامه‌ریزی مراحل مونتاژ مفید واقع شود. یکی از روش‌های بیان مونتاژ، تهیه لیست قطعات[۴] است. به‌طور کلی، لیست قطعات یا اصطلاحاً BOM، همهٔ قطعات، زیرمونتاژها و مواد را فهرست می‌کند، همچنین اطلاعات دیگری چون کمیت‌ها، هزینه‌ها و روش‌های تولید را شامل می‌شود. لیست قطعات معمولاً دارای یک نمودار درختی با کدهای سطح ترتیبی می‌باشد [۶]. تعداد زیادی از نمودارهای BOM همچون شبکهٔ BOM [۷]، برای بیان روابط کارکردی قطعات و زیرمونتاژها استفاده شده است. لیست قطعات یک ابزار ارتباطی استاندارد در صنعت برای طراحی، تولید و خرید بوده و با طراحی کامپیوتری[۵] و برنامه‌ریزی سازمانی[۶] تلفیق شده است.

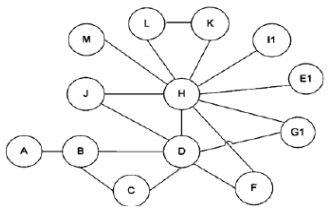
یکی دیگر از مرسوم‌ترین روش‌های بیان مونتاژ، توصیف تئوریک نمودار قطعات و اتصالات فیزیکی بین آنها مانند نمودار رابطه و ماتریس مجاورت می‌باشد. یک نمودار رابطه[۷]، شبکه‌ای گرافیکی است که در آن نودها (گره‌ها) بیانگر قطعات، و خطوط بین آنها نشانگر روابط تعریف‌شده توسط کاربر می‌باشند. این روابط (که با استفاده از لبه‌های گراف بیان می‌شوند)، رابط نامیده می‌شوند که ارتباطات و اتصالات فیزیکی بین اجزا را نشان می‌دهند [۸]. هر یک از مراحل مونتاژ با برقراری یک یا چند رابطهٔ مونتاژی مشخص می‌شود. شکل ۳ قطعات یک رایانهٔ همراه و ارتباط بین آنها را نمایش می‌دهد. فرایند مونتاژ وقتی کامل می‌شود که همهٔ روابط برقرار باشند.

نمودار روابط برای تولید سری‌های مونتاژ نیز استفاده شده است. مثلاً نمودار روابط برای استخراج تقدم و تأخر مراحل مونتاژ در تولید همه سری‌های ممکن استفاده می‌شود [۹]. سایر جنبه‌های مونتاژ با استفاده از ابزارهای متنوع دیگری بیان می‌شوند. نمودار اولویت به‌طور گسترده برای بیان قیود روی مسائل فرایندی در حین مونتاژ استفاده می‌شوند (چه وظایفی باید قبل از وظایف دیگر کامل شوند). روابط اولویت در مسائل مربوط به تعادل خط مونتاژ مفید و کاربردی هستند. نمودارهای اولویت عموماً از عمل مونتاژ (تشخیص تأخر و تقدم) به‌جای قطعات استفاده می‌کنند. اما اگر ابتدا یک جزء پایه ایجاد شود، عمل افزودن قطعات بعدی را می‌توان به‌سادگی با قطعهٔ روی نمودار اولویت نشان داد (شکل ۴).

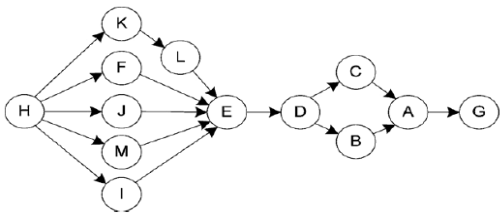


Parts List	
A	display assembly
B	hinge cover
C	keyboard
D	palm rest (with touch pad)
E	system board
F	optical drive
G	main battery
H	computer base
I	hard drive
J	speakers
K	microprocessor thermal-cooling assembly
L	microprocessor
M	fan

Source: www.support.dell.com



شکل ۳. گراف ارتباطات برای اجزای یک رایانهٔ همراه



شکل ٤. گراف اولویت برای بیان مونتاژ اجزای رایانهٔ همراه

روش‌های به‌کارگیری مونتاژ برای تنوع محصول

افزایش تنوع محصول منجر به ایجاد روش‌های جدید در زمینهٔ اجرای مونتاژ شده است. ژا و همکارانش مروری جامع روی بیان مونتاژ بر پایهٔ گراف‌های مکان، ارتباط مجازی، قیود، عملکرد و کارکردهای محصول یکپارچه و طراحی فرایند انجام داده‌اند [۱۰]. به‌کارگیری مونتاژ برای تنوع محصول در منابع گوناگون به اشکال مختلف بیان

شده که در میان آنها، PFA[8] از جمله عناوینی است که مطالعات زیادی روی آن صورت گرفته است. PFA برای اندازه‌گیری وضعیت بازار، اشتراکات و اقتصاد تولید استفاده می‌شود [۱۱-۱۲]. BOM نیز برای ایجاد تنوع در محصولات به‌ویژه محصولات هم‌خانواده تکامل یافته است. همچنین روش‌های رایجی برای معرفی مفهوم لیست جنس مواد وجود دارد[9] [۱۳-۱۴]. GBOM ها از روابط عملکردی و ساختاری در میان اجزا برای تولید انواع محصولات استفاده می‌کنند. نمودارهای رابطه نیز برای بیان تنوع محصول سازگار شده‌اند، که شامل نمودار خانواده‌ای از محصولات است که رابطهٔ بین انواع محصولات را با به‌کارگیری قطعات مشترک به‌صورت یک گره (نود) بیان می‌کند. پس برای یک خانواده از محصولات، نمودار رابطه می‌تواند برای قطعات مشترک و متغیر در یک مجموعه اصلاح شود. بیان مونتاژ برای تلفیق جنبه‌های بیشتری از تنوع محصول بسط داده شده است. مثلاً شباهت و وابستگی در حین مونتاژ با استفاده از معیارهای هزینه بر مبنای تغییر ابزار یا وسایل بیان می‌شود. وابستگی هزینه به نوع محصول و فرایند نیز در طراحی محصولات هم خانواده ارزیابی می‌شود.

سلسله مراتب مونتاژ

مراحل مونتاژ یک مجموعه از قطعات، نقش کلیدی در تعیین کیفیت محصول مونتاژی و نیز مسائل مربوط به طراحی فرایند مانند نیاز به وسائل، توانایی تست فرایند و تعداد مراحل مونتاژ ایفا می‌کند. تعیین همهٔ سری‌های ممکن برای مونتاژ یک گام بلند در فرایند طراحی محصول نهایی می‌باشد. یکی از پیشگامان تحقیق و پژوهش در زمینهٔ سری‌های مونتاژ، بورگالت می‌باشد. اولین کار او برای ارزیابی فرایند مونتاژ، از یک سری پرسش بله یا خیر استفاده می‌کرد [۱۵]. بورگالت نمودار رابطه و الویت یک محصول را با استفاده از اطلاعات موجود در لیست قطعات و نقشه مونتاژ بیان کرد، که در آن قطعات (گره‌ها) و روابط بین زوجها مشخص شده بودند. گاپتا و کرشنان [۱۶] الگوریتمی برای تعیین بزرگترین زیرمجموعه از محصولات هم‌خانواده در یک مسئله مونتاژ ایجاد کردند که دارای بعضی قطعات متفاوت بود. آنها از الگوریتم د-فازیو و ویتنی برای یافتن همهٔ سری‌های مونتاژ استفاده و الگوریتم خود را برای یافتن بیشترین زیرمجموعه اجرا کردند. کشف همهٔ گزینه‌های ممکن برای سری مونتاژ به دو دلیل کار مشکلی است: نخست اینکه برای تعداد کمی از قطعات هم تعداد سری‌های ممکن می‌تواند زیاد باشد. دیگر اینکه تغییرات جزئی در طرح می‌تواند گزینه انتخابی برای مونتاژ را تغییر دهد.

طراحی سیستم مونتاژ برای تنوع محصول

با وجود مجموعه‌ای از سری‌های مونتاژ ممکن، طراحی سیستم مونتاژ سبب تعیین چیدمان سیستم می‌شود و توازن سیستم مونتاژ با اختصاص وظایف به ایستگاه‌های ممکن همراه خواهد بود.

چیدمان سیستم مونتاژ

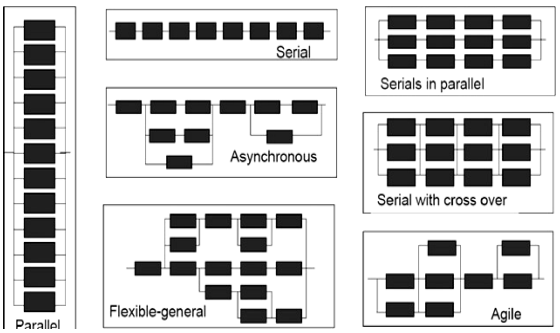
سیستم‌های مونتاژ می‌توانند با استفاده از چیدمان‌های گوناگونی طراحی شوند. خط مونتاژ متحرک، که توسط فورد معرفی شد، دارای چیدمان سری بود. این سیستم‌ها، که به‌عنوان خطوط سری یا خطوط جریان شناخته می‌شوند، برای تولید حجم بالایی از یک نوع محصول خاص توسط ماشین‌ها و سیستم‌های خاص فرآوری مواد مورد استفاده قرار می‌گیرند.

چیدمان سیستم به دو صورت طبقه‌بندی می‌شود:

۱. چیدمان همزمان که در آن هر قطعه بدون توجه به مسیر آن در سیستم، مجموعه‌ای از عملیات را پشت سر می‌گذارد.
۲. چیدمان غیرهمزمان که مجموعه عملیات انجام‌شده روی قطعات به مسیر آنها در سیستم بستگی دارد.

به‌طور کلی، سیستم‌های همزمان برای تولید انبوه مناسب‌ترند. معمولاً در صورتی‌که در سیستم مونتاژ،

زیرمجموعه‌های گوناگونی وجود داشته باشد از چیدمان غیرهمزمان استفاده می‌شود. خط مونتاژ اصلی معمولاً با تغذیه‌کننده‌های سایر خطوط زیرمجموعه سری است (شکل ۵). سیستم‌های همزمان که در شکل ۵ نمایش داده شده‌اند، موارد خاصی از چیدمان انعطاف‌پذیرند. به‌طور کلی، در فرایندهای مونتاژ اتوماتیک از چیدمان‌های متقارن استفاده می‌شود.



شکل ۵. پیکربندی سیستم‌های گوناگون [۱۷]

پیکربندی سیستم با موارد زیر تعیین می‌شود:

۱. چیدمان ماشین‌ها

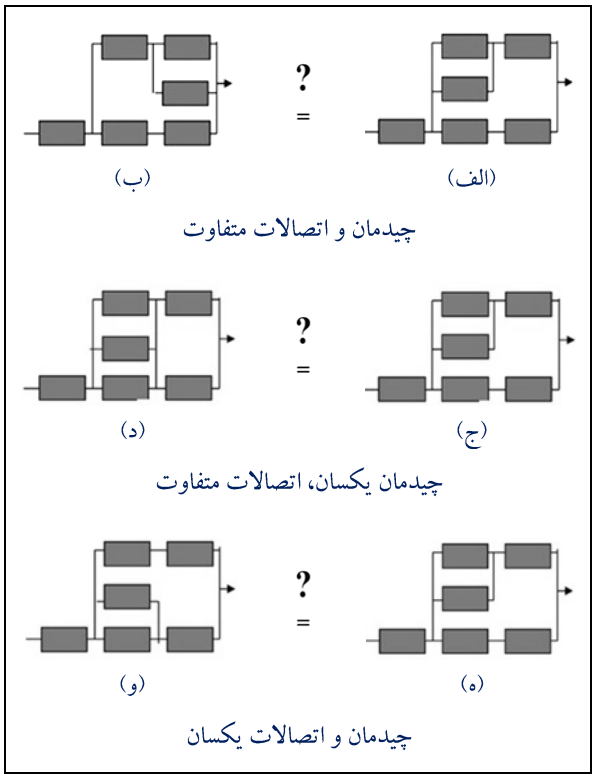
۲. روابط (اتصالات) میان آنها

مثلاً در شکل ۶، چیدمان و اتصالات سیستم در (الف) و (ب) با هم متفاوت‌اند. چیدمان‌های ماشین در (ج) و (د) مشابه‌اند، اما اتصالات در میان آنها متفاوت است. بنابراین این دو پیکربندی کاملاً با هم متفاوت‌اند و در دو دستهٔ جداگانه قرار می‌گیرند. در حالی‌که (ه) و (و)، که دارای چیدمان و اتصالات مشابه‌اند، نشان‌دهندهٔ پیکربندی یکسانی می‌باشند.

در عمل تعداد چیدمان‌های مختلف مربوط به تعداد مشخصی از ماشین‌ها می‌تواند بسیار زیاد باشد. مثلاً با داشتن شش ماشین، می‌توان ۱۷۰ چیدمان گوناگون شامل سری، موازی و دوگانه ایجاد کرد. البته همهٔ این چیدمان‌ها در تولید استفاده نمی‌شوند، چون برنامه‌ریزی و عملیات می‌تواند برای برخی از چیدمان‌های غیرسیستمی بسیار دشوار باشد.

توازن خط مونتاژ

توازن خط مونتاژ به‌معنای جستجو برای اختصاص‌دادن مناسب وظایف مونتاژ به ایستگاه‌ها با توجه به شرایط اولویت برمبنای یک هدف چندمنظوره یا تک‌منظوره می‌باشد. این اهداف از هدفی ساده مانند به حداقل رساندن تعداد ایستگاه‌ها برای یک سیکل خاص و یا حداقل ساختن زمان سیکل در ایستگاه‌های مختلف یک خط سری تا بهینه‌سازی کارایی و عدم توازن در یک خط غیر سری، متفاوت می‌باشند.



شکل ٦. پیکربندی‌های گوناگون و معادل [۱۷]

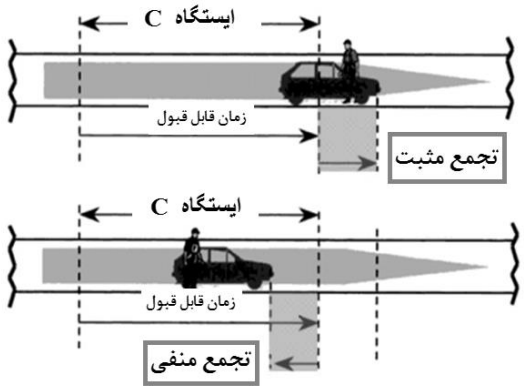
توازن خط برای تنوع محصول

اغلب دو دیدگاه توسط خطوط مونتاژ برای تنوع محصول پیشنهاد می‌شود:

۱. در یک خط مونتاژ چندمدلی، که تفاوت میان مدل‌های مختلف محصول زیاد است، تولید در دسته‌های مختلف مربوط به هر مدل انجام می‌شود.

۲. یک خط مونتاژ ترکیبی که در آن مدل‌های مختلف محصول تقریباً مشابه‌اند، می‌توانند به‌طور همزمان در یک خط مونتاژ شوند.

در توازن خط مونتاژ مدل ترکیبی (حالت اول)، مشخصات فرایند مونتاژ منجر به بروز مشکلات جدیدی مانند تجمع[۱۰] و ازدحام مدل‌ها می‌شود، در حالی‌که در توازن مدل منفرد ساده (حالت دوم) چنین مشکلی وجود ندارد. اصطلاح تجمع، انحراف از زمان مناسب یک چرخه را بیان می‌کند. هدف اصلی توازن خط، رسیدن به زمان چرخهٔ مشابه در هر ایستگاه است، اما اگر انواع متنوعی از محصولات وجود داشته باشند، که نیازمند عملیات مونتاژ مختلف هستند، این امر عملاً غیرممکن خواهد بود. تجمع می‌تواند مثبت یا منفی باشد (شکل ۷).



شکل ۷. تجمع مثبت و منفی [۱۸-۱۹]

تجمع منفی بازهٔ زمانی را نشان می‌دهد که طی آن کارگر یک ایستگاه، هیچ‌گونه فعالیتی روی یک نوع محصول خاص انجام نمی‌دهد. اغلب تجمع منفی بسیار زیاد با تغییرات زیاد در فرایندهای مونتاژ ایجاد می‌شود. تجمع منفی با نیازمندی یک محصول که نزدیک به حداکثر ظرفیت ایستگاه است مطابقت ندارد و کارایی کلی خط را کاهش می دهد. تجمع مثبت بازهٔ زمانی را نشان می‌دهد که طی آن کارگر یک ایستگاه، در مورد یک نوع محصول خاص از چرخهٔ زمانی تعریف‌شده فراتر می‌رود. تجمع مثبت بسیار زیاد، اغلب در تنوع بالای فرایندهای مونتاژ رخ می‌دهد. این امر نه‌تنها بر کارگر فشار وارد می‌کند، بلکه بر کل تولید نیز تأثیر منفی می‌گذارد. ایستگاه‌های شامل تجمع مثبت بزرگ، می‌توانند به‌سادگی در خط مونتاژ گلوگاه ایجاد کنند.

ورودی‌های لازم برای توازن خط

به‌منظور انجام توزان خط، اطلاعات فرایند و شرایط اولویت مربوط به سری‌های ممکن مونتاژ قطعات باید موجود باشد. توازن خط را می‌توان تنها پس از کامل‌شدن توازن فرایند انجام داد، در حالی‌که روش‌های مختلفی برای شناسایی قیود اولویت وجود دارد. طبق مرجع [۲۰]، این روش‌ها را می‌توان به حداقل سه گروه تقسیم کرد:

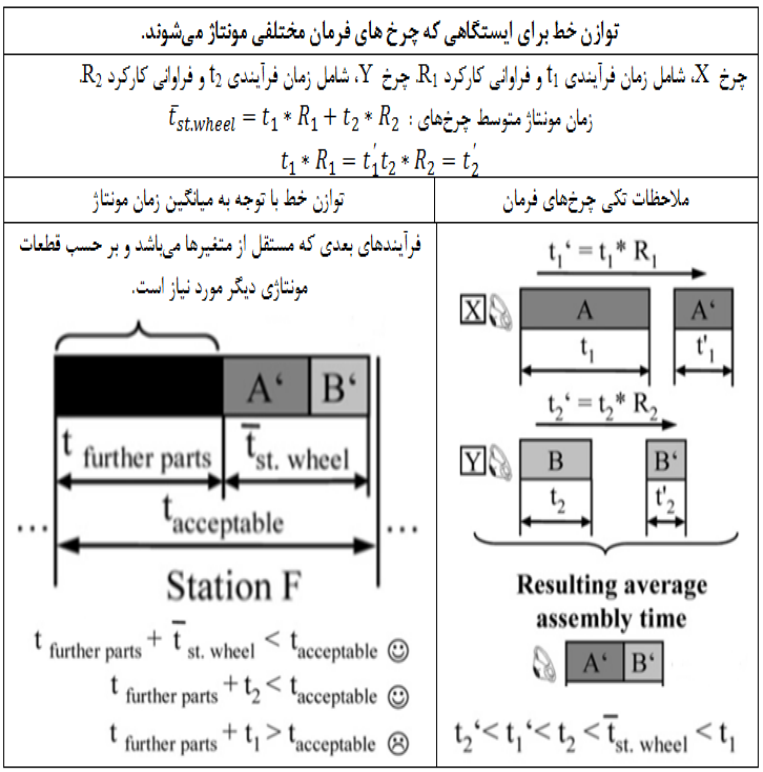
۱. روش‌هایی که به مکان‌شناسی مجموعه می‌پردازند (نمودار رابطه، محل اتصال، نمودار AND/OR)
۲. روش‌هایی که به هندسه می‌پردازند (مانند آنالیزهای مبتنی بر شبیه‌سازی فرایند مونتاژ که قطعات را اشیای جامد در نظر می‌گیرند)
۳. روش‌هایی که به تحلیل اطلاعات مربوط به مونتاژ اضافی می‌پردازند که می‌توانند کارکردی، معنایی، رابطه‌ای، فنی و جز این‌ها باشند.

مدل‌سازی توازن خط

خطوط مونتاژ به ایستگاه‌هایی تقسیم می‌شوند که باید به‌طور مساوی زمان‌بندی شوند تا حجم پیش‌بینی‌شده برای محصولات محقق شود. تقاضای پیش‌بینی‌شده، زمان چرخهٔ خط و ایستگاه را تعیین می‌کند. علاوه بر برنامه‌ریزی برای پرسنل در زمینه توازن خط، حجم کاری مساوی و زمان‌های اجرای مساوی باید به کارگران اختصاص یابد.

مجموعه‌ای از فرمول‌های ریاضی برای مدل‌سازی مسئلهٔ توازن خط مونتاژ مدل ترکیبی استفاده می‌شود که شامل برنامه‌نویسی مکمل دوگانه، برنامه‌نویسی مکمل ترکیبی، برنامه‌نویسی هدف و برنامه‌نویسی مکمل غیرخطی می‌باشد. توازن خط براساس محاسبات میانگین نشان

می‌دهد که فرایندهایی که در پروسهٔ برنامه‌ریزی ایجاد شده‌اند به‌گونه‌ای به ایستگاه‌ها اختصاص می‌یابند که میانگین زمان چرخه قابل قبول حاصل شود. توجه به میانگین زمان مونتاژ اولین الگو مربوط به حجم کاری و تعداد کارگر لازم را فراهم می‌کند، اما هیچ‌گونه اطلاعات خاصی دربارهٔ متغیرها نمی‌دهد. شکل ۸ میانگین زمان مونتاژ مربوط به چرخ فرمان‌های مختلف که فرایند مونتاژ آنها متفاوت است را نشان می‌دهد. چرخ فرمان‌ها باید در ایستگاهی مونتاژ شوند که قطعات دیگری که مخصوص آن نوع نیستند نیز مونتاژ شوند. در مثال ذکر شده، زمان چرخهٔ تعریف‌شده $t_{acceptable}$ در زمان مونتاژ متوسط چرخ فرمان‌ها مشاهده می‌شود. این مقدار در صورتی معتبر است که انواع محصول شامل چرخ فرمان Y جداگانه مد نظر باشد. برای انواع محصول شامل چرخ فرمان Y، تجمع منفی رخ خواهد داد در حالی‌که این تجمع هنوز قابل قبول است. مونتاژ چرخ فرمان X سبب تجمع مثبت می‌شود که از زمان چرخهٔ تعریف‌شده $t_{acceptable}$ فراتر می‌رود که این تجمع قابل قبول نیست. این نمونه نشان می‌دهد که محاسبات میانگین تنها می‌تواند اولین مرحله از یافتن یک توازن مناسب باشد. جوانب مخصوص متغیرها نقش مهمی در برنامه‌ریزی مونتاژ ایفا می‌کنند و بی‌شک باید تلاش‌های بیشتری در رابطه با مدیریت متغیرها صورت گیرد تا بتواند به‌شکلی شفاف و روشن به محصول، فرایند و انواع منابع بپردازد.



شکل ۸ روش توازن خط برحسب مقادیر میانگین [۱۹]

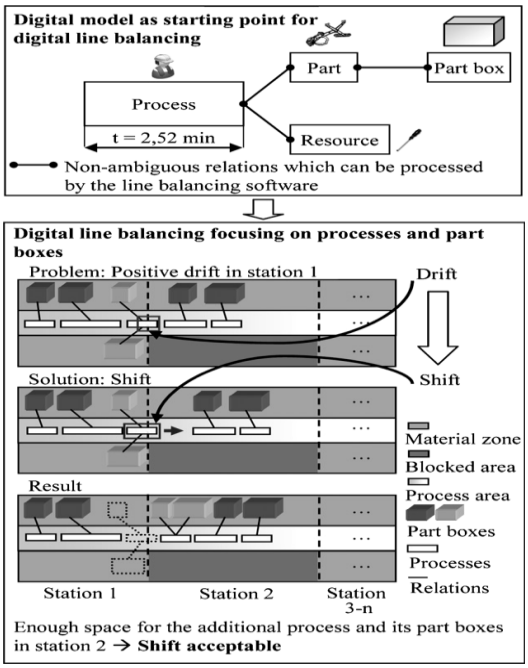
نتایج مربوط به توازن خط

امروزه توازن خط به جنبه‌های بسیار مختلفی می‌پردازد. هدف اصلی اختصاص مناسب فرایندها به ایستگاه‌هاست، به‌گونه‌ای که کمترین تجمع قابل قبول رخ دهد. دیگر اهداف شامل بهینه‌سازی جنبه‌های لجستیک و حرکت میان خطوط می‌باشند. ابزارهای دیجیتالی پیشرفته مربوط به توازن خط نه‌تنها امکاناتی برای تخصیص فرایندها به ایستگاه‌ها ارائه می‌کنند بلکه اجازهٔ تجسم همزمان

بهره‌گیری از مکان مواد (شکل ۹) و نیز محاسبهٔ فواصل حرکت کارکنان با محل قطعات را می‌دهند. مثلاً ابزار DELMIA، به نام توازن خط خودکار[11] امکانات ذکرشده را عرضه می‌کند. به‌علاوه، باید توجه داشت که توازن خط بر نیاز نهایی منابع نیز تأثیر دارد. در نتیجه به حداقل رساندن نیاز نهایی منابع یا تأثیرات زیست محیطی می‌تواند هدف دیگری باشد، در حالی‌که این روش تنها در مواردی به‌کار می‌رود که از منابع گران‌قیمت استفاده می‌شود. چندین نرم‌افزار دیگر به‌صورت تجاری یا غیرتجاری در دسترس می‌باشند. بستهٔ نرم‌افزار تجاری OptiLine از الگویتم ژنتیک استفاده می‌کند. نرم‌افزارهای غیرتجاری زیادی نیز موجود هستند. اگرچه اکثر آنها مخصوص یک مسئله خاص و یا مربوط به مسائل تک‌مدلی هستند. یک الگوریتم تجربی (اکتشافی) نیز به‌صورت یک نرم‌افزار مبتنی بر MSAccess برای مطالعه یک نمونهٔ صنعتی نیز اجرا شده است.

ارزیابی عملکرد

کیفیت، هزینه و تحویل مهم‌ترین معیارهای عملکرد سیستم‌های تولید هستند، اما معیارهای عملکرد از نظر تداوم زیست محیطی و آثار اجتماعی و کارگری توجهاتی را به‌خود جلب کرده‌اند. کیفیت معمولاً برمبنای نزدیک‌بودن به مشخصات و ویژگی‌های کلیدی طراحی محصول اندازه گیری می‌شود. هو [۲۱] با ترکیب مدل ساختار مهندسی با آنالیز آماری (که به‌دلیل تطابق قطعات، تنوع مورد توجه بود)، یک مدل جریان تنوع برای پیش‌بینی کیفیت مونتاژ اتوماتیک ارائه کرد. کاملیو و همکارانش [۲۲]، چنین مدلی را برای سیستم‌های مونتاژ چندمرحله‌ای گسترش دادند و روشی برای تشخیص خطا در سیستم‌های مونتاژ ابداع کردند. ظرفیت پذیرش، معیار مهم دیگری از عملکرد سیستم مونتاژ است که تحقیقات مهمی در این حوزه انجام شده است. کتاب گرش وین [۲۳]، مقدمه‌ای بر روش‌های آنالیز ظرفیت پذیرش سیستم می‌باشد. علاوه بر ظرفیت پذیرش، معیارهای دیگری نیز برای تعیین کیفیت انعطاف‌پذیری سیستم پیشنهاد شده است.



شکل ۹. روش توازن خط به‌صورت همزمان

جنبه‌های لجستیک مربوط به DELMIA را مد نظر قرار می‌دهد

یک روش برآورد انعطاف پذیری سیستم تولید برمبنای شباهت رفتار پویا بین یک سیستم مکانیکی و تولیدی می‌باشد. فرضیهٔ اصلی این است که انعطاف‌پذیری یک سیستم تولید را می‌توان براساس عملکرد عامل میرایی در یک سیستم مکانیکی محاسبه کرد. این روش در یک نمونهٔ آزمایشی با استفاده از داده‌های حقیقی حاصل از صنعت خودروسازی به‌کار گرفته شده است که نتایج نشان می‌دهد این روش برای تخمین انعطاف‌پذیری در یک سیستم تولید قابل استفاده می‌باشد. قابلیت قیاس و قابلیت تبدیل از دیگر معیارهای انعطاف‌پذیری عملکرد سیستم تولید می‌باشند. قابلیت قیاس، بیانگر توانایی اصلاح ظرفیت تولید برای یک سیستم با افزودن یا کاهش منابع تولید (مثل ماشین‌ها) و یا تغییر اجزای سیستم می‌باشد. قابلیت تبدیل، سهولت یک سیستم تولید در تغییر کارکرد خود مثلاً در پاسخ به انواع محصولات مختلف را اندازه‌گیری می‌کند.

هزینهٔ معیار نهایی برای بررسی یک سیستم تولید است. یک مدل هزینه برای فرایندهای مونتاژ، که براساس تکنیک تعیین هزینهٔ بر پایهٔ فعالیت (ABC)[۱۲] بوده و عوامل هزینه مونتاژ را با یک مدل ترکیب می‌کند، می‌تواند به‌عنوان ابزاری برای حمایت از تصمیم‌گیری در زمان طراحی و بهره برداری از سیستم‌های مونتاژ مورد استفاده قرار گیرد.

عملیات سیستم مونتاژ

برنامه‌ریزی فرایند برای مونتاژ با تنوع بالا

مونتاژ چیزی فراتر از سوارش قطعات با همدیگر است و فرایند نهایی در تولید به‌شمار می‌آید. برنامه‌ریزی فرایند مونتاژ کار مهمی در برنامه‌ریزی و کنترل تولید قطعات مجزا محسوب می‌شود. سطح دانه بودن[۱۳] در برنامه‌ریزی مونتاژ به مقدار و سطح جزئیات موجود گفته می‌شود. برنامه‌ریزی مونتاژ را می‌توان به برنامه‌ریزی خرد و کلان طبقه‌بندی کرد. برنامه‌ریزی کلان اساساً به وظایفی مانند برنامه‌ریزی استقرار، شناسایی وظایف مونتاژ و سری‌سازی آنها برای انتقال از یک چیدمان به دیگری می‌پردازد. برنامه‌ریزی خرد بر جزئیات ریزتر هر عملیات مانند مراحل ریز مونتاژ، مسیر ابزارها، اجتناب از برخورد، انتخاب عوامل موثر نهایی و تولید برنامه‌های قابل اجرا در مونتاژ اتوماتیک و روباتیک تمرکز می‌کند. هومم دملو و سندرسون [۲۴] و جونز و همکارانش [۲۵]، ضوابط متنوع در سیستم‌های برنامه‌ریزی موجود و کاربردهای آنها را بررسی کرده‌اند. علاوه بر اهداف رایج مانند بهینه‌سازی هزینه، زمان، عملکرد، کارهای بدون ارزش افزوده مانند جهت‌دهی مجدد، چیدمان مجدد و تغییر ابزارآلات و ضوابط خاص مونتاژ، مورد توجه قرار گرفته است. در دو دههٔ اخیر، کاربرد روش‌های بهینه‌سازی غیرسنتی مانند الگوریتم ژنتیک، شبیه‌سازی آنیل[۱۴]، جستجوی تابو[۱۵]، کلونی مورچه‌ها، شبکه‌های عصبی افزایش چشمگیری داشته است. روش‌های جستجو براساس هوش مصنوعی برای تولید سری مونتاژ و برنامه‌ریزی فرایند برای مونتاژ دستی و اتوماتیک و عملیات دمونتاژ مورد استفاده قرار می‌گیرد.

به‌کارگیری دانش شناسایی برای برنامه‌ریزی مونتاژ

مقدار و نوع جزئیات موجود در برنامه‌ریزی مونتاژ مهم می‌باشد. تقابل با مدل‌های CAD مونتاژ، نخستین گام در برنامه‌ریزی مونتاژ است؛ چون نهایتاً خودکار کردن برنامه‌ریزی مونتاژ و همچنین تولید برنامه‌ها براساس داده‌های ورودی مورد نیاز می‌باشد. ایده‌آل این است که نقشه‌های اولیه مونتاژ، مقاطع عرضی، فهرست قطعات و نیز داده‌های ارتباطی مانند نمودارهای رابطه–الویت بتوانند برنامه‌ریزی و آنالیز مونتاژ را در اوایل مرحله طراحی و چرخه تولید شروع کنند.

برنامه‌ریزی مونتاژ قابل پیکربندی مجدد

معمولاً زمان صرف‌شده در برنامه‌ریزی طراحی و مونتاژ یک محصول جدید قابل توجه است. برای محصولاتی با چرخهٔ حیات طولانی، که در مقادیر زیاد تولید می‌شوند و اغلب به‌صورت دستی مونتاژ می‌شوند، این سرمایه‌گذاری (زمانبر بودن برنامه‌ریزی) قابل توجیه است. همچنین یک شاخص عملکردی برای ارزیابی پیکربندی مجدد فرایند تدوین شده است. شاخص پیکربندی مجدد برای ارزیابی کیفیت برنامه‌های فرایند آرایش شده، استفاده می‌شود که معیاری از گستره چیدمان مجدد و تغییرات به‌واسطهٔ تنوع می‌باشد و همچنین نشان‌دهندهٔ جهت‌گیری جدید در برنامه‌ریزی فرایند و بیانگر معیاری نوین با هدف حداقل ساختن توقف در فعالیت‌های فرعی در سطح فروشگاه می‌باشد. این روش برنامه‌ریزی فرایند قابل پیکربندی مجدد جدید[۱۶]، پیکربندی مجدد موضعی برنامه‌های مونتاژ در زمان لازم را ممکن ساخته و گستره تغییر و پیکربندی مجدد در سطح فروشگاه و هزینه‌های مربوط به انجام تغییرات در تأسیسات موجود، ابزارها، آموزش نیروی کار و مسائل مربوط به کیفیت را به

حداقل می‌رساند. این شیوه برای برنامه‌ریزی مونتاژ کلان عملی بوده و در مونتاژ یک خانواده از قوری‌های برقی خانگی مورد استفاده قرار گرفته است.

مدیریت پیچیدگی‌های حاصل از تنوع محصول

با افزایش تنوع محصول، فرایند مونتاژ در سیستم‌های مونتاژ مدل ترکیبی کاملاً پیچیده می‌شود که خود بر عملکرد سیستم تأثیرگذار است. این پیچیدگی حاصل از تنوع، در جنبه‌های مختلف مونتاژ مانند تأمین قطعات، زمان بندی تولید، عملیات مونتاژ دستی و جز این‌ها بروز پیدا می‌کند. چهار منبع اصلی تنوع محصول، ممکن است سبب افزایش پیچیدگی فرایند مونتاژ شوند:

۱. کارهای اصلی مختلف در یک خانواده از محصولات
۲. سازگاری یک کار با نیازهای مختلف
۳. عرضهٔ کارکردهای اختیاری
۴. نیازهای غیر کارکردی

یک روش ممکن برای مطابقت با این چالش عبارت است از مدل‌سازی چگونگی پیچیده‌شدن فرایند مونتاژ و عملیات تنوع محصول و همچنین چگونگی تأثیر بر عملکرد سیستم.

سامی و المراغه‌ای یک مدل برای پیچیدگی محصول ابداع کردند که در آن کیفیت و تنوع اطلاعات و نیز اصول طراحی مونتاژگرا (DFA) با مدل پیچیدگی عملیات المراغه‌ای و اوبانیک [۲۶]، ادغام شده است. آنها مدل پیچیدگی مونتاژ محصول را به‌صورت زیر بیان کرده‌اند:

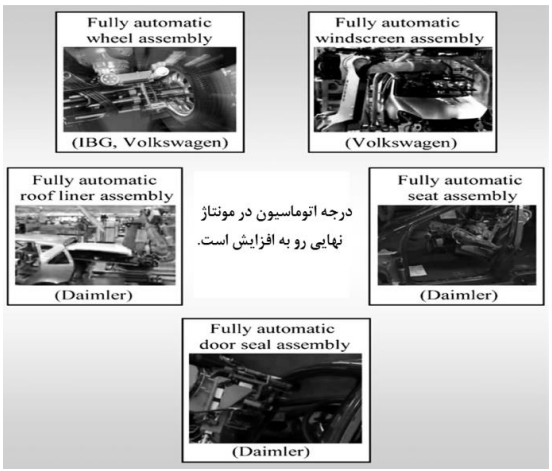
$$C_{product} = \left(\frac{n_p}{N_p} + CI_{product}\right)\log_2^{(N_p+1)} + \left(\frac{n_s}{N_s}\right)\log_2^{(N_s+1)} \quad (۱)$$

به‌طوری‌که در این رابطه $C_{product}$ پیچیدگی مونتاژ محصول، N_p و N_s به‌ترتیب کل تعداد قطعات و بست‌ها، n_p و n_s تعداد قطعات و بست‌های منحصر به‌فرد و $CI_{product}$ شاخص پیچیدگی مونتاژ محصول می‌باشد.

عبارت دوم معادله ۱ تنوع و کیفیت اطلاعات مرتبط با بست‌ها را نشان می‌دهد که $n_s \geq 1$.

نقش انسان در مونتاژ

نقش عامل انسانی در انواع گوناگون سیستم‌های تولید و مونتاژ کاملاً متفاوت است. معرفی نسخه‌های روباتیک در کنار خطوط مونتاژ اتوماتیک سنتی، کاربر انسانی را از خطوط مونتاژ سری حذف کرده است. با این‌وجود، هنوز بسیاری از عملیات مونتاژ به‌قدری پیچیده هستند که کارگران مونتاژ انسانی بهترین راه‌حل می‌باشند. در برخی موارد، عملیات دستی تنها گزینه است. انسان در سازگاری با تغییرات کوچک در کار مونتاژ، از ماشین بهتر است. در نتیجه اگر تنوع کم در محصول وجود داشته باشد، استفاده از انسان نتیجهٔ پایدارتری می‌دهد. با این‌حال تمایل به افزایش درجهٔ اتوماسیون، خصوصاً در حوزهٔ مونتاژ نهایی وجود دارد. نمونه‌هایی از مونتاژ اتوماتیک در شکل ۱۰ نمایش داده شده است. استانداردسازی و تنظیم نکات مهم از راه‌حل‌های کلیدی هستند.

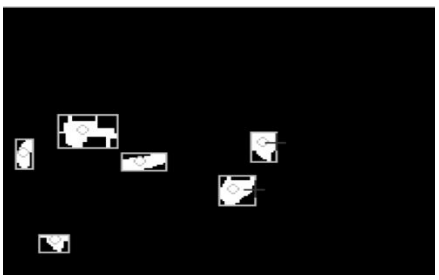


شکل ۱۰. نمونه‌هایی از مونتاژ اتوماتیک

در خط سری، عملیات اتوماتیک می‌تواند با بازده زیادی مورد استفاده قرار گیرد و عملیات پایدار می‌تواند با استاندارد شدن وظایف و داشتن تنوع کم بین انواع محصولات حاصل شود. برای عملیات نهایی، کار دستی بهترین گزینه

است. کارگران می‌توانند وظایف خود را به‌منظور مونتاژ انواع محصولات تغییر دهند. امکان تکمیل عملیات موازی، به کارگران اجازه کار در محل منفرد را می‌دهد. همیشه تفکیک میان وظایفی که می‌توانند به‌صورت اتوماتیک انجام شوند از وظایفی که به مونتاژ دستی نیاز دارند، ساده نیست. قوانین ایمنی، استفاده از محل کاری که کاربران مجبورند بدن خود را درون فضای کار یک روبات در حال کار قرار دهند، منع می‌کند. در چندین پروژهٔ تحقیقاتی، روش‌هایی برای غلبه بر این مشکل بررسی شده است. امیدبخش‌ترین روش، استفاده از سیستم‌های بصری برای ممنوع‌کردن روبات از حرکت به‌سمت دستان، بازوها یا سایر بخش‌های بدن انسان می‌باشد. یک نمونه از این سیستم‌ها در شکل ۱۱ نمایش داده شده است.

(الف)



(ب)

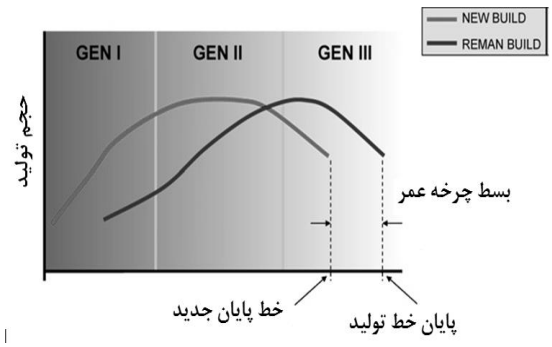
شکل ۱۱. نمایشی از

الف) یک کارگاه دستی روباتیک از دید دوربین الکترونیک

ب) بخش‌هایی از بدن انسان که روبات نباید به آن نواحی وارد شود.

تولید مجدد برای محصولات با تنوع زیاد

فرایند تولید با ویژگی تولید مجدد می‌تواند برای ساخت برخی از انواع محصولات با تنوع زیاد که در معرض محدودیت‌های اقتصادی و لجستیک قرار دارند مورد استفاده قرار گیرد. در تولید مجدد، محصولات مورد استفاده به یک وضعیت جدید برمی‌گردند در نتیجه ارزش افزوده بیشتری نسبت به تولید اولیه، ایجاد می‌شود (شامل انرژی، مواد خام و کار) و آثار زیست‌محیطی محصول کاهش می‌یابد. مطالعات صورت گرفته، صرفه‌جویی انرژی ۸۵ درصدی در تولید محصولات جدید و کاهش در استفاده از منابع طبیعی کمیاب را نشان داده‌اند. تولید مجدد، اصول لجستیک معکوس را ترکیب می‌کند که به‌صورت فرایند برنامه‌ریزی، اجرا و کنترل جریان مؤثر و مقرون به‌صرفه مواد خام، موجودی فرایند، کالاهای نهایی و اطلاعات مربوطه از نقطه مصرف تا نقطه مبدأ با هدف ضبط مجدد ارزش یا دفع مناسب تعریف می‌شود. شکل ۱۲ نشان می‌دهد که چگونه تولید چرخه حیات مفید، نسل‌های متوالی محصولات را گسترش می‌دهد. چون محصولات دوباره تولیدشده معمولاً ۳۰ تا ۵۰ درصد کمتر از کالاهای جدید فروخته می‌شوند، در نتیجه حاشیهٔ سود کمی دارند.



شکل ۱۲. استراتژی بازیافت برای یک پلتفرم چندبار تولیدشده

چالش‌های استفاده از تولید مجدد برای ایجاد محصولات با تنوع بالا در درجهٔ اول لجستیک و اقتصادی می‌باشد. تنوع بالا، دلیل گرانی قطعات سفارشی است که باید ذخیره و نگه‌داری شود؛ به‌طوری‌که هزینه‌های اضافی بر قیمت هسته‌های استاندارد تحمیل می‌کند. به‌علاوه قطعات اضافی نیازمند تمیزکردن دستی بسیار پرزحمت و بازرسی جداگانه قبل از انبارکردن ایمن هستند.

جمع‌بندی

مونتاژ فرایندی مهم و مقرون به‌صرفه برای تولید انواع محصولات می‌باشد. تحقیقات مهمی در طراحی و بهره‌برداری از سیستم مونتاژ در حمایت از تنوع بالای محصول صورت گرفته است، برخی از نکات مربوط به تنوع بالا عبارت‌اند از:

۱. یک شیوهٔ توانمند برای طراحی سیستم مونتاژ، توسعهٔ روش‌های بیان مونتاژ است که بتواند از طراحی جمعی پشتیبانی کند. این مسئله برای همکاری تولیدکنندگان مختلف در سراسر جهان بسیار مهم است.

۲. ملاحظهٔ ترتیب مونتاژ و مونتاژ موازی اجازهٔ هیچ‌گزینه دیگری که منجر به تولید ساده و پیکربندی سیستم نوین شود را نمی‌دهد.

۳. طراحی سیستم‌های مونتاژ قابل پیکربندی مجدد با تلفیق ماشین‌ها و افراد می‌تواند به انعطاف‌پذیری و قابلیت رشد سیستم مؤثر منجر شود.

۴. چون الگوی تولید از سفارش انبوه به‌سمت شخصی‌سازی تکامل یافته است، روش‌های طراحی مونتاژ جدید در حمایت از ساختار محصول باز و طراحی شخصی ابداع شده است. محصولات شخصی به حمایت سیستم‌های تولید بر مبنای تقاضا نیاز دارند.

مآخذ

[1] Pine, Joseph. “Mass Customization: The New Frontier in Business Competition.”, 62. Harvard: Harvard Business School Press, 1992.

[2] Wards C, (Ed.), Ward’s Automotive Yearbook. “Wards Communications”, Inc., Detroit, MI, 1970.

[3] Wards AG, (Ed.), Ward’s Automotive Yearbook. “Prism Business Media”:, Inc., Detroit, MI, 2006.

[4] Annual Report of the Federal Reserve Bank of Dallas. http://www.dallasfed.org/fed/annual/index.cfm (accessed September 2, 1998)

[5] Tseng, Mitchell, Jiao, Jianxin, Merchant, Eugene. 1996. Design for Mass Customization. CIRP Annals Manufacturing Technology 45(1):153–156.

[6] Hopp, Wallace. and Spearman, Mark. 2007. “Factory Physics”, pp. 131-132. 3rd edition, Irwin/McGraw-Hill.

[7] Nanda, Jyotirmaya., Thevenot, Henri., Simpson, jack. 2007. Product Family Design Knowledge Representation, Aggregation, Reuse, and Analysis. Artificial Intelligence for Engineering Design Analysis and Manufacturing 21(02):173–192.

[8] Samy, Simen, Maraghy Hector. 2010. Measuring the Complexity of Manual Products Assembly. Paper presented at the International Conference on Manufacturing System, May 26-28, in Vienna Austria,.

[9] De Fazio, Tailor, Whitney, Daniel. 1987. Simplified Generation of All Mechanical Assembly Sequences. IEEE Journal of Robotics and Automation 3(6): 640–658.

[10] Zha, XF, Lim, SYE, Fok, SC. 1998. Integrated Intelligent Design and Assembly Planning: A Survey. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology 14(9): 664–685.

[11] Jiao, J. Tseng, MM., Duffy, VG., Lin, F. 1998. Product Family Modeling for Mass Customization. Computers & Industrial Engineering 35(3–4): 495–498.

[12] Jiao , J., Tseng, MM. 1999. A Methodology of Developing Product Family Architecture for Mass Customization. Journal of Intelligent Manufacturing 10(1): 3–20.

[13] Olsen, KA., Sætre, P., Thorstenson, A. 1997. A Procedure-Oriented Generic Bill of Materials. Computers & Industrial Engineering 32(1): 29–45.

[14] Hegge, HMH., Wortmann, JC. 1991. Generic Bill-of-Material: A New Product Model. International Journal of Production Economics 23(1–3): 117–128.
[15] Bourjault, A. 1984. Contribution A` Une Approche Methodologique De L'assemblage Automatise´: E´ laboration Automatique Des Se´quences Operatoires. PhD diss., Universite´ de Franche-Comte´ , France.
[16] Gupta, S., Krishnan, V. 1998. Product Family-Based Assembly Sequence Design Methodology. IIE Transactions 30(10): 933–945.
[17] Shpitalni, M., Kurnaz, S. 2002. How Many Machining System Configurations Exist? Special Symposium in honor of Prof. Krause on Virtualisation of Product Development, April 26, In Berlin, Germany.
[18] Eversheim, W., Abels, I. 2003. Simulation-Based Staff Planning in the Field of Final Assembly of Cars. Automobil produktion. Springer: 61–70.
[19] Weyand L. 2010. Risk-Reduced Final Assembly Planning in the Automotive Industry. PhD diss., Universita¨ t des Saarlandes, Germany.
[20] Bley, H., Avgoustinov, N., Zenner, C. 2006. Assembly Operation Planning by Using Assembly Features. Paper presented at the 1st CIRP-International Seminar on Assembly Systems, November 15–17, In Stuttgart, Germany.
[21] Hu SJ. 1997. Stream-of-Variation Theory for Automotive Body Assembly, CIRP Annals, Manufacturing Technology 46(1): 1–6.
[22] Camelio , Jaime., Ceglarek, Dariusz. and Hu, Jack. 2003. Modeling Variation Propagation of Multi- Station Assembly Systems with Compliant Parts. Journal of Mechanical Design 125: 673.
[23] Gershwin Simpson. "Intelligent Manufacturing Systems Engineering.", Prentice Hall. 1994.
[24] Homem de Mello, LS., Sanderson, AC. 1991. Representations of Mechanical Assembly Sequences, IEEE Transactions on Robotics and Automation 7(2): 211–227.
[25] Jones, RE., Wilson, RH., Calton, TL. 1998. On Constraints in Assembly Planning. IEEE Transactions on Robotics and Automation 14: 849–863.
[26] ElMaraghy Wead., Urbanic Ruis. 2003. Modelling of Manufacturing Systems Complexity. CIRP Annals Manufacturing Technology 52(1): 363–366.

پی‌نوشت

1. Product Family Architecture (PFA)
2. economy of scale
۳. استفاده از تجهیزات یکسان در ترکیب باهم به‌منظور تولید محصولات متعدد با قیمت ارزان‌تر.
4. Bill-of-Material
5. Computer-Aided Design
6. Enterprise Resource Planning
7. liaison graph
8. Product Family Architecture
9. Generic Bill of Material
10. Drift
11. Automatic Line Balancing
12. Activity Based Costing
13. granularity
14. Simulated Annealing
15. Tabu Search
16. Reconfigurable Process Planning