ارائه یک سیستم برنامه‌ریزی تولید سلسله مراتبی برای محیط‌های ترکیبی MTO/MTS (با یک مطالعه موردی)

سید علی ترابی
استادیار گروه مهندسی صنایع، دانشکده فنی، دانشگاه تهران
satorabi@ut.ac.ir
محمود عبادیان*، مرضیه رضائی
دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی صنایع، دانشگاه تهران
mebadian@engmail.ut.ac.ir
حسن شمسی
دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی صنایع، دانشگاه علم و صنعت
مصطفی میری
کارشناس مهندسی صنایع، دانشگاه صنعتی امیر کبیر

واژه‌های کلیدی: برنامه‌ریزی تولید سلسله مراتبی(HPP)- محیط‌های ترکیبی MTS/MTO- افق غلتان- برنامه‌ریزی عدد صحیح

چکیده: در این مقاله یک ساختار سلسله مراتبی و یکپارچهٔ برنامه‌ریزی تولید و مواد برای محیط‌های ترکیبی MTS/MTO ارائه شده است. این ساختار دارای چهار سطح مختلف تصمیم‌گیری بوده و برای هر سطح یک مدل تصمیم‌گیری مناسب توسعه یافته است. سطح اول مربوط به فرآیند رد یا پذیرش سفارشات MTO و برآورد ظرفیت‌های موردنیاز سفارشات پذیرفته شده است. در این مرحله با توجه به اهمیت سفارشات و ظرفیت در دسترس که برای محصولات MTS وMTO مشترک می‌باشد، ترکیبی از سفارشات ورودی پذیرفته شده و بقیه سفارشات رد می‌شوند. مراحل بعدی نیز طبق منطق سیستم MRP II مربوط به برنامه‌ریزی محصولات MTS می‌باشند. بدین ترتیب در سطح دوم، از یک مدل ریاضی عدد صحیح برای حل مسئله برنامه‌ریزی تولید ادغامی (AP) استفاده شده و هدف تعیین سطوح بهینه تولید، موجودی، پیمان‌کاری و اضافه‌کاری برای محصولات ادغامی در پریودهای ادغامی می‌باشد. در سطح سوم، برنامهٔ ادغامی تهیه شده در سطح دوم با استفاده از یک مدل تفکیک مناسب به برنامه اصلی تولید (MPS) در سطح مدل‌های محصولات قابل فروش و پریودهای غیرادغامی تبدیل می‌شود. نهایتاً در سطح چهارم نیز با توجه به MPS تعیین شده در سطح سوم و سایر داده‌ها نظیر زمان تدارک خرید اقلام، برنامه زمانی سفارشات خرید (ماجول MRP) از طریق اجرای یک مدل ریاضی مختلط عدد صحیح تعیین می‌گردد. همچنین به منظور پویا نمودن این ساختار برنامه‌ریزی و بهنگام‌سازی سیستماتیک برنامه‌ها در سطوح مختلف، از رویکرد افق غلتان در هر یک از این سطوح استفاده شده است. ساختار پیشنهادی برای یک سازندهٔ بزرگ وسایل الکترونیکی (شامل انواع تلویزیون، رادیوپخش خودرو و مانیتور) به اجرا در آمده و نتایج بدست آمده بیانگر کارایی بالای این رویکرد در برنامه‌ریزی یکپارچه تولید و مواد در این شرکت تولیدی می‌باشد.

۱- مقدمه

یک سیستم تولیدی شامل چندین زیر سیستم مرتبط بهم است و فعالیت‌های مختلف آنها بایستی بنحوی صحیح در جهت افزایش کارائی و عملکرد کل سیستم هدایت شوند. در این میان برنامه‌ریزی تولید فعالیت پیچیده‌ای است که نیاز به همکاری واحدهای مختلف در یک سازمان دارد. این فعالیت در واقع توالی یکسری تصمیمات در رابطه با موضوعات مختلف در محیط ساخت وتولید می‌باشد. تصمیمات تولیدی در سطوح مختلف مدیریتی مطابق با سلسله مراتب فعالیت‌های تولیدی اتخاذ می‌شوند. با پایین رفتن در این ساختار سلسله مراتبی تصمیم‌گیری، افق تصمیمات تنگ‌تر شده و سطح جزئیات افزایش می‌یابد. اما به هر حال یک ارتباط و هماهنگی مابین تصمیمات سطوح متوالی تصمیم‌گیری ضروری است. یک روش کلاسیک برای انجام این فرآیند تصمیم‌گیری چند سطحی، رویکرد برنامه‌ریزی تولید سلسله مراتبی (HPP)[1] می‌باشد. در یک سیستم HPP، مسئله اصلی تصمیم‌گیری با توجه به نوع ساختار سازمانی به مسائل کوچکتری تجزیه می‌شود که این زیر مسائل دارای یک ساختار سلسله مراتبی مابین خود هستند.

تعداد سطوح تصمیم‌گیری و مسئله تصمیم‌گیری در هر سطح بستگی به نوع محیط تولیدی دارد [۱]. برخی از سیستم‌های تولیدی از موجودی محصولات نهائی که براساس پیش‌بینی تقاضای مشتریان تولید و در انبارها نگهداری می‌شوند، به تقاضای مشتریان خود پاسخ می‌دهند. به این نوع محیط‌های تولیدی ساخت برای انبار (MTS)[2] گفته می‌شود. برخی دیگر نیز تنها در صورت رسیدن سفارش مشتری اقدام به تولید نموده و لذا به سیستم‌های ساخت برای سفارش (MTO)[3] معروف می‌باشند. عدم امکان پیش‌بینی مناسب محصولات بدلیل افزایش نوسانات بازار رقابتی، بالا بودن هزینه‌های موجودی و عدم استاندارد سازی محصولات بدلیل افزایش تنوع خواسته‌های مشتریان از جمله ضعف‌های محیط‌های تولیدی MTS می‌باشد. از طرف دیگر امکان تولید کردن تمام محصولات بصورت کاملاً سفارشی امکان پذیر نیست. بالارفتن زمان تحویل سفارش، عدم امکان مناسب از منابع تولیدی (اضافه‌کاری و یا بیکاری ماشین‌آلات) و پیچیدگی برنامه‌ریزی تولید محصولات از جمله مشکلات سیستم‌های MTO می‌باشد. به همین دلیل امروزه بیشتر سیستم‌های تولیدی برای بهره‌گیری از مزایای همزمان سیستم‌های تولیدی MTS و MTO تمایل به پیاده‌سازی محیط تولیدی ترکیبی را دارند [۲]. اگرچه تاکنون تحقیقاتی در زمینه پیاده‌سازی رویکرد HPP در سیستم‌های تولیدی MTS و MTO صورت گرفته اما این موضوع در سیستم‌های ترکیبی MTO/MTS کاملاً جدید می‌باشد [۳]. سوالی که در محیط‌های تولیدی ترکیبی مطرح می‌باشد این است که با توجه به منابع محدود مشترک در اینگونه سیستم‌های تولیدی برای محصولات MTS و MTO و نیز ویژگی‌های متفاوت این محصولات، یک ساختار مناسب سلسله مراتبی شامل چه اجزای تصمیم‌گیری می‌باشد. برای پاسخگویی به این سوال، در این مقاله سعی شده است که یک ساختار مناسب سلسله مراتبی در یک محیط تولیدی که محصولات MTS و MTO تولید می‌کند ارائه شود.

بخش دوم مقاله شامل مروری بر تحقیقاتی است که تاکنون در زمینه برنامه‌ریزی تولید سلسله مراتبی در محیط‌های تولیدی مختلف صورت گرفته است. در بخش سوم، ساختار سلسله مراتبی تصمیم‌گیری پیشنهادی ارائه می‌شود. این بخش شامل ارائه ساختار سلسله مراتبی پیشنهادی، توضیح مراحل مختلف ساختار تصمیم‌گیری و ارائه مدلهای ریاضی عدد صحیح می‌باشد. در بخش چهارم نتایج اجرای ساختار پیشنهادی برای یک سازندهٔ بزرگ وسایل الکترونیکی (شامل انواع تلویزیون، رادیوپخش خودرو و مانیتور) نشان داده می‌شود. بخش پایانی مقاله شامل مزایای ساختار پیشنهادی و مطالعات آتی می‌باشد.

۲- مرور ادبیات

هاکس و میل [۴] اولین محققانی بودند که رسماً به موضوع HPP بر مبنای ایده‌های اشاره شده در کارهای هالت و دیگران [۵] و وینترز [۶] پرداختند. آنها مجموعه‌ای از روشهای هیوریستیک را برای برنامه‌ریزی سلسله مراتبی یک مجتمع صنعتی شامل چهار کارخانه ارائه دادند. مدل آنها چهار سطحی بود و افق زمانی سطوح مختلف با هم تفاوت داشت. در این مدل سلسله مراتبی، تصمیمات در هر سطح،

---

[1] **Hierarchical Production Planning (HPP)**
[2] **Make To Stock (MTS)**
[3] **Make To Order (MTO)**

محدودیت‌های سطح پایین‌تر را تشکیل داده و لذا تصمیمات اخذ شده در سطوح بالاتر تاثیر مهم‌تری روی عملکرد کل سیستم ساخت داشتند. گریوز [۷] یک رویکرد مخلوط را برای مدل هاکس و میل ارائه داد بطوریکه در این مدل، مسائل برنامه‌ریزی ادغامی و تفکیک خانواده تواماً در قالب یک برنامه خطی عدد صحیح مخلوط ارائه شده بود. در این مدل، دو مسئله فوق بوسیله یک محدودیت بهم مرتبط شده‌اند که موجودی در سطح تجمعی را با موجودی‌های خانواده‌ها برابر می‌گرداند. بیتران، هاس و هاکس [۸] کار قبلی خود را به یک سیستم ساخت/مونتاژ دو مرحله‌ای توسعه دادند. آنها از داده‌های اطلاعاتی یک تولیدکننده قلم جهت مقایسه برنامه‌های تولیدی بدست آمده از این روش و خروجی سیستم برنامه‌ریزی نیازمندی‌های مواد (MRP)[1] استفاده نمودند. ناگی [۹] یک مدل سلسله مراتبی دو مرحله‌ای ارائه داد که قطعات را در قالب خانواده‌ها و ماشین‌ها را در قالب سلول‌های ساخت ادغام نمود. معیار بهینه‌سازی در هر دو سطح این مدل بشکل حداقل‌سازی هزینه‌های نگهداری و پس افت می‌باشد. مدل ادغامی، میزان تولید خانواده‌های قطعات را در هر پریود زمانی مشخص می‌سازد. سپس این مقادیر تجمعی در سطح بعدی برای محاسبه میزان تولید هر قطعه در اولین پریود تفکیک می‌شوند. آقای مهرا [۱۰] یک مدل برنامه‌ریزی تولید سلسله مراتبی را برای حل مسائل برنامه‌ریزی تولید چند مرحله‌ای کارگاهی در سطح تاکتیکی ارائه داد. این مدل از یک ساختار دو سطحی برخوردار بوده و ادغام‌سازی بطور همزمان در مورد قطعات، ماشین‌آلات و پریودهای زمانی صورت می‌گیرد. این ادغام‌سازی با استفاده از روش شبیه‌سازی تبرید و یک الگوریتم خوشه‌بندی صورت می‌گیرد.

کیو و همکارانش [۱۱] یک ساختار دو سطحی برنامه‌ریزی تولید را در یک محیط چند محصولی/چند ماشینه پیشنهاد داده‌اند. به منظور کاهش پیچیدگی مدل تفکیک خانواده‌ها در سطح دوم، برنامه‌ریزی تولید ادغامی شامل زمانهای راه‌اندازی می‌باشد. آکتورک و ویلسون [۱۲] یک ساختار HPP را در یک محیط تولید سلولی به منظور حداقل نمودن هزینه‌های تولیدی با توجه به محدودیت‌های بالانس تولید و موجودی و نیز محدودیت ظرفیت در سلول‌های تولیدی مختلف ارائه نموده‌اند. یان و همکارانش [۱۳] یک ساختار HPP را در یک محیط تولیدی انعطاف‌پذیر پیشنهاد داده‌اند. در هر سطح از ساختار پیشنهادی یک مدل برنامه‌ریزی ریاضی ارائه شده است. بعلت پیچیدگی مدل‌های پیشنهادی در محیط تولید انعطاف‌پذیر، از الگوریتم‌های کارماکار و سیاست تعامل/پیش‌بینی برای حل مدل‌های ریاضی استفاده شده است. یان و همکارانش [۱۴] کار قبلی خود را با اضافه کردن محدودیت‌های اضافه بار ماشین‌آلات، بیکاری ماشین‌آلات و محدودیت تقاضا توسعه دادند. مثال‌هائی از کاربردهای صنعتی مدل‌های HPP را نیز می‌توان در کارهای لیبراتور و میلر در یک شرکت نساجی [۱۵]، تسابون و سوگاوارا در یک کمپانی اتومبیل‌سازی [۱۶] و روتن در یک شرکت سازنده پودر شیر [۱۷] مشاهده نمود. اغلب تحقیقات اشاره شده در بالا مناسب سیستم‌های تولیدی MTS می‌باشند اگر چه برخی از موارد کاربردی اشاره شده در این تحقیقات از لحاظ جریان مواد و قطعات از نوع جریان کارگاهی و برخی دیگر از نوع کارگاهی [۷ و ۱۸] می‌باشند.

تاکنون تحقیقات اندکی در زمینه اجرای رویکرد HPP در سیستم‌های تولیدی MTO در مقایسه با MTS به چاپ رسیده است. تحقیقات انجام شده در اینگونه محیط‌های تولیدی بیشتر در سطوح برنامه‌ریزی کوتاه مدت شامل نحوه ترخیص سفارشات[2] بدرون خط تولید و توزیع سفارشات[3] بین ایستگاه‌های مختلف می‌باشد. با توجه به ویژگی‌های محیط‌های تولیدی MTO که امکان پیش‌بینی محصولات تولیدی وجود ندارد و تنوع محصولات بالا و معمولاً در مقادیر کم تولید می‌شوند، بنابراین امکان انجام برنامه‌ریزی بلند مدت وجود ندارد. با این وجود کینگزمن [۱۹] و نیز بریتهوپت و همکارانش [۲۰] تاکید نموده‌اند که شرکت‌های MTO در ساختار برنامه‌ریزی تولید سلسله مراتبی در سیستم تولیدی خود نیازمند یک سطح برنامه‌ریزی میان‌مدت می‌باشند که قبل از مراحل ارسال کارها به کف کارگاه و زمانبندی آنها که دارای افق برنامه‌ریزی کوتاه‌مدت می‌باشند، انجام شود. آنها این مرحله از ساختار سلسله مراتبی را مرحله ورود سفارش[4] نامیدند. هندری و همکارانش [۲۱] در مقاله‌ای اهمیت در نظر گرفتن مرحله ورود سفارش در ساختار برنامه‌ریزی تولید سلسله مراتبی شرکت‌های MTO را مورد توجه قرار داده و تاکید کرده‌اند که کلید موفقیت در سیستم‌های تولیدی MTO، مدیریت زمان تحویل سفارشات می‌باشد. برای این منظور آنها بررسی مرحله ورود سفارشات جدید به سیستم و کنترل ظرفیت را قبل از مراحل ارسال کارها به کارگاه و زمان‌بندی آنها ضروری دانسته‌اند. به عبارت دیگر در مقالات ذکر شده، ساختار سلسله مراتبی در محیط‌های MTO تنها شامل مشخص نمودن سطوح مختلف برنامه‌ریزی و تصمیماتی است که باید در هر یک از این سطوح گرفته شود ولی مدل‌های تصمیم‌گیری شبیه آنچه که در سیستم‌های MTS انجام شده است، پیشنهاد نشده است. برای سیستم‌های تولیدی MTO تنها یک مقاله در ادبیات HPP همراه با

---

[1] Material Requirement Planning (MRP)
[2] Order Release
[3] Dispatching
[4] Order Entry Stage

مدل‌های مناسب تصمیم‌گیری ارائه شده که مربوط به کار کاراویلا و دسوزا [۲۲] می‌شود. در این مقاله برای یک شرکت تولیدکننده کفش که بصورت سفارشی کار می‌کند یک چهارچوب برنامه‌ریزی تولید سلسله مراتبی طراحی شده است. همچنین در زمینه کاربرد HPP در سیستم‌های ترکیبی MTO/MTS تنها یک مقاله وجود دارد که توسط سومان و همکارانش [۳] ارائه شده است. در این مقاله یک ساختار سلسله مراتبی در محیط‌های ترکیبی همانند صنایع غذایی پیشنهاد شده است. این ساختار شامل سه سطح مختلف تصمیم‌گیری می‌باشد. سطح اول مربوط به تعیین استراتژی تولید محصولات است یعنی چه محصولاتی با سیاست MTO و کدامیک با سیاست MTS تولید شوند. در سطح دوم مقدار اندازه انباشته محصولات MTS و نیز زمان تحویل محصولات MTO با در نظرگرفتن ظرفیت در دسترس تعیین می‌شوند. در سطح سوم ساختار پیشنهادی، فرآیند ترخیص کارها و زمانبندی آنها صورت می‌گیرد.

سیستم پیشنهادی در این مقاله یک سیستم سلسله مراتبی چهار سطحی در یک محیط تولیدی ترکیبی MTO/MTS می‌باشد و برای هر سطح یک مدل تصمیم‌گیری مناسب توسعه یافته است. بدلیل اهمیت محصولات MTO در مقایسه با محصولات MTS از جنبه درآمدزائی و نیز خصوصیات اینگونه محصولات از جمله داشتن زمان تحویل مشخص و هزینه‌هائی که ممکن است از عدم تحویل به موقع آنها بر سیستم اعمال شود، بنابراین لازم است در ابتدا چک شود که سیستم توانائی پاسخگوئی به سفارشات ورودی را دارد یا خیر. بعد از مشخص شدن ترکیب سفارشات و ظرفیت لازم برای محصولات MTO، باقیمانده ظرفیت به محصولات MTS تخصیص داده می‌شود. بنابراین در ساختار پیشنهادی، سطح اول مربوط به فرآیند رد یا پذیرش سفارشات MTO و برآورد ظرفیت‌های موردنیاز سفارشات پذیرفته شده است. در این مرحله با توجه به اهمیت سفارشات و ظرفیت در دسترس که برای محصولات MTS وMTO مشترک می‌باشد، ترکیبی از سفارشات ورودی پذیرفته شده و بقیه سفارشات رد می‌شوند. مراحل بعدی نیز طبق منطق سیستم MRP II مربوط به برنامه‌ریزی محصولات MTS می‌باشند. بدین ترتیب در سطح دوم، از یک مدل ریاضی عدد صحیح برای حل مسئله برنامه‌ریزی تولید ادغامی (AP) استفاده شده و هدف تعیین سطوح بهینه تولید، موجودی و اضافه‌کاری برای محصولات ادغامی در پریودهای ادغامی می‌باشد. در سطح سوم، برنامهٔ ادغامی تهیه شده در سطح دوم با استفاده از یک مدل تفکیک مناسب و با توجه به خروجی مرحله دوم به برنامه اصلی تولید (MPS) در سطح مدل‌های محصولات قابل فروش و پریودهای غیرادغامی تبدیل می‌شود. نهایتاً در سطح چهارم نیز با توجه به MPS تعیین شده در سطح سوم و سایر داده‌ها نظیر زمان تدارک خرید اقلام، برنامه زمانی سفارشات خرید (ماجول MRP) از طریق اجرای یک مدل ریاضی مختلط عدد صحیح تعیین می‌گردد. همچنین به منظور پویا نمودن این ساختار برنامه‌ریزی و بهنگام‌سازی سیستماتیک برنامه‌ها در سطوح مختلف، از رویکرد افق غلتان در هر یک از این سطوح استفاده شده است.

۳- ساختار سیستم برنامه‌ریزی تولید پیشنهادی

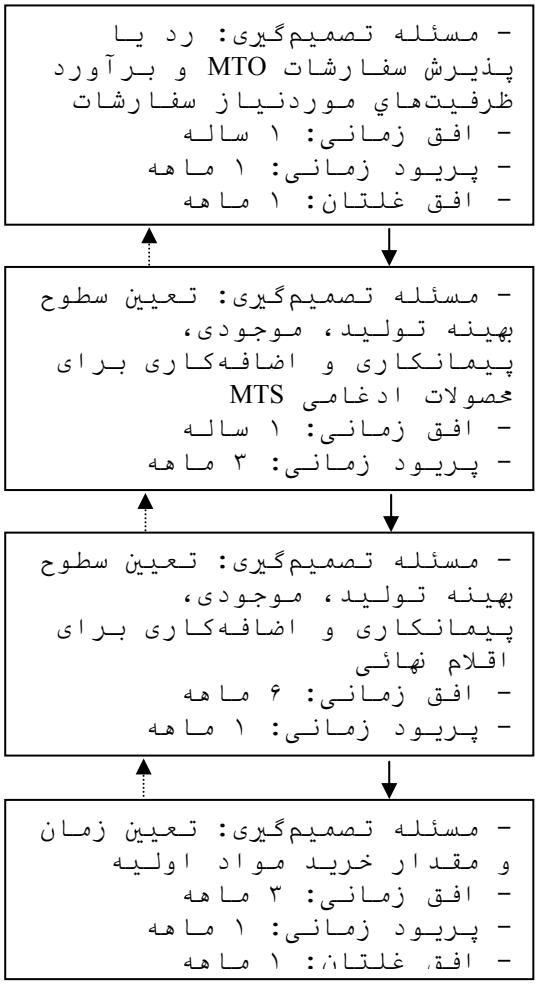
سیستم برنامه‌ریزی تولید پیشنهادی یک سیستم سلسله مراتبی چهار سطحی است که شامل سطح رد یا پذیرش محصولات MTO، برنامه‌ریزی ادغامی، برنامه اصلی تولید و برنامه‌ریزی نیازمندی‌های مواد (MRP) محصولات MTS می‌باشد. فرضیات اساسی در این سیستم عبارتند از:

- MTO و MTS بودن هریک از محصولات تولیدی شرکت مشخص می‌باشند.
- زمان تحویل محصولات MTO ثابت بوده و توسط مشتری به شرکت ارائه می‌شوند. (زمان تحویل قابل مذاکره نمی‌باشد)
- خانواده محصولات MTS و اقلام نهائی متعلق به هریک از این خانواده‌ها از قبل مشخص می‌باشند.

سطح اول مربوط به برنامه ریزی سالانه محصولات MTO بوده و دارای افق زمانی ۱ ساله با پریودهای سه ماهه می‌باشد. مسئله تصمیم‌گیری در این سطح، رد یا پذیرش سفارشات دریافتی با توجه به زمان تحویل سفارش و ظرفیت در دسترس می‌باشد. سطح دوم مربوط به برنامه‌ریزی تولید ادغامی محصولات MTS با افق زمانی یک ساله (با توجه به پوشش یک دوره کامل از تقاضاهای فصلی پیش‌بینی شده) و پریودهای ادغامی ۳ ماهه می‌باشد. مسئله اصلی تصمیم‌گیری در این سطح، تعیین سطوح بهینه تولید، موجودی و اضافه‌کاری برای محصولات ادغامی MTS (در سطح خانواده) می‌باشد. در سطح سوم مقادیر تولید، موجودی و اضافه‌کاری ماهانه هر یک از اقلام نهائی در افق ۳ ماهه آتی با توجه به سطح دوم مشخص می‌شوند. این سطح از ساختار پیشنهادی، برنامه اصلی تولید را تشکیل می‌دهد. بعلت وجود عدم قطعیت در فرآیند برنامه‌ریزی، برنامه اصلی تولید در پایان هر ماه تنها برای سه ماه آتی اجرا شده و در پایان هر

ماه، اطلاعات جدید (تقاضای واقعی، ظرفیت‌های در دسترس و ...) تهیه و می‌توان آنها را برای بهنگام نمودن برنامه‌های تولید در یک افق برنامه‌ریزی متحرک مورد استفاده قرار داد. سپس با مشخص شدن مقدار تولید ماهانه هر یک از اقلام نهائی، برنامه سفارش مواد اولیه مورد نیاز هر یک از اقلام نهائی براساس برنامه اصلی تولید و مدل تصمیم‌گیری مربوطه در پریودهای ماهانه تهیه می‌شود. ساختار پیشنهادی برنامه‌ریزی تولید سلسله مراتبی در شکل (۱) آمده است.

در ادامه این فصل به تشریح کامل سطوح مختلف سیستم برنامه‌ریزی تولید سلسله مراتبی پیشنهادی و مدل‌های ریاضی ارائه شده در هر سطح برای رسیدن به اهداف مورد نظر پرداخته می‌شود.



شکل (۱) ساختار پیشنهادی برنامه‌ریزی تولید سلسله مراتبی در محیط‌های ترکیبی MTS/MTO

۳-۱- سطح اول: رد یا پذیرش سفارشات MTO

در این سطح با توجه به ظرفیت در دسترس برای محصولات MTO و نیز زمان تحویل آنها تصمیم گرفته می‌شود که از میان سفارشات رسیده به سیستم کدامیک از محصولات MTO باید پذیرفته شده و کدامیک رد شوند. این سطح شامل دو قدم می‌باشد. در قدم اول چک می‌شود که آیا ظرفیت کافی برای سفارشات رسیده به سیستم وجود دارد یا نه. در قدم دوم برای سفارشات رد نشده در قدم اول، چک می‌شود که امکان برآورده‌کردن زمان تحویل سفارشات باقیمانده با توجه به زمان ورود مواد اولیه امکان‌پذیر است یا خیر. برای این منظور مشتریان سیستم براساس درجه اهمیت‌شان به دو گروه تقسیم‌بندی می‌شوند:

- مشتریان با درجه اهمیت بالا: مشتریانی که سفارش آنها می‌تواند سود بالایی را برای شرکت به همراه داشته باشد و سهم بازار بیشتری را نصیب شرکت کند.
- مشتریان با درجه اهمیت پایین: مشتریانی که سود چندانی نصیب شرکت نمی‌کنند و پذیرش سفارش آنها فقط می‌تواند به افزایش سهم بازار شرکت کمک کند.

به هنگام ورود سفارش به سیستم، این تقسیم‌بندی توسط مدیران رده بالای شرکت مشخص می‌شود. این تفکیک به برنامه‌ریزان تولید شرکت در برنامه‌ریزی بهتر سفارشات جدید کمک می‌کند و می‌تواند سبب افزایش سود و سهم بیشتر در بازار رقابتی شود.

قدم اول: محاسبه سرانگشتی ظرفیت: در این فعالیت تخمین زده می‌شود که آیا با ورود سفارش جدید، ظرفیت فعلی در طول افق برنامه‌ریزی ۱ ساله جوابگو می‌باشد یا نه. نحوه انجام محاسبه سرانگشتی ظرفیت به صورت زیر می‌باشد:

۱- اگر سفارش از درجه اهمیت بالایی برخوردار باشد، برای محاسبه سرانگشتی ظرفیت از فرمول زیر استفاده می‌شود:

$$(1)\sum_{i} TWK_{ij} \le \sum_{t=1}^{12} C_{jt} \quad \forall j$$

که در آن:

i: اندیس سفارش

j: اندیس منبع‌کاری

t: اندیس پریود برنامه‌ریزی (ماهیانه)

TWK_{ij} : میزان بارکاری موردنیاز سفارش i در منبع j

C_{jt}: ظرفیت در دسترس منبع j در پریود t برای محصولات MTO. این ظرفیت شامل حداکثر ظرفیت در دسترس شامل وقت عادی و اضافه کاری می‌باشد.

در صورتیکه برای سفارش جدید که از درجه اهمیت بالایی برخوردار است، ظرفیت کافی در بعضی از منابع‌کاری وجود نداشته باشد (رابطه (۱) برقرار نباشد)، آلترناتیوهایی که برای تصمیم گیری در مورد تعیین وضعیت این سفارش وجود دارد عبارتند خواهند بود از:

- افزایش ظرفیت سیستم برای پاسخگوئی به سفارش جدید. برای منابع‌کاری که دارای ظرفیت کافی در طول افق برنامه‌ریزی نمی‌باشند تصمیمات اولیه برای افزایش ظرفیت در صورت امکان توسط مدیریت گرفته می‌شود.
- به تاخیر انداختن برخی از سفارش‌های با درجه اهمیت پایین که در سیستم وجود دارند.
- در صورتیکه برای برآورده‌کردن سفارش جدید نیاز به ظرفیت زیاد و غیرقابل تامین باشد، در این حالت می‌توان سفارش را رد نمود.

۲- برای سفارش‌هایی که از درجه اهمیت پایینی برخوردار هستند از فرمول زیر برای محاسبه سرانگشتی ظرفیت استفاده می‌شود:

$$(2)\ \sum_{i} TWK_{ij} \le \sum_{t=1}^{12} (1-\alpha)\times C_{jt} \quad \forall j$$

α: درصدی از ظرفیت کل C_{jt} که برای سفارشات با اهمیت بالا در نظرگرفته می‌شود. این مقدار از سوی مدیریت سازمان و با توجه به پیش‌بینی سفارشات آتی توسط واحد فروش و بازاریابی تعیین می‌شود. در صورت عدم برقراری رابطه (۲)، تصمیم‌گیری برای این سفارش شامل رد سفارش، به تاخیر انداختن سفارش می‌باشند. در صورتیکه در هر یک از دو حالت، مقدار ظرفیت برای پاسخگوئی به سفارشات موجود در سیستم کافی باشد، به قدم دوم رفته و زمان تکمیل عملیات (OCD)[1] و زودترین زمان ممکن ترخیص سفارش به درون خط (ERD)[2] محاسبه می‌شوند. بدین ترتیب با ورود هر سفارش جدید بدرون سیستم، مدیریت شرکت می‌تواند در سطح اول تصمیم‌گیری و قبل از اینکه فعالیت‌های بعدی بر روی سفارش جدید صورت گیرد، تصمیمات اولیه را برای سفارش جدید (شامل رد سفارش یا اقداماتی نظیر افزایش ظرفیت سیستم و یا به تاخیر انداختن بعضی از سفارشات موجود در سیستم) انجام دهد. این فعالیت سبب مدیریت بهتر سفارشات و برنامه‌ریزی بهتر آنها از سوی شرکت می‌شود. فعالیت تخمین سرانگشتی ظرفیت موضوعی است که تاکنون در ساختارهای برنامه‌ریزی تولید سلسله مراتبی پیشنهادی مورد توجه قرار نگرفته و در این مقاله برای اولین بار به آن توجه شده است.

---

[1] **Operation Completion Date (OCD)**
[2] **Earliest Release Date (ERD)**

قدم دوم: بعد از چک کردن ظرفیت سیستم در قدم اول، در قدم دوم اطمینان حاصل می‌شود که با توجه به زمان تحویل هر سفارش و زمان تحویل مواد اولیه توسط تامین‌کنندگان امکان تحویل سفارش در موعد تحویل وجود دارد یا خیر. قدم دوم فقط برای سفارش‌هائی که در قدم اول رد نشده‌اند انجام می‌شود. برای این منظور لازم است مقادیر OCD و ERD مشخص شوند. بدلیل مشخص بودن زمان تحویل سفارش، برای محاسبه مقادیر OCD و ERD از روش برگشت به عقب استفاده می‌شود. برای محاسبه مقادیر OCD و ERD از فرمول زیر که توسط کینگزمن و همکارانش [۲۳] ارائه شده است استفاده می‌شود.

$$OCD_{n,i} = DD_i$$
$$OCD_{n-1,i} = OCD_{n,i} - TWK_{n-1,i} - W_p$$
$$OCD_{n-2,i} = OCD_{n-1,i} - TWK_{n-1,i} - W_p$$
.
$$OCD_{1,i} = OCD_{2,i} - TWK_{1,i} - W_p$$
$$LRD_i = OCD_{1,i}$$
$$ERD_i = LRD_i - pool\ delay$$

n: تعداد منابع‌کاری

DD_i: زمان تحویل سفارش i

$OCD_{r,i}$: زمان تکمیل عملیات سفارش i در منبع r

LRD_i: دیرترین زمان ترخیص سفارش i به درون خط. اگر سفارش دیرتر از این زمان به درون خط فرستاده شود امکان برآورده سازی زمان تحویل DD_i در موعد مقرر وجود ندارد.

ERD_i: زودترین زمان ترخیص سفارش i به درون خط

Pool delay: مقدار بارکاری شامل سفارش‌هایی که تائید شده و مواد اولیه آنها در دسترس می‌باشد اما هنوز بدرون خط ترخیص شده‌اند. این مقدار معمولاً توسط مدیریت شرکت مشخص می‌شود.

W_p: زمان انتظار هر عملیات برای یک کار با اولویت p. مقدار W_p توسط مدیریت در طول افق برنامه‌ریزی مشخص می‌شود p شامل دو اولویت نرمال و بالا می‌باشد. برای سفارش‌هایی با درجه اهمیت پایین از اولویت نرمال استفاده می‌شود. ولی برای سفارش‌های با درجه اهمیت بالا علاوه بر اولویت نرمال در صورتی که امکان تحویل سفارش در موعد مقرر نباشد با استفاده از کوتاه کردن زمان انتظار (اولویت بالا) می‌توان به زمان تحویل مورد نظر رسید. در این صورت تنها درصدی از سفارشات می‌توانند در اولویت بالا قرار گیرند.

از مقایسه زمان ورود مواد اولیه[1] (MAD) تامین‌کنندگان و مقدار LRD و ERD می‌توان اطمینان حاصل نمود که امکان برآورده کردن مقدار زمان تحویل در زمان مقرر وجود دارد یا نه. محاسبه یک مقدار میانگین MAD با توجه به عملکرد گذشته تامین‌کنندگان امکان‌پذیر می‌باشد. در صورتیکه مواد اولیه به موقع به شرکت برسند نیازی به انجام هیچ اولویت‌دهی و انجام فعالیت اضافه‌ای (اضافه‌کاری و پیمانکاری) وجود ندارد و سفارش پذیرفته خواهد شد. در غیر اینصورت اگر مواد اولیه در موعد مقرر به شرکت نرسند نیاز به اولویت دهی در سیستم تولیدی و یا رد سفارش می‌باشد. بنابراین در مقایسه ERD , LRD و MAD یکی از سه حالت زیر اتفاق می‌افتد:

۱- $ERD \geq MAD$: مواد اولیه به موقع تامین شده و سفارش پذیرفته می‌شود.

۲- $ERD<MAD<LRD$: در این حالت با دادن اولویت مناسب به سفارش می‌توان آن را برآورده نمود. آلترناتیوهایی که برای رسیدن به زمان مقرر DD وجود دارد عبارتند از:

- تغییر در مقادیر OCD: برای برآورده کردن به موقع سفارش مقدار ($MAD - ERD$) باید بین مقادیر OCD پخش شود تا حداقل به رابطه $ERD=MAD$ برسیم. در این صورت مقدار جدید OCD از رابطه زیر بدست می آیند:

$$(3)\ OCD' = OCD - \frac{MAD - ERD}{n}$$

[1] **Material Arrival Time (MAD)**

- اولویت بالا در طول صف بین منابع تولیدی مختلف. همانطور که گفته شد در صورت نیاز به دادن اولویت بالا به مقادیر Wp برای یک سفارش امکان کوتاه کردن زمان صف وجود دارد. کاهش این زمان در منابع مختلف باید بگونه ای باشد که $ERD=MAD$ شود. این آلترناتیو تنها برای سفارش‌های با اولویت بالا در نظر گرفته می‌شوند.
- دیر کرد: در صورت امکان می‌توان سفارش را با تاخیر تحویل داد.

همچنین امکان استفاده از ترکیبی از این آلترناتیوها به منظور برآورده‌کردن به موقع سفارش در موعد مقرر وجود دارد.

۳- $MAD > LRD$: در این حالت زمان ورود مواد اولیه از دیرترین زمان ترخیص سفارش بدرون خط نیز بیشتر است.آلترنانیوهایی که برای رسیدن به زمان DD وجود دارند شامل موارد زیر می‌باشند:

- تغییر در مقدار OCD بگونه ای که مقادیر ERD , MAD برابر شوند. در این حالت سفارش در اولویت نرمال قرار می گیرد. اما این حالت می‌تواند سبب کوتاه شدن زمان OCDها شده و سبب نیاز به ظرفیت بالا در پریودهای زمانی مختلف شود.

$$(4)\ OCD' = OCD - \frac{MAD - ERD}{n}$$

- اولویت بالا در طول صف بین منابع تولیدی مختلف: در این حالت مشابه حالت دوم با دادن اولویت بالا به مقادیر Wp بین منابع تولیدی مختلف سبب کوتاه شدن زمان صف و در نتیجه کوتاه شدن زمان OCDها می‌شود. کاهش زمان مقادیر Wp باید به اندازه‌ای باشد که $LRD = MAD$ شود. این حالت تنها وقتی برای سفارشهای بااهمیت بالا در نظرگرفته می‌شود.
- رد سفارش: در این حالت به دلیل بالابودن اینکه احتمال دیرکرد در تحویل سفارش و یا تاثیر منفی که این سفارش در برنامه‌ریزی سفارشات دیگر موجود در سیستم می‌تواند داشته باشد در صورت اهمیت پایین، سفارش رد می‌شود.
- دیر کرد: در صورت امکان می‌توان سفارش را با تاخیر تحویل داد.

بدین ترتیب در این سطح تصمیمات مناسب برای محصولات سفارشی شامل رد سفارش، تاخیرانداختن سفارش، اضافه‌کرن ظرفیت و پذیرش سفارش و تحویل به موقع اتخاذ می‌شود. قدم‌های لازم برای این تصمیمات، تاکنون در تحقیقات قبلی در نظرگرفته نشده است. در هنگام تخصیص کارها به ایستگاه‌های کاری، ابتدا محصولات سفارشی و سپس محصولات MTS براساس برنامه تولید در سطوح سوم و چهارم به ایستگاه‌های مختلف تخصیص داده می‌شوند.

۳-۲- سطح دوم: برنامه‌ریزی تولید ادغامی محصولات MTS

مسئله برنامه‌ریزی تولید ادغامی بعنوان یک روش مناسب برنامه‌ریزی ظرفیت میان‌مدت در یک افق زمانی معمولاً یک ساله مطرح است. همانطور که قبلاً نیز بیان شد خروجی این مرحله شامل تعیین سطوح بهینه تولید، موجودی، پیمانکاری و اضافه‌کاری برای محصولات ادغامی MTS (در سطح خانواده) می‌باشد. برای تعیین این مقادیر از یک مدل برنامه‌ریزی ریاضی استفاده می‌شود. هدف این مدل, تهیه یک برنامه تولید و موجودی ادغامی براساس پیش‌بینی تقاضای محصولات ادغامی می‌باشد و با توجه به سیاست‌های بکار رفته در جذب نوسانات تقاضا (شامل نگهداری موجودی و استفاده از اضافه‌کاری و پیمانکاری), محدودیت‌های مناسبی نیز بکار گرفته شده است. اندیسها، پارامترها و متغیرهای مدل در جدول (۱) آمده است.

پارامترهای مدل :

i : اندیس خانواده محصولات $(i=1,\ldots,n)$ — j : اندیس مراکز تولید گلوگاهی $(j=1,2,\ldots,J)$

t : اندیس دوره برنامه‌ریزی $(t=1,2,3,4)$ — I_{i0} : سطح موجودی پیش‌بینی شده از محصول i در ابتدای سال آتی

D_{it} : میزان فروش (تقاضای) پیش‌بینی شده محصول i در طی پریود ۳ ماهه t ام

c_{it}: متوسط هزینه تولید یک واحد محصول i در پریود t — a_{ij} : نرخ مصرف منبع گلوگاهی j در تولید یک واحد محصول i

CAP_{jt}: ظرفیت باقیمانده منبع j در طی پریود t برای تولید محصولات MTS (با کم کردن ظرفیت مورد نیاز محصولات MTO)

CO_t: هزینه یک واحد از منبع اضافه‌کاری در پریود t — h_{it}: هزینه نگهداری هر واحد محصول i در پریود ۳ ماهه t ام

p_u : درصد مجاز کارکرد زیرظرفیت وقت عادی

PS_{it} : حداکثر مجاز سطح پیمانکاری محصول ادغامی i ام در پریود t

α_1: حداقل درصد بهره بانکی سالانه

$date_t$: تعداد روزهای کاری در پریود t

cs_{it} : هزینه هر واحد تولید پیمانکاری محصول ادغامی i در پریود t

SS_{it} : سطح موجودی اطمینان محصول ادغامی i در پریود t

α_2: درصد سالانه تقریبی مربوط به سایر هزینه‌های نگهداری

$\beta_{t,t-1}$: حداکثر درصد اختلاف مجاز نرخ‌های تولید روزانه در دو پریود متوالی $t,t\text{-}1$ (با توجه به فرض عدم تغییر سطوح نیروی انسانی تعریف می‌شوند)

متغیرهای مدل:

I_{it} : سطح موجودی برنامه‌ریزی شده از محصول ادغامی i در انتهای پریود t

P_{it} : سطح تولید برنامه‌ریزی شده از محصول ادغامی i در انتهای پریود t

SS_{it} : میزان تولید خارج از شرکت (پیمانکاری) از محصول ادغامی i در پریود t

O_{jt} : میزان اضافه‌کاری برنامه‌ریزی برای منبع گلوگاهی j در پریود t

جدول (۱) پارامترها و متغیرهای مدل برنامه‌ریزی ادغامی

بدین ترتیب مدل ریاضی مسئله برنامه‌ریزی ادغامی به شکل ذیل است:

$$Min\ Z = \sum_{i=1}^{n}\sum_{t=1}^{4} h_{it} * I_{it} + \sum_{j=1}^{J}\sum_{t=1}^{4} CO_t * O_{jt} + \sum_{i=1}^{n}\sum_{t=1}^{4} C_{it} * P_{it} + \sum_{i=1}^{n}\sum_{t=1}^{4} cs_{it} * S_{it}$$

Subject To:

(1) $I_{i,t-1} + P_{it} + S_{it} - I_{it} = D_{it} \quad \forall i,\ t$

(2) $\sum_{i\in j} a_{ij}\, p_{it} < CAP_{jt} + O_{jt} \quad \forall i, j, t$

(3) $\sum_{i\in j} a_{ij}\, p_{it} > (1-p_u)\times CAP_{jt} \quad \forall i, t$

(4) $O_{jt} \le over_time_{jt} \quad \forall j, t$

(5) $S_{it} \le PS_{it} \quad \forall i, t$

(6) $I_{it} \ge SS_{it}$

(7) $\left|x_{it} - x_{i,t-1}\right| \le \beta_{t,t-1} \times \max(x_{it}, x_{i,t-1})$

(8) $x_{it} = \dfrac{P_{it}}{date_t} \quad \forall i, t$

(9) $O_{jt}, x_{it} \ge 0;\ \ P_{it}, I_{it} \ge 0, \text{integer}$

تابع هدف حداقل کردن هزینه‌های تولید، موجودی، اضافه‌کاری و پیمانکاری می‌باشد. رابطه (۲) محدودیت مربوط به ارضای تقاضای محصولات MTS در هر پریود بر اساس تعادل مقادیر تولید و موجودی است. روابط (۲و۳) محدودیت‌های حداکثر ظرفیت ماشین‌آلات و حداقل سطح مجاز زیر ظرفیت می‌باشند. رابطه (۴) مربوط به حداکثر ظرفیت اضافه‌کاری در دسترس است. محدودیت (۵) حداکثر تولید پیمانکاری و محدودیت (۶) حداقل مجاز موجودی در انبار با توجه به مقدار ذخیره اطمینان می‌باشد. رابطه (۷) محدودیت هموارسازی خط و محدودیت (۸) میزان تولید روزانه را محاسبه می‌کند. رابطه (۹) شرط غیرمنفی و عدد صحیح بودن متغیرهای تصمیم‌گیری می‌باشد. مدل ریاضی فوق به واسطه وجود رابطه (۷) غیرخطی است. برای خطی کردن این مدل باید تغییراتی در مدل غیرخطی فوق داده شود. در این رابطه بجای مقادیر $\max(x_{it}, x_{i,t-1})$ و $\left|x_{it} - x_{i,t-1}\right|$ از متغیرهای z_t و Y_t و نیز بجای محدودیت (۷) از محدودیت‌های (۱-۹) تا (۶-۹) استفاده می‌شود:

(9-1) $Y_t - Y_{t-1} \le \beta \times Z_t \quad t = 2,\ldots,T-1$

(9-2) $Y_t - Y_{t-1} \ge \beta \times Z_t \quad t = 2,\ldots,T-1$

(9-3) $Y_t \le Z_t \quad \forall t$

(9-4) $Y_{t-1} \le Z_t \quad \forall t$

(9-5) $Y_t = \sum_{i=1}^{n} X_{i,t} \quad \forall t$

$$(9-6)\ \ Z_t, Y_t \geq 0$$

در تابع هدف فاکتور $M * \sum_{t=1}^{T} Z_t$ اضافه می‌شود. پارامتر M جریمه‌ای است که برای هموار کردن مقادیر تولید روزانه در پریودهای متوالی در تابع هدف آمده است. هرچه مقدار M بیشتر انتخاب شود, اختلاف مقادیر تولید روزانه کمتر خواهد شد.

۳-۳- سطح سوم: برنامه‌ریزی اصلی تولید (MPS)

در برنامه‌ریزی تولید ادغامی , محصولات مورد برنامه‌ریزی ادغامی بوده و در واقع برنامه تولید برای محصولات نماینده تهیه می‌شود و لذا هنوز قابلیت اجرائی ندارد. در برنامه ادغامی معمولاً سطوح تولید و موجودی‌ها, میزان اضافه کاری و پیمانکاری و نیز میزان نیروی کار در یک افق بلند مدت (۱۲تا ۱۸ ماهه) و در یک سطح ادغامی مشخص می‌شود. برای اینکه بتوان این برنامه تولیدی را در سطح کارخانه و کارگاه‌های مختلف تولیدی اجرا نمود, لازم است که برنامه تولید ادغامی به برنامه تولید تک تک محصولات نهائی تفکیک شود. این برنامه تفکیک شده همان برنامه اصلی تولید برای محصولات نهائی می‌باشد که ورودی اصلی سیستم MRP است. هدف مدل ریاضی در این سطح تهیه یک برنامه بهینه تولید و موجودی برای هر یک از محصولات نهائی (مدل‌های) متعلق به خانواده های مختلف محصولات ادغامی براساس خروجی سطح اول, پیش بینی تقاضای مدل‌های مختلف و نیز با توجه به سیاست‌های بکار رفته در جذب نوسانات تقاضا شامل نگهداری موجودی، پیمانکاری و اضافه کاری می‌باشد. مشخصه‌های مدل در جدول (۲) آمده است.

پارامترهای مدل:

i: اندیس خانواده محصولات $(i = 1,...,n)$

k: اندیس محصولات نهائی $(k = 1,...,m)$

j: اندیس مراکز تولید گلوگاهی $(j = 1,...,J)$

t' : اندیس دوره ادغامی (سه ماهه)

t: اندیس دوره برنامه‌ریزی (ماهانه) $(t = 1,...,3)$

$I_{it'}$: سطح موجودی برنامه‌ریزی شده از محصول ادغامی i در انتهای پریود ادغامی t' (خروجی سطح اول)

$P_{it'}$: سطح تولید برنامه‌ریزی شده از محصول ادغامی i در پریود ادغامی t' (خروجی سطح اول)

$O_{jt'}$: حداکثر زمان اضافه کاری مورد نیاز به منبع j در پریود ادغامی t' (خروجی سطح اول)

D_{ikt} : میزان فروش پیش بینی شده مدل k از خانواده ادغامی i در پریود t

I_{iko} : سطح موجودی پیش بینی شده مدل k از خانواد ادغامی i در ابتدای افق برنامه‌ریزی اصلی تولید

C_{ik} : متوسط هزینه تولید یک واحد مدل k از خانواده ادغامی i

h_{ik} : متوسط هزینه نگهداری هر واحد مدل k از خانواده ادغامی i در یک پریود

CAP_{jt} : ظرفیت باقیمانده منبع j در طی پریود t برای تولید محصولات MTS

CO_{jt}: هزینه یک واحد از منبع j در پریود t در زمان اضافه کاری

a_{ikj} : نرخ مصرف منبع گلوگاهی j در تولید یک واحد از مدل k از خانواده i

متغیرهای مدل:

P_{ikt}: سطح تولید برنامه‌ریزی شده مدل k از خانواده i در پریود ماهانه t

I_{ikt} :سطح موجودی برنامه‌ریزی شده مدل k از خانواده i در انتهای پریود ماهانه t

$S_{ikt'}$: میزان تولید خارج از شرکت (پیمانکاری) از محصول ادغامی i در پریود t

O_{jt}: میزان اضافه کاری برنامه‌ریزی شده برای منبع گلوگاهی j در پریود ماهانه t

جدول (۲) پارامترها و متغیرهای مدل برنامه‌ریزی اصلی تولید

$$Min\ \ Z=\sum_{t=1}^{T}\sum_{i=1}^{n}\sum_{k\in i}(h_{ik}\times I_{ikt}+C_{ik}\times P_{ikt}+CS_{ikt}\times S_{ikt})+\sum_{t=1}^{T}\sum_{j=1}^{J}CO_{jt}\times O_{jt}+\sum_{i=1}^{n}M\times Z_i$$

Subject To:

$$(1)\ I_{ik(t-1)}-I_{ikt}+P_{ikt}+S_{ikt}=D_{ikt}\quad \forall i,k,t$$

$$(2)\sum_{i=1}^{n}\sum_{k\in i}\sum_{t=1}^{T}a_{ikj}\times P_{ikj}\le CAP_{jt}+O_{jt}\quad \forall j,t$$

$$(3)\sum_{t\in t'}O_{jt}=O_{jt'}\quad \forall j$$

$$(4)\sum_{k\in i}\sum_{t\in t'}P_{ikt}+U_{1i}-V_{1i}=P_{it'}\quad \forall i$$

$$(5)\ Z_{1i}\ge U_{1i}\quad \forall i$$

$$(6)\ Z_{1i}\ge V_{1i}\quad \forall i$$

$$(7)\sum_{i=1}^{6}\sum_{k\in i}\sum_{t\in t'}I_{ikt}+U_{2l}-V_{2l}=I_{it'}\quad \forall i,k,t$$

$$(8)\ Z_{2i}\ge U_{2i}\quad \forall i$$

$$(9)\ Z_{2i}\ge V_{21}\quad \forall i$$

$$(10)\sum_{i=1}^{6}\sum_{k\in i}\sum_{t\in t'}S_{ikt}+U_{2l}-V_{2l}=S_{it'}\quad \forall i,k,t$$

$$(11)\ Z_{3i}\ge U_{3i}\quad \forall i$$

$$(12)\ Z_{3i}\ge V_{31}\quad \forall i$$

$$(13)\ O_{jt}\ge 0;\ \ P_{ikt},I_{ikt}\ge 0\ \&\ \text{integer};\ \ \forall \text{i, k, t}$$

تابع هدف مدل ریاضی بشکل حداقل کردن هزینه‌های تولید، نگهداری، پیمانکاری، و هزینه‌های اضافه کاری در طی افق برنامه‌ریزی اصلی تولید می‌باشد. خروجی این مدل بهینه‌سازی، تعیین ترکیب بهینه تولید مدل‌های مختلف در هر پریود ماهیانه است. رابطه (۱) و (۲) محدودیت‌های مربوط به ارضای تقاضای مدل‌های مختلف بر اساس تعادل مقادیر تولید و موجودی و ظرفیت تولید می‌باشد. رابطه (۳) محدودیت ظرفیت اضافه‌کاری در دسترس در یک پریود سه ماهه (خروجی مدل سطح دوم) می‌باشد. روابط (۱۲-۶) محدودیت‌هائی هستند که از سطح دوم ساختار سلسله مراتبی پیشنهادی بر مدل برنامه اصلی تولید اعمال می‌شوند. به منظور حفظ یکپارچگی بین خروجی‌های سطح دوم و سوم, مجموع تولید و موجودی هر خانواده در یک پریود ادغامی سه ماهه در سطح ادغامی باید برابر تولید و موجودی مدل‌های متعلق به آن خانواده در همان پریود ادغامی باشد. از آنجا که محصولات در سطح دوم به صورت ادغامی در نظر گرفته شده‌اند بنابراین ممکن است یک محصول نهائی دارای موجودی اولیه نباشد و محصول نهائی دیگر از همان خانواده دارای مقدار قابل توجهی موجودی باشد. از طرفی ممکن است مقدار موجودی خانواده به اندازه‌ای باشد که نیاز به تولید خانواده مذکور در یک پریود نباشد. در این حالت با اجرای مدل ریاضی سطح ادغامی مقدار تولید خانواده محصولات صفر می‌شود($P_{it'}$) در حالی که ممکن است تقاضا برای مدلی که موجودی آن صفر می‌باشد در همان پریود غیر صفر بوده و در این حالت نیاز به تولید محصول نهائی ذکر شده می‌باشد. بنابراین اگر محدودیت‌های (۴) به صورت تساوی مشابه محدودیت‌ها (۳) آورده شود (بدون استفاده از متغیرهای کمکی U_{1i} و V_{1i}) طرف راست محدودیت برابر صفر بوده در حالیکه در طرف چپ محدودیت باید یکی از مقادیر P_{ikt} غیر صفر شود که این موضوع سبب می‌شود تا مدل ریاضی در سطح سوم فضای شدنی نداشته باشد. برای رفع این مشکل از متغیرهای کمکی U_i و V_i و Z_i استفاده می شود. طبق محدودیت های (۵و۶) و نیز ضریب M بزرگ در تابع هدف مسئله برای متغیر Z_i، متغیرهای کمکی تا آنجاکه مسئله از حالت غیرشدنی خارج شود مقدار می گیرند. این موضوع برای محدودیت (۷) و (۱۰) نیز صادق است. همچنین به دلیل تجمعی بودن پارامترهای ورودی در مدل ادغامی ممکن است جوابهای دو سطح دوم . سوم دقیقاً برابر نباشند. روابط (۱۳) نیز شرط غیرمنفی و عدد صحیح بودن متغیرهای تصمیم‌گیری می‌باشد.

۳-۴- سطح چهارم: برنامه‌ریزی مواد موردنیاز (MRP)

برنامه‌ریزی مواد موردنیاز صدور سفارشات ساخت قطعات داخلی و نیز سفارشات خرید مواد اولیه و قطعات خریدنی را مشخص می‌کند. مهمترین ورودی این سطح، برنامه اصلی تولید می‌باشد. به منظور حفظ رویکرد سلسله‌مراتبی و نیز محاسبه دقیق‌تر زمان و مواد موردنیاز در این سطح نیز یک مدل برنامه‌ریزی ریاضی ارائه شده است. هدف این مدل تعیین مقدار بهینه سفارش مواد با در نظرگرفتن تبادلات بین هزینه‌های موجودی و سفارش با توجه به محدودیت‌های موجود (محدودیت تعادل موجودی, محدودیت فضای انبار و محدودیت اندازه انباشته سفارشات) می‌باشد. مشخصه‌های مدل برنامه‌ریزی مواد در جدول (۳) آمده است

پارامترهای مدل :

j : اندیس اقلام نهائی بر جسب مدل $(j=1,2,...,n)$ — i : اندیس مواد اولیه (i=1,2)

ss_{ijt} : ذخیره اطمینان مورد نیاز از ماده اولیه i از محصول j در دوره t

mps_{jt} :مقدار تولید قلم نهائی محصول j در دوره t (خروجی سطح سوم)

f_{ij} : حجم ماده اولیه i محصول j — V_t: کل حجم انبار در دسترس در دوره t

a_{it} : هزینه سفارش‌دهی ماده اولیه i در دوره t — h_{ij} : هزینه نگهداری ماده اولیه i از محصول j

I_{ij0} : موجودی هر ماده اولیه i از محصول j در ابتدای دوره برنامه‌ریزی

متغیرهای مدل :

K_{ijt} : مقدار سفارش ماده اولیه i از محصول j در دوره t — I_{ijt} : موجودی ماده اولیه i از محصول j در انتهای دوره t

$$\left.\begin{matrix} x_{ijt} \geq 0 & 1 \\ otherwise & 0 \end{matrix}\right\} = y_{ijt}$$

جدول (۳) پارامترها و متغیرهای مدل برنامه‌ریزی مواد موردنیاز

$$MINZ = \sum_{t=1}^{T}\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{J}(h_{ij}I_{ijt} + a_{it}y_{ijt} + N \times Z_{ijt})$$

Subject To:

$$(1) I_{ij,t-1} - ss_{ijt} + x_{ijt} - I_{jit} = mps_{jt} + u_{ijt} \qquad \forall i,j,t$$

$$(2) Z_{ijt} \geq U_{ijt} \qquad \forall i,j,t$$

$$(3) \sum_{j=1}^{J}\sum_{i=1}^{n}\left(x_{ijt} + I_{ij,t-1}\right)f_{ij} \leq V_t \qquad \forall t$$

$$(4) x_{ijt} = k_{ijt} \times y_{ijt} \qquad \forall j,t,i$$

$$(5) x_{ijt} \leq M \times y_{ijt} \qquad \forall i,j,t$$

$$(6) x_{ijt} \geq 0 \qquad \forall i,j,t$$

$$(7) k_{ijt} \in Integer \qquad \forall i,j,t$$

$$(8) y_{ijt} \in \{0,1\}$$

تابع هدف مدل ریاضی فوق بشکل حداقل کردن هزینه‌های نگهداری، هزینه‌های سفارش‌دهی در طی افق برنامه‌ریزی MRP است. خروجی این مدل بهینه‌سازی، تعیین ترکیب بهینه سفارش مواد اولیه مدل‌های مختلف در هر پریود است. رابطه (۲) محدودیت مربوط به ارضای برنامه تولید مدل‌های مختلف در هر پریود بر اساس تعادل مقادیر تولید و موجودی مواد اولیه آنها است. روابط (۲-۳) محدودیت‌هائی هستند که از سطح سوم ساختار سلسله مراتبی پیشنهادی بر مدل MRP اعمال می‌شوند. به منظور حفظ یکپارچگی بین خروجی‌های سطح سوم و چهارم, مقدار سفارش هر یک از مواد اولیه براساس نیاز تولید (خروجی سطح قبلی) مشخص می‌شود. از آنجا که مقدار سفارش مواد اولیه حداقل باید برابر مقدار تولید سطح سوم باشد بنابراین با افزودن متغیرهای کمکی U به مدل اجازه داده می‌شود تا بیشتر از نیاز آن ماه سفارش داده شود و باقیمانده به صورت موجودی نگهداری شود. مقادیر U به وسیله محدودیت (۳) و ضریب N بزرگ در تابع هدف

مسئله برای متغیر Z تا حد ممکن حداقل می‌شوند. رابطه (۳) محدودیت فضای انبار موجود جهت نگهداری مواد اولیه را در مدل در نظر می‌گیرید. محدودیت (۴) مقدار اندازه انباشته‌ها برای سفارش مدل‌های تولیدی مختلف را در نظر گرفته می‌گیرد. در محدودیت (۵) مقدار سفارش به یک متغیر صفر و یک وابسته شده و در صورتی که این متغیر مقدار یک بگیرد هزینه سفارش‌دهی به مدل شارژ می‌شود. محدودیت‌های (۶-۸) محدودیت‌های عددصحیح و نامنفی بودن را نشان می دهد.

به منظور پویا نمودن سیستم یکپارچه برنامه‌ریزی تولید و در نظر گرفتن تأثیرات محیط داخلی و خارجی سازمان در تهیه برنامه‌های تولید، از رویکرد افق غلتان در تمام سطوح مدل پیشنهادی استفاده می‌شود.

- پس از گذشت هر ۳ ماه, برنامه تولید AP با آخرین داده‌های بدست آمده بهنگام می‌شود.
- در سطح سوم، برنامه اصلی تولید پس از گذشت هر ۱ ماه با آخرین داده‌های بدست آمده بهنگام می‌شود.
- برنامه‌ریزی سفارشات مواد نیز مانند سطح سوم و با تغییرات در برنامه اصلی تولید بهنگام می‌شود.

۴- اجرای ساختار پیشنهادی برای یک سازندهٔ بزرگ وسایل الکترونیکی

در این بخش نتایج حاصله از اجرای ساختار پیشنهادی در یک شرکت سازندهٔ بزرگ وسایل الکترونیکی ارائه می‌شود. تولیدات این شرکت شامل انواع تلویزیون، مانیتور و رادیو پخش می‌باشد. محصولات تلویزیون و مانیتور در این شرکت به صورت MTS و محصول رادیو پخش به صورت MTO تولید می‌شوند. محصول تلویزیون در سایزهای مختلف ۱۴، ۲۱ و۲۵ اینچ به بالا و در سه مارک تجاری مختلف و مانیتور در سایزهای ۱۵ و ۱۷ با دو مارک تجاری تولید می‌شوند. ۴ نوع مختلف رادیو پخش با نام‌های ۸۴۴۰، ۸۴۱۲، ۸۴۱۷ و ۸۴۲۰ نیز در این شرکت تولید می‌شوند. مبنای گروهبندی محصولات MTS در سطح ادغامی تفاوت‌های موجود در فرآیندهای ساخت و نیز هزینه‌های تولید است. بنابراین محصولات MTS متعلق به یک مارک تجاری و سایز یکسان در یک خانواده قرار می‌گیرند. بعنوان مثال تمام اقلام نهائی متعلق به یک مارک تجاری و با سایز ۱۴ در یک خانواده قرار می‌گیرند. محصولات MTS دارای تقاضای فصلی می‌باشند. سیستم تولید یک سیستم بزرگ کارگاهی است و تمامی بخش‌ها در هر پریود برنامه‌ریزی فعال هستند. ظرفیت وقت عادی در مورد هر نوع محصول ۵۰۰ دقیقه و ۶ روز در هفته می‌باشد. البته ۱۰ درصد از این ظرفیت برای زمان‌های راه‌اندازی در نظر گرفته شده است و از زمان دردسترس کم شده است. همچنین حداکثر ظرفیت اضافه‌کاری برای تمامی محصولات یکسان می‌باشد. پیش‌بینی‌های مربوط به فروش‌های ماهیانه معادل با داده‌های فروش سال ۱۳۸۳ در نظر گرفته شده است. هدف تعیین یک برنامه تولید ۱۲ ماهه با توجه به یک افق متحرک می‌باشد.

سیاست برنامه‌ریزی شرکت، سفارشات عقب افتاده و استخدام و اخراج نیروی کار را مجاز نمی‌داند. به منظور تحلیل خروجی‌های ساختار پیشنهادی و مقایسه آن با وضعیت موجود با توجه به نوع محصولات تولیدی (استاندارد یا غیر سفارشی و سفارشی) شاخص های عملکرد ذیل تعریف شده‌اند:

شاخص های مرتبط با سطوح موجودی محصولات نیمه ساخته و نهایی: بطور کلی موجودی یک نوع اتلاف محسوب شده و بایستی در حداقل سازی آنها تلاش نمود. لذا شاخص های مرتبط با آنها می توانند معیارهای مناسبی برای ارزیابی عملکرد سیستم یکپارچه برنامه ریزی تلقی شوند. شاخص های ذیل در این راستا مورد بهره برداری قرار گرفته‌اند:

۱- متوسط سطح موجودی انبار محصولات نهایی به تفکیک محصول (بر حسب تعداد و ارزش ریالی) که حداقل بودن آنها بیانگر میزان هماهنگی بین واحدهای فروش و بازاریابی و برنامه‌ریزی تولید است.

۲- متوسط سطح موجودی زیر مونتاژها و محصولات نیمه ساخته در جریان ساخت[1] (WIP) که بیانگر وجود هماهنگی در برنامه تولید مراحل مختلف سیستم تولید است.

۳- متوسط سطح موجودی اقلام و زیرمجموعه های خریداری شده که اندازه این شاخص نیز میزان کارایی سیستم‌های کنترل موجودی و برنامه‌ریزی سفارشات خرید را نشان می‌دهد.

شاخص‌های مرتبط با میزان بکارگیری منابع تولیدی:

[1] **Work-In-Process**

۴ – نسبت زمان برنامه ریزی شده برای تولید به حداکثر زمان در دسترس که در واقع در صد ظرفیت مورد استفاده (برنامه ریزی شده) را نشان می‌دهد.
۵ – نسبت میزان تولید واقعی به میزان تولید برنامه ریزی شده که درصد انحرافات از برنامه‌ها (مثبت یا منفی) را نشان می‌دهد.
۶ – درصد توقفات خطوط / ماشین آلات به علت نبودن مواد و قطعات. این درصد بیانگر کارایی فعالیت های واحد تدارکات و نیز سیستم برنامه‌ریزی مواد در صدور بموقع و مناسب مواد و قطعات خریدنی می‌باشد.
۷ – نسبت زمانهای راه اندازی به کل زمان در دسترس (مفید) ماشین آلات: این نسبت می‌تواند بیانگر میزان مناسب بودن برنامه های تولید در ایستگاه‌های کاری مختلف باشد.
۸ – نسبت تولید واقعی به تولید برنامه ریزی شده: این نسبت میزان انحراف از برنامه تولید را نشان می‌دهد.
۹ – نسبت میزان پیش بینی فروش به تولید برنامه ریزی شده: این نسبت نیز میزان انطباق برنامه تولید با فروش پیش بینی شده را نشان داده و در واقع سطح هماهنگی ما بین واحدهای فروش و برنامه‌ریزی تولید را بیان می‌کند.
۱۰ – متوسط تعداد سفارشات دارای دیر کرد
۱۱ – متوسط زمان دیرکرد سفارشات
۱۲ – مجموع جریمه‌های پرداختی بابت دیرکرد سفارشات

با مقایسه برنامه تولید فعلی شرکت در سال ۸۳ که داده‌های آن در دسترس بود و خروجی ساختار پیشنهادی، نتایج بدست آمده بیانگر کارایی بالای این رویکرد در برنامه‌ریزی یکپارچه تولید و مواد در این شرکت تولیدی می‌باشد. جدول (۴) مقایسه ساختار فعلی برنامه‌ریزی تولید و ساختار پیشنهادی برنامه‌ریزی تولید سلسله‌مراتبی را با توجه به شاخص‌های ذکر شده نشان می‌دهد.

شاخص‌های عملکردی	ساختار فعلی برنامه‌ریزی تولید	ساختار پیشنهادی برنامه‌ریزی تولید سلسله‌مراتبی
۱	۴۳۵۷۸۲۲۱۵۲۴ ریال	۲۷۱۷۹۴۱۲۴۰۰ ریال
۲	۲۵۰۰۰	۱۲۸۰۰
۳	۵۲۰۰۰	۲۳۶۰۰
۴	٪۶۸	٪۸۲
۵	٪۳۰	٪۱۸
۶	٪۴۵	٪۱۹
۷	٪۳۰	٪۱۲
۸	٪۷۲	٪۸۵
۹	٪۵۸	٪۷۹
۱۰	۶۸	۲۵
۱۱	۸ روز	۴ روز
۱۲	۱۲۵۴۴۰۰۰۰ ریال	۲۸۴۶۰۰۰۰ ریال

جدول (۴) مقایسه ساختار فعلی برنامه‌ریزی تولید و ساختار پیشنهادی برنامه‌ریزی تولید سلسله‌مراتبی

۵- نتیجه‌گیری

عدم امکان پیش‌بینی مناسب محصولات تولیدی بدلیل افزایش نوسانات بازار رقابتی، بالا بودن هزینه‌های موجودی و عدم استاندارد سازی محصولات بدلیل افزایش تنوع خواسته‌های مشتریان در محیطهای تولیدی MTS و از طرف دیگر بالارفتن زمان تحویل سفارش، عدم امکان مناسب از منابع تولیدی (اضافه‌کاری و یا بیکاری ماشین‌آلات) و پیچیدگی برنامه‌ریزی تولید محصولات در سیستم‌های MTO سبب شده است که بسیاری از شرکت‌هائی که تنوع بالائی از محصولات را تولید می‌کنند تمایل به پیاده‌سازی محیط تولیدی ترکیبی داشته باشند. برای دستیابی همزمان به مزایای سیستم‌های MTS و MTO و نیز کاهش و حذف معایب اینگونه سیستم‌ها لازم است که از یک

نگرش تولید سلسله مراتبی در سیستم‌های ترکیبی استفاده شود. سوال اصلی در محیط‌های تولیدی ترکیبی این است که با توجه به وجود منابع محدود مشترک در اینگونه سیستم‌های تولیدی برای محصولات MTS و MTO و نیز ویژگی‌های متفاوت این محصولات، یک ساختار مناسب سلسله مراتبی شامل چه اجزای تصمیم‌گیری می‌باشد. در همین راستا در این مقاله یک ساختار سلسله مراتبی تصمیم‌گیری در سیستم‌های تولید MTS/MTO پیشنهاد شده است. ساختار پیشنهادی از مزیت‌های زیر برخوردار است:

- کاهش پیچیدگی: بعلت وجود محصولات MTS و MTO در سیستم، برنامه‌ریزی همزمان آنها مشکل می‌باشد. در رویکرد پیشنهادی با تفکیک مسئله برنامه‌ریزی به زیرمسائل تصمیم‌گیری، امکان برنامه‌ریزی مناسب محصولات فراهم می‌شود.
- کاهش نیاز به اطلاعات دقیق و جزئی در سطح برنامه‌ریزی بلند مدت: بعلت طولانی بودن افق برنامه‌ریزی بلند مدت در سطح ادغامی، امکان دسترسی به اطلاعات دقیق و جزئی وجود ندارد. بنابراین با استفاده از داده‌های ادغامی در سطوح بالاتر که دقیق‌تر از داده‌های جزئی می‌باشند و برقراری مناسب با سطوح پایین (استفاده از خروجی آنها در مراحل پایین)، امکان تعیین یک برنامه دقیق‌تر که نیاز به تغییرات کمتری داشته باشد، بوجود می‌آید.
- مقابله بهتر با تغییرات داخلی و خارجی: هرگاه که پارامترهای ورودی سیستم در سطوح مختلف بواسطه یک اختلال ناشی از تغییرات داخل و خارج از سیستم دچار تغییر می‌شوند، بدون نیاز به حل مجدد تمامی زیر مسائل، این نوع وقایع بطور تدریجی در سطوح مختلف جذب شده و تاثیرات آنها در نظر گرفته می‌شوند. همچنین استفاده از رویکرد غلتان سبب بهنگام و دقیق‌تر شدن برنامه‌های خروجی می‌شود.
- امکان استفاده از معیارهای مختلف در سطوح مختلف: معیارهای مختلف بسته به سطوح مدیریتی، در سطح مناسب خود در ساختار سلسله مراتبی قرار می‌گیرند. بعنوان مثال، هزینه‌های موجودی و اضافه‌کاری در سطوح بالا و هزینه‌های راه‌اندازی و سفارش مواد در سطح پایین برنامه‌ریزی در نظر گرفته می‌شوند.

از جمله کارهای بعدی که می‌تواند در زمینه برنامه‌ریزی تولید سلسله مراتبی در سیستم‌های ترکیبی مورد توجه قرار گیرد انتخاب محصولات MTS و MTO با توجه به خصوصیات محصولات تولیدی در سیستم و نیز استفاده از معیارهای مناسب می‌باشد. همچنین استفاده از معیارها و مدل‌های تفکیک مناسب و دقیق‌تر جهت تعیین خانواده محصولات و اقلام نهائی از مواردی است که می‌تواند سبب کامل‌تر شدن ساختار سلسله مراتبی شود. مهمترین موردی که می‌توان در تحقیقات آتی مورد توجه قرار گیرد و تاکنون در ادبیات برنامه‌ریزی تولید سیستم‌های ترکیبی پیاده نشده است، تعریف و مدلسازی مسائل تصمیم‌گیری مناسب برای محصولات MTS و MTO به صورت همزمان و با یکدیگر در تمام سطوح ساختار برنامه‌ریزی تولید سلسله مراتبی می‌باشد.

REFRENCES:

[۱] Weinstein, L. and Chung, C. "Integration maintenance and production decisions in a hierarchical production planning environment". Computers & Operations Research, Vol.26, 1999, 1059-1074.
[۲] van Donk, D.P. "Make to stock or make to order: The decoupling point in the food processing industries". Int. J. Production Economics, Vol.69, 2001, 297-306.
[۳] Soman, C.A., van Donk, D.P. and Gaalman, G. "Combined make-to-order and make-to-stock in a food production system". International Journal of Production Economics, Vol.90, No.2, 2004, 223-235
[۴] Hax, A.C. and Meal, H.C. "Hierarchical integration of production planning and scheduling". In studies in the management sciences (M.A.Geisler, ed.), Logistics, North Holland-American Elsevier, 1975.
[۵] Holt, C.C., Modigliani, F., Muth, J.F. and Simon, H.A. "Planning production, inventories and work force". NewJersey: Prentice Hall, 1960.
[۶] Winters, R.P. "Constrained inventory rule of production smoothing". Management Science, Vol.8, No.4, 1962, 470-481.
[۷] Graves, S.C. "Using Lagrangian techniques to solve hierarchical production planning problem". Management Sciences, Vol.28, No.3, 1982, 245-261.
[۸] Bitran, G.R., Hass, E.A., Hax, A.C. "Hierarchical production Planning: A two stages system". Operation Research, Vol.30, No.2, 1982, 232-251.

[۹] Nagi, R. "Design and operation of hierarchical production management systems. PhD thesis, University of Maryland, college Park, 1992.
[۱۰] Mehra, A. "Hierarchical production planning for job shop". PhD Thesis, University of Maryland, 1995.
[۱۱] Qiu, M.M., Fredendall, L.D. and Zhu, Z. "Application of hierarchical planning in a multiproduct, multimachine environment". Int. J. Prod. Res., Vol.39, No.13, 2001, 2803-2816.
[۱۲] Akturk, M. S. and Wilson, R. G. "A hierarchical model for the cell loading problem of cellular manufacturing systems". Int .J .Prod .Res, Vol.36, No.7, 1998, 2005-2023.
[۱۲] Ozdamar, L., Bozyel, M.A. and Birbil, S.T. "A hierarchical decision support system for production planning (with case study)". European Journal of Operational Research, Vol.104, 1998, 403-422.
[۱۳] Yan, H.S., Zhang, X.D. and Ma, X.D. "Karmakar and Interaction/Prediction algorithms for hierarchical production planning for the highest business benefit". Computers in Industry, Vol.49, 2002, 141-155.
[۱۴] Yan, H.S., Zhang, X.D. and Ma, X.D. "Hierarchical production planning with demand constraints".Computers & Industrial Engineering, Vol.46, No.3,2004, 533-551.
[۱۵] Liberatore, J.M. and Miller, T. "A hierarchical production planning system". Interfaces, Vol.15, 1985, 1-11.
[۱۶] Tsubone, H. and Sugawara, M. "A hierarchical production planning in a Motor industry", Omega, Vol.15, 1987, 113-120.
[۱۷] Rutten, W.G. "Hierarchical mathematical programming for operational planning in a process industry". European Journal of Operational Research, Vol.64, 1993, 363-369.
[۱۸] Gabbay, H. "Aggregation and disaggregating in hierarchical production planning ". Boston, Martinus Nijhof, 1979, 95-106.
[۱۹] Kingsman , B. "Modeling input-output workload for dynamic capacity planning in production planning systems". International Journal of Production Economics. Vol.68, 2002, 73-93.
[۲۰] Breithoupt, J.W., Land, M, Nyhuis, P. "The workload control concept: Theory and practical extensions and load oriented order release". Production Planning & Control, Vol.13, No.7, 2002, 625-638.
[۲۱] Hendry, L.C., Kingsman, B.G. "Pro0duction planning systems and their applicability to make-to-order companies". European Journal of Operation Research, Vol.40, 1989, 1-15.
[۲۲] Carravilla, M.A., De Souasa, J.P. "Hierarchical production planning in a Make-To-Order company : A case study". European Journal of Operational Research, Vol.86, 1995, 43-56.
[۲۳] Kingsnam, B., Hendry, L. "The relative contribution of input and output controls on the performance of a workload control system in make-to-order companies". Production Planning & Control, Vol.13, No.7, 2002, 579-590.