مهندسی صنایع و مدیریت شریف، (تابستان ۱۳۹۹)
دوره‌ی ۱-۳۶، شماره‌ی ۱/۲، ص. ۵۱-۶۰

Original Article

امکان‌سنجی بهینه‌سازی چیدمان در انبار با استفاده از الگوریتم طبیعی گسترش تنش و روش محاسباتی اجزای محدود

کوروش طباطبایی شکرآبی * **(دانشجوی دکتری)**
گروه مهندسی صنایع، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم تحقیقات
امید فتاحی ولیلایی (دانشیار)
دانشکده‌ی مهندسی صنایع، دانشگاه صنعتی شریف
علی عابدیان (دانشیار)
دانشکده‌ی مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی شریف

با توجه به لزوم تغییرات بنیادی در صنایع در انقلاب صنعتی چهارم و به دنبال لزوم تحول مجموعه‌های صنعتی به منظور انطباق با الزاماتی مانند توسعه‌ی پایدار، چابکی و انعطاف پذیری، تحولی بنیادین در بسیاری از مفاهیم و روش‌های سنتی سیستم‌های تولید مطرح شده است. بنابر مقتضیات جدید برای توانمندی پاسخگویی به انتظارات آینده، در این مقاله تعریف جدیدی از روش چیدمان و ذخیره‌سازی کالا در انبارهای مکانیزه با ایده‌پردازی از الگوریتم‌های مورد استفاده در زمینه‌ی مهندسی مکانیک ارائه شده است. در این تحقیق امکان بهینه‌سازی چیدمان کالا در انبار با توجه به عدم کارایی الگوریتم‌های سنتی بررسی شده و سپس با استفاده از تعاریف الگوی گسترش تنش، روش محاسباتی اجزای محدود و نظریه‌ی کمینه‌ی انرژی پتانسیل الگوریتم جدیدی طراحی و ارائه شده است. کارایی این الگوریتم و مقایسه‌ی برتری‌های آن با الگوریتم سنتی بررسی و تحلیل شده است. همچنین، نتایج برای نشان دادن مزیت‌های الگوریتم جدید در مقایسه با الگوریتم‌های سنتی با توجه به الزامات الگوی نسل چهارم صنایع و مباحثی چون چابکی، پایداری و انرژی مورد بحث قرار گرفته است.

واژگان کلیدی: انبار مکانیزه، چیدمان، تنش، تحلیل اجزای محدود، نظریه‌ی کمینه‌ی انرژی پتانسیل، انقلاب صنعتی چهارم.

Kourosh.tabatabaei@srbiau.ac.ir
fvalilai@sharif.edu
abedian@sharif.edu

۱. مقدمه

با رشد صنایع درکشورهای مختلف اروپایی و آمریکا پس از انقلاب صنعتی و رقابت در بازار تولید، نیاز به خودکارکردن صنایع بزرگ تولیدی هر چه بیشتر احساس شد. سیستم‌هایی که باعث صرفه‌جویی در استفاده از نیروی انسانی و فضای مورد نیاز برای تولید و انبار شوند، به این ترتیب، با بالا رفتن کارایی و سرعت در امر تولید به لحاظ اقتصادی هم سود ناخالص قابل‌توجهی نصیب آنها می‌شود.

دلیل اصلی استفاده‌ی بسیار زیاد از ماشین‌ها و ابزارهای خودکار (اتوماسیون و رباتیک) در فضای بسیاری از کارخانجات این است که سیستم خودکارسازی به گونه‌یی طراحی شده است که شغل‌های تکراری و خطرناک را برای انسان حذف کند و همچنین از نظر هزینه‌یی در قبال ساعت‌ها کارکردن بی وقفه، به‌صرفه باشد. ایجاد سیستم خودکار و رباتیک در صنایع باعث افزایش تولید با کیفیت بالا و کاهش میزان دستمزد شده است؛ در نتیجه سبب افزایش پایداری محصولات در بازار و بالا رفتن میزان رضایت مشتری نیز شده است. اگر مواد اولیه به طور صحیح جابه‌جا نشوند، محصولات با کیفیت و مفید تولید نمی‌شوند.[۱]

۲. تعریف سیستم انبارداری مکانیزه (AS/RS)[۱]

یکی از سیستم‌های کاملاً خودکار و پیشرفته سیستم انبارداری AS/RS است. در سیستم انبارداری AS/RS کالاها یا مواد به صورت خودکار و بدون نیاز به نیروی انسانی در انبار ذخیره و از آن خارج می‌شوند. این سیستم انبارداری پیشرفته به صورت گسترده از دهه‌ی ۱۹۵۰ مورد استفاده قرار گرفته و در سطح وسیعی از صنایع گوناگون از قبیل خودرو، صنایع غذایی، گمرک، کتابخانه‌ها و صنایع نظامی به کار برده شده است. در انبارداری سیستم مکانیزه دریافت مواد و اقلام، نگهداری صحیح و تحویل به موقع آنها به مصرف‌کننده با کمک سیستم‌های مکانیزه و رعایت

* نویسنده مسئول
تاریخ: دریافت ۱۳۹۸/۲/۳۰، اصلاحیه ۱۳۹۸/۸/۱۹، پذیرش ۱۳۹۸/۹/۳.
DOI:10.24200/J65.2019.52982.1976

مقررات و دستورالعمل‌ها به نحوی انجام می‌شود که با اعمال کنترل دقیق از میزان موجود کالا در انبار و مقدار مصرف آن از انباشته شدن بیش از حد موجودی‌های جلوگیری شود.[۲و۳]

فرایندهای اصلی انبار شامل: پذیرش کالا، جاگذاری و جابه‌جایی کالا، انتخاب و گردآوری کالا برای خروج، بسته‌بندی و تحویل کالا و فرایندهای پشتیبانی شامل کنترل کیفیت، خدمات ارزش افزوده، خدمات مشتریان، مدیریت انبار است. یکی از وظایف اساسی انبار آن است که تضمین کند همه‌ی عملیات محدوده‌ی سیستم انبار حتی‌الامکان باصرفه و به صورت مؤثر انجام گیرد. موضوع حفظ سطوح اقتصادی موجودی اقلام انبار و ضمانت حداقل هزینه‌ها از سوی واحد انبار باید برای همه اعضای آن روشن باشد. هدف چیدمان بهینه در انبار، بهینه‌سازی توابع انبارداری، دست‌یابی به بیشینه‌ی کارایی و بهره‌برداری از فضای انبار از طریق تجزیه و تحلیل داده‌ها و پیش‌بینی فعالیت‌ها در هر یک از این داده‌ها با استفاده از سطح متناسبی از خودکارسازی و ماشین‌آلات مرتبط است.[۳]

۳. انواع چیدمان و جانمایی کالا در انبارها

چیدمان به روش‌های متفاوتی که برای چینش (انبارش) و نگهداری اقلام در محوطه‌ی انبارها و راهروهای فضای انبارش به کار می‌روند، اطلاق می‌شود. اصطلاحاً چیدمان در انبارها را می‌توان موقعیت قرارگرفتن کالاها در انبار تعریف کرد. بدیهی است که منظور از پیشنهاد چیدمان برای یک پروژه‌ی خاص، انتخاب مناسب‌ترین راه و ارائه‌ی آن برای کنار هم قرار دادن و به اصطلاح چینش مناسب اقلام درکنار هم است.[۴و۵]

به راحتی می‌توان ادعا کرد که از مفهوم چیدمان به غیر از مقوله‌ی انبار در بسیاری از سازمان‌ها، ادارات، فروشگاه‌ها، پارکینگ‌ها و مکان‌های عمومی، یا حتی سازمان‌های نظامی و ارتش‌ها استفاده می‌شود. شاید بتوان گفت نظامیان اولین نفراتی بودند که از مفهوم چیدمان یا همان آرایش در آموزش‌ها و جنگ‌ها بهره جستند. اما از زمانی که انبارها به مفهوم امروزی در صنایع مختلف شکل گرفتند، همواره چیدمان یکی از مسائل مهم در انبارها بوده است.

در وحله‌ی اول پیدا کردن جای مناسب برای ایجاد فضاهای انبار یا به اصطلاح چینش انبار در سطح سازمان یا جای‌گذاری انبار در سایت مد نظر است و در مرحله‌ی بعدی موقعیت قرارگرفتن هر کالا در انبار به نحوی که به راحتی قابلیت ردیابی داشته باشد و دسترسی به آن آسان باشد، جزء مسائل مهم انبارهاست.

مهارت انتخاب چیدمان بخش مهمی از راهبرد انبار است به نحوی که یک چیدمان خوب و مؤثر در انبار می‌تواند مزیت رقابتی برای سازمان دیده شود. همچنین چیدمان مفید و انعطاف‌پذیر می‌تواند به سازمان برای رسیدن به اهدافش کمک کند. این مهم را می‌توان در شرکت‌های پخش که دارای انبارهای بسیار با موقعیت‌های جغرافیایی متفاوت داخلی و خارجی و شبکه‌های پخش مویرگی و حتی بازارهای خاص خرده‌فروشی هستند، به وضوح حس کرد.

در جایی دیگر می‌توان قابلیت ارتقای سازمان را در انبارهای شرکت‌های تولیدی با داشتن خطوط مونتاژ و بهره‌گیری از چیدمان مؤثر و منعطف مشاهده کرد. شرکت‌های پروژه‌محور به دلیل تفاوت عمده‌یی که در ماهیت کاری مشاهده می‌شود ناچار به استفاده‌ی تلفیقی از روش‌های استاندارد چیدمان در بخش کالا هستند. به همین دلیل است که مدل‌های مختلط یعنی استفاده از انواع چیدمان در سازمان‌های پروژه‌محور انعطاف‌پذیری و پوشش‌های لازم را توسط انبار به بخش‌های اجرایی پروژه می‌دهد. برای چیدمان به شکل عام روش‌های گوناگونی وجود دارد؛ انتخاب و استقرار هر یک از این روش‌ها رابطه‌ی تنگاتنگی با صنعت یا گردش اقلام خواهد داشت. چند نوع روش استاندارد که در مقوله‌ی چیدمان کاربرد زیادی دارد، به شرح زیر است:

الف) چیدمان‌های ثابت؛

ب) چیدمان‌های فرایندی؛

ج) چیدمان‌های تولیدی؛

د) چیدمان‌های خدماتی؛

ه) چیدمان‌های اداری؛

و) چیدمان‌های فروشگاهی؛

ز) چیدمان انباری.

همان‌طور که دیده می‌شود چیدمان در انبار یکی از روش‌های استاندارد است که برایند متغیرهای مختلفی است و اهداف زیادی بر انتخاب نوع چیدمان در انبار تأثیر می‌گذارند، که از آن جمله می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

۴. اهداف مورد نظر در انتخاب چیدمان

۱. استفاده‌ی بهینه از فضا (طراحی فضا، چیدمان، قفسه‌بندی و ...)؛

۲. حداقل هزینه‌های عملیاتی (حداقل زمان و مسیرهای دسترسی و به تبع آن هزینه‌های حمل‌ونقل)؛

۳. شرایط امن، مطمئن و سازگار با محیط زیست؛

۴. حفظ حداقل هزینه‌های کلی عملیاتی؛

۵. استفاده‌ی بیشینه از فضا؛

۶. استفاده‌ی بیشینه از تجهیزات متناسب با نیاز هر انبار و متناسب با میزان سرمایه‌گذاری به ویژه تجهیزات حمل‌ونقل؛

۷. استفاده‌ی بیشینه از نیروی کار؛

۸. دسترسی بیشینه.

۵. مروری بر پیشینه‌ی تحقیق

مرور پیشینه‌ی انجام شده بر روی مدل کلاسیک انبار و انبارهای مکانیزه، بیان‌گر این است که تلاش‌های بسیاری برای بهینه‌سازی ملاحظات انبار ترجیحاً از طریق روش‌های حل دقیق یا عمدتاً با توجه به وابستگی متغیرها به‌هم، به صورت ترکیبی از ملاحظات فوق از طریق تعریف مسائل چندمتغیره و حل آن از روش‌های تقریبی، ابتکاری یا فراابتکاری صورت گرفته است و زمینه‌های تحقیق در خصوص مدل کلاسیک انبار و وابستگی‌های آن از قبیل موضوع چیدمان تقریباً اشباع‌اند و پرواضح است که این زمینه نیاز به بازتعریف بسیاری از تعاریف قدیمی و روزآمدسازی آنها بر مبنای نیازمندی‌های روز دارد.[۶و۷] پس ابتدا به معرفی کلی ساختار یک انبار مکانیزه‌ی کلاسیک پرداخته می‌شود و سپس اجمالاً در خصوص طراحی انبار و تصمیمات مهمی که لازم است در هنگام طراحی انبار بهینه به آن توجه شود توضیح داده می‌شود؛ سپس در خصوص انتخاب نوع انبار و متغیرهای آن و در مورد این‌که پس از انتخاب و به منظور پیکربندی انبار، در مورد چه گزینه‌ها و وابستگی‌های نرم‌افزاری و سخت‌افزاری (مربوط به تجهیزات و سیستم کنترل انبار) لازم است تصمیم‌گیری شود، توضیح داده خواهد شد. در ادامه و به اختصار، تحقیقات انجام شده در حوزه‌ی سیاست‌های اصلی تخصیص، انتساب و ذخیره‌سازی، حوزه‌ی

چینش و دسته‌بندی در انبار و ترتیب و توالی تقاضای انبارش و مصرف کالا در انبار معرفی می‌شود و به ارزیابی کارایی آنها پرداخته خواهد شد و در نهایت در بخش تعریف مسئله، موضوع به طور خلاصه جمع‌بندی می‌شود.

۱.۵. ساختار و پیکربندی انبار مکانیزه‌ی (AS/RS) کلاسیک

انبارهای مکانیزه عموماً دارای ساختاری شامل فضای انبار و مجموعه‌ی سخت‌افزاری شامل سه گروه بارگیر و باربند[۲]، حمل‌ونقل مواد[۳] (بارگذاری و باربری) و سیستم جرثقیل[۴] هستند که هرکدام بنابر نوع طراحی و سیستم کنترلی انبار می‌توانند به انواع مختلف با کارایی متفاوت تقسیم شوند.[۵،۴]

گذشته از الزامات مکان‌یابی، موقعیت راهبردی و انتخاب فضای مناسب در ساخت انبار مهم است. طراحی انبار از چند جنبه دارای حساسیت ویژه است؛ از آن‌جایی که یک انبار قرار است به شکل بهینه نیازهای جاری را در حوزه‌ی وظایف خود برآورده کند با توجه به انعطاف‌ناپذیری سیستم سخت‌افزاری که در نهایت در طراحی آن در نظر گرفته می‌شود، باید بتواند نیازهای آینده را نیز پوشش دهد.[۸] پس لازم است در زمان طراحی به ویژه طراحی سیستم‌های داخلی انبار دقت لازم اعمال شود تا انبار در آینده نیز در حوزه‌ی پاسخگویی به وظایف دچار نقصان نشود. از این‌رو، در زمان طراحی یک انبار لازم است در مورد خصوصیات آن تصمیم‌گیری شود و بر اساس تصمیم‌گیری‌های انجام شده وابستگی‌ها و ملزومات اجرایی آن به دقت انتخاب شود. بدیهی است عملکرد بهینه‌ی یک انبار همواره بستگی به راهبرد تعریف شده و کارکرد بهینه‌ی تجهیزاتی دارد که برای آن در نظر گرفته می‌شود.[۹]

در مورد نحوه‌ی پیکربندی و راهبردهای کنترلی در طراحی انبار، در حوزه‌ی طراحی ساختاری انبار[۵]، به طور خلاصه می‌توان گفت اغلب تحقیقات متمرکز بر روی محاسبه‌ی چیدمان Single Storage Rack است و به ظرفیت انبارش یا موقعیت انبارش توجه نشده است؛ یا به ندرت به موضوع موقعیت بهینه‌ی درهای ورود و خروج کالا توجه شده است .[۱۰،۱۱] و در زمینه‌ی کنترل انبار اغلب محققان یک یا تعداد کمی دستور کنترلی را در طراحی ساختار انبار پیشنهادی خود دخیل کرده‌اند و موضوعات طراحی موقعیت بهینه‌ی وسایل حمل‌ونقل داخل انبار و نحوه‌ی تقسیم‌بندی و دسته‌بندی اجناس در طراحی انبار اساساً دیده نشده است و با این‌که سیستم کنترلی و طراحی ساختاری انبار به هم وابستگی کامل دارند، در تحقیقات انجام شده هریک به تنهایی و مستقلاً بررسی شده‌اند و به موضوع تعداد ورودی و خروج انبار و موقعیت بهینه‌ی آنها به ندرت پرداخته شده است.[۱۲،۱۳]

۶. سیاست‌های اصلی انبارش در انبارهای مکانیزه

به طور کلی پنج سیاست اصلی برای انبارش در انبارهای مکانیزه وجود دارد.[۲،۶،۷،۱۲]

۱. ذخیره‌سازی اختصاصی

در این روش هر نوع کالا همواره به یک موقعیت خاص تعلق می‌گیرد؛ عیب اصلی آن نیاز به فضای زیاد برای ذخیره‌سازی است و در نتیجه فضای کمی به تجهیزات انبارش اختصاص می‌یابد و عموماً این تجهیزات مکانیزه نیستند. از مزایای آن می‌توان انبارش کالاهای با حجم بزرگ یا سنگین را نام برد.[۴]

۲. ذخیره‌سازی تصادفی

در این روش در تمام فضاهای خالی انبار امکان انبارش با احتمال یکسان وجود دارد.

۳. ذخیره‌سازی در نزدیک‌ترین محل باز

در این روش انبارش در اولین مکان خالی صورت می‌گیرد. این روش زمانی مناسب است که قفسه‌های نزدیک به محل ورود و خروج کالا، اشغال یا پر باشد.

۴. ذخیره‌سازی مبتنی بر گردش کالا (شاخص مکعب بر سفارش)

در این روش جانمایی انبارش بر اساس بسامد نیاز به مصرف کالا صورت می‌گیرد؛ به این صورت که کالاهایی که بیشتر مورد نیاز هستند در مکان‌هایی نزدیک به درب‌های ورودی/خروجی که قابلیت دسترسی بهتر، ساده‌تر و سریع‌تر را دارند، جانمایی می‌شوند. در این روش شاخص (COI) [۶] برای هر بار ورودی به انبار تعریف می‌شود. شاخص COI نسبت فضای مورد نیاز بار به تعداد سفارش برای آن بار در بازه‌ی زمانی خاص است. این قاعده، بارهای با COI کمتر را در نزدیک‌ترین موقعیت‌ها به درهای ورود و خروج جانمایی می‌کند. اشکال این روش این است که هر تغییری در بسامد تقاضا یا تعریف محصول (بار جدید) باعث حجم بزرگی از جابه‌جایی و تغییرات چیدمان در انبار می‌شود.[۱۰،۱۵]

۵. انتساب ذخیره‌سازی بر مبنای کلاسه‌بندی

در این روش فضای قابل دسترسی در انبار به چندین قسمت تقسیم می‌شود و متعاقباً هر بار بر اساس بسامد تقاضا کلاس‌بندی می‌شود و علاوه بر این‌که به هر قسمت فقط یک کلاس کالا تخصیص می‌یابد و جانمایی کالاهای هر دسته کلاس می‌تواند در قسمت اختصاصی آن کلاس به صورت تصادفی صورت گیرد. در این شیوه به علت مدیریت بهتر فضا و زمان به صورت عمده سه کلاس مصرفی کالا در نظر گرفته می‌شوند[۷] که از کلاس A (کالای پرمصرف) تا کلاس C (با مصرف کمتر، مرتبه‌سوم) طبقه‌بندی می‌شوند. از مزایای این روش جانمایی کالاهای کلاس پرمصرف در نزدیکی درب‌های ورودی/خروجی همراه با استفاده از مزیت انعطاف‌پذیری انبار به‌دلیل انبارش تصادفی کالاهای دسته‌بندی شده (در هر کلاس) و استفاده‌ی بهینه از فضا در انبارهای دارای محدودیت جاست.[۱۰،۱۵،۱۶]

۷. ضرورت و اهداف تحقیق

به‌طور کلی، تغییر منعطف از عصر ساده‌ی دیجیتالی شدن (انقلاب صنعتی سوم) به فنّاوری‌های ترکیبی نوآورانه (انقلاب صنعتی چهارم) سیستم‌های تولیدی و پشتیبانی را به بازنگری در روش کاری خود مجبور می‌کند. پس لازم است رهبران کسب‌وکار و مدیران ارشد تغییرات پیرامون خود را حس کنند. مفروضات گروه‌های عملیاتی خود را به چالش بکشند و به طور مداوم نوآوری کنند. صنایع تولیدی در حال حاضر در حال تغییر از تولید انبوه به تولید سفارشی هستند. پیشرفت‌های سریع در فنّاوری‌های ساخت و کاربرد در صنایع به افزایش بهره‌وری کمک می‌کند. واژه‌ی ۴،۰ به معنی چهارمین انقلاب صنعتی است که به عنوان سطح جدیدی از سازمان تعریف می‌شود و کل زنجیره‌ی ارزش چرخه‌ی عمر محصولات را کنترل می‌کند. صنعت ۴،۰ هنوز رویایی است، اما مفهوم واقع‌گرایانه‌یی است که شامل اینترنت اشیا، اینترنت صنعتی، ساخت هوشمند و تولیدات ابری است. نسل چهارم صنعت دارای الگوهایی است که به یکپارچگی دقیق بین اجزا در فرایند تولید می‌پردازد تا ضمن رعایت زمینه‌ی پویایی در اجرای فرایندها بهبود مستمر داشته باشند و بر فعالیت‌های ارزش افزوده مانند سرعت، چابکی سیستم، بهره‌وری و پایداری (انرژی) و اجتناب از پسماندها تمرکز می‌کند.[۱،۱۷]

در این تحقیق سعی بر این است با توجه به رشد فنّاوری و لزوم افزایش بهره‌وری

در سرعت، دقت خدمت‌دهی، در قدم اول تعریف جدیدی از روش‌های انبارش و چیدمان در فضای انبارهای هوشمند ارائه شود که در آن با استفاده از الگوریتم‌های تحلیل و بهینه‌سازی سایر زمینه‌های مهندسی از جمله مهندسی مکانیک، بسیاری از محدودیت‌های قبلی دگرگون شده و به جای آن ملاحظات و متغیرها تصمیم جدیدی تعریف شود تا در سیستم پیشنهادی جدید برخلاف مدل کلاسیک، فضای انبار از یک فضای ایستا به یک فضای پویا تبدیل شود.

در این راستا لازم است اجزای انبارش به صورت پویا در نظر گرفته شوند و دیگر مانند مدل کلاسیک در جای خود ثابت نباشند و در هر زمان (بسته به سرعت مصرف، تواتر ورود و خروج و ...) دارای مختصات مکانی متغیر باشند و از لحاظ هزینه لازم است در لحظه در مکان بهینه‌ی خود در انبار قرارگیرند که برای محاسبه‌ی آن باید از الگوریتمی ابتکاری استفاده کرد که ضمن سرعت بالا در محاسبه‌ی مکان بهینه، قادر به ارائه‌ی حل دقیق باشد و در ارائه‌ی مختصات مکانی دقیق باشد؛ به عبارتی این الگوریتم، به صورت یک واحد ارزش افزوده برای برآورده کردن الزامات نسل چهارم صنعت در حوزه‌ی چیدمان و انبار عمل کند. به این صورت این مدل قابلیت ارضای وضعیت انبارش پویا را خواهد داشت و قادر به پاسخگویی به محرک‌های سریع منتج از سیستم‌های تولیدی یا خدماتی باسرعت بالا خواهد بود.

۸. تعریف مسئله

امروزه با توجه به رشد فنّاوری، گسترش سیستم‌های تولیدی، تنوع فرایندهای تولید، رشد اقتصادی و بهینه شدن سیستم‌های تولیدی از نظر سرعت انعطاف‌پذیری و به تبع آن لزوم افزایش سرعت فرایندهای پشتیبانی و خدماتی سیستم‌های تولیدی، مدل کلاسیک انبارهای مکانیزه با توجه به محدودیت‌هایی که دارد و با وجود تحقیقات و پروژه‌های انجام شده برای بهینه‌سازی و بهبود بازده آن، پاسخگوی نیازهای سیستم‌های تولیدی پرسرعت جدید نیست و لازم است برخی تعاریف قدیمی مطابق با نیازمندی‌های جدید بازتعریف شوند و به دنبال آن برخی روش‌ها و الگوریتم‌های محاسباتی کنار گذاشته شوند؛ روش‌ها و الگوریتم‌های جدیدی برای سازمان‌دهی تعاریف جدید و حل مسائل آنها تعریف شود.

از آن‌جایی که مدل کلاسیک انبار مکانیزه یک مدل ایستاست، اجزایی که وظیفه‌ی انبارش و نگه‌داری جنس و کالا (حجمی یا وزنی) را به عهده دارند، در این مدل ثابت در نظر گرفته می‌شوند و محاسبات مربوط به بهینه‌سازی معادلات هزینه، به صورت عمده از طریق کاهش عامل‌های زمان و مسافت (حمل‌ونقل و حرکت کالا) و در نهایت طراحی چیدمان بهینه‌ی اجزای انبارش عمل می‌کنند تا عوامل حمل‌ونقل کالا وظیفه‌ی خود را در کوتاه‌ترین مسیر (کمترین مسافت) و کمترین زمان و در نهایت باکمترین هزینه اجرا کنند. در مدل انبار کلاسیک، افزایش تقسیم‌بندی مدل محیط انبار (افزایش تعداد کالا، کاهش ابعاد کالا یا افزایش تعداد تقسیم‌بندی فضای انبار و تغییر تعداد و موقعیت درب‌های ورود وخروج در انبار) در معادلات مربوط به هزینه بسیار تأثیرگذار است و حل مسائل مربوط به چیدمان را با دشواری و زمان‌بری زیاد مواجه می‌کند.

در این تحقیق سعی شده است که با الهام گرفتن از الگوریتم طبیعی گسترش تنش در اجسام (با توجه به مشابهت رفتاری الگوی گسترش تنش) ، نگاشتی به صورت در مدل تخصیص چیدمان بهینه در انبار، طراحی و ارائه شود و از روش محاسباتی و تحلیلی اجزای محدود و نظریه‌ی کمینه‌ی انرژی پتانسیل برای تحلیل استفاده شود و بر اساس الگوریتم ابتکاری جدید، توانایی‌های مورد ادعای مدل جدید راستی‌آزمایی شود.

۱.۸. مدل تلفیقی جانمایی ذخیره‌سازی مبتنی بر گردش کالا (شاخص مکعب بر سفارش COI)

همان طور که اشاره شد.[۱۴و۱۶] در حوزه‌ی جانمایی انبارش[۸] (تخصیص فضای انبارش) به طور کلی پنج سیاست اصلی برای انبارش در انبارهای مکانیزه وجود دارد که جامع‌ترین و کاربردی‌ترین آنها که در حال حاضر در انبارهای مکانیزه مورد استفاده قرار می‌گیرد، تلفیقی از این سیاست‌هاست.

در این روش شاخص (COI) برای هر بار ورودی به انبار تعریف می‌شود. شاخص COI در حقیقت نسبت فضای مورد نیاز بار به تعداد سفارش برای آن بار در بازه‌ی زمانی خاص است. این قاعده، بارهای با COI[۱۰] کمتر را در نزدیک‌ترین موقعیت‌ها به درب‌های ورود و خروج جانمایی می‌کند. و فضای قابل دسترسی در انبار به چندین قسمت تقسیم می‌شود و متعاقباً بارها که بر اساس بسامد تقاضا کلاس‌بندی شده‌اند به هر فضا تعلق می‌گیرد به این صورت که به هر فضا فقط یک کلاس کالا تخصیص می‌یابد و جانمایی کالاهای هر دسته کلاس می‌تواند در فضای اختصاصی آن کلاس به صورت تصادفی صورت گیرد. در این شیوه به منظور مدیریت بهتر فضا و زمان، به صورت عمده سه کلاس مصرفی کالا در نظر گرفته می‌شود که از کلاس A(کالای پرمصرف) تا کلاس C (بامصرف کمتر، مرتبه سوم) طبقه‌بندی می‌شوند. از مزایای این روش جانمایی کالاهای کلاس پرمصرف در نزدیکی درب‌های ورودی/خروجی همراه با استفاده از مزیت انعطاف‌پذیری انبار به دلیل انبارش تصادفی کالاهای دسته‌بندی شده (در هرکلاس) و استفاده بهینه‌ی از فضا در انبارهای دارای محدودیت جاست. مدل ریاضی هزینه که با تلفیق مزایای این سیاست‌ها ارائه شده است و در حال حاضر در مقالات و محاسبات چیدمان استفاده می‌شود طوری تنظیم شده است که هزینه‌ی جابه‌جایی اقلام به نقاط ورود و خروج کمینه شود.[۱۸]

۲.۸. مدل ریاضی سیاست ذخیره‌سازی تخصیص‌یافته

در یک انبار p نقطه‌ی ورود و خروج دارد که از طریق آنها m قلم جنس به انبار وارد یا خارج می‌شود؛ اقلام در یکی از n مکان موجود برای انبارکردن ذخیره می‌شوند و همه‌ی مکان‌ها، فضای ذخیره‌سازی مساوی برای انبارکردن نیاز دارند و می‌دانیم که قلم (کالای) i به فضایی به اندازه‌ی Si نیاز دارد. پس ایده‌آل این است که:

$$\sum_{i=1}^{m} S_i = n \qquad (1)$$

تعداد f_{ik} سفر برای محصول i از نقطه‌ی ورودی/خروجی k وجود دارد، هزینه‌ی جابه‌جایی یک واحد از محصول i به اندازه‌ی یک واحد مسافت از نقطه‌ی ورودی /خروجی k، معادل C_{ik} است و فاصله‌ی فضای ذخیره‌سازی j از نقطه‌ی ورودی و خروجی k، معادل d_{kj} است. با در نظر گرفتن متغیر تصمیم x_{ij} به صورت صفر و یک، که مشخص می‌کند آیا جنس i به محل ذخیره‌ی j تخصیص یافته یا خیر، می‌توان مدل ریاضی زیر را برای تخصیص اقلام به فضاهای ذخیره‌سازی فرمول‌بندی کرد؛ به نحوی که هزینه‌ی جابه‌جایی اقلام به نقاط ورودی و خروجی کمینه شود (رابطه‌ی ۲). هزینه برای هر جفت کالا/فضای انبارش به صورت حاصل ضرب سه عامل محاسبه شده است.

الف) فراوانی سفرها به هریک از نقاط ورود/خروج

ب) فاصله‌ی پیموده شده به هر نقطه‌ی ورود/خروج

ج) هزینه به ازای واحد مسافت.

$$Minimize \sum_{i=}^{m}\sum_{j=1}^{n}\left[\frac{(\sum_{k=1}^{p} c_{ik}f_{ik}P_k d_{kj})}{s_i}\right]x_{ij} \quad (۲)$$

$$\sum_{j=1}^{n} x_{ij} = s_i, i = 1, 2, ..., m \quad (۳)$$

$$\sum_{i=1}^{m} x_{ij} = s_i, j = 1, 2, ..., n \quad (۴)$$

$$x_{ij} = 0 \; or \; 1 \;,\; i = 1, 2, ..., m \;\; j = 1, ..., n \quad (۵)$$

با جایگذاری:

$$w_{ij} = \frac{(\sum_{k=1}^{p} c_{ik}f_{ik}P_k d_{kj})}{s_i}$$

تابع هدف را می‌توان به صورت زیر بازنویسی کرد:

$$Minimize \sum_{i=}^{m}\sum_{j=1}^{n} w_{ij}x_{ij} \quad (۶)$$

۳.۸. مدل ریاضی جانمایی ذخیره‌سازی مبتنی‌بر سیاست گردش کالا (شاخص مکعب بر سفارش COI)

حالت خاصی از مدل طراحی سیاست ذخیره‌سازی تخصیص‌یافته را در نظر می‌گیریم که در آن همه‌ی اقلام از درب‌های ورودی و خروجی به یک نسبت استفاده می‌کنند و هزینه‌ی جابه‌جایی یک واحد بار کالای i مستقل از نقطه‌ی ورودی/خروجی است. Pk را به عنوان درصدی از سفرهای کالای i تعریف می‌کنیم که از نقطه‌ی ورودی /خروجی k ام استفاده می‌کند؛ به طوری که $k = 1, 2, 3, ...P$ (برای هر کالا چون همه‌ی کالاها از نقاط ورودی/خروجی به یک نسبت استفاده می‌کنند.) پس محدودیت‌های اضافی در این مدل حذف می‌شوند و نیازی به اولین اندیس در f_{ik} و c_{ik} نیست. بنابراین، به ترتیب f_i و c_i جایگزین می‌شوند و مدل ریاضی به صورت زیر فرمول‌بندی می‌شود:

$$w_{ij} = \frac{(\sum_{k=1}^{p} c_i f_i d_{kj})}{s_i} \quad (۷)$$

با جایگذاری

$$w_j = \sum_{k=1}^{p} P_k d_{kj}$$

تابع هدف را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$Minimize \sum_{i=}^{m}\sum_{j=1}^{n} \frac{c_i f_i}{s_i} w_j x_{ij}$$

$$subjected\ to\ constraints\ (۳) - (۵) \quad (۸)$$

در ادامه اجرای این مدل متضمن مرتب‌سازی خروجی جملات مربوط به "هزینه" $(cifi/si)$ برای هر قلم کالای i و خروجی محاسبات جملات مربوط به «مسافت» (Wj) برای هر فضای ذخیره‌سازی j به ترتیب به صورت غیرصعودی و غیرنزولی است؛ به عبارتی کالایی که دارای بیشترین هزینه‌ی جابه‌جایی در واحد کالاست، به موقعیتی که کمترین فاصله از درهای ورودی/خروجی را دارد، تخصیص می‌یابد. از طرفی در این مدل می‌توان به جای جملات هزینه‌ی $cifi$ از پارامتر Ti به عنوان تواتر مصرف کالا و عبارت (Ti/si) به عنوان تواتر مصرف در واحد کالا نیز بهره جست. در این حالت این مدل، کالایی را که بیشترین تواتر مصرف در واحد کالا یا به عبارتی تراکم چگالی کالا را داشته باشد (تندمصرف‌تر باشد) به موقعیتی که کمترین فاصله از درب‌های ورودی/خروجی را داشته باشد، آدرس‌دهی می‌کند.

۴.۸. الگوریتم حل مدل ذخیره‌سازی مبتنی‌بر سیاست گردش کالا

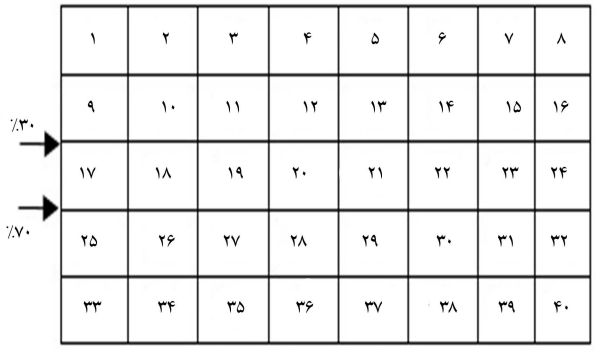
حل مسائل با استفاده از این مدل بهینه‌ی هزینه با الگوریتم شکل ۱ به شرح زیر صورت می‌گیرد:

همان‌طورکه در الگوریتم مشخص است، تابع بهینه دارای دو قسمت است و فرایند چیدمان بهینه در دو مرحله انجام می‌شود؛ مرحله‌ی اول و پس از تقسیم‌بندی فضای انبار، محاسبه‌ی شاخص مسافت (Wj) بر روی تقسیمات سطح انبار و مشخص‌شدن اولویت‌بندی بلوک‌ها بر مبنای قابلیت انبارش؛ به نحوی که بهترین موقعیت انبارش واحدی است که دارای کمترین شاخص (Wj) است. بدیهی است مقدار شاخص بنابر موقعیت هر واحد در سطح انبار و تعداد تقسیمات سطح انبار، تعداد درب‌ها، موقعیت درب‌ها، فاصله‌ی درب‌ها از تقسیمات انجام شده و درصد سفر هرکالا از هر در تغییر می‌کند. مرحله‌ی دوم محاسبات هزینه و شاخص (Tj) بر روی تقسیمات انبار است؛ در این حالت اولویت انبارش هرکالا بر مبنای تواتر ورود و خروج آن کالا تقسیم بر تعداد کالا (واحدها) و در نهایت محاسبه‌ی تراکم چگالی (Tj) هر کالا صورت می‌گیرد. بدیهی است هر کالایی که دارای تراکم چگالی بیشتری است، اولویت بالاتری برانبارش در موقعیت‌های بهینه در انبار دارد. در مجموع محاسبات به نحوی است که هزینه‌ی جابه‌جایی اقلام به نقاط ورودی و خروجی کمینه شود و کالایی با ضریب مصرف بیشتر (با تعداد ورود و خروج بیشتر (تراکم چگالی بیشتر)) در نقاط بهینه‌ی انبارش جایگزین شود. در ادامه به منظور مشاهده‌ی عملکرد چیدمان مدل بهینه کلاسیک، حل یک مسئله‌ی نمونه ارائه می‌شود.[۱۴]

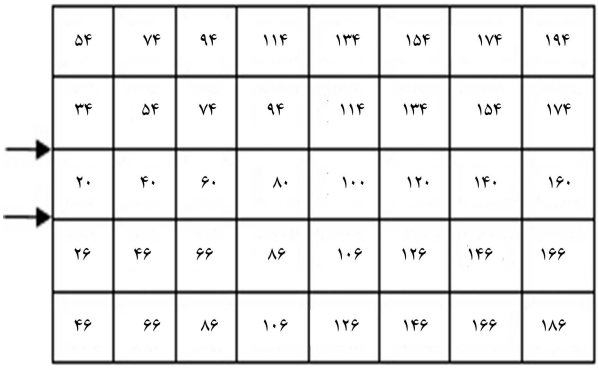
شکل ۱. الگوریتم حل مدل ذخیره‌سازی مبتنی‌بر سیاست گردش کالا.

جدول ۱. فرض‌های مثال عددی در مورد مشخصات انبار و محاسبه‌ی اولویت انبارش کالا.

محصول	Tj (تواتر ورود و خروج)	Ai (مساحت)	Si (تعداد واحد)	Tj/Si	اولویت انبارش
A	۷۵۰	۳۶۰۰	۹	۸۳٫۳۳	۱
B	۹۰۰	۶۴۰۰	۱۶	۵۶٫۲۵	۳
C	۸۰۰	۴۰۰۰	۱۰	۸۰	۲



شکل ۲. مساحت انبار ۱۶۰۰۰ واحد که دارای دو درب ورود و خروجی است؛ با درصد ورود و خروج به ترتیب ۳۰٪ و ۷۰٪ در طرفین و دارای تقسیمات مساوی به مساحت ۴۰۰ واحد (هر واحد ۴۰۰ = ۲۰ × ۲۰).



شکل ۳. پیاده سازی مرحله اول الگوریتم چیدمان کلاسیک و تخصیص شاخص بهینه مسافت به هر واحد انبار.

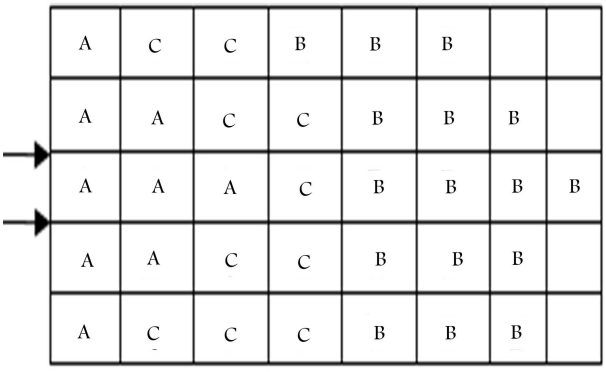
۵.۸. مثال عددی با استفاده از مدل چیدمان بهینه توسط سیاست مبتنی بر گردش کالا

انباری به مساحت ۱۶۰۰۰ واحد به شرح تقسیم‌بندی شکل ۲ موجود است:

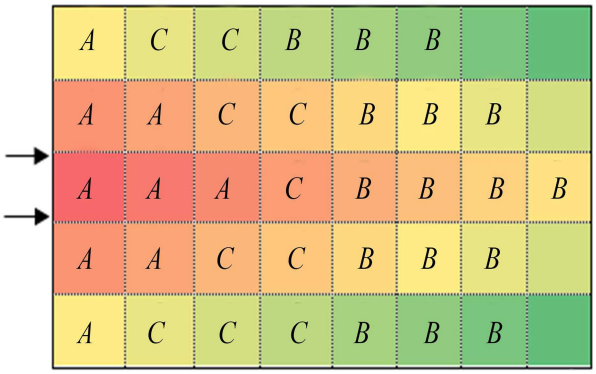
قراراست سه محصول A و B و C با مشخصات جدول ۱ جانمایی و انبارش شوند:

پس از محاسبه‌ی مرحله اول الگوریتم بهینه‌ی چیدمان و پیاده‌سازی شاخص مسافت بر روی تقسیم‌بندی سطح انبار نتایج در شکل ۳ ارائه شده است. سپس مرحله‌ی دوم الگوریتم بر اساس محاسبات جدول یک اجرا می‌شود و محصولات به ترتیب اولویت و به تعداد واحدهایشان و با روند غیرنزولی بر روی تقسیمات انبار جانمایی می‌شوند. (شکل‌های ۴ و ۵)

نتیجه این‌که همان طور که از اشکال ۲ تا ۵ نمایان است، در این سیاست، الگو و ترتیب چیدمان به صورتی است که تخصیص کالا (با ضرایب مصرف بیشتر)



شکل ۴. جانمایی محصولات به ترتیب اولویت ($A > C > B$).



شکل ۵. شکل چیدمان بهینه با توجه به موقعیت درب‌ها و تعداد تقسیمات و سایر مشخصات انبار در مدل کلاسیک.

از نزدیک‌ترین فاصله به نقاط ورود/خروج شروع می‌شود و در نهایت در دورترین فاصله از مبادی ورود/خروج، با کالاهایی با ضرایب مصرف کمتر خاتمه می‌یابد.

۹. تنش و گسترش آن

در توضیح مفهوم تنش، می‌توان گفت هر زمان که کوشش می‌کنیم جسمی را از شکل خود خارج کنیم و آن را به شکل دیگری درآوریم، می‌بینیم که آن جسم در برابر تغییر شکل مقاومت می‌کند. اگر نیرویی به جای حرکت دادن جسم بخواهد آن را از شکل اصلی خارج کند، می‌گوییم که آن جسم تحت تنش قرار دارد. تنش عبارت است از نیرویی درونی که در برابر تغییر شکل جسم مقاومت می‌کند. نیرو از خارج جسم بر نقطه‌یی وارد می‌شود و تنش در درون جسم در مقابل آن نیرو مقاومت می‌کند.

تنش نیرویی است که بر واحد مساحت توزیع می‌شود. ممکن است تنش به صورت کششی، تراکمی، یا برشی باشد. تغییر حالت طولی جسم نتیجه‌ی نیروی کششی است؛ تراکم منتج از نیروی فشار است؛ و برش به علت نیرویی است که

در امتداد سطح جسم عمل می‌کند. چون تمام سطح مقطع جسم در برابر نیروی تغییر شکل‌دهنده مقاومت می‌کند، واحدهای تنش بر حسب نیرو بر واحد مساحت بیان می‌شود. در سیستم متریک از واحد (نیوتن بر مترمربع و یا پاسکال) استفاده می‌شود. چون موادی که تنش بر آنها وارد می‌شود تحت کشش تراکم یا برش هستند، مواد مزبور یا تغییر شکل می‌دهند یا گسیخته می‌شوند[۱۹و۲۰] گسترش تنش همواره از مراکز تمرکز تنش یا به عبارتی منطقه‌ی تحت بار یا تحت فشار با انرژی پتانسل بیشتر به سمت مناطق آزاد (بدون بار) با انرژی پتانسیل کمتر حرکت می‌کند.

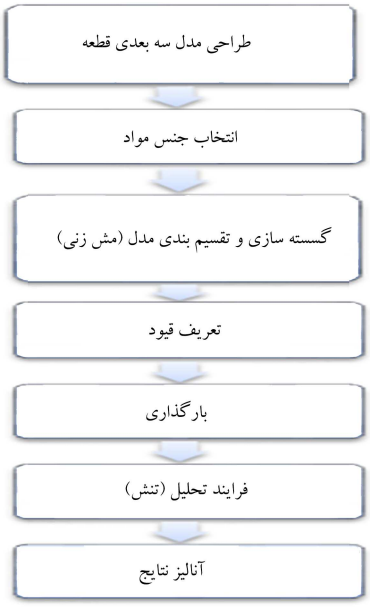
۱۰. روش اجزای محدود

یک روش عددی برای حل معادلات دیفرانسیل حاکم بر یک مسئله‌ی واقعی است که در قالب یک مدل ریاضی آورده شده است؛ روش اجزای محدود که به اختصار FEM[۹] نامیده می‌شود.[۲۱و۲۲] روشی است عددی برای حل تقریبی معادلات دیفرانسیل جزئی و حل انتگرال‌ها. اساس کار این روش، حذف کامل معادلات دیفرانسیل یا ساده‌سازی آنها به معادلات دیفرانسیل معمولی است که با روش‌های عددی مثل اویلر حل می‌شوند.

برای رسیدن به حل دقیق تغییرات رفتاری یک سازه مانند محاسبه‌ی تغییر مکان، کرنش و تنش یک سازه باید ابتدا معادلات تعادل سازه محاسبه و تعریف شوند؛ به نحوی که در کنار آن، شرایط مرزی و سازگاری مسئله نیز ارضا شوند. بدون شک حل معادلات تعادل درکنار برقراری شرایط مرزی و سازگاری در سازه‌های ساده کار سختی نیست، اما اگر با یک مسئله‌ی پیچیده (از لحاظ هندسه، رفتار ماده، بارگذاری و ...) روبه‌رو باشیم، حل دقیق معادلات فوق عملاً بسیار دشوار و در برخی موارد تقریباً غیرممکن است. در یک چنین موقعیت‌هایی، روش اجزای محدود یک روش پذیرفته شده و کارآمد برای حل معادلات دیفرانسیلی حاکم بر رفتار جسم (مسئله) است که کارایی و سرعت عمل آن عملاً به اثبات رسیده است. روش اجزای محدود دارای دو تقسیم‌بندی است؛ یکی از این تقسیم‌بندی‌ها برای به دست آوردن تغییر مکان در نقاط اتصال اجزا و محاسبه‌ی نیروی اعضای سازه‌ها از اجزای مجزا استفاده می‌شود. این روش «تحلیل ماتریسی سازه‌ها» نام دارد و دارای نتایجی مطابق با تحلیل کلاسیک سازه‌هاست. روش دوم از اجزای محیط پیوسته برای تعیین حل‌های تقریبی مسائل انتقال گرما، مکانیک سیالات و مکانیک جامدات استفاده می‌کند. در این روش حل تقریبی پارامترهای مطلوب در نقاطی که گره نامیده می‌شوند، به دست می‌آیند. روش اجزای محدود حاصل کار الکساندرهرنیکوف (۱۹۴۱) و ریچارد کورانت (۱۹۴۲) است[۲۲] با این که روش کار این دو دانشمند کاملاً متفاوت است، اما یک ویژگی مشترک دارند و آن تقسیم یک دامنه‌ی پیوسته یا به عبارتی ماده به یک سری زیردامنه و قطعات کوچک‌تر ماده به نام جزء است. روش اجزای محدود پایه و مبنای بسیاری از طراحی‌ها به کمک رایانه است که تحلیل‌های پیچیده را با سرعت خیلی زیاد بر روی مدل‌هایی با تقسیم‌بندی‌های بسیار بزرگ (با چگالی مش بالا) انجام می‌دهد و نتایج این تحلیل‌ها توسط نمایش اعداد یا به صورت خطوط رنگی (گرافیکی) قابل مشاهده است.[۲۱و۲۳] نرم‌افزارهای مورد اشاره به صورت عمده برای تحلیل تنش سازه‌ها از فلوچارت شکل ۶ استفاده می‌کنند.

۱.۱۰. توصیف عمومی روش اجزای محدود

- گسسته‌سازی سازه‌ی مش؛
- ارائه‌ی رفتار فیزیکی حاکم بر جزء به صورت کمّی؛



شکل ۶. فلوچارت تحلیل تنش.

- انتخاب یک مدل درون‌یاب یا مدل جابه‌جایی مناسب؛
- استخراج ماتریس سختی و بردارهای نیروی جزء؛
- تجمیع معادلات اجزا برای استخراج معادلات کلی تعادل؛
- محاسبه‌ی تنش‌ها و کرنش‌های جزء؛
- محاسبه و استخراج جابه‌جایی‌ها در گره‌ها.

۲.۱۰. الگوریتم پیاده‌سازی روش اجزای محدود

این الگوریتم سه مرحله‌ی کلی دارد.

- پیش‌پردازش: در این مرحله مدل هندسی صفحه‌ی مستطیلی و مدل شبکه‌بندی شده‌ی مسئله ساخته می‌شود. سپس بارگذاری و شرایط مرزی به مدل اعمال می‌شود؛
- حل مدل اجزای محدود: تجمیع معادلات سیستم و حل معادلات کلی در این مرحله انجام می‌پذیرد؛
- پس‌پردازش: آماده کردن و نمایش نتایج؛

۱۱. روش تحقیق و مدل مفهومی

مشابهت منطق عملکرد دو الگوریتم چیدمان بهینه (مدل کلاسیک) با الگوی گسترش طبیعی تنش، باعث شد در این تحقیق تلاش شود تا ضمن صحه‌گذاری به این مشابهت، انبارش بهینه‌ی کالا در انبار با الهام از الگوی گسترش تنش امکان‌سنجی شود و در صورت اخذ نتایج مورد انتظار، نگاشتی برای اجرای چیدمان بهینه در انبار به کمک روش محاسباتی اجزای محدود طراحی و الگوریتمی جدید ارائه شود تا با توجه به سرعت محاسبات و جامعیت عملکرد روش اجزای محدود از مزایای آن در حل مسائل چیدمان استفاده شود.

برای استفاده از الگوی توزیع تنش، ابتدا لازم است معادل‌سازی منطقی بین تعاریف دو الگوریتم صورت پذیرد و سپس نگاشتی بر روی مفاهیم دو الگوریتم

جدول ۲. نگاشت مفاهیم مدل‌های کلاسیک و اجزای محدود.

جدول مشابه‌سازی مفاهیم		
حوزه‌ی مدل کلاسیک (در انبار)	≡	حوزه‌ی گسترش تنش و الگوریتم اجزای محدود (جهت انبار)
تقسیم‌بندی فضای انبارش (مساحت انبار)	≡	مش‌بندی سطح مدل
دیوارهای انبار	≡	شرایط مرزی
درب‌های ورود/خروج (انبار)	≡	نقاط بارگذاری
تعیین درصد ورود و خروج کالا از هر درب	≡	تسهیم (نسبت) بارگذاری نقاط (از بار واحد)
اجرای محاسبه‌ی اندیس Wj (فاصله‌ی بهینه از درب‌ها)	≡	محاسبه‌ی تنش در نقاط (شار تنش) و جابه‌جایی و مرتب‌سازی اجزا بر مبنای کمینه‌ی انرژی پتانسیل (کمترین تنش) از نقاط بارگذاری
محاسبات اندیس **Ti/Si** و تعیین اولویت انبارش هر نوع کالا		
مرتب‌سازی کالا بر اساس اولویت انبارش		

قدیم (کلاسیک) و جدید (مدل اجزای محدود) تعریف و پیاده‌سازی شود و در انتها بر مبنای آن، مدل مفهومی الگوریتم جدید طراحی و پیاده‌سازی شود.

برای تعریف این نگاشت همان طور که در جدول ۲ مشاهده می‌شود، ابتدا مشخصه‌های مدل انبار کلاسیک به شرح زیر تعریف می‌شود:

۱ـالف) انبار در نظرگرفته شده مستطیل شکل است.

۱ـب) سطح انبار بدون مانع، قفسه و اختلاف سطح است.

۱ـج) انبار دارای چهار دیوار (دو به دو موازی) است.

۱ـد) سطح انبار بنابر مقتضیات انبارش کالا، به مساحت‌های کوچک‌تر مساوی و متحدالشکل (در این مدل مربع شکل) تقسیم می‌شود.

۱ـه) در این مدل، درب‌های ورود/خروج بر روی دیوارهای موازی (روبرو) تعریف و تعبیه می‌شود.

۱ـو) قابلیت تعریف دو درب (ورود /خروج) صرفاً بر روی دیوارهای موازی هم وجود دارد و درب‌ها منطقاً روی زوج دیواری که بیشترین فاصله را از هم دارند، به تفکیک بر روی نقاط حاشیه‌یی حاصل از تقسیم‌بندی سطح انبار تعریف می‌شوند.

۱ـز) انبار در یک بازه‌ی زمانی در حال پرشدن و در بازه‌ی زمانی بعد در حال خالی شدن است و در مدل انبار وضعیت تراکم کالا مشاهده می‌شود.

۱ـح) به شکل هماهنگ و در یک بازه‌ی زمانی، انبار (کلیه‌ی درب‌ها) در وضعیت ورود یا وضعیت خروج کالاست.

۱ـط) در این مدل متناسب با تعداد درب‌ها، سهم ورود/خروج کالای هر درب، به شکل درصدی از ظرفیت کل تغذیه‌ی کالای انبار تعریف می‌شود.

باتوجه به توضیحات فوق، تلاش شده است در مدل اجزای محدود نیز حتی‌الامکان مشخصه‌های مدل انبار کلاسیک با حداقل تغییرات لحاظ و شبیه‌سازی شود. پس در مدل جدید:

۲ـالف) صفحه‌یی مستطیل شکل به عنوان سطح انبار در نظرگرفته شده است.

۲ـب) صفحه‌ی در نظرگرفته شده، از جنس فلز نرم و همگن و دارای ضخامت کم است.

۲ـج) شرایط مرزی بر روی صفحه به نحوی اعمال می‌شود تا از چهار وجه موجود، وجوهی که در آنها درب‌های ورود و خروج تعریف نشده‌اند، مقید گردند.

۲ـد) سطح انبار متناسب با تقسیم‌بندی مدل کلاسیک (مقتضیات انبارش کالا)، با اجزای مربعی مش‌بندی می‌شود.

۲ـه) در مدل جدید، درب‌های ورود/خروج بر روی زوج وجوه موازی که دارای بیشترین فاصله‌اند، تعریف می‌شوند.

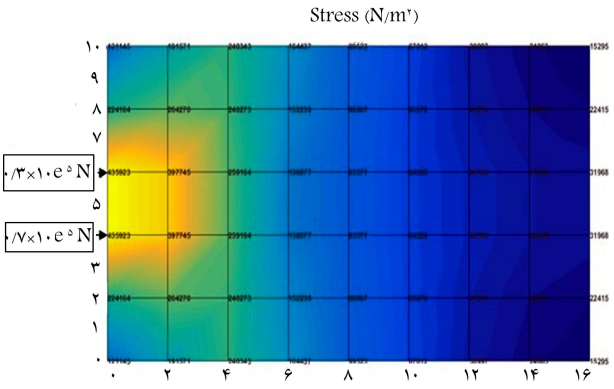
۲ـو) نقاط بارگذاری بدل از درب‌های (ورود/خروج) بر روی گره‌های حاصل از مش‌بندی وجوهی که مقید نشده‌اند، مشابه با موقعیت درب‌های مدل کلاسیک تعریف می‌شوند.

۲ـز) بارگذاری در کلیه‌ی نقاط در یک بازه‌ی زمانی صرفاً فشاری یا کششی است.

۲ـح) در مدل جدید سهم بارگذاری نقاط، مشابه و متناسب با درصد ورود/خروج کالا (در مدل کلاسیک)، به صورت درصدی از بار واحد شبیه‌سازی می‌شود.

۱۲. شبیه‌سازی و تحلیل

در این مرحله مدل مثال (۱) شبیه‌سازی شده و در محیط نرم‌افزار اجزای محدود بارگذاری شده است. پس از تحلیل تنش، نتایج به دست آمده حاکی از مشابهت بسیار در منطق عملکرد هر دو شیوه است (شکل‌های ۷ و ۸).



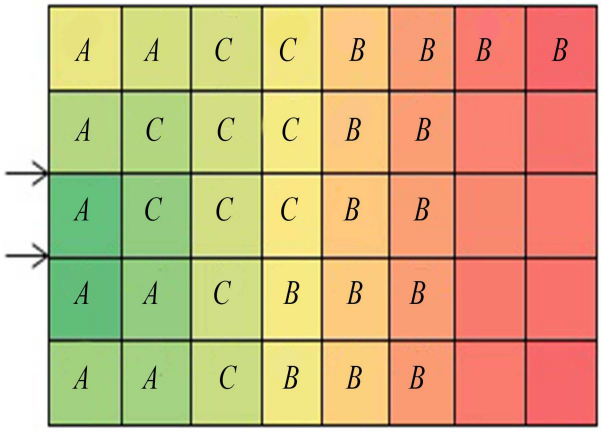
شکل ۷. نتایج تحلیل تنش به دست آمده در محیط نرم‌افزار اجزای محدود.

جدول ۳. نتایج تحلیل‌های انجام شده بر روی مثال بخش ۵.۸ با تواترهای مختلف ورود/خروج کالا.

ردیف	تقسیم‌بندی سطوح انبار	نقاط ورود/خروج	تواتر ورود/خروج کالا	درصد مشابهت	پاسخ زمانی مدل کلاسیک	پاسخ زمانی مدل اجزاء محدود
۱	$۵ \times ۸ = ۴۰$	$Nod\ ۳, ۴$ $(left\ side)$	٪۳۰ ٪۴۰	٪۹۱٫۷	$۰/۱۹\ sec$	$۰/۱۵sec$
۲	$۵ \times ۸ = ۴۰$	$Nod\ ۲, ۵$ $(left\ side)$	٪۵۰ ٪۵۰	٪۹۱٫۷	$۰/۱۹\ sec$	$۰/۱۵\ sec$
۳	$۵ \times ۸ = ۴۰$	$Nod\ ۲, ۵$ $(left\ side)$	٪۷۰ ٪۳۰	۰٫۹۵	$۰/۱۹\ sec$	$۰/۱۵\ sec$

جدول ۴. نتایج مقایسه‌یی تحلیل‌های انجام شده برای چیدمان بهینه بر روی یک انبار با تقسیم‌بندی‌های متفاوت.

ردیف	تقسیم‌بندی سطوح انبار	نقاط ورود/خروج	تواتر ورود/خروج کالا	درصد مشابهت	پاسخ زمانی مدل کلاسیک	پاسخ زمانی مدل اجزاء محدود
۱	$۵ \times ۸ = ۴۰$	$Node\ ۴, ۶$ $(left\ side)$	$Both$ ٪۵۰	٪۹۰	$۰/۳۶\ sec$	$۰/۱۶\ sec$
۲	$۱۰ \times ۱۶ = ۱۶۰$	$Node\ ۴, ۶$ $(left\ side)$	$Both$ ٪۵۰	٪۹۵٫۸	$۰/۵۷\ sec$	$۰/۴۵\ sec$



شکل ۸. مرتب‌سازی و چیدمان برمبنای مناطق دارای کمترین تنش و کمینه‌ی انرژی پتانسیل.

در ادامه برای تحلیل دقیق‌تر، میانگین تنش نقاط تشکیل‌دهنده‌ی هر جزء در وسط هر جزء محاسبه شد. محاسبات نشان می‌دهد که بیشترین تنش (تمرکز تنش) در اجزای نزدیک به تحریک و بار است که دارای بیشترین انرژی پتانسیل و ناپایداری است و کمترین میانگین در نقاط مقابل بارگذاری و دارای کمترین انرژی پتانسیل است.[۲۳] پس مقایسه‌ی نتایج مدل کلاسیک، با مدل اجزای محدود نشان می‌دهد، چنان‌چه محاسبات الگوریتم طوری تنظیم شود که اولویت چیدمان کالا بر مبنای مرتب‌سازی در نقاط دارای کمترین تنش و انرژی پتانسیل و طبیعتاً دارای بیشترین پایداری باشد، از این الگو می‌توان در بهینه‌سازی چیدمان انبار بهره جست.

۱۳. مثال‌های عددی و نتیجه‌گیری

به دلیل ضرورت پیاده سازی الگوی نسل چهارم صنایع در سیستم‌های تولیدی جهت تطابق آن با نیازهای جدید و اینکه تحولات اساسی و ساختاری در آن اجتناب ناپذیر است، بدیهی است بیشترین چالش در تحقق پیاده سازی الزاماتی چون، پایداری، چابکی و انعطاف پذیری می باشد و این انجام نمی‌شود مگر با نوآوری و جوان سازی فرایندها، پیاده‌سازی پیشنهادات و راه حل های جدید و تلفیق آن با تکنولوژی. در این تحقیق تلاش شده است حل مسئله بهینه سازی چیدمان درانبار با استفاده از روشی نو (الگوریتم گسترش تنش) ارائه شود و مورد راستی آزمایی قرارگیرد و به منظور ارزیابی قابلیت‌های مدل جدید، تعدادی مسئله‌ی چیدمان به عنوان نمونه حل و مقایسه شده است. تحلیل مسائل ابتدا با تحلیل مسئله‌ی که حل عددی آن در بخش ۵.۸ ارائه شده با دو سناریو در جداول ۳و۴ ارائه شده است. ارزیابی نشان می‌دهد نه تنها خروجی الگوریتم جدید با درصد بسیار بالایی با نتایج حاصل از خروجی الگوریتم کلاسیک منطبق است، حتی در نسبت‌های بالاتر (انبار با تقسیم‌بندی کوچکتر) و تغییر در موقعیت درب‌های ورودی/خروجی سرعت محاسباتی بسیار بالاتری نسبت به مدل کلاسیک دارد (جداول ۳ و ۴).

نتایج نشان می‌دهد که الگوریتم جدید در بهینه‌سازی تخصیص و ذخیره‌سازی و چیدمان موفق است و دارای قابلیت‌ها و مزایای بیشتری به شرح زیر است:

۱. سرعت محاسباتی بالاتر؛

۲. دقت محاسباتی بیشتر؛

۳. توانایی اولویت‌بندی چیدمان (تعداد) کالا به صورت نامحدود و درکوتاه‌ترین زمان.

تحقیقات آینده

۱. می‌توان الگوریتم جدید را برای بهینه‌سازی تخصیص ذخیره‌سازی به نحوی سامان‌دهی و تنظیم کرد که با توجه به ویژگی‌های وزنی کالاهای مختلف و از منظر مباحث پایداری و کاهش انرژی (صرفه‌جویی انرژی)، مسیر حرکت هرکالا در محیط انبار و همچنین زمان انبارش بهینه شود.

۲. می‌توان با تعریف نقاط ورود/خروج در جهت‌های مختلف (مقابل یا مجاور)، الگوریتم جدید را به نحوی سامان‌دهی و تنظیم کرد که با هدف افزایش بازده، موقعیت و تعداد و فاصله‌ی نقاط ورود/خروج در آن بهینه شوند.

۳. با استفاده از اطلاعات انبارهای شرکت‌هایی که در سطح نسل سوم یا چهارم الگوی صنایع فعالیت می‌کنند، الگوریتم جدید به صورت عملی نیز اعتبارسنجی شود.

پانوشت‌ها

1. automated storage and retrival system
2. rack
3. handling
4. crane
5. physical design
6. cube-per-order index
7. ABC storage
8. storage assignment
9. finite element method

منابع (References)

1. Müller, Julian Marius., Daniel, Kiel. and Kai-Ingo Voigt. "What drives the implementation of Industry 4.0? The role of opportunities and challenges in the context of sustainability", *Sustainability*, **10.1**, pp. 247 (2018).
2. Roodbergen, Kees Jan. and Iris, FA Vis. "A survey of literature on automated storage and retrieval systems", *European journal of operational research*, **194.2**, pp. 343-36+2 (2009).
3. Vickson, R.G., Fujimoto, A., "Optimal storage locations in a carousel storage and retrieval system", *Location Science*, **4**(4), pp. 237-245 (1996).
4. Graves, S. C., Hausman, W. H. and Schwarz, L. B. "Storage-retrieval interleaving in automatic warehousing systems", *Management Science*, **23**(9), pp. 935-945 (1977).
5. Hsieh, S. and Tsai, K.C. "A BOM oriented class-based storage assignment in an automated storage/retrieval system", *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, **17**, pp. 683-691 (2001).
6. Gagliardi, J., Jacques, R. and Angel, R. "Models for automated storage and retrieval systems: a literature review", *International Journal of Production Research*, **50.24**, pp. 7110-7125 (2012).
7. Reyes, J., Solano-Charris, E. and Montoya-Torres, J. "The storage location assignment problem: A literature review", *International Journal of Industrial Engineering Computations*, **10.2**, pp. 199-224 (2019).
8. Kulturel, S., Ozdemirel, N.E., Sepil, C. and et al. Bozkurt, Z., "Experimental investigation of shared storage assignment policies in automated storage/ retrieval systems", *IIE Transactions*, **31**, pp. 739-749 (1999).
9. Allen, S.L. "A selection guide to AS/R systems", *Industrial Engineering*, **24**(3), pp. 28-31.3 (1992).
10. Heskett, J.L. "Cube-per-order index – a key to warehouse stock location", *Transportation and Distribution Management*, **3**, pp. 27-31 (91963).
11. Rosenblatt, M.J., Roll, Y. and Zyser, V., "A combined optimization and simulation approach for designing automated storage/retrieval systems", *IIE Transactions*, **25**(1), pp. 40-50 (1993).
12. Schwarz, L.B., Graves, S.C. and Hausman, W.H., "Scheduling policies for automatic warehousing systems: Simulation results", *AIIE Transactions*, **10**(3), pp. 260-270 (1978).
13. Terry, W.R., Rao, H.R. and Son, J.Y., "Application of a computer-based approach to designing real-time control software for an integrated robotic assembly and automated storage/retrieval system" *International Journal of Production Research*, **26**(10), pp. 1593-1604 (1988).
14. Heragu, S. S. *Facilities design, CRC Press*, june 19 (2008).
15. Krishnaiah Chetty, O.V. and Sarveswar, Reddy, M., "Genetic algorithms for studies on AS/RS integrated with machines", *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, bf 22, pp. 932-940 (2003).
16. Elsayed, E.A. and Lee, M.K. "Order processing in automated storage/retrieval systems with due dates", *IIE Transactions*, **28**, pp. 567-577 (1996).
17. Ferrera, Enrico, et al. "Toward Industry 4.0: efficient and sustainable manufacturing leveraging MAESTRI total efficiency framework", *International Conference on Sustainable Design and Manufacturing*, Springer, Cham (2017).
18. Meller, R.D. and Mungwattana, A. "Multi-shuttle automated storage/retrieval systems", *IIE Transactions*, **29**, pp. 925-938 (1997).
19. Segerlind, L. J. Applied finite element analysis, Wiley New York (1976).
20. Smith, D. R., An introduction to continuum mechanics-after Truesdell and Noll, *Springer Science & Business Media*, **22** (2013).
21. Gilbert S., *Linear Algebra and Its Applications (4th ed.), Brooks Cole*, ISBN 978-0-03-010567-8. (2005).
22. Reddy, J.N. *An Introduction to the Finite Element Method*, **27** (2006).
23. Zohdi, Tarek. and Zohdi Ditzinger. *A Finite Element Primer for Beginners*. Springer (2018).