

بهبودسازی زمان‌های پیشبرد با فرض وجود اقلام معیوب در سیستم برنامه‌ریزی نیازمندی‌های مواد: مطالعه موردی

حسین کریمی*، وحید شریفیان**

تاریخ ارسال: ۹۶/۷/۴ - تاریخ پذیرش: ۹۹/۶/۱۰

چکیده

سیستم‌های برنامه‌ریزی نیازمندی‌های مواد برای پاسخ‌گویی به تقاضای تولیدی گسسته کاربرد زیادی دارد. در این مقاله یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط به منظور کمینه‌سازی هزینه‌ی نهایی که شامل هزینه‌های موجودی کالای در جریان ساخت، بارگذاری، سفارشات عقب‌افتاده، سفارشات از دست‌رفته، تولیدات اضافه و تغییرات در زمان پیشبرد، معرفی می‌شود. همچنین، بخشی از تقاضای پاسخ داده نشده به صورت تقاضای عقب‌افتاده و بخشی از آن به صورت فروش از دست‌رفته در مدل اعمال می‌شود. علاوه بر این در مدل مطرح شده کالای معیوب و چگونگی تأثیر آن روی تقاضای مشتری مورد بحث قرار گرفته است. مدل تک هدفه ارائه شده قطعی بوده و برای برنامه‌ریزی احتیاجات مواد در یک شرکت تولیدی بتن آماده استفاده شده و با توجه به نتایجی که از حل دقیق آن به دست آمده است، با کاهش میزان ضایعات در شرکت مورد مطالعه می‌توان هزینه‌های تولیدی را حدود ۳۰٪ کاهش داد و با توجه به زمان‌های پیشبرد تعیین شده، می‌توان برنامه سفارش‌دهی مواد را اجرا کرد. همچنین در این پژوهش حد پایینی برای مسأله ارائه شده و کارایی محاسباتی آن مورد ارزیابی قرار گرفته است.

واژگان کلیدی: اقلام معیوب، برنامه‌ریزی نیازمندی‌های مواد، تعیین زمان‌های پیشبرد، کمبود.

* استادیار، دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه بجنورد، بجنورد، ایران (نویسنده مسئول) (h.karimi@ub.ac.ir)

** دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه بجنورد، بجنورد، ایران

مقدمه

سیستم‌های برنامه‌ریزی نیازمندی‌های مواد یکی از ابزارهای رایج گسترش برنامه‌های تولید در بخش‌های تولیدی گسسته است. برنامه‌ریزی نیازمندی‌های مواد یک رویکرد کامپیوتر محور برای سیستم‌های طراحی تولید است که مشخص می‌کند چه قطعاتی/موادی، چگونه، به چه مقداری و در چه زمانی برای تولید محصول نهایی مورد نیاز است. این سیستم‌ها اطلاعات مربوط به تقاضای مشتریان و پیش‌بینی میزان فروش را از بخش‌های موجودی و پایگاه داده دریافت کرده، سپس برنامه تولید محصولات را برای برآوردن نیاز مشتریان مشخص می‌سازد. بر اساس برنامه‌ی برنامه‌ریزی نیازمندی‌های مواد، در صورتی که موجودی قطعات و اجزای سازنده محصولات به مقدار کافی باشد، محصولات تولید و در مراکز فروش به مشتریان تحویل داده خواهند شد، در غیر این صورت طرح خرید قطعات به تأمین کنندگان ارسال می‌شود.

یک پارامتر کلیدی در این سیستم‌ها زمان پیشبرد برنامه‌ریزی شده^۱ برای هر قسمت است. سیستم‌های برنامه‌ریزی نیازمندی‌های مواد نیاز خالص هر قطعه/ماده را بر اساس زمان پیشبرد به عقب برمی‌گرداند تا بتواند زمان تولید و زمان خرید سفارشات را برنامه‌ریزی کند. امروزه به دلیل اهمیت برآورده سازی نیاز مشتری در موعد مقرر و کاهش هرچه بیشتر هزینه‌ها در مباحث تولید ناب، ایرادات و اشکالات اساسی به سیستم‌های برنامه‌ریزی نیازمندی‌های مواد وارد است ولی به دلیل رایج بودن استفاده از این سیستم‌ها و سادگی و فهم آسان رویکرد آن، دلیل اصلی تمرکز ما بر این رویکرد است. استفاده کنندگان، منطبق بر برنامه‌ریزی نیازمندی‌های مواد را فهمیده و به‌خوبی می‌توانند ارتباط بین ورودی‌ها و خروجی‌های آن را درک کنند. این فهم، کاربران را قادر می‌سازد تا غلط بودن داده‌های ورودی و چگونگی تغییر داده‌های ورودی برای کسب خروجی را بهتر تشخیص دهند. یک دلیل دیگر برای استفاده کاربران از برنامه‌ریزی نیازمندی‌های مواد، داشتن جواز استفاده از نرم‌افزار برنامه‌ریزی منابع سازمانی^۲ در بسیاری از واحدهای صنعتی و ارتباط نزدیک و جامعی که مدل‌های برنامه‌ریزی

1. Planned lead time (PLT)

2. Enterprise resource programming (ERP)

نیازمندی‌های مواد با سایر نرم‌افزارهای سازمانی دارد، است. هدف ما در این مقاله بهبود مجموعه زمان پیشبرد برنامه‌ریزی شده‌ای است که در سیستم‌های برنامه‌ریزی نیازمندی-های مواد استفاده می‌شوند. سربرنامه تولید و سفارشات مشتری به‌عنوان نیاز خالص به برنامه‌ریزی نیازمندی‌های مواد ارسال می‌شود. این سیستم با توجه به موجودی در دست و موجودی کالای سفارش داده‌شده (که انتظار می‌رود دریافت شود) برنامه‌ریزی تولید را برای پاسخ‌گویی به نیاز خالص تعیین می‌کند (اورلیکی، ۱۹۷۵؛ پلاس، ۱۹۹۴؛ تاک و اسمیت، ۲۰۱۱) این نیازهای خالص با زمان پیشبرد برنامه‌ریزی شده و اندازه دسته‌ها با هم برای ایجاد سفارشات برنامه‌ریزی شده جدید به کار گرفته می‌شوند. این سفارشات برنامه‌ریزی شده در بخشهای صورت مواد^۱ پخش شده و بر اساس تاریخ تعیینی برنامه‌ریزی نیازمندی‌های مواد، در خط تولید استارت می‌خورد.

مقاله حاضر توسعه‌ای بر مقاله مایلن و همکارانش (۲۰۱۵) است که در مقاله آن‌ها فرض بر این است که تمام مواد اولیه به کالای نهایی مرغوب تبدیل می‌شود که می‌دانیم همواره درصدی از اقلام و کالای معیوب در سیستم‌های تولیدی مشاهده می‌شود و این اقلام معیوب هزینه‌های از دست رفتن اعتبار، وارانته و یا مواجه شدن سیستم تولیدی با کمبود بیشتر را در پی خواهد داشت. علاوه بر این در مقالات گذشته در این حوزه تمام کمبود به‌صورت عقب‌افتاده در نظر گرفته می‌شد ولی امروزه در بسیاری از سیستم‌های تولیدی درصدی از مشتریان در صورت مواجهه با تأخیر در سفارش، ممکن است با پس‌گرفتن سفارش، هزینه کمبود به‌صورت ازدست‌رفته را به سیستم تولیدی تحمیل کنند. ما در این مقاله مدلی برای تعیین زمان‌های پیشبرد در سیستم برنامه‌ریزی احتیاجات مواد ارائه کرده‌ایم که در این مدل بخشی از کمبود به‌صورت عقب‌افتاده و بخشی از آن به‌صورت فروش ازدست‌رفته است، همچنین در این مدل به تولید اقلام/مواد معیوب توجه شده و هزینه تحمیل شده به سیستم تولیدی با در نظر گرفتن این اقلام ارزیابی شده است.

1. Bill of materials (BOM)

در ادامه‌ی این مقاله بخش‌های زیر ارائه می‌شود. در بخش ۲ ادبیات موضوع مورد بررسی، مرور می‌شود. در بخش ۳ مدل مسأله مطرح و بررسی می‌شود. نتایج محاسباتی برای یک مطالعه موردی، حد پایین و پیشنهادات مدیریتی به ترتیب در بخش‌های ۴ و ۵ ارائه می‌شود و در نهایت در بخش ۶، نتایج مقاله ارائه خواهد شد.

مطالعات پیشین

همانطور که می‌دانیم، زمان پیشبرد در سیستم‌های تولید و موجودی، زمانی بین سفارش خرید تا دریافت کالا است. زمان پیشبرد برنامه‌ریزی شده زمانی بین زمان تحویل سفارش تولید و زمان صدور سفارش برنامه‌ریزی شده است. این زمان پیشبرد در سیستم‌های تولیدی به دلیل محدودیت‌های ظرفیتی یا تقاضاهای غیر برنامه‌ریزی شده به صورت مقدار ثابتی نیستند و به نوعی متغیری هستند که می‌توانند در مقدار بهینه‌ای قرار گیرند. در ادامه به بررسی این موضوع در ادبیات پژوهش خواهیم پرداخت.

بیلینگتون و همکارانش (۱۹۸۳) از جمله اولین مقالات در زمینه‌ی تعیین زمان‌های پیشبرد است. مقاله آن‌ها یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط^۱ برای تعیین برنامه تولید بهینه (با مفاهیم زمان‌های پیشبرد برنامه‌ریزی شده) در یک سیستم تولیدی ساخت برای انبار با مفاهیم کلی، صورت مواد چند سطحی و محدودیت ظرفیت، را پیشنهاد کرد. کانت (۱۹۸۶) پیشنهاد داد که زمان پیشبرد برنامه‌ریزی شده باید بر مبنای نسبت ارزش اقتصادی زمان‌های انتظار و تأخیرها که اجزای موجودی هستند تنظیم شود. با این وجود، این تنظیمات باید با دقت انجام شود چون تأثیر بلندمدت خواهد گذاشت.

در ادامه ادبیات، مدلی ارائه شده که به نوعی برنامه‌ریزی تأمین مواد بر اساس بهینه‌سازی زمان‌های پیشبرد انجام شد که دولگویی و اولد-لولی (۲۰۰۲) این کار را انجام دادند. آن‌ها یک مدل تصادفی برای به دست آوردن مقادیر زمان‌های پیشبرد در سیستم یک سطحی، چند کالایی، برنامه‌ریزی تأمین چند دوره‌ای بر اساس زمان پیشبرد غیرقطعی برای حداقل‌سازی

1 . Mix integer programming (MIP)

مقدار انتظاری کمبود پس‌افت و هزینه‌های نگهداری پیشنهاد دادند. اسپیتز (۲۰۰۳) مفاهیم هزینه‌ای در زمان پیشبرد برنامه‌ریزی شده را با آزمایش‌های سعی و خطا بررسی کرد. متعاقباً، دولگویی و اولد-لولی (۲۰۰۴) یک مدل عمومی‌تر برای تعیین زمان‌های پیشبرد برنامه‌ریزی شده در یک سیستم ترکیبی با زمان پیشبرد غیرقطعی برای حداقل‌سازی میانگین هزینه نگهداری، هزینه کمبود پس‌افت، و هزینه بارگذاری ارائه دادند. در مدل آن‌ها فرض شده بود که زمان پیشبرد هر یک از قطعات از یک توزیع احتمالی پیروی می‌کند و هزینه‌های نگهداری در هر دوره زمانی یکسان در نظر گرفته شده بود. تئو و همکارانش (۲۰۱۱) پنجره‌های برنامه‌ریزی بهینه (جبران‌کننده زمان) و زمان‌های پیشبرد برنامه‌ریزی شده را در نظر گرفتند تا هزینه‌های تولیدی مربوطه را حداقل کنند. زمان‌های پیشبرد بهینه در طول زمان ثابت باقیمانده و تقاضاها در صورت احتیاج با بهره‌گیری از زیرساخت‌ها و اضافه‌کاری تأمین می‌شوند. آن‌ها فرض کردند که سربرنامه تولید یک مجموعه با یک نرخ ثابت در افق برنامه‌ریزی است. علاوه بر این، بحث ظرفیت در این سیستم‌ها توسط آلتندورفر و ماینر (۲۰۱۱) بررسی گردید. آن‌ها مدلی برای بهینه‌سازی همزمان زمان‌های پیشبرد و ظرفیت در یک سیستم تولیدی دوسطحی با در نظر گرفتن زمان‌های تحویل کالا به مشتریان ارائه کردند. لوآنو و دیمیتریو (۲۰۱۲) الگوریتمی برای تخمین زمان پیشبرد ثابت در برنامه‌ریزی نیازمندی‌های مواد برای سیستم تولیدی ساخت برای سفارش ارائه کردند. دولگویی و اولد-لولی (۲۰۱۳) جریان تحقیقات خود را با معرفی یک مدل چند دوره‌ای بدون هیچ‌گونه محدودیتی در تعداد قطعات برای حداقل‌سازی سفارشات و زمان‌های پیشبرد برنامه‌ریزی شده، ادامه دادند. مدل آن‌ها مجموع هزینه‌های نگهداری و بارگذاری برای تمام قطعات را حداقل می‌کرد تا زمانی که یک سطح سرویس مطلوب بدست آید. مدل آن‌ها بر طبق کل توزیع‌های ممکن برای اجزای زمان پیشبرد عمومی‌سازی شده بود. نوین و رایت (۲۰۱۵) مدل ریاضی و روش حلی برای تعیین زمان پیشبرد و سطح ظرفیت بهینه برای حداکثرسازی سود با در نظر گرفتن زمان به صورت متغیر، معرفی کردند. آلتندورفر (۲۰۱۵) مدلی برای نشان دادن رابطه اندازه دسته تولیدی و سطح خدمت‌دهی برای تعیین زمان‌های پیشبرد در یک سیستم تولیدی تک سطحی

معرفی کرد. مادرونرو و همکارانش (۲۰۱۵) مدلی ریاضی برای سیستم برنامه‌ریزی نیازمندی‌های مواد با فرض فازی بودن زمان‌های پیشبرد ارائه کردند.

یکی از مدل‌هایی که در ادامه ارائه شد، مدل مایلن و همکارانش (۲۰۱۵) بوده که مقاله حاضر مبتنی بر مدل آن‌ها است. آن‌ها مدل برنامه‌ریزی عدد صحیحی برای تعیین زمان‌های پیشبرد بهینه با توجه به هزینه‌های نگهداری و تغییر در زمان پیشبرد برنامه‌ریزی شده با توجه به ظرفیت قطعات و ظرفیت تولید ارائه دادند. سوکرد و ووتی پورنپون (۲۰۱۶) الگوریتمی تلفیقی (الگوریتم ژنتیک^۱ و الگوریتم جستجوی ممنوعه^۲) برای حل مسأله برنامه‌ریزی نیازمندی‌های مواد با فرض متغیر بودن زمان‌های پردازش برای سیستم‌های تولیدی جریان انعطاف‌پذیر^۳ ارائه کردند. پویا و پاکدامن (۲۰۱۷) یک مدل برنامه‌ریزی نیازمندی‌های مواد با فرض پیوستگی زمان تولید و ظرفیت محدود موجودی ارائه کردند. بورودین و همکارانش (۲۰۱۷) فرض تصادفی بودن زمان پیشبرد را در یک سیستم مونتاژ تک سطحی بررسی کردند. هاسلر و اشکنریتر (۲۰۱۹) فرض پویا بودن زمان پیشبرد را در یک سیستم تولیدی مطرح کردند. هنکا و ورما (۲۰۱۹) به مسأله کاربرد یک مدل برنامه‌ریزی نیازمندی‌های مواد در صنعت خودروسازی (مطالعه موردی) پرداختند.

بر اساس این بررسی‌های انجام شده، بیشتر مطالعات در حوزه مسئله بهینه‌سازی زمان‌های پیشبرد برنامه‌ریزی شده اثر عواملی همانند محدودیت‌های ظرفیتی، هزینه‌ها موجودی، نرخ خدمات را توأمان در کنار هم در نظر نگرفتند. علاوه بر این، در این مقاله، وجود اقلام یا مواد معیوب و وجود کمبود به صورت فروش از دست رفته نیز وجود دارد. همچنین، بر اساس بررسی‌هایی که انجام شد، در اکثر مقالات روشی برای محاسبه حد پایینی برای مسئله ارائه نشده است که این موضوع در مقاله حاضر مورد بررسی قرار گرفته که با یک روش ابتکاری یک حد پایین برای مقاله ارائه خواهد شد.

-
1. Genetic algorithm (GA)
 2. Tabu search (TS)
 3. Flexible flow shop

مدل مسأله

تعریف مسأله

این مقاله برای محیط تولیدی گسسته با محدودیت ظرفیت که از برنامه‌ریزی نیازمندی‌های مواد استفاده می‌کند و با در نظر گرفتن تقاضای قابل‌تغییر، ارائه شده است. از مسائل صنعتی مرتبط با مقاله می‌توان به تولید قطعات موتوری، ریخته‌گری دقیق، ابزار جنگی، الکترونیک و تولید مصالحی که دارای اجزای مختلفی هستند اشاره کرد. در این پژوهش هدف تعیین و بهینه‌سازی زمان‌های پیشبرد برنامه‌ریزی شده با توجه به هزینه‌های تولیدی و موجودی است. ما فرض کرده‌ایم که سفارشات برنامه‌ریزی شده یا با توجه به فرضیات سیستم برنامه‌ریزی نیازمندی‌های مواد در موعد مقرر آزاد می‌شوند و یا به دلیل کمبود اجزای موردنیاز در زمانی دیرتر از زمان مقرر تحویل داده می‌شوند. اگر موجودی اجزا به اندازه کافی در اختیار باشد، سفارشات برنامه‌ریزی شده در موعد مقرر و با در نظر گرفتن ظرفیت در دسترس آزاد می‌شوند و اگر موجودی اجزا به اندازه موردنیاز در دسترس نباشد، حداکثر محصول با توجه به اجزاء موجود، تولید شده و مقدار تقاضای باقیمانده به صورت کمبود پس‌افت یا ازدست‌رفته به دوره بعد منتقل می‌شود. زمانی که یک برنامه سفارش در خط تولید آزاد می‌شود، اجزای موردنیاز برای تولید آن سفارش از انبار خارج می‌شود. فرض بر این است که درصدی از اجزاء/مواد در قسمت‌های سرهم‌بندی فاقد کیفیت مطلوب بوده و معیوب محسوب می‌شوند. تمام فعالیت‌ها در یک محیط تولیدی انجام می‌شود. جریان مواد در خط تولید در هر زمان در دسترس است (حمل و نقل در خط تولید بدون عیب است). محاسبات در دوره‌های زمانی گسسته از یک مدت‌زمان ثابت انجام می‌شود. سطح موجودی انبار در ابتدای افق برنامه‌ریزی، صفر است. تقاضا به صورت یک عامل خارجی به عنوان نیاز خالص مستقل در مدل اعمال می‌شود. تقاضای وارد شده به سیستم می‌تواند به صورت تقاضای برنامه‌ریزی شده و یا محموله برنامه‌ریزی شده در سربرنامه تولید اعمال شود. تقاضای پاسخ داده نشده در اولین دوره بعد در نظر گرفته می‌شود و به عنوان تقاضای پس‌افت و یا سفارش ازدست‌رفته اعمال می‌شود. اگر یک برنامه سفارش آزاد شود باید با توجه به ظرفیت موجود در بهینه‌ترین زمان پیشبرد محقق شود. و اگر

اجزای کافی برای تحقق همه‌ی سفارشات در یک دوره وجود نداشته باشد، اولویت با سفارشات به تعویق افتاده‌ی دور قبل است. تمام کاهش‌ها و افزایش‌های سطح موجودی در ابتدای هر دوره همزمان انجام می‌شود. در مدل این مقاله نحوه تحویل محصول به صورت دسته‌به‌دسته و دوره‌ی تولیدی ثابت در نظر گرفته شده است. اندیس‌ها، پارامترها، ضرایب تابع هدف و متغیرهای تصمیم به صورت زیر است:

اندیس‌ها

a قسمت‌هایی که از سرهم‌بندی قطعات ساخته شده

e مواد خام

i اجزا

u قسمت‌هایی که از سرهم‌بندی قسمت‌های سرهم شده ساخته می‌شوند

d نیاز خالص مستقل

t دوره زمانی

s دوره زمانی برای سفارش آزادشده برنامه‌ریزی شده

v دوره زمانی که محصول به انبار می‌رسد

w دوره زمانی که یک سفارش برنامه‌ریزی شده به انبار می‌رسد و برای پاسخ دادن به نیاز خالص

استفاده می‌شود

x دوره زمانی اولیه برای بهینه‌سازی زمان پیشبرد

f تعداد دوره‌های زمانی وابسته به تعداد دوره‌های نیاز خالص که در یک انباشته مشترک‌اند

پارامترها

$Milt_i$ حداقل زمان پیشبرد برای اقلام بدون محدودیت

$Malt_i$ حداکثر زمان پیشبرد برنامه‌ریزی شده برای قطعه/ماده i

Fp_i	تعداد دوره‌های ثابت نیاز خالص برای پاسخ‌گویی به اندازه دسته
$MPAR_{at}$	حداقل درصد مقدار واقعی سفارش برنامه‌ریزی شده آزاد شده برای قطعه/ماده a در دوره t
$MQAR_{at}$	حداقل مقدار واقعی سفارش آزاد شده برای قطعه/ماده a در دوره t
Dd_t	تقاضای مستقل خارجی از محصول d در دوره t
Q_{ac}	مقدار مورد نیاز از جزء c برای تولید a
CR_{ir}	ظرفیت مورد نیاز از منبع r برای تولید هر قطعه/ماده تولیدی
CA_{rt}	ظرفیت در دسترس از منبع r در دوره زمانی t
M	مقدار بزرگ
ε	مقدار کوچک
β_i	درصد ضایعات قطعه/ماده i
α_i	درصد کالای i که به صورت پس‌افت برآورده خواهد شد

ضرایب تابع هدف

Hi	هزینه نگهداری هر واحد
HWi	هزینه نگهداری موجودی در جریان ساخت مازاد
BOi	هزینه سفارشات عقب افتاده برای هر قطعه/ماده
LSd	هزینه موجودی از دست رفته هر قطعه/ماده
SCi	هزینه راه‌اندازی برای تولید هر واحد
$PCCVi$	هزینه تغییر هر واحد در زمان پیشبرد برنامه‌ریزی شده
$PCCFi$	هزینه ثابت هر واحد تغییر در زمان پیشبرد برنامه‌ریزی شده

متغیرهای تصمیم

B_{dt}	مقدار تقاضای عقب افتاده در پایان دوره t
I_{it}	موجودی نهایی محصول i در پایان دوره t
$IMRP_{it}$	موجودی نهایی محصول i در پایان دوره t بدون وجود محدودیت‌ها
P_{itv}	سفارش برنامه‌ریزی شده آزاد شده از محصول i در دوره t که در دوره v به انبار می‌رسد
P_{itv}^*	اگر $P_{itv} \geq 0$ ، مساوی یک.
PLT_{iv}	زمان پیشبرد برنامه‌ریزی شده از یک سفارش برنامه‌ریزی شده جدید از محصول i که در دوره v به انبار می‌رسد
LT_{iv}^*	اگر $\sum_{t=v-Malt_i}^{v-Milt_i} P_{itv}^* = 1$ ، مساوی ۱
PLT_{iv}^+	افزایش در زمان پیشبرد نسبت به دوره قبل
PLT_{iv}^-	کاهش در زمان پیشبرد نسبت به دوره قبل
PLT_{iv}^*	اگر مقدار زمان پیشبرد نسبت به قبل تغییر کند، ۱
SH_{dt}	محموله تکمیل شده از تقاضای محصول d در دوره t
AP_{it}	شروع به تولید واقعی جزء i در دوره t
AP_{it}^*	اگر $AP_{it} \geq 0$ ، مساوی ۱
AR_{it}	آزاد سازی واقعی محصول جزء i در دوره t
AR_{it}^*	اگر $AR_{it} \geq 0$ ، مساوی ۱

BR_{at}	سفارشات برنامه‌ریزی شده معوق از قطعه/ماده a در دوره t
BR_{at}^*	اگر $BR_{at} \geq 0$ مساوی یک
CPI_a	در صورتی که موجودی اجزای تشکیل دهنده قطعه/ماده a برای تولید مازاد وجود داشته باشد، مساوی ۱
ASS_{at}^+	موجودی مازاد بر تولید مورد نیاز اجزای تشکیل دهنده قطعه/ماده a در دوره t
COM_{act}^-	اگر حد پایین موجودی برای تولید مازاد از قطعه/ماده a در دوره t توسط جزء c محدود شود، ۱، در غیر این صورت ۰
MAX_{at}	حداقل مقدار AR_{it} با توجه به $MPAR_{at}$ و $MQAR_{at}$
Z_{at}	۱ است، اگر حداقل مقدار AR_{it} برای آزادسازی براساس $MQAR_{at}$ بزرگتر از حداقل آزادسازی براساس $MPAR_{at}$ باشد، در غیر این صورت ۰
E_{at}	موجودی قطعات اولیه برای پوشش حداقل آزادسازی از قطعه/ماده a در دوره t اگر موجود باشد، ۱ در غیر این صورت ۰
EWI_{it}	موجودی در جریان ساخت اضافی از جزء i در دوره t

مدل ریاضی

فرمول‌ها و روابط ریاضی مدل مسئله به صورت زیر است.

$$\begin{aligned} \min \sum_{i \in I} \sum_{t \in T} (H_i I_{it} + HW_i WI_{it} + SC_i AR_{it}^*) + \\ \sum_{d \in D} \sum_{t \in T} (BO_d \alpha_t B_{dt} + LS_d (1 - \alpha_t) B_{dt}) + \\ \sum_{i \in I} \sum_{v \geq 1 + Milt_i} (PCCF_i PLTC_{iv}^* + PCCV_i (PLT_{iv}^+ + PLT_{iv}^-)) \end{aligned} \quad (1)$$

رابطه (۱) تابع هدف مسأله و شامل هزینه‌های نگهداری، موجودی در جریان ساخت، راه‌اندازی، کمبود پس‌افت، فروش از دست‌رفته و تغییرات در زمان‌های پیشبرد است.

$$B_{dt} = B_{d(t-1)} + D_{dt} - SH_{dt} \quad (2)$$

در محدودیت (۲) مقدار عقب‌افتاده از تقاضای d در پایان دوره t برابر مقدار تقاضای عقب‌افتاده از این محصول در پایان دوره $t-1$ به علاوه تقاضای مستقل دوره t منهای کل تولید به صورت محموله در آن دوره است.

$$I_{it} = I_{i(t-1)} + AP_{i(t-Mil_i)} - \sum_{d \in i, d \in D} SH_{dt} - \sum_{a \in ass_i} Q_{ai}(1 - \beta_a)AR_{at} \quad \forall i \in I, t \in T \quad (3)$$

با توجه به محدودیت (۳) مقدار موجودی قطعه/ماده i در انتهای دوره تولیدی t برابر است با مقدار موجودی نهایی دوره قبل به علاوه مقدار تولیدشده در دوره t با توجه به حداقل زمان پیشبرد آن محصول منهای تقاضای خالص از محصول نهایی به صورت محموله منهای مقدار آزادشده از این قطعه/ماده در دوره t .

$$WI_{it} = WI_{i(t-1)} + AR_{it} - AP_{it} \quad \forall i \in I, t \in T \quad (4)$$

در محدودیت (۴) مقدار موجودی در جریان ساخت مازاد در انتهای دوره t برابر است با مقدار موجودی در جریان ساخت مازاد در انتهای دوره $t-1$ به علاوه کالای نیمه ساخته در انتهای دوره t منهای کالای نهایی تولیدشده در انتهای دوره t .

$$\sum_{i \in I} CR_{ir} AR_{it} \leq CR_r \quad \forall i \in I, t \in T \quad (5)$$

در محدودیت (۵) تعداد واحدهای تولیدی از جزء i در انتهای دوره t بوسیله ظرفیت اجزایش محدود می‌شود.

$$IMRP_{it} = IMRP_{i(t-1)} + \sum_{s \in T, s=t-Milt_i}^{t-Milt_i} P_{ist} - D_{it} - \sum_{a \in ass_i} \sum_{s \in T, s=t+Malt_i}^{t+Malt_i} P_{atv} Q_{ai} (1 + \beta_a) \quad \forall i \in I, t \in T; t > 1 + Milt_i \quad (6)$$

محدودیت (۶) مشابه محدودیت (۳) است با این تفاوت که سطح موجودی با توجه به سیستم برنامه‌ریزی نیازمندی‌های مواد و بدون در نظر گرفتن محدودیت‌ها است.

$$IMRP_{it} = P_{ilt} - \sum_{x=1}^{1+Milt_i} [D_{it} + \sum_{a \in ass_i} \sum_{v \in T, v=t+Malt_i}^{x+Malt_i} P_{axv} Q_{ai} (1 + \beta_a)] \quad \forall i \in I, t \in T; t = 1 + Milt_i \quad (7)$$

در اولین دوره بعد از $Milt_i$ باید مقدار تقاضای دوره‌های ۱ تا $Milt_i+1$ پاسخ داده شود، این نکته در محدودیت (۷) مشهود است.

$$\sum_{t=\max\{1, v-Malt_i\}}^{v-Milt_i} P_{itv} \leq \sum_{f=1}^{\min\{FP_i, |T|+1-v\}} D_{i(v+f-1)} + \sum_{f=1} \sum_{a \in ass_i} \sum_{w=v+f-1+Malt_i}^{\min\{v+f-1+Malt_i, |T|\}} P_{a(v+f-1)w} Q_{ai} (1 + \beta_a) \quad \forall i \in I, v \in T; 1 + Milt_i \leq v \leq |T| \quad (8)$$

محدودیت (۸) به این نکته اشاره می‌کند که مقدار دریافت از قطعه/ماده i در دوره v همواره کوچکتر یا مساوی مقدار تقاضای دوره‌های v و یا دوره‌های FP_i به علاوه مقدار سفارش از قطعه/ماده a در دوره v و یا در دوره‌های FP_i است.

$$\sum_{t=\max\{1, v-Malt_i\}}^{v-Milt_i} P_{itv} \leq \sum_{f=2-v}^{\min\{FP_i, |T|+1-v\}} D_{i(v+f-1)} + \sum_{f=2-v} \sum_{a \in ass_i} \sum_{w=v+f-1+Malt_i}^{\min\{v+f-1+Malt_i, |T|\}} P_{a(v+f-1)w} Q_{ai} (1 + \beta_a) \quad \forall i \in I, v \in T; v = 1 + Milt_i \quad (9)$$

محدودیت (۹) همانند محدودیت (۸) است با این تفاوت که برای اولین دوره بعد از $Milt_i$ نوشته شده است.

$$\sum_{t=\max\{1, v-Milt_i\}}^{v-Milt_i} \sum_{w=v}^{\min\{v+FP_i-1, |T|\}} P_{itv}^* \leq 1 \quad \forall i \in I, v \in T; 1 + Milt_i \leq v \leq |T| \quad (10)$$

محدودیت (۱۰) تضمین می‌کند که در هر دوره زمانی FP_i حداکثر یک سفارش برنامه‌ریزی شده به انبار می‌رسد.

$$\sum_{t=\max\{1, v-Milt_i\}}^{v-Milt_i} \sum_{w=v+1-FP_i}^v P_{itv}^* \leq 1 \quad \forall i \in I, v \in T; 1 + Milt_i \leq v \leq |T| \quad (11)$$

محدودیت (۱۱) نیز مشابه محدودیت (۱۰) است ولی برای در نظر گرفتن دوره‌های قبل از دوره v نوشته شده است.

$$\sum_{t=\max\{1, v-Milt_i\}}^{v-Milt_i} P_{itv}^* \leq MALT_i LT_{iv}^* \quad \forall i \in I, v \in T; 1 + Milt_i \leq v \quad (12)$$

محدودیت (۱۲) تضمین می‌کند که اگر یک سفارش برنامه‌ریزی شده در دوره v آزاد شود، آنگاه متغیر صفر و یک LT_{iv}^* ، مقدار یک می‌گیرد.

$$PLT_{iv} \geq MILT_i \quad \forall i \in I, v \in T; 1 + Milt_i \leq v \quad (13)$$

محدودیت (۱۳) تضمین می‌کند که باید زمان پیشبرد برای تقاضای جدید جزء i از حداقل زمان پیشبرد آن بیشتر باشد.

$$PLT_{iv} = PLT_{i(v-1)} + PLT_{iv}^+ + PLT_{iv}^- \quad \forall i \in I, v \in T; 1 + Milt_i \leq v \quad (14)$$

این نکته که زمان پیشبرد جزء i که در دوره v به انبار می‌رسد، بر اساس زمان پیشبرد دوره قبل و میزان افزایش و یا کاهش در زمان پیشبرد آن تعیین می‌شود، در محدودیت (۱۴) بیان شده است.

$$\sum_{t=v-Malt_i}^{v-Milt_i} (v-t)P_{iv}^* \leq PLT_{iv} \quad \forall i \in I, v \in T; 1 + Milt_i \leq v \quad (15)$$

$$+ MALT(1 - LT_{iv}^*)$$

با توجه به محدودیت (۱۵) اگر مقدار یک بگیرد به این معناست که یکی از مقادیر P_{iv}^* وابسته به v و t مقدار یک خواهد گرفت و با توجه به ضریب $v-t$ حدپایین زمان پیشبرد جدید تعیین می‌شود، در غیر این صورت محدودیت غیر فعال است.

$$\sum_{t=v-Malt_i}^{v-Milt_i} (v-t)P_{iv}^* \geq PLT_{iv} \quad \forall i \in I, v \in T; 1 + Milt_i \leq v \quad (16)$$

$$- MALT(1 - LT_{iv}^*)$$

محدودیت (۱۶) هم مشابه محدودیت ۱۵ است و برای برابری PLT_{iv} با سمت چپ نامساوی نوشته شده است.

$$PLT_{iv}^+ \leq MALT_i LT_{iv}^* \quad \forall i \in I, v \in T; 1 + Milt_i \leq v \quad (17)$$

$$PLT_{iv}^- \leq MALT_i LT_{iv}^* \quad \forall i \in I, v \in T; 1 + Milt_i \leq v \quad (18)$$

محدودیت‌های (۱۷) و (۱۸) برای تعیین حداکثر و حداقل میزان افزایش در زمان پیشبرد نوشته شده‌اند.

$$PLT_{iv}^+ + PLT_{iv}^- \leq MALT_i PLTC_{iv}^* \quad \forall i \in I, v \in T; 1 + Milt_i \leq v \quad (19)$$

محدودیت (۱۹) برای تعیین حداکثر تغییر در زمان پیشبرد نوشته شده است.

$$AR_{it} = \sum_{v=t+Milt_i}^{t+Malt_i} P_{etv} \quad \forall e \in E, t \in T \quad (20)$$

با توجه به محدودیت (۲۰) زمان واقعی آزادسازی اجزاء اولیه محصول، وابسته به حداقل و حداکثر زمان پیشبرد آن در دوره زمانی برنامه‌ریزی شده t برابر با مجموع زمان‌های برنامه‌ریزی شده آزادسازی آن اجزاء است.

$$BR_{at} = BR_{a(t-1)} + \sum_{v=t+Milt_i}^{t+Malt_i} P_{atv} - AR_{at} \quad \forall a \in A, t \in T, v \in T; v = 1 + Milt_i \quad (21)$$

در محدودیت (۲۱) مقدار کمبود از قطعه/ماده a در انتهای دوره t برابر با مقدار کمبود در انتهای دوره $t-1$ به علاوه مقدار برنامه‌ریزی شده برای سفارشات قطعه/ماده a در دوره t است.

$$BR_{at}^* + CPI_a + E_{at} \leq 2 \quad \forall a \in A, t \in T \quad (22)$$

در یک سیستم برنامه‌ریزی نیازمندی‌های مواد اگر BR_{at}^* صفر باشد یعنی توانایی تولید قطعات موردنیاز و اضافی از قطعه/ماده a وجود دارد و اگر مقدار آن یک باشد یا می‌توان تقاضای موجود را پاسخ داد یا مقدار موجودی اضافی را تولید کرد و به هر دو این مقادیر نمی‌توان پاسخ داد، این نکته در محدودیت (۲۲) بیان شده است.

$$BR_{at} \leq M \times BR_{at}^* \quad \forall a \in A, t \in T \quad (23)$$

با توجه به محدودیت (۲۳) اگر متغیر BR_{at}^* مقدار یک بگیرد آنگاه برای قطعه/ماده a در دوره t می‌تواند کمبود وجود داشته باشد.

$$ASS_{at}^+ \leq \frac{I_{ct}}{Q_{ac}} \quad \forall a \in A, t \in T, c \in a \quad (24)$$

با توجه به محدودیت (۲۴) مقدار موجودی اضافی از اجزاء قطعه/ماده a که باعث آزادسازی تعداد بیشتری از قطعه/ماده a در دوره t نمی‌شود برابر با مقدار موجودی نهایی از جزء c در دوره t تقسیم بر مقدار موردنیاز از قطعه/ماده c برای تولید قطعه/ماده a است.

$$ASS_{at}^+ \geq \frac{I_{ct}}{Q_{ac}} - M(1 - COM_{act}^-) \quad \forall a \in A, t \in T, c \in a \quad (25)$$

محدودیت (۲۵) برای تعیین جزئی که تولید اضافی از محصول a را محدود می‌کند در نظر گرفته شده است.

$$\sum_{c \in a} COM_{act}^- = 1 \quad \forall a \in A, t \in T \quad (26)$$

با توجه به محدودیت (۲۶) برای هر قطعه/ماده حتماً یکی از اجزاء، تولید مازاد آنرا محدود می‌کند.

$$ASS_{at}^+ \leq M \times CPI_{at} \quad \forall a \in A, t \in T \quad (27)$$

با توجه به محدودیت (۲۷) اگر موجودی اضافی از اجزاء a وجود داشته باشد می‌توان تولید مازاد داشت.

$$MAX_{at} \geq MPAR_{at} \sum_{v: v=t+Milt_i}^{t+Malt_i} P_{atv} \quad \forall a \in A, t \in T \quad (28)$$

محدودیت (۲۸) برای تعیین یک حد پایین برای تعداد قطعه/ماده آزاد شده a با توجه به حداقل درصد آزادسازی واقعی و مجموع سفارشات برنامه‌ریزی شده نوشته شده است.

$$MAX_{at} \geq MQAR_{at} \quad \forall a \in A, t \in T \quad (29)$$

محدودیت (۲۹) هم تعیین یک حد پایین برای تعداد قطعه/ماده آزاد شده a با توجه به حداقل مقدار آزادسازی واقعی a در دوره t نوشته شده است.

$$MAX_{at} \leq MPAR_{at} \sum_{v: v=t+Milt_i}^{t+Malt_i} P_{atv} + MZ_{at} \quad \forall a \in A, t \in T \quad (30)$$

$$MAX_{at} \leq MQAR_{at} + M(1 - Z_{at}) \quad \forall a \in A, t \in T \quad (31)$$

با توجه به محدودیت (۳۰) و (۳۱) فقط یکی از محدودیت‌های (۲۹) و (۲۸) فعال است.

$$(1 + \varepsilon)(AR_{at} + ASS_{at}^+) \leq MAX_{at} + ME_{at} \quad \forall a \in A, t \in T \quad (32)$$

با توجه به محدودیت (۳۲) اگر موجودی به اندازه کافی برای قطعه/ماده a در زمان t در انبار وجود نداشته باشد مقدار MAX_{at} باید بیشتر از مقدار واقعی آزاد شده از قطعه/ماده a بعلاوه مقدار اضافی از تولید قطعه/ماده a باشد و علت قراردادن ε این است که اگر مقدار کافی

موجودی قطعه/ماده a وجود نداشته باشد باید مقدار MAX_{at} بیشتر از مجموع AR_{at} و ASS_{at}^+ باشد.

$$AR_{at} \geq MAX_{at} - M(1 - AR_{at}^*) \quad \forall a \in A, t \in T \quad (33)$$

در محدودیت (۳۳) اگر مقدار واقعی آزادسازی از قطعه/ماده a در دوره t برآورده شود، حداقل مقدار آن برابر با MAX_{at} است.

$$AR_{at} \leq M \times AR_{at}^* \quad \forall a \in A, t \in T \quad (34)$$

$$AP_{it} \leq M \times AP_{it}^* \quad \forall i \in I, t \in T \quad (35)$$

$$P_{itv} \leq M \times P_{itv}^* \quad \forall a \in A, t \in T, v \in T, \\ T + Milt_i \leq v \leq t + Mali_i \quad (36)$$

محدودیت‌های (۳۴)، (۳۵) و (۳۶) برای محدود کردن متغیرهای AR_{at} ، AP_{it} و P_{itv} با توجه به متغیرهای صفر و یک AR_{at}^* ، AP_{it}^* و P_{itv}^* نوشته شده است.

$$P_{itv}^*, AP_{it}^*, AR_{it}^*, BR_{at}^*, CPI_{at}, E_{at}, Z_{at}, LT_{iv}^*, PLT_{iv}^*, COM_{act}^- \in \{0,1\} \quad (37)$$

$$B_{dt}, I_{it}, IMRP_{it}, P_{itv}, PLT_{iv}, PLT_{iv}^+, PLT_{iv}^-, SH_{dt}, AP_{it}, AR_{it}, BR_{at}, ASS_{at}^+, EWI_{it}, \\ MAX_{at} \geq 0 \quad (38)$$

محدودیت‌های (۳۷) و (۳۸) برای تعیین حدود متغیرها در نظر گرفته شده است. لازم به ذکر است با توجه به مقاله میلتنبرگ (۲۰۰۱) پیچیدگی مدل‌های خطی برنامه‌ریزی نیازمندی‌های مواد NP-Hard است.

نتایج محاسباتی برای یک مطالعه موردی

در این قسمت مدل ارائه شده برای برنامه‌ریزی نیازمندی‌های مواد در تولید بتن آماده مطرح می‌شود. مواد موردنیاز برای تولید بتن عبارت است از: سیمان، درشت‌دانه (شن)، ریزدانه (ماسه) و آب. عیار

بتن‌های تولیدی توسط میزان سیمان به کار رفته در تولید هر واحد (یک متر مکعب) بتن مشخص می‌شود، برای مثال در تولید بتن با عیار ۳۵۰، میزان سیمان به کار رفته در هر متر مکعب آن ۳۵۰ کیلوگرم بر متر مکعب خواهد بود. وزن بتن‌های عیار ۳۵۰ معمولاً بین ۲۲۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب و ۲۴۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب است. سیمان مورد استفاده در تولید بتن که به سیمان پرتلند شناخته می‌شود شامل: آهک، سیلیس، آلومین، اکسید آهن و اکسید منیزیم است. به‌طور کلی کیفیت بتن‌های تولیدی وابسته به میزان درشت‌دانه، ریزدانه و نحوه اختلاط مواد تشکیل دهنده آن است و هر چه میزان ریزدانه‌های آن نسبت به درشت‌دانه‌هایش بیشتر باشد می‌توان بتن‌های مقاوم‌تری تولید کرد. صورت مواد برای محصول مورد مطالعه در جداول ۱ و ۲ نوشته شده است.

در شرکت تولیدی مورد مطالعه بتن آماده با عیار ۳۵۰ به صورت عمده تولید می‌شود. ظرفیت تولید در این واحد صنعتی به صورت میانگین ۳۰۰۰ واحد (به صورت پیش فرض هر متر مکعب بتن یک واحد محصول در نظر گرفته می‌شود) در هفته است. ما در این مطالعه برنامه‌ریزی نیازمندی‌های مواد در شرکت مورد مطالعه را برای ۸ هفته کاری اجرا می‌کنیم. در ابتدای دوره تولید فرض می‌شود که موجودی انبار خالی است و طول افق برنامه‌ریزی ۱۲ هفته در نظر گرفته می‌شود تا فرصت تولید بتن در دوره‌های ماقبل (۴ هفته) دوره تولید وجود داشته باشد. اهمیت و اولویت ضرایب به کار رفته در تابع هدف مسأله با توجه به نظر واحد فروش در شرکت مورد مطالعه و با بررسی سوابق ثبت شده در آن شرکت تخمین زده شده‌اند. همچنین هزینه‌های تولید و موجودی به کار رفته در این مطالعه بر اساس نظراتی است که از واحد فروش این شرکت جمع‌آوری شده است. با توجه به اهمیت کمبود در جلوگیری از مواجهه مشتریان با کمبود، هزینه‌های کمبود به صورت فروش از دست رفته و پس‌افت در اولویت اول هستند. هزینه‌های موجودی نهایی و موجودی‌های در جریان ساخت که هزینه‌های زیادی به سیستم تولیدی تحمیل خواهند کرد در اولویت دوم هستند. هزینه راه‌اندازی نیز مورد توجه است ولی نسبت به سایر هزینه‌ها در اولویت پایین‌تری قرار دارد چون با هر بار راه‌اندازی می‌توان تعداد واحدهای زیادی از محصول تولید کرد. هزینه‌های تغییر هر واحد در زمان پیشبرد در اولویت آخر است. اطلاعات هزینه‌ای شرکت مورد مطالعه در جدول ۳ نوشته شده است.

جدول ۱- صورت مواد و حداکثر و حداقل زمان پیشبرد برای ساخت بتن با عیار ۳۵۰

$Malt_i$	$Milt_i$	درصد استفاده در هر واحد بتن	میزان استفاده در هر واحد بتن	ماده	سطح BOM
۲	۱	-	۲۴۰۰ Kg/m ³	بتن	۱
۳	۲	۰,۱۴۶	۳۵۰ Kg/m ³	سیمان	۲
۳	۱	۰,۳۱	۷۵۰ Kg/m ³	شن	۲
۳	۱	۰,۴۷	۱۱۲۵ Kg/m ³	ماسه	۲
۱	۱	۰,۰۷۴	۱۷۵ Kg/m ³	آب	۲

جدول ۲- صورت مواد و حداکثر و حداقل زمان پیشبرد برای ساخت سیمان پرتلند

$Malt_i$	$Milt_i$	درصد استفاده در هر واحد سیمان	میزان استفاده در هر واحد سیمان	ماده	سطح BOM
۳	۲	-	۳۵۰ Kg/m ³	سیمان	۲
۲	۱	۰,۶۳	۲۲۰ Kg/m ³	آهک	۳
۳	۱	۰,۲۰	۷۰ Kg/m ³	سیلیس	۳
۲	۱	۰,۰۶	۲۱ Kg/m ³	آلومین	۳
۳	۱	۰,۰۳	۱۰,۵ Kg/m ³	اکسید آهن	۳
۳	۱	۰,۰۱۵	۵ Kg/m ³	اکسید منیزیم	۳

در بتن و سیمان تولیدی محدودیت‌های ظرفیتی وجود دارد و بقیه اجزای محصول دارای محدودیت نمی‌باشند. $MQAR_{at}$ برای بتن ۳۰٪ و برای سیمان ۲۰٪ در نظر گرفته شده است. مقدار پارامتر FP_i برای همه‌ی مواد برابر ۱ است. در تولید بتن میزان ضایعات و تولیدات معیوب زیر ۵٪ است. مسائل مورد بحث در این پژوهش توسط حل کننده سی‌پلکس^۱ و در نرم افزار بهینه‌سازی گمز^۲ حل شده است که نحوه حل مسأله و هزینه‌های بدست آمده برای درصد ضایعات

1. CPLEX
2. GAMS

مختلف در جدول (۴) نوشته شده است. هزینه‌های موجودی در این مسأله شامل هزینه نگهداری موجودی کالای نهایی و نگهداری موجودی در جریان ساخت است. همانطور که مشخص است، با افزایش میزان ضایعات هزینه فروش ازدست‌رفته نیز افزایش می‌یابد، ولی با توجه به اینکه درصد کمی (۱۰٪) از تقاضای مشتریان به صورت فروش ازدست‌رفته است، لذا این هزینه نسبت به هزینه کمبود پس‌افت سهم کمتری از هزینه کل سیستم را شامل می‌شود. همچنین محدوده امکان‌پذیری کمبود برای هزینه سفارشات عقب‌افتاده هر قطعه/ماده (BO_d) و هزینه موجودی ازدست‌رفته هر قطعه/ماده (LS_d) به ترتیب ۹۰۰۰۰ و ۸۳۰۰۰۰ است و اگر هر یک از این دو پارامتر بیشتر از این مقادیر باشند آنگاه مقدار کمبود تقریباً برابر صفر خواهد بود.

جدول ۳- هزینه‌های تولید و موجودی

نوع هزینه	میزان هزینه برای هر واحد محصول
فروش ازدست‌رفته	۷۰۰۰۰ تومان
کمبود پس‌افت	۵۰۰۰۰ تومان
نگهداری موجودی	۳۵۰۰۰ تومان
موجودی در جریان ساخت	۳۵۰۰۰ تومان
هزینه راه‌اندازی	۲۰۰۰۰ تومان
تغییر هر واحد زمان پیشبرد	۱۰۰۰۰ تومان

در مجموع اختلاف هزینه کمبود، که شامل کمبود پس‌افت و فروش ازدست‌رفته است، بین بیشترین و کمترین میزان ضایعات در سیستم تولیدی مورد مطالعه، حدود ۸ میلیون تومان است که هزینه نسبتاً قابل توجهی است، پس برای جلوگیری از تحمیل هزینه کمبود بیشتر به سیستم تولیدی باید تعداد کالای معیوب تولیدی را کاهش داد. هزینه نگهداری هم همانند هزینه کمبود با افزایش میزان ضایعات و تولیدات معیوب سیر صعودی داشته و افزایش می‌یابد. با توجه به نتایج جدول ۴، اختلاف

هزینه نگهداری بین بیشترین و کمترین میزان ضایعات در سیستم تولیدی مورد مطالعه، حدود ۱۲ میلیون تومان است. هزینه تغییر زمان پیشبرد هم با افزایش میزان ضایعات تغییر خواهد یافت، ولی چون این هزینه نسبت به هزینه کل سیستم مقدار ناچیزی است، تغییرات آن با افزایش درصد ضایعات، متفاوت است. با توجه به نتایج، هزینه کل با افزایش میزان ضایعات از ۱٪ به ۵٪ حدود ۱۲ میلیون تومان افزایش خواهد یافت که این مقدار نسبت به هزینه کل سیستم تولیدی مورد مطالعه مقدار قابل ملاحظه‌ای است. همچنین زمان‌های پیشبرد بدست آمده برای تولید بتن در شرکت مورد مطالعه در جدول ۵ ثبت شده است. با توجه به نتایج بدست آمده از جدول ۵ ملاحظه می‌شود که زمان‌های پیشبرد برای اجزای مختلف محصول مورد مطالعه متغیر است و زمان‌های پیشبرد در مقاطع مختلف زمانی تغییر کرده‌اند و این تغییر انعطاف‌پذیری تولید را افزایش می‌دهد. برنامه سفارش‌دهی اقلام در جدول ۶ ثبت شده است که با ضرب اعداد جدول ۶ در وزن هر یک از مواد میزان سفارش‌دهی برای هر جزء به کیلوگرم بدست خواهد آمد.

جدول ۴- هزینه‌های موجودی با در نظر گرفتن درصد ضایعات مختلف

حالت	۱٪ ضایعات	۱,۵٪ ضایعات	۲٪ ضایعات
کمبود پس‌افت	۱۸۷۱۲۸۷	۲۷۹۳۱۰۳	۳۷۰۵۸۸۲
کمبود ازدست‌رفته	۱۴۸۵۱۴	۲۲۱۶۷۴	۲۹۴۱۱۷
موجودی	۱۴۰۱۶۲۱۰	۱۵۴۸۰۴۳۰	۱۷۰۸۹۳۰۰
راه‌اندازی	۱۳۴۰۰۰۰	۱۳۴۰۰۰۰	۱۳۴۰۰۰۰
تغییر زمان پیشبرد	۲۲۰۰۰۰	۲۴۰۰۰۰	۲۰۰۰۰۰
کل	۱۷۵۹۶۰۱۳	۲۰۰۷۵۲۰۵	۲۲۶۱۱۳۵۵
حالت	۲,۵٪ ضایعات	۳٪ ضایعات	۳,۵٪ ضایعات
کمبود پس‌افت	۴۶۰۹۷۵۶	۵۵۰۴۸۵۴	۶۳۹۱۳۰۴
کمبود ازدست‌رفته	۳۶۵۸۵۳	۴۳۶۸۹۳	۵۰۷۲۴۶
موجودی	۱۸۰۱۷۷۷۰	۱۹۷۰۹۳۵۰	۲۰۸۸۹۲۵۰
راه‌اندازی	۱۳۴۰۰۰۰	۱۳۴۰۰۰۰	۱۳۴۰۰۰۰
تغییر زمان پیشبرد	۲۸۰۰۰۰	۲۷۰۰۰۰	۳۴۰۰۰۰
کل	۲۴۶۱۳۳۸۳	۲۷۲۶۰۰۹۸	۲۹۴۶۷۷۹۶

حالت	% ضایعات	% ۴,۵ ضایعات	% ۵ ضایعات
کمبود پس‌افت	۷۲۶۹۲۳۰	۸۱۳۸۷۵۵	۹۰۰۰۰۰۰
کمبود ازدست‌رفته	۵۷۶۹۲۳	۶۴۵۹۳۳	۷۱۴۲۸۵
موجودی	۲۲۴۱۲۹۷۰	۲۴۱۷۳۳۶۰	۲۵۹۲۳۱۳۰
راه‌اندازی	۱۳۴۰۰۰۰	۱۳۴۰۰۰۰	۱۳۴۰۰۰۰
تغییر زمان پیشبرد	۳۲۰۰۰۰	۲۴۰۰۰۰	۲۴۰۰۰۰
کل	۳۱۹۱۹۱۱۹	۳۴۵۳۸۰۵۲	۳۷۲۲۶۴۱۴

حد پایین

در اغلب سیستم‌های موجودی، هزینه‌های نگهداری و کمبود سهم بسیار زیادی از هزینه کل را به خود اختصاص می‌دهند و سایر هزینه‌ها نقش کم‌رنگ‌تری داشته و نسبت به هزینه‌های نگهداری و کمبود درصد کمتری از هزینه‌های سیستم را شامل می‌شوند. پس با تعیین محدوده‌ی هزینه‌های نگهداری و کمبود می‌توان محدوده‌ی هزینه کل مدل ارائه‌شده را با تقریب خوبی تعیین کرد. در این مقاله برای هر یک از هزینه‌های نگهداری و کمبود روابطی معرفی شده‌است تا بتوان حد پایین مدل را بدست آورد و عملکرد هر یک از روابط با استفاده از شاخص RPD سنجیده شده‌است. مقدار RPD از رابطه (۳۹) محاسبه می‌گردد Z^* مقدار بهینه تابع هدف است).

$$RPD = \frac{Z^* - LB}{Z^*} \times 100 \quad (39)$$

جدول ۵- تعیین زمان‌های پیشبرد برای تولید بتن با عیار ۳۵۰

ماده	BOM سطح	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲
بتن آماده	۱						۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲
شن	۲				۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱		
ماسه	۲				۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱		
سیمان	۲				۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲		
آب	۲				۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱		
آهک	۳		۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱				
سیلیس	۳		۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱				
آلومین	۳		۱	۲	۲	۲	۲	۲	۲				
ماده	BOM سطح	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲
اکسید آهن	۳		۱	۱	۳	۲	۲	۲	۲				
اکسید منیزیم	۳		۱	۲	۲	۲	۱	۳	۲				

جدول ۶- برنامه سفارش‌دهی اقلام برای تولید بتن با عیار ۳۵۰ (۲٪ ضایعات)

ماده	سطح BOM	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲
بتن آماده	۱						۳۰۰۰	۴۰۰۰	۳۰۰۰	۴۱۰۰	۲۷۰۰	۳۵۰۰	۴۲۰۰
شن	۲			۹۴۸	۱۲۶۴	۹۴۸	۱۲۹۶	۸۵۳	۱۱۰۶	۱۳۲۸			
ماسه	۲			۱۴۳۸	۱۹۱۷	۱۴۳۸	۱۹۶۵	۱۲۹۴	۱۶۷۷	۲۰۱۳			
سیمان	۲		۴۴۶	۵۹۵	۴۴۶	۶۱۰	۴۰۲	۵۲۱	۶۲۵				
آب	۲			۲۲۶	۳۰۱	۲۲۶	۳۰۹	۲۰۳	۲۶۴	۳۱۷			
آهک	۳	۲۸۱	۳۷۵	۲۸۱	۳۸۴	۲۵۳	۳۲۸	۳۸۸					
سیلیس	۳	۸۹	۱۱۹	۸۹	۱۲۲	۸۰	۱۰۴	۱۲۳					
آلومین	۳	۶۳	۲۷	۳۷	۲۴	۳۱	۳۸						
اکسید آهن	۳	۲۷	۱۸	۱۸	۱۲	۱۶	۱۹						
اکسید منیزیم	۳	۱۶	۷	۹	۸	۶	۱۰						

برای این که حد پایین ارائه‌شده، جواب‌های مناسب و قابل قبولی برای سیستم برنامه‌ریزی احتیاجات مواد تولید کند، می‌بایست دارای شرایطی باشد. (۱) اولین دوره‌ی تقاضا در سیستم برنامه‌ریزی احتیاجات مواد به صورت نرمال باشد. به صورتی که باید اولین دوره‌ی تقاضا بزرگتر یا مساوی مجموع حداقل زمان‌های پیشبرد اجزاء باشد تا فرصت کافی برای تولید وجود داشته باشد ($\sum_i Milt_i \geq$ اولین دوره تقاضا). (۲) هزینه‌های کمبود و نگهداری موجودی بزرگتر از سایر هزینه‌ها بوده و نقش پر رنگ‌تری داشته‌باشند.

حد پایین هزینه نگهداری

در این مقاله برای تعیین حد پایین مجموع هزینه‌های نگهداری کالا و موجودی در جریان ساخت، رابطه (۴۰) ارائه شده است. در این رابطه متوسطی از هزینه نگهداری و موجودی در جریان ساخت همچنین ضریبی (λ) از متوسط تقاضا، برای تعیین حد پایین به کار گرفته شده است.

$$LB_{hc} = \frac{H + HW}{2} \times \lambda_1 \times \frac{\sum D}{n} \quad (40)$$

در سیستم‌های برنامه‌ریزی احتیاجات مواد، در هر دوره درصد کمی از تقاضا نگهداری می‌شود و درصد بسیار زیادی از تقاضا برای به حداقل رساندن هزینه‌ها تحویل مشتریان می‌شود. ما برای برآورد درصدی از متوسط تقاضای مشتریان که در سیستم نگهداری می‌شود، ضریب تعدیلی $[\lambda_1 = 0.09 + 2\beta]$ که وابسته به درصد ضایعات فرآیند تولید بوده و با حل مثال-های مختلف به دست آمده است، معرفی کرده‌ایم. مقادیر بدست آمده از حد پایین و مقدار بهینه تابع هدف مجموع هزینه نگهداری برای درصد ضایعات مختلف در جدول ۷ به ثبت رسیده است. با توجه این جدول، حد پایین عملکرد خوبی داشته و با افزایش درصد ضایعات نیز اختلاف محسوسی با مقدار بهینه هزینه نگهداری ایجاد نمی‌کند.

جدول ۷- حد پایین برای هزینه‌های نگهداری

درصد ضایعات	مقدار بهینه	LB_{hc}	RPD
٪۱	۱۴۰۱۶۲۱۰	۱۳۴۷۵۰۰۰	۰,۰۴
٪۲	۱۷۰۸۹۳۰۰	۱۵۹۲۵۰۰۰	۰,۰۷
٪۳	۱۹۷۰۹۳۵۰	۱۸۳۷۵۰۰۰	۰,۰۷
٪۴	۲۲۴۱۲۹۷۰	۲۰۸۲۵۰۰۰	۰,۰۷
٪۵	۲۵۹۲۳۱۳۰	۲۳۲۷۵۰۰۰	۰,۱

حد پایین هزینه کمبود

برای تعیین حد پایین مجموع هزینه‌های کمبود پس‌افت و فروش ازدست‌رفته رابطه (۴۱) ارائه شده است.

$$LB_{hc} = \frac{BO + LS}{2} \times \lambda_2 \times \frac{\sum D}{n} \quad (41)$$

ضریب تعدیل برای حد پایین هزینه کمبود $[\lambda_2 = 0.9\beta]$ نیز وابسته به درصد ضایعات فرآیند تولید بوده و با حل مثال‌های مختلف به دست آمده است. مقادیر به دست آمده از حد پایین و مقدار بهینه تابع هدف مجموع هزینه‌های کمبود برای درصد ضایعات مختلف در جدول ۸ به ثبت رسیده است.

جدول (۸): حد پایین برای هزینه کل

درصد ضایعات	مقدار بهینه	LB_{bc}	RPD
٪۱	۲۰۱۹۸۰۱	۱۸۹۰۰۰۰	۰,۰۶
٪۲	۳۹۹۹۹۹۹	۳۷۸۰۰۰۰	۰,۰۵
٪۳	۵۹۴۱۷۴۷	۵۶۷۰۰۰۰	۰,۰۵
٪۴	۷۸۴۶۱۵۳	۷۵۶۰۰۰۰	۰,۰۴
٪۵	۹۷۱۴۲۸۵	۹۴۵۰۰۰۰	۰,۰۳

حد پایین کل

در سیستم‌های تولیدی، بیشتر هزینه‌ها را هزینه‌های نگهداری مواد و کمبود اقلام تشکیل می‌دهند. پس با در نظر گرفتن حد پایین هزینه‌های نگهداری و کمبود می‌توان به خوبی حد پایین تابع هدف مسأله در این مقاله را به دست آورد. حد پایینی که برای تابع هدف ارائه شده است، عبارت است از مجموع حد پایین هزینه نگهداری و حد پایین هزینه کمبود. (رابطه (۴۲))

$$LB_T = LB_{hc} + LB_{bc} \quad (42)$$

مقادیر به دست آمده از حد پایین و مقدار بهینه تابع هدف مجموع کل هزینه‌ها برای درصد ضایعات مختلف در جدول ۹ به ثبت رسیده است. برای تخمین تابع هدف مسأله و مجموع هزینه‌های در نظر گرفته شده، حدود و روابط ارائه شده کارایی خوبی دارند و می‌توانند الگویی مناسبی برای تخمین هزینه‌های مسأله باشند.

جدول ۹- حد پایین برای هزینه کل

درصد ضایعات	مقدار بهینه	LB_T	RPD
٪۱	۱۷۵۹۶۰۱۳	۱۵۳۶۵۰۰۰	۰,۱۳
٪۲	۲۲۶۱۱۳۵۵	۱۹۷۰۵۰۰۰	۰,۱۳
٪۳	۲۷۲۶۰۰۹۸	۲۴۰۴۵۰۰۰	۰,۱۲
٪۴	۳۱۹۱۹۱۱۹	۲۸۳۸۵۰۰۰	۰,۱۱
٪۵	۳۷۲۲۶۴۱۴	۳۲۷۲۵۰۰۰	۰,۱۲

تحلیل و نتایج حل عددی

در این بخش با ارائه و حل مثال‌های مختلف اعتبار مدل ارائه شده در این پژوهش را می‌سنجیم. چون پارامترهای درصد ضایعات و هزینه موجودی از دست رفته هر قطعه/ماده، جزء پارامترهای اصلی در نوآوری این پژوهش است لذا برای اعتبار سنجی مدل ارائه شده، مسائلی را در ابعاد مختلف و با در نظر گرفتن مقادیر مختلف این پارامترها حل نموده‌ایم، بدین منظور مدل مسأله را در حالت‌های ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰ و ۲۵ جزئی و با تولید کردن سه مقدار تصادفی برای پارامتر هزینه موجودی از دست رفته هر قطعه/ماده با توزیع یکنواخت در بازه [۱۰۰۰۰، ۲۰۰۰۰۰ تومان] و سپس رند کردن اعداد به دست آمده به بالا (مقادیر ۳۶۰۰۰، ۶۰۰۰۰ و ۱۵۰۰۰۰ برای پیاده‌سازی در مسائل مورد نظر به دست آمد) و همچنین سه حالت ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد ضایعات، حل کرده و نتایج آن را در قالب هزینه‌های عمده مدل که شامل هزینه کل (تابع هدف)، موجودی و کمبود است را در جدول ۱۰ به ثبت رسانده‌ایم

(سایر پارامترها مشابه پارامترها و فرضیات شرکت مورد مطالعه در بخش ۴ بوده و برای تمامی مسائل ثابت فرض شده است).

جدول ۱۰- نتایج حل مدل در حالت‌های مختلف

تعداد اقلام	درصد ضایعات											
	۰,۱			۰,۲			۰,۳					
	هزینه فروش از دست رفته	تابع هدف (میلیون)	هزینه موجودی (میلیون)	هزینه کمبود (میلیون)	هزینه فروش از دست رفته	تابع هدف (میلیون)	هزینه موجودی (میلیون)	هزینه کمبود (میلیون)	هزینه فروش از دست رفته	تابع هدف (میلیون)	هزینه موجودی (میلیون)	هزینه کمبود (میلیون)
	۳۶۰۰۰	۱۳۱,۸	۲۹,۱	۱۰۲	۳۶۰۰۰	۱۸۲,۴	۳۴,۴	۱۴۷,۲	۳۶۰۰۰	۲۲۵,۳	۳۹,۷	۱۸۴,۶
۵	۶۰۰۰۰	۲۵۷,۱	۲۹,۱	۲۳,۴	۶۰۰۰۰	۳۳۱,۹	۳۴,۴	۳۰۳,۳	۶۰۰۰۰	۳۸۹,۴	۳۹,۷	۳۵۵,۲
	۱۵۰۰۰۰	۶۷۸,۵	۲۹,۱	۶۵۵,۴	۱۵۰۰۰۰	۸۲۷,۷	۳۴,۴	۷۹۹	۱۵۰۰۰۰	۹۴۴,۷	۳۹,۷	۹۱۰,۳
	۳۶۰۰۰	۲۹۵,۵	۴۹,۵	۲۴۵	۳۶۰۰۰	۳۶۷,۶	۶۲,۴	۳۰۴	۳۶۰۰۰	۴۳۱,۱	۷۵,۳	۳۵۵
۱۰	۶۰۰۰۰	۴۵۶,۹	۴۹,۵	۴۰۶	۶۰۰۰۰	۵۶۷,۹	۶۲,۴	۵۰۴	۶۰۰۰۰	۶۶۴,۶	۷۵,۳	۵۸۸
	۱۵۰۰۰۰	۱۰۶۲	۴۹,۵	۱۰۱۱	۱۵۰۰۰۰	۱۳۱۸,۹	۶۲,۴	۱۲۵۵	۱۵۰۰۰۰	۱۵۴۰	۷۵,۳	۱۴۶۴
	۳۶۰۰۰	۵۰۶,۱	۷۳	۴۳۲	۳۶۰۰۰	۶۱۸,۸	۹۱	۵۲۶,۴	۳۶۰۰۰	۷۱۷,۱	۱۰۹	۶۰۶,۳
۱۵	۶۰۰۰۰	۷۶۴	۷۳	۶۸۹,۲	۶۰۰۰۰	۹۰۷,۲	۹۱	۸۱۴	۶۰۰۰۰	۱۰۳۲,۹	۱۰۹	۹۲۱,۲
	۱۵۰۰۰۰	۱۸۲۶,۴	۷۳	۱۷۵۲	۱۵۰۰۰۰	۲۱۳۰,۴	۹۱	۲۰۳۷,۵	۱۵۰۰۰۰	۲۴۰۵,۵	۱۰۹	۲۲۹۴
	۳۶۰۰۰	۱۰۳۰	۱۴۸	۸۱	۳۶۰۰۰	۱۱۴۸	۱۷۹	۹۶۷,۶	۳۶۰۰۰	۱۲۵۷	۲۱۰	۱۰۴۵,۱
۲۰	۶۰۰۰۰	۱۳۴۰,۱	۱۴۸	۱۱۹۰	۶۰۰۰۰	۱۵۱۷,۴	۱۷۹	۱۳۳۵,۸	۶۰۰۰۰	۱۶۶۷,۴	۲۱۰	۱۴۵۴,۲
	۱۵۰۰۰۰	۳۱۸۲,۶	۱۴۸	۳۰۳۲,۶	۱۵۰۰۰۰	۳۶۶۵,۲	۱۷۹	۳۴۸۳,۶	۱۵۰۰۰۰	۴۱۱۷	۲۱۰	۳۹۰۳,۷
	۳۶۰۰۰	۱۶۷۵,۲	۲۲۴,۳	۱۴۵۰	۳۶۰۰۰	۱۸۲۲,۲	۲۶۷,۳	۱۵۵۳,۵	۳۶۰۰۰	۱۹۶۰,۴	۳۱۰,۳	۱۶۴۸,۱
۲۵	۶۰۰۰۰	۱۹۶۶,۳	۲۲۴,۳	۱۷۴۰	۶۰۰۰۰	۲۱۷۹,۳	۲۶۷,۳	۱۹۰۹,۴	۶۰۰۰۰	۲۳۷۱,۳	۳۱۰,۳	۲۰۵۷,۷
	۱۵۰۰۰۰	۴۹۶۳,۱	۲۲۴,۳	۴۷۳۶,۲	۱۵۰۰۰۰	۵۵۳۲,۴	۲۶۷,۳	۵۲۶۱,۸	۱۵۰۰۰۰	۶۰۶۳,۱	۳۱۰,۳	۵۷۴۸,۷

همانطور که از نتایج جدول ۱۰ پیداست و مطابق انتظارات، هزینه‌های کل و کمبود در مسائل مختلف به تعداد اجزاء، هزینه فروش از دست رفته و درصد ضایعات حساسیت داشته و با افزایش مقادیر این پارامترها، افزایش می‌یابد و این موضوع صحت مدل ارائه شده را تأیید

می‌کند. همچنین هزینه موجودی با افزایش تعداد اجزاء و درصد ضایعات افزایش می‌یابد ولی این هزینه با افزایش پارامتر هزینه فروش از دست رفته تغییری نمی‌کند و دلیل این موضوع عدم تأثیر این پارامتر در متغیرهای تأثیرگذار در مقدار موجودی اقلام در مدل‌سازی و دلیلی بر صحت مدل ارائه شده است. با توجه به این نکته که اهمیت عدم مواجهه‌ی با کمبود در مدل مسأله بیشتر از نگهداری موجودی فرض شده است (پارامترهای در نظر گرفته شده در بخش ۴) لذا مقدار هزینه‌های کمبود سهم بیشتری در مقدار هزینه کل نسبت به هزینه موجودی در مسائل مختلف دارند. برای درک بهتر روند تغییرات هزینه‌های کل، کمبود و موجودی ارائه شده در جدول ۱۰، شکل‌های ۱ تا ۳ ترسیم شده است.

پیشنهادات مدیریتی

با بررسی سیستم تولیدی شرکت مورد مطالعه و نتایج به دست آمده از پیاده‌سازی مدل برنامه‌ریزی نیازمندی‌های مواد در آن شرکت می‌توان پیشنهادات زیر را ارائه کرد.

پیشنهاد اول

با توجه به هزینه‌های بالای مواجهه سیستم تولیدی با هر واحد کمبود و اهمیت تأمین تقاضای مشتریان در موعد مقرر، باید به کیفیت محصولات تولیدی و بالابردن کارایی ماشین‌آلات توجه ویژه‌ای شود. در این مقاله با توجه به هزینه‌های بدست آمده، با بالابردن کیفیت بتن تولیدی می‌توان حدود ۱۲ میلیون تومان در هزینه‌های تولیدی و موجودی صرفه جویی کرد.

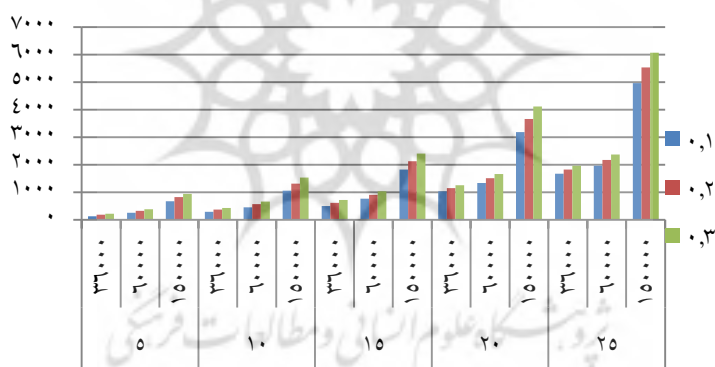
پیشنهاد دوم

با توجه به زمان‌های پیشبرد به دست آمده این گونه می‌توان نتیجه گرفت که در تولید بتن، سیمان گلوگاه است و با توجه به وجود درصدی از ضایعات در تولید سیمان، برای کاهش هزینه‌های کمبود می‌توان از موجودی بافر^۱ استفاده کرد.

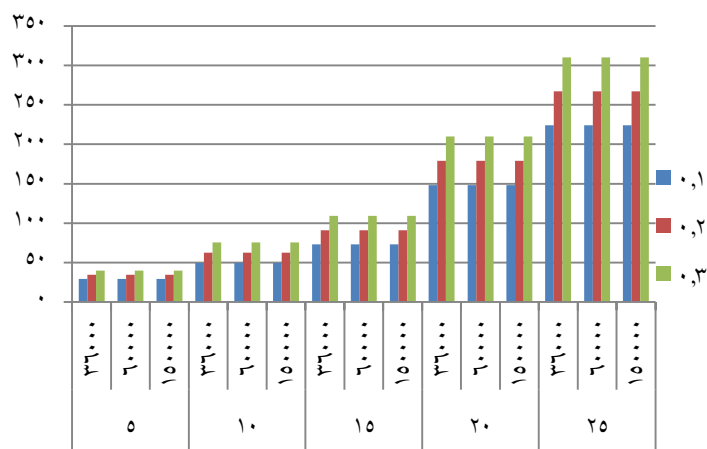
1. Buffer

پیشنهاد سوم

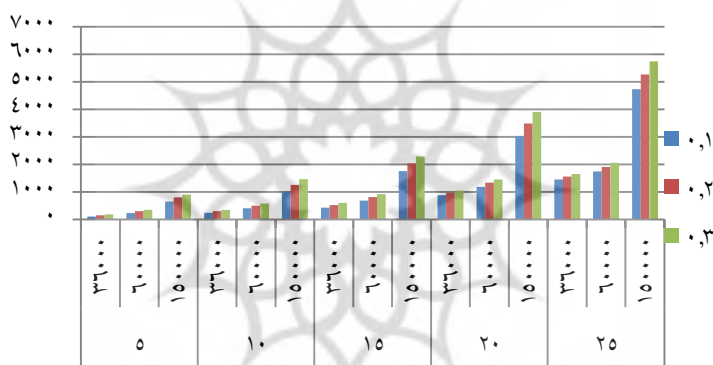
در سفارش‌دهی مواد/قطعات نکته حائز اهمیت توجه ویژه به هزینه‌های با اهمیت بیشتر است (معمولاً هزینه‌های نگهداری و کمبود سهم بیشتری از هزینه‌های کل را شامل می‌شوند). برای مثال در تولید بتن، شن و ماسه درصد بالایی از حجم محصول را شامل می‌شوند (برای تولید هر متر مکعب بتن، ۱۱۲۵ کیلوگرم ماسه و ۷۵۰ کیلوگرم شن مورد نیاز است). و هیچ‌کدام گلوگاه نیستند پس برای کاهش هزینه‌های موجودی می‌بایست زمان سفارش‌دهی این مواد را به زمان تولید نزدیک کرد. و از طرف دیگر سیمان حجم نسبتاً کمی از محصول را شامل می‌شود و هزینه نگهداری آن کمتر از شن و ماسه است ولی گلوگاه است و در صورت کمبود سیمان درصد زیادی از تقاضا با کمبود مواجه خواهد شد پس بهتر است برای کاهش هزینه‌های کمبود، فرجه‌ی بیشتری برای سفارش‌دهی سیمان در نظر گرفت و زمان سفارش‌دهی آن را از زمان تولید بتن تا حد قابل قبولی که هزینه‌ی نگهداری و کمبود متعادل گردند، دور کرد.



شکل ۱- مقدار هزینه کل در حالات مختلف مسأله



شکل ۲- مقدار هزینه موجودی در حالات مختلف مسأله



شکل ۳- مقدار هزینه کمبود در حالات مختلف مسأله

نتیجه گیری

در این مقاله یک مدل ریاضی برای تعیین زمان‌های پیشبرد برای سیستم‌های برنامه ریزی نیازمندی‌های مواد ارائه شد و این مدل برای یک شرکت تولیدی بتن آماده به کار گرفته شد. در این مدل میزان ضایعات مورد بحث قرار گرفت و با توجه به متغیر بودن این درصد در دوره‌های تولیدی مختلف و وابستگی آن به حالات مختلف، برای حالت‌های مختلف مورد محاسبه قرار گرفت و اهمیت توجه به کارایی تولید و جلوگیری از تولید کالای معیوب و نامرغوب نشان داده شد با توجه به نتایج، با کاهش میزان ضایعات در شرکت مورد مطالعه می-

توان هزینه‌های تولیدی را حدود ۳۰٪ کاهش داد. همچنین در این مقاله بخشی از تقاضای برآورده نشده مشتریان به صورت تقاضای ازدست‌رفته در مدل اعمال گردید که این مسأله منجر به اهمیت بیشتر برآورده سازی نیاز مشتریان در موعد مقرر گردید. این مقاله رویکرد سنتی حاکم در سیستم‌های برنامه‌ریزی نیازمندی‌های مواد که مقادیر زمان‌های پیشبرد، به صورت ثابت در نظر گرفته می‌شد و انعطاف‌پذیری سیستم‌های تولیدی را کاهش و هزینه‌های بیشتری را به آن سیستم‌ها تحمیل می‌کرد را تغییر داده و مدل با کارایی بیشتری ارائه شد. همچنین برای تخمین میزان هزینه‌های مدل مطرح شده، حد پایینی ارائه شد و با توجه به نتایج از عملکرد خوبی برخوردار بود. تحقیقات پیشنهادی آتی می‌تواند ارائه مدل‌هایی برنامه ریزی احتیاجات مواد مشابه در سیستم‌های تولیدی پیوسته با فرضیات جدید باشد. همچنین فرضیاتی همچون احتمالی بودن زمان‌های پیشبرد یا در نظر گرفتن منطق فازی در مدل ارائه شده می‌تواند به جامعیت مدل مطرح شده کمک کند.

منابع

Altendorfer, K & Minner, S., (2011" .(Simultaneous optimization of capacity and planned lead time in a two stage production system with different customer due dates ." *European Journal of Operational Research*. ۱۳۴۱۴۶, ۲۱۳ .

Billington, P., McClain, J & Thomas, L.J., (1983" .(Mathematical Programming Approaches to Capacity-Constrained MRP Systems: Review, Formulation, and Problem Reduction ." *Management Science*, 29. 11۴1-11۲۶,

Borodin, V., Hnaien, F & Dolgui, A" .andom lead times in replenishment planning for single-level assembly systems: The value of information ." *IFAC PapersOnLine 50-1 (2017) 1205-1210*.

Dolgui, A & Ould-Louly, M.-A., (2002" .(A Model for Supply Planning under Lead Time Uncertainty ." *International Journal of Production Economics*, 78, 145-152.

Dolgui, A., Ben Ammar, O., Hnaien, F & Louly M.A.O., (2013" .(A State of the Art on Supply Planning and Inventory Control under Lead Time Uncertainty ." *Studies in Informatics and Control*, 22, 255-268.

George Ioannou & Stavrianna Dimitriou., (2012" .(Lead time estimation in MRP/ERP for make-to-order manufacturing systems ." *International Journal of Production Economics*, 139, 551-563 .

Haeussler, S & Schneckenreither, M, (2019" .(Adaptive Order Release Planning with Dynamic Lead Times ." *IFAC PapersOnLine 52-13*. ۱۸۹۵-۱۸۹۰ (۲۰۱۹)

Hencha, R & Verma, D" .Study Of Material Requirement Planning Processes & Its Analysis And Implementation (A Case Study Of

Automobile Industry ." *International Journal of Scientific & Technology Research*. Corpus ID: 203119427 .

Kanet, J., (1986" .(Toward a Better Understanding of Lead Times in MRP Systems ." *Journal of Operations Management*, 6, 305-313.

Klaus Altendorfer,.(2015".(Influence of lot size and planned lead time on service level and inventory for a single-stage production system with advance demand information and random required lead times ." *International Journal of Production Economics*, 47,499-230.

Manuel Díaz-Madroñero. Josefa Mula & Mariano Jiménez. (2015 .("Material Requirement Planning under Fuzzy Lead Times *IFAC-PapersOnLine*, 48-3-242–247.

Milne, R. J., Mahapatra, S., Wang, C. T., (2015). Optimizing planned lead times For Enhancing Performance of MRP Systems ., *International Journal of Production Economics*. 167–220–231.

Miltenburg, J, (2001). Computational complexity of algorithms for MRP and JIT production planning problems in enterprise resource planning systems ,*Production Planning & Control: The Management of Operations*, 12:2.۲۰۹–۱۹۸ ,

Orlicky, J. A., (1975" .(*Material Requirements Planning* \",st edition. McGraw-Hill: New York.

Ould-Louly, M.A & Dolgui, A., (2004" .(The MPS parameterization under lead-time Uncertainty." *International Journal of Production Economics*.90, 369–376 .

Plossl, G & Orlicky's (1994" .(*Material Requirements Planning* \",nd edition. Mc Graw-Hill :New York.

Pooya, M & Pakdaman, M, (2017" .(Optimal control model for infinite capacity continuous MRP with deteriorating items ." *Journal of Intelligent Manufacturing*, 10845-017-1383-6.

Ptak, C. , Smith, C & Orlicky's (2011" .(*Material Requirements Planning* ,rd edition.Mc Graw-Hill: New York.

Spitter, J. M., de Kok, A. G & Dellaert, N.P., (2003" .(*Cost implications of planned lead times in supply chain operations planning* ." working paper.

Teo C-C., Bhatnagar R & Graves, S.C., (2011" .(Setting planned lead times for a make-to-order production system with master schedule smoothing ." *IIE Transactions*, 43,399-414.

Thanh-Ha Nguyen & Mike Wright., (2015" .(Capacity and lead-time management when demand for service is seasonal and lead-time sensitive ." *European Journal of Operational Research* 247,588-595.

Watcharapan Sukkerd & Teeradej Wutti pornpun.,(2016" .(Hybrid genetic algorithm and tabu search for finite capacity material requirement planning system in flexible flow shop with assembly operations .," *Computers & Industrial Engineering* 97 – 157-169.