



دانشگاه صنعتی شریف
دانشکده مهندسی صنایع

بهینه‌سازی زنجیره تامین با استفاده از الگوریتم کلونی مورچگان

امیرحسین قناعتیان

۹۷۱۰۴۵۸۳

استاد راهنما

دکتر عرفان حسن ناییبی

فهرست

۳.....	چکیده
۴.....	کلمات کلیدی
۵.....	مقدمه
۶.....	مرور ادبیات
۱۰.....	بیان مسئله
۱۰.....	آشنایی با داده‌ها
۱۲.....	پیش‌پردازش داده‌ها
۱۵.....	توصیف و مدل‌سازی
۱۶.....	محدودیت‌ها
۱۷.....	حل مدل
۱۹.....	سیاست بهینه
۲۰.....	نتیجه‌گیری
۲۱.....	منابع

چکیده

در حال حاضر در زمینه بهینه سازی، الگوریتم کلونی مورچگان تا کنون بر روی مسائل بهینه سازی گوناگونی، به صورت موفقیت آمیز پیاده سازی و اجرا گردیده است. این الگوریتم برگرفته از زندگی واقعی مورچه برای یافتن کوتاه ترین مسیر از لانه تا غذا گرفته الهام است. تعمیم این رفتار مورچه به مسائل حوزه ی بهینه سازی، با تمرکز بر مسئله فروشنده دوره گرد^۱ می تواند یکی از روش های مناسب برای رسیدن به جواب بهینه باشد. مطالعات نشان داده که مورچه ها حشراتی اجتماعی هستند که در کلونی ها زندگی می کنند و رفتار آنها بیشتر در جهت بقا کلونی است تا در جهت بقا یک جزء از آن. یکی از مهم ترین و جالب ترین رفتار مورچه ها، رفتار آنها برای یافتن غذا است و به ویژه چگونگی پیدا کردن کوتاه ترین مسیر میان منابع غذایی و آشیانه است. به عبارت دیگر، جمعیت مورچگان به نحوی همیشه قادر هستند تا یک مسیر بهینه را برای تامین منابع غذایی مورد نیاز بیابند. شبیه سازی چنین رفتار بهینه ای، پایه و اساس بهینه سازی کلونی مورچگان را تشکیل می دهد. نام دقیق این الگوریتم، بهینه سازی کلونی مورچگان^۲ است که توسط اغلب افراد به آن الگوریتم مورچگان یا الگوریتم کلونی مورچگان گفته می شود. مدیریت زنجیره تامین به عنوان یکی از مهم ترین ارکان کسب و کارهای امروزی تلقی شده و بخش اعظمی از هزینه های هر سازمان تولیدی و خدماتی در این چرخه، هزینه می شود. از مهم ترین مولفه های کارآمدی هر زنجیره تامین، بر خورداری از یک سیستم حمل و نقل بهینه می باشد که رویکرد ریاضی حاکم بر مدلسازی و بهینه سازی آن را در این مقاله کلونی مورچگان بر عهده دارد.

مقاله پیش رو شامل پیاده سازی الگوریتم ذکر شده برای یک مسئله ی بهینه سازی مرتبط با زنجیره تامین می باشد. کاربرد الگوریتم کلونی مورچگان در یافتن کمترین هزینه، کمترین زمان و بیشینه سازی رضایت مشتری مورد بحث قرار گرفته است و در نهایت با استفاده از داده های موجود سیاست بهینه ارائه خواهد شد.

1 Travelling Salesman Problems
2 Ant Colony Optimization

کلمات کلیدی

بهینه‌سازی شبکه حمل‌ونقل
الگوریتم کلونی مورچگان
برنامه‌ریزی زنجیره تامین
یادگیری ماشین در زنجیره تامین
بهینه‌سازی با استفاده از یادگیری ماشین

مقدمه

هر کسب و کار بین المللی با شبکه تولید و توزیع پیچیده اکنون، بهینه سازی زنجیره تامین را ضروری می‌داند. استراتژی‌های ناکارآمد حتی در پایین‌ترین سطح فعالیت‌های شرکت می‌تواند به طور قابل توجهی روی سودآوری تاثیر بگذارد. کل شبکه توزیع، از مواد خام در مبدأ تا نحوه‌ی تحویل به مشتری، باید مدل سازی شود که این کار به قدرت پردازش زیادی نیاز دارد. انعطاف پذیری یک مزیت رقابتی سیاست جغرافیایی^۳ امروزی، که در حال تحول و پیچیدگی رشد زیادی می‌باشد. مدل سازی زنجیره تامین می‌تواند این انعطاف پذیری را به وجود بیاورد. یک تجارت می‌تواند تأثیر تغییرات در نرخ ارز، تعدیل سیاست مالیات واردات، تغییرات در قیمت نفت و رویدادهای طبیعی مانند کووید ۱۹ را قبل از وقوع شبیه‌سازی کند. این تکنیک‌های مدل سازی در واقع روش‌های بهینه سازی مبتنی بر یادگیری ماشین هستند. ابزارهای برنامه نویسی خطی ترکیبی عدد صحیح^۵، مانند CPLEX، اغلب برای بهینه سازی شبکه‌های مختلف زنجیره تامین استفاده می‌شوند. اگرچه طیف گسترده‌ای از مدل های خطی را می‌توان با استفاده از ابزارهای MILP بهینه حل کرد، اما همه مدل های زنجیره تامین در دنیای واقعی خطی نیستند. به همین دلیل، طیف گسترده‌ای از استراتژی‌های جایگزین برای حل مدل های زنجیره تامین بسیار پیچیده بررسی شده است. یکی از این الگوریتم‌ها، الگوریتم کلونی مورچگان است که به خوبی برای حل مسائل عملی مانند برنامه ریزی و مسیریابی مناسب است. اکثر الگوریتم‌های کلونی مورچگان شامل دو مرحله منحصر به فرد هستند. حل مسئله و بازخورد فرمون به سایر مورچه‌ها. یک مورچه مصنوعی معمولی با استفاده از فرمون^۶ های باقی مانده توسط مورچه‌های دیگر، فرمون خود را ایجاد می‌کند و باعث می‌شود ارتباطات با استفاده از چندین تکرار از طریق ماتریس فرمون به تعداد قابل توجهی انجام شود و همگرا به یک مجموعه جواب بهینه‌ی برتر انجام شود.

³ Geopolitics

⁴ Covid-19

⁵ Mixed Integer Linear Programming

⁶ pheromone

مرور ادبیات

الگوریتم‌های مشتق شده از الگوریتم کلونی مورچگان، زیر مجموعه‌ای از روش‌های هوش ازدحامی^۷ هستند. این دسته روش‌ها، حوزه تحقیقاتی و مطالعاتی به شمار می‌آیند که به مطالعه الگوریتم‌های الهام گرفته شده از مفهوم رفتارهای ازدحامی^۸ می‌پردازند. الگوریتم‌های هوش ازدحامی از مجموعه‌ای از موجودیت‌های فردی ساده تشکیل شده‌اند که از طریق خودسازماندهی^۹ با یکدیگر تعامل و همکاری می‌کنند. منظور از خودسازماندهی، نبود سیستم کنترل مرکزی برای کنترل و ایجاد هماهنگی میان اعضای یک سیستم هوش ازدحامی است.

حشره‌شناس فرانسوی، پیر پائول گراس^{۱۰} اولین محقق بود که رفتار اجتماعی حشرات را مورد بررسی قرار داد. ایشان در بازه سال‌های اولیه دهه ۴۰ میلادی تا اواخر دهه ۵۰ میلادی، به مطالعه و تحقیق در مورد رفتار موریه‌ها پرداخت. در جریان این مطالعات، او به این موضوع پی برد که این گونه حشره‌ای می‌تواند به سیگنال‌های محرک محیطی واکنش نشان دهد. چنین محرک‌هایی، به نوبه‌ی خود، نوعی واکنش برنامه‌نویسی شده ژنتیکی در این موجودات را فعال می‌کند.

این دانشمند، پی برد که تأثیرات این واکنش‌های ژنتیکی (از سوی موریه‌ها) نه تنها می‌تواند به عنوان محرک جدید برای خود موریه‌ها عمل کند (ایجاد واکنش‌های متعاقب دیگر در پاسخ به محرک‌های محیطی)، بلکه دیگر موریه‌های موجود در کلونی را نیز تحت تأثیر قرار می‌دهد و واکنش‌های خاصی را در آن‌ها برمی‌انگیزد. وی از اصطلاح نشانه‌ورزی^{۱۱} برای توصیف این نوع ارتباط غیر مستقیم میان موریه‌ها استفاده کرد. در این ارتباط کد شده ژنتیکی، گونه‌های کارگری حشرات از طریق عملکرد حاصل از تعامل با محیط تحریک می‌شوند و واکنش‌های ژنتیکی خاصی از خود نشان می‌دهند.

این دسته از ارتباطات ژنتیکی و غیر مستقیم میان حشرات، از دو جهت با دیگر وسایل ارتباطی متفاوت است:

- طبیعت فیزیکی و غیر نمادین اطلاعات مبادله شده میان حشرات: این اطلاعات، مترادف با تغییرات حالات محیطی-فیزیکی است که در اثر تعامل حشره با محیط صورت می‌پذیرد.
- طبیعت (ذات) محلی اطلاعات مبادله شده: این دسته از اطلاعات تنها توسط حشراتی قابل دسترسی است که از محیط حاوی این اطلاعات بازدید کرده باشند یا در همسایگی بلافاصله این محیط قرار گرفته باشند. به عبارت دیگر، چنین اطلاعاتی توسط تمامی حشرات موجود در کلونی قابل دریافت نیست و یک فاکتور جغرافیایی در تبادل اطلاعات میان حشرات مؤثر است.

نمونه‌هایی از چنین ارتباطات غیر مستقیمی در کلونی مورچگان نیز قابل مشاهده است. در بسیاری از گونه‌های مورچگان، زمانی که مورچه‌ها از کلونی خود به سمت منابع غذایی حرکت می‌کنند، ماده‌ای را روی زمین منتشر می‌کنند که به آن فرومون گفته می‌شود. مورچه‌های دیگر قادر هستند تا فرومون منتشر شده در محیط را ببینند. وجود فرومون در محیط، مسیر انتخابی توسط مورچگان را تحت تأثیر قرار می‌دهد. به عبارت دیگر، مورچه‌ها معمولاً تمایل دارند مسیر حاوی فرومون غلیظ‌تر را دنبال کنند. فرومون منتشر شده، سبب ایجاد رد فرومون^{۱۲} در محیط می‌شود. رد فرومون به مورچه‌ها این امکان را می‌دهد که بتوانند منابع غذایی مناسبی که پیش از این توسط دیگر مورچه شناسایی شده را پیدا کنند.

⁷ Swarm Intelligence

⁸ Swarm Behaviors

⁹ Self-Organizing

¹⁰ Pierre-Paul Grasse

¹¹ Stigmergy

¹² Pheromone Trail

محققان، در پی مشاهده نتایج آزمایش پل باینری^{۱۳}، در صدد آن برآمدند تا مدلی ریاضی را برای توصیف رفتار بهینه مورچگان توسعه دهند. با فرض اینکه پس از گذشتن t واحد زمانی از زمان آغاز آزمایش، m_1 مورچه از پل اول و m_2 مورچه از پل دوم استفاده کرده باشند، احتمال (p_1) اینکه مورچه $m+1$ پل اول را انتخاب کند در معادله شماره ۱ نشان داده شده است.

$$p_1(m+1) = \frac{(m_1 + k)^h}{((m_1 + k)^h + (m_2 + k)^h)}$$

معادله ۱

در این رابطه، پارامترهای h و k ، پارامترهای مورد نیاز برای برازش^{۱۴} مدل روی داده‌های آزمایش است. همچنین، احتمال اینکه همان مورچه پل دوم را انتخاب کند، از طریق رابطه $p_2 = 1 - p_1$ به دست می‌آید. شبیه‌سازی مونته کارلو^{۱۵} انجام شده روی داده‌های آزمایش نشان می‌دهد که مدل توسعه داده شده با مقادیر پارامترهای $h \approx 2, k \approx 20$ برازش بسیار خوب و مناسبی از داده‌های آزمایش تولید می‌کند. از این مدل ساده می‌توان برای طراحی مورچه‌های مصنوعی استفاده کرد که مسائل بهینه‌سازی را به شیوه مشابه حل می‌کنند.

همان‌طور که پیش از این اشاره شد، ارتباطات غیر مستقیم میان مورچه‌های واقعی از طریق فرومون منتشر شده در محیط انجام می‌شود. به طور مشابه، مورچه‌های مصنوعی می‌توانند فرآیند انتشار فرومون در محیط را از طریق دستکاری مقادیر متغیرهای فرومون متناظر با متغیرهای مسئله شبیه‌سازی کنند. متغیرهای مسئله می‌توانند متناظر با حالاتی در نظر گرفته شوند که مورچه‌های مصنوعی در طول فرآیند تولید جواب بهینه در محیط، با آن‌ها برخورد می‌کنند. همچنین، براساس مدل ارتباطی مبتنی بر فرومون، مورچه‌های مصنوعی به اطلاعات مرتبط با متغیرهای فرومون تنها دسترسی محلی خواهند داشت. بنابراین، مورچه‌های مصنوعی به دو روش قادر خواهند بود خود را با ویژگی‌های شاخص مدل ارتباطی ذکر شده (نشان‌ورزی) سازگار کنند:

۱. ایجاد تناظر میان متغیرهای توصیف کننده حالات محیطی و مقادیر مختلف برای متغیرهای مسئله.
۲. فراهم کردن دسترسی (فقط) محلی به این متغیرها برای عوامل

یکی دیگر از ویژگی‌های رفتاری مهم جمعیت مورچه‌ها که می‌تواند توسط مورچه‌های مصنوعی مورد بهره‌وری قرار بگیرد، جفت‌شدگی میان مکانیزم خودکاتالیز و ارزیابی ضمنی^{۱۶} جواب‌ها است. منظور از ارزیابی ضمنی در رفتار بهینه مورچه‌ها این است که مسیرهای کوتاه‌تر، زودتر از مسیرهای بلندتر توسط مورچه‌ها پیموده می‌شوند؛ در نتیجه، رد فرومون منتشر شده در این مسیر، سریع‌تر توسط مورچه‌های دیگر تقویت می‌شود. مسیر کوتاه‌تر برای مورچه‌های مصنوعی، معادل برازندگی بیشتر یا هزینه کمتر است. بنابراین، جفت‌شدگی میان مکانیزم خودکاتالیز و ارزیابی ضمنی، در صورتی که برای تولید عملگرهای تکاملی مناسب استفاده شود، مکانیزم فوق‌العاده قدرتمندی برای تضمین عملکرد بهینه در الگوریتم‌های بهینه‌سازی مبتنی بر جمعیت خواهد بود.

¹³ Binary bridge

¹⁴ Fitting

¹⁵ Monte Carlo Simulation

¹⁶ Implicit Evaluation

زنجیره تامین نیز مانند بسیاری از موارد دیگر، دارای تعاریف بسیاری است و فعالین حوزه زنجیره تامین، معانی زیادی برای این مفهوم تعریف کرده اند. برای مثال در تعریف سامر اندرسون^{۱۷} داریم:

زنجیره تامین شبکه ای است بین یک شرکت و تامین کنندگان آن برای تولید و توزیع کالا به خریدار نهایی

این شبکه شامل فعالیتها، افراد، نهادها، اطلاعات و منابع مختلفی است و نشان دهنده مراحل است که برای رساندن کالا یا خدمات از مراحل اولیه به مشتری انجام می گیرد. شرکت های مطرح دنیا زنجیره تامین خود را توسعه می دهند تا بتوانند هزینه های خود را کاهش دهند و در فضای رقابتی این روزها، باقی بمانند.

در تعریفی دیگر که در دنیا شناخته شده تر است، زنجیره تامین یعنی شبکه ای از فعالیتها شامل توسعه محصول، بازاریابی، تهیه مواد و نیازهای اولیه، مدیریت ارسال و تدارکات (لجستیک) و... برای تحقق اهداف سازمان.

در واقع زنجیره تامین شامل تمام فعالیت هایی می گردد که کالاها از مرحله ماده خام تا تحویل به مصرف کننده نهایی طی می کنند.

مدیریت زنجیره تامین^{۱۸} فرآیند و فعالیت تامین مواد اولیه یا اجزای سازمانی است که شرکت برای ایجاد یک محصول یا خدمات و ارائه آن به مشتریان نیاز دارد. هدف مدیریت زنجیره تامین، بهبود عملکرد زنجیره تامین است. به بیان دیگر اطلاعات به موقع و دقیق زنجیره تامین به تولیدکنندگان این امکان را می دهد تا فقط محصول قابل فروش را تولید و ارسال کنند. سیستم های زنجیره تامین موثر به تولیدکنندگان و خرده فروشان کمک می کنند تا فعالیت اضافی را کاهش دهند. این امر هزینه تولید، حمل و نقل، بیمه و ذخیره سازی کالاهایی را که قابل فروش نیستند، کاهش می دهد. ۶ جزء اصلی این فرایند عبارتند از:

- برنامه ریزی
- یافتن منابع مناسب
- تولید
- توزیع کالا
- پشتیبانی
- ارزیابی نهایی

برنامه ریزی: شرکتها باید تمام منابع مورد نیاز در راستای تامین تقاضای مشتری برای دریافت محصول یا خدمات خود را برنامه ریزی و مدیریت کنند. آنها همچنین باید زنجیره تامین را طراحی نموده و سپس تعیین کنند که از کدام معیارها استفاده خواهند کرد تا اطمینان حاصل شود که زنجیره تامین کارآمد و موثر است.

یافتن منابع مناسب: منظور از این مهم، همان تامین کنندگانی هستند که شرکتها برای تهیه کالا و خدمات مورد نیاز برای تولید محصول خود انتخاب می کنند. پس از عقد قرارداد، مدیران زنجیره تامین از فرآیندهای مختلفی برای نظارت و مدیریت روابط میان

¹⁷ Somer G. Anderson

¹⁸ Supply Chain Managment

دو طرف بهره می‌برند. فرآیندهای اصلی این بخش شامل سفارش، دریافت، مدیریت موجودی کالا و تأیید مجوز پرداخت‌های تامین‌کننده می‌باشد.

تولید: مدیران زنجیره تامین، فعالیت‌های لازم برای پذیرش مواد اولیه، تولید محصول، آزمایش کیفیت، بسته‌بندی، حمل و نقل و برنامه تحویل را همواره جزو اصول مهم در نظر دارند. بیشتر شرکت‌ها کیفیت، میزان تولید و بهره‌وری کارگران را مورد ارزیابی قرار می‌دهند تا اطمینان حاصل کنند که شرکت محصولاتی مطابق با استانداردهای مورد قبول بازار تولید می‌کند.

توزیع کالا: این امر که معمولاً لجستیک (Logistic) نامیده می‌شود، شامل هماهنگی سفارشات مشتری، تعیین زمان تحویل، ارسال بار، صورت‌حساب مشتری و دریافت پرداختی‌ها می‌باشد. این بخش به وسایل نقلیه برای ارسال محصول به مشتریان متکی است. بسیاری از سازمان‌ها بخش‌های زیادی از فرآیند تحویل را به سازمان‌های متخصص واگذار می‌کنند، به خصوص زمانی که محصول به بررسی‌های خاصی نیاز دارد.

پشتیبانی: تامین‌کننده به یک شبکه پاسخگو و انعطاف‌پذیر برای بازگرداندن محصولات معیوب، مازاد یا ناخواسته نیاز دارد. اگر محصول معیوب بوده یا مطابق استانداردهای مد نظر مشتری نباشد و یا مازاد آنچه سفارش داده شده، به مشتری تحویل داده شود، باید برای بررسی به انبار برگردد.

ارزیابی نهایی: برای کارایی بیشتر، زنجیره تامین به نظارت بر اطلاعات در سراسر زنجیره و اطمینان از انطباق با همه مقررات نیاز دارد. فرآیندهای این مرحله شامل امور مالی، منابع انسانی فناوری اطلاعات، امکانات، مدیریت پورتفولیو، طراحی محصول، فروش و تضمین کیفیت هستند.

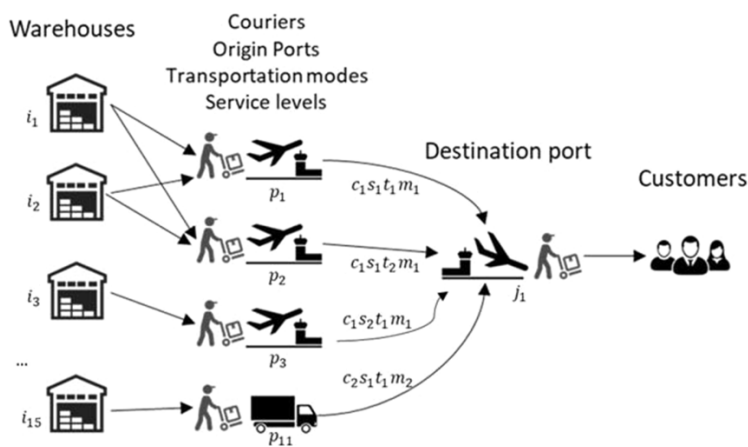
در این مسئله دو بخش تولید و توزیع کالا مورد بررسی قرار می‌گیرد.

بیان مسئله

یک دیتاست واقعی از یک شبکه لجستیک یک شرکت تولیدکننده ریزتراشه^{۱۹} ارائه شده است. این شرکت داده‌های سفارش‌هایی را ارائه کرده که باید از طریق شبکه زنجیره تامین منتقل شوند. این شبکه شامل ۱۵ انبار کالا، ۱۱ مبدا و یک مقصد می‌شود. انبار کالاها محدود به مجموعه خاصی از محصولات هستند، علاوه بر این، برخی از انبارها فقط برای ذخیره مجموعه‌ای خاص از مشتریان اختصاص داده شده‌اند. همچنین، انبارها با محدودیت تعداد سفارش‌هایی که می‌تواند در یک روز پردازش کند مواجه هستند. مشتری به هنگام سفارش دادن تصمیم می‌گیرد به چه نوع سطح خدماتی نیاز دارد.

۱. از مبدا به مشتری
۲. از مبدا به مقصد اولیه
۳. تحویل در انبار به مشتری

اگر چه بیشتر محموله‌ها از طریق حمل‌ونقل هوایی انجام می‌شوند، برخی از سفارشات از طریق زمین و با کامیون‌های حمل بار جابجا می‌شوند. اکثر سفارشات با افزایش وزن نرخ‌های تخفیفی ارائه می‌دهند. با این حال، حداقل هزینه برای حمل‌ونقل وجود دارد که برای سفارشات در مقیاس پایین است. توجه به این نکته حائز اهمیت است که حمل و نقل سریع‌تر با اینکه گران‌تر است، اما رضایت مشتری بهتری را به وجود خواهد آورد. شکل شماره ۱ یک نمونه از بخش از دیتاست است که مدل شده است. قابل به ذکر است که منظور از $c_1 s_1 t_1 m_1$ حمل‌ونقل با پیک c_1 ، سطح خدمات s_1 ، زمان تحویل t_1 و حالت حمل و نقل m_1 می‌باشد.



شکل ۱

آشنایی با داده‌ها

¹⁹ microchip

مجموعه داده به هفت جدول تقسیم می شود، یک جدول برای همه سفارشات^{۲۰} که نیاز به تعیین مسیر دارند جدول OrderList. و شش جدول اضافی که محدودیت‌ها را مشخص می کند. به عنوان مثال، جدول نرخ حمل‌ونقل برای پیک‌های موجود^{۲۱}، نرخ حمل‌ونقل برای هر مسیر و سایر هزینه‌های مرتبط. مسیر حمل‌ونقل^{۲۱} به ترکیب حالت حمل‌ونقل و پیک جابجا کننده اطلاق می‌شود. جدول PlantPorts پیوندهای مجاز بین انبارها و بنادر حمل‌ونقل را توصیف می کند. علاوه بر این، جدول ProductsPerPlant همه ترکیبات انبار-محصول پشتیبانی شده را فهرست می کند. VmiCustomers شامل تمام موارد خاص است، که در آن انبار فقط مجاز به پشتیبانی از مشتری خاص است، در حالی که هر انبار دیگری که در این جدول نیست می‌تواند هر مشتری را پشتیبانی کند. علاوه بر این، WhCapacities ظرفیت‌های انبار را که بر حسب تعداد سفارش‌ها در روز محاسبه می‌شود را لیست می‌کند و WhCosts هزینه‌های مربوط به نگهداری محصولات در یک انبار معین را به واحد دلار اندازه‌گیری می‌کند.

²⁰ FreightRates

²¹ shipping lane

پیش پردازش داده‌ها

برای استفاده از داده‌های موجود در دیتاست ابتدا لازم است این داده‌ها را وارد برنامه‌ی پایتون کرده و سپس یک دیتافریم برای هر کدام از شیت‌های موجود در اکسل تولید کنیم. شکل ۲ نشان دهنده‌ی این بخش از برنامه می‌باشد.

```
# reading in all the csv files
file = pd.ExcelFile("/content/drive/MyDrive/Bachelor Project/Supply chain logisitcs problem.xlsx")
plant_ports = file.parse("PlantPorts")
order_list = file.parse("OrderList")
products_plants = file.parse("ProductsPerPlant")
vmi_plants = file.parse("VmiCustomers")
freight_rates = file.parse("FreightRates")
wh_cost = file.parse("WhCosts")
wh_capacities = file.parse("WhCapacities")
```

شکل ۲

مرحله‌ی بعدی پیش‌پردازش داده‌ها که شامل مواردی چون:

- پالایش داده‌ها
- حذف داده‌های پرت
- حذف داده‌های تکراری
- جلوگیری از حشو
- حذف ستون با اطلاعات ناقص

می‌باشد.

همچنین به منظور اینکه بتوانیم از داده‌های موجود استفاده کنیم لازم است که **type** دیتاها را مطابق با موجودیتشان به عدد صحیح یا عدد اعشاری یا رشته‌ای از حروف در بیاوریم. در شکل ۳ موارد فوق قابل مشاهده می‌باشد.

```

# Data cleaning for order_list

# order_list format conversion
order_list['TPT'] = order_list['TPT'].astype(int)
order_list['Ship ahead day count'] = order_list['Ship ahead day count'].astype(int)
order_list['Ship Late Day count'] = order_list['Ship Late Day count'].astype(int)
order_list['Unit quantity'] = order_list['Unit quantity'].astype(int)
order_list['Weight'] = order_list['Weight'].astype(float)
# drop nulls form order_list
order_list.dropna(inplace=True)
# drop duplicates from order_list

order_list.drop_duplicates(inplace=True)

# Data cleaning for freight_rates

# freight_rates format conversion
freight_rates['minm_wgh_qty'] = freight_rates['minm_wgh_qty'].astype(int)
freight_rates['max_wgh_qty'] = freight_rates['max_wgh_qty'].astype(float)
freight_rates['minimum cost'] = freight_rates['minimum cost'].astype(float)
freight_rates['rate'] = freight_rates['rate'].astype(float)
freight_rates['tpt_day_cnt'] = freight_rates['tpt_day_cnt'].astype(int)
# drop nulls form freight_rates
freight_rates.dropna(inplace=True)
# drop duplicates from freight_rates
freight_rates.drop_duplicates(inplace=True)

# Data cleaning for wh_cost

# wh_cost format conversion
wh_cost['Cost/unit'] = wh_cost['Cost/unit'].astype(float)
# drop nulls form wh_cost
wh_cost.dropna(inplace=True)
# drop duplicates from wh_cost
wh_cost.drop_duplicates(inplace=True)

# Data cleaning for wh_capacities

# wh_cost format conversion
wh_capacities['Daily Capacity '] = wh_capacities['Daily Capacity '].astype(int)
# drop nulls form wh_capacities
wh_capacities.dropna(inplace=True)
# drop duplicates from wh_capacities
wh_capacities.drop_duplicates(inplace=True)

# Data cleaning for products_plants

# drop nulls form products_plants
products_plants.dropna(inplace=True)
# drop duplicates from products_plants
products_plants.drop_duplicates(inplace=True)

# Data cleaning for vmi_plants

# drop nulls form vmi_plants
vmi_plants.dropna(inplace=True)
# drop duplicates from vmi_plants
vmi_plants.drop_duplicates(inplace=True)

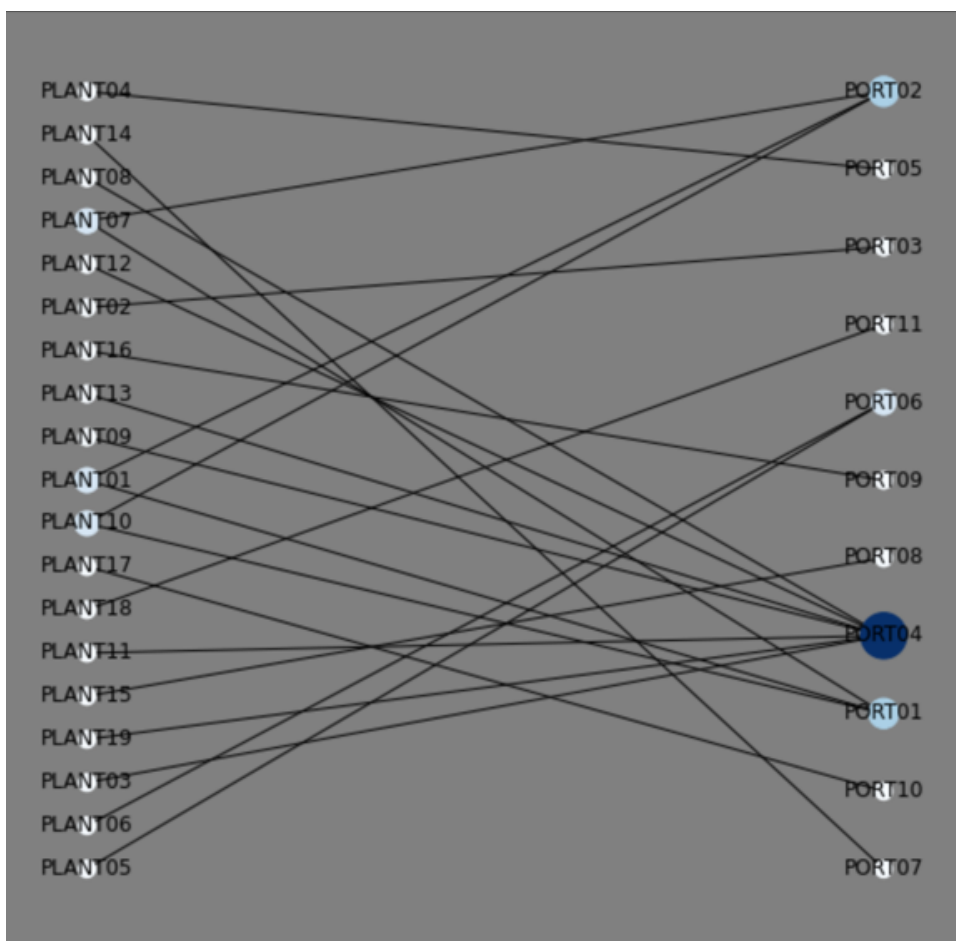
# Data cleaning for

# drop nulls form plant_ports
plant_ports.dropna(inplace=True)
# drop duplicates from plant_ports
plant_ports.drop_duplicates(inplace=True)

```

شکل ۳

حال پیش از شروع سایر مراحل، ارتباط بین داده‌ها را تصویر سازی میکنیم. در شکل ۴ ارتباطات بین هر کدام از انبارها و مقصدهای موجود نشان داده شده است.



شکل ۴

همان‌طور که در شکل ۴ قابل مشاهده است، برخی انبارها تنها به یک مقصد مشخص بار ارسال می‌کنند و در مقابل هر مقصد از انبارهایی خاص بار دریافت می‌کنند. طبق شکل بندر شماره ۴ بیشترین انبار را می‌پذیرد.

توصیف و مدل سازی

هدف اصلی بهینه سازی یافتن مجموعه ای از انبارها، خطوط حمل و نقل و پیک ها برای یافتن مقرون به صرفه ترین شبکه ی ارسال است. بنابراین تابع هدف از دو هزینه متحمل شده تشکیل می شود، هزینه انبار $WC_{k,i}$ و هزینه حمل و نقل $TC_{k,p,j}$. سپس مجموع هزینه در تمام k سفارش موجود محاسبه می شود. معادله شماره ۲ تابع هدف این مسئله می باشد.

$$\min \sum_{k=1}^I (WC_{ki} + TC_{kpj})$$

معادله ۲

که در آن WC هزینه انبار برای سفارش k در انبار i و TC هزینه حمل و نقل برای سفارش k بین انبار p و مشتری j است. نحوه ی محاسبه ی دو عنصر تشکیل دهنده ی تابع هدف در معادلات شماره ۳ و ۴ آورده شده است.

$$WC_{ki} = q_k \times P_i$$

معادله ۳

Transportation cost (TC_{kpj})

1. if $s_k = CRF$
2. then $TC_{kpj} = 0$
3. else if $m = GROUND$
4. then $TC_{kpj} = \frac{R_{pjcostm}}{\sum_{k=1}^I w_{kpjcostm}} \times w_{kpjcostm}$
5. else
6. then $TC_{kpj} = R_{pjcostm} \times w_{kpjcostm}$
7. if $TC_{kpj} < M_{pjcostm}$
8. then $TC_{kpj} = M_{pjcostm}$
9. end if
10. end if

معادله ۴

در معادله شماره ۴ s_k سطح خدمت برای سفارش k ، p پورت مبدا، j پورت مقصد، c نوع پیک، s سطح خدمت، t زمان تحویل، m حالت حمل و نقل است. علاوه بر این، $M_{p,j,c,s,t,m}$ حداقل هزینه برای مسیر مشخص شده است، $w_{k,p,j,c,s,t,m}$ وزن بر حسب کیلوگرم برای سفارش k است و $R_{p,j,c,s,t,m}$ نرخ حمل و نقل (دلار برای هر کیلوگرم) برای وزن های معین بر اساس وزن کل خط انتقال مطابق با جدول نرخ حمل و نقل^{۲۲} است.

²² FreightRates

محدودیت‌ها

محدودیت اول مسئله در معادله شماره ۵ نشان داده شده است.

$$\sum_{k=1}^I o_{ki} \leq c_i$$

معادله ۵

در این معادله $o_{k,i}$ در صورتی ۱ است که سفارش k از انبار i ارسال شده است و در غیر این صورت این عدد برابر با صفر است. $WC_{k,i}$ نیز محدودیت سفارش هر انبار در روز است که از جدول WhCapacities برداشت شده است.

محدودیت دوم مسئله در معادله شماره ۶ قابل مشاهده است. در این معادله $w_{k,p,j,c,s,t}$ وزن به کیلوگرم برای سفارش k ارسال شده از انبار p به مشتری j از طریق پیک c با استفاده از سطح خدمات s ، زمان تحویل t و حالت حمل و نقل m . سمت راست معادله از جدول FreightRates برداشته می‌شود.

$$\sum_{k=1}^I w_{kpjctsm} \leq \max F_{pjctsm}$$

معادله ۶

و در نهایت سومین و آخرین محدودیت را معادله شماره ۷ نشان می‌دهد.

$$k_z \in i_z$$

معادله ۷

این محدودیت به این معناست که محصول z از سفارش k متعلق به انبار i بر اساس جدول ProductsPerPlant است.

حل مدل

پروسه‌ی پیدا کردن کوتاه‌ترین مسیر توسط مورچه‌ها، ویژگی‌های بسیار جالبی دارد، اول از همه قابلیت تعمیم زیاد و خود سازمانده بودن است. در ضمن هیچ مکانیزم کنترل مرکزی ای وجود ندارد. ویژگی دوم قدرت زیاد آن است. سیستم شامل تعداد زیادی از عواملی است که به تنهایی بی‌اهمیت هستند بنابراین حتی تلفات یک عامل مهم، تأثیر زیادی روی کارایی سیستم ندارد. سومین ویژگی این است که، پروسه یک فرایند تطبیقی است. از آنجا که رفتار هیچ‌کدام از مورچه‌ها معین نیست و تعدادی از مورچه‌ها همچنان مسیر طولانی‌تر را انتخاب می‌کنند، سیستم می‌تواند خود را با تغییرات محیط منطبق کند و ویژگی آخر اینکه این پروسه قابل توسعه است و می‌تواند به اندازه‌ی دلخواه بزرگ شود. همین ویژگی‌ها الهام بخش طراحی الگوریتم‌هایی شده‌اند که در مسائلی که نیازمند این ویژگی‌ها هستند کاربرد دارند.

الگوریتم کلونی مورچه الهام گرفته شده از مطالعات و مشاهدات روی کلونی مورچه هاست. این مطالعات نشان داده که مورچه‌ها حشراتی اجتماعی هستند که در کلونی‌ها زندگی می‌کنند و رفتار آنها بیشتر در جهت بقاء کلونی است تا در جهت بقاء یک جزء از آن. یکی از مهمترین و جالبترین رفتار مورچه‌ها، رفتار آنها برای یافتن غذا است و به ویژه چگونگی پیدا کردن کوتاهترین مسیر میان منابع غذایی و آشیانه. این نوع رفتار مورچه‌ها دارای نوعی هوشمندی توده‌ای است که اخیراً مورد توجه دانشمندان قرار گرفته است در دنیای واقعی مورچه‌ها ابتدا به طور تصادفی به این سو و آن سو می‌روند تا غذا بیابند. سپس به لانه بر می‌گردند و ردّی از فرومون (Pheromone) به جا می‌گذارند. چنین ردهایی پس از باران به رنگ سفید در می‌آیند و قابل رویت اند. مورچه‌های دیگر وقتی این مسیر را می‌یابند، گاه پرسه زدن را رها کرده و آن را دنبال می‌کنند. سپس اگر به غذا برسند به خانه بر می‌گردند و رد دیگری از خود در کنار رد قبل می‌گذارند؛ و به عبارتی مسیر قبل را تقویت می‌کنند. فرومون به مرور تبخیر می‌شود که از سه جهت مفید است:

باعث می‌شود مسیر جذابیت کمتری برای مورچه‌های بعدی داشته باشد. از آنجا که یک مورچه در زمان دراز راه‌های کوتاه‌تر را بیش تر می‌پیماید و تقویت می‌کند هر راهی بین خانه و غذا که کوتاه‌تر (بهتر) باشد بیشتر تقویت می‌شود و آنکه دورتر است کمتر. اگر فرومون اصلاً تبخیر نمی‌شد، مسیرهایی که چند بار طی می‌شدند، چنان بیش از حد جذاب می‌شدند که جستجوی تصادفی برای غذا را بسیار محدود می‌کردند. وقتی غذای انتهای یک مسیر جذاب تمام می‌شد رد باقی می‌ماند.

لذا وقتی یک مورچه مسیر کوتاهی (مناسبی) را از خانه تا غذا بیابد بقیه مورچه‌ها به احتمال زیادی همان مسیر را دنبال می‌کنند و با تقویت مداوم آن مسیر و تبخیر ردهای دیگر، به مرور همه مورچه‌ها هم مسیر می‌شوند. هدف الگوریتم مورچه‌ها تقلید این رفتار توسط مورچه‌هایی مصنوعی ست که روی نمودار در حال حرکت اند. مسئله یافتن کوتاهترین مسیر است و حلالش این مورچه‌های مصنوعی اند.

فرایند الگوریتم عبارت است از:

- ۱- تعیین مقدار اولیه برای تابع فرمومون و تابع ابتکاری
- ۲- قرار دادن شهر مبدأ برای هر مورچه در لیست ممنوعه که حق گذر مجدد به آن برای آن مورچه وجود نداشته باشد
- ۳- محاسبه تابع احتمال برای انتخاب شهر بعدی برای هر مورچه در هر شهر
- ۴- تعدیل جمعیت شهرها بابت انتخاب هر مورچه به لیست ممنوعه آن مورچه
- ۵- افزودن شهر انتخابی هر مورچه به لیست ممنوعه آن مورچه
- ۶- تعیین بهترین مسیر
- ۷- بروزرسانی و رفتن به ۳

برای حل این مسئله از الگوریتم کلونی مورچگان که در پیش تر به آن اشاره می کنیم استفاده می کنیم. به این منظور ابتدا در برنامه ی پایتون دو class تعریف می کنیم. سپس از کتابخانه ی ACO-Pants و PuLP به منظور استفاده از الگوریتم ذکر شده و کمک گرفتن از برنامه ریزی خطی و بهینه سازی کمک می گیریم. ۲۴،۲۳

با توجه به اینکه تمام محدودیت ها و همچنین تابع هدف تعریف شده است، حال لازم است با استفاده از موارد ذکر شده داده هایی که از دیتاست وارد شده است را به توابع مربوطه داده و از این طریق به جواب بهینه یعنی مشخص کردن مسیر بهینه برسیم.

²³ <https://pypi.org/project/ACO-Pants/>

²⁴ <https://pypi.org/project/PuLP/>

سیاست بهینه

نتیجه‌ی کد زده شده، شامل یک فایل CSV می‌باشد که در آن برای هر کدام از سفارشات بهترین انبار برای نگهداری محصول، بهترین مقصد برای ارسال محصول، کمترین هزینه‌ی انبارداری و کمترین هزینه‌ی ارسال ذکر شده است. نمونه‌ای از این خروجی در شکل شماره ۶ موجود است.

	min_cost	best_plant	best_port_price	best_port
0	4.756374	PLANT16	2.836567	PORT09
1	4.756374	PLANT16	2.836567	PORT09
2	4.756374	PLANT16	2.836567	PORT09
3	4.756374	PLANT16	2.836567	PORT09
4	4.756374	PLANT16	2.836567	PORT09

شکل ۵

نتیجه گیری

توجه به این مسئله حائز اهمیت است که انواع مختلف الگوریتم بهینه سازی مورچگان وجود دارد.

در پایین تعدادی از انواع شناخته شده از الگوریتم بهینه سازی مورچگان نام برده شده است:

۱. سیستم مورچگان نخبگان

در این روش بهترین راه حل کلی در هر تکرار فرمون آزاد می‌کند. همچنین این روش برای تمام مورچه‌های مصنوعی باید انجام شود.

۲. سیستم مورچگان ماکسیموم، مینیمم

یک مقدار کمینه و بیشینه برای فرمون تعیین کرده و فقط در هر مرحله بهترین جواب این مقدار را آزاد می‌کند و تمام گره‌های مجاور آن به مقدار فرمون بیشینه مقدار دهی اولیه می‌شوند.

۳. سیستم کلونی مورچگان بر اساس رتبه

تمام راه حل‌های بدست آمده بر اساس طول جواب رتبه‌بندی می‌شوند و بر اساس همین رتبه‌بندی مقدار فرمون آزاد سازی شده توسط آن‌ها مشخص خواهد شد و راه حل با طول کمتر از راه حل دیگر با طول بیشتر مقدار فرمون بیشتری آزاد می‌کند.

۴. سیستم مورچه متعامد

در این روش مکانیزم تولید فرمون به مورچه اجازه می‌دهد تا برای رسیدن به جواب بهتر و مشترک با بقیه مورچه‌ها جستجو انجام دهد با استفاده از روش طراحی متعامد مورچه می‌تواند در دامنه تعریف شده خود به صورت مداوم برای بدست آوردن بهترین جواب جستجو کند که این عمل به هدف رسیدن به جواب بهینه و صحیح ما را نزدیک می‌کند. روش طراحی متعامد می‌تواند به دیگر روش‌های جستجو دیگر گسترش پیدا کنند تا به مزیت‌های این روش‌های جستجو اضافه کند.

مزایای روش الگوریتم کلونی مورچگان:

همکاری گروهی میان مورچه‌ها برای تولید جواب‌های بهینه، طبیعت مبتنی بر «توازی» (Parallelism) و «همبستگی» (Solidarity) این روش فرا اکتشافی را نشان می‌دهد.

بازخورد مثبت ایجاد شده از طریق انتشار فرومون در محیط، سبب همگرایی سریع به جواب‌های خوب برای مسأله بهینه‌سازی می‌شود.

برای استفاده در کاربردهای پویا (کاربردهایی که نیاز به انطباق سریع با تغییرات محیطی ضروری است) مناسب است. همگرایی به جواب بهینه، تضمین شده است.

معایب روش الگوریتم کلونی مورچگان:

تجزیه و تحلیل نظری این روش بسیار سخت است.

این روش، بر پایه دنباله‌ای از تصمیمات تصادفی ولی وابسته به هم بنا نهاده شده است.

زمان لازم برای همگرایی به جواب بهینه نامشخص است.

با توجه به فراابتکاری بودن الگوریتم، جواب بهینه یکتا نیست. الگوریتم‌های مشتق شده‌ای که در بالا آمده است، به مراتب از الگوریتم کلونی مورچگان ساده، جواب بهتری را تولید می‌کند اما به تناسب نیاز به سخت‌افزاری بالاتر می‌باشد. طبق اعداد بدست آمده در مقاله‌ی مرجع این پروژه [1] برای رسیدن به جوابی با ۹۹ درصد دقت، با سخت‌افزاری با مشخصات:

CPU: AMD Ryzen™ Thread ripper™ 1950X (16 cores, 32 threads), running at 3.85 GHz.

RAM: 64 GB 2400 MHz DDR4, 4 channels.

OS: Windows 10 Pro, version 1703

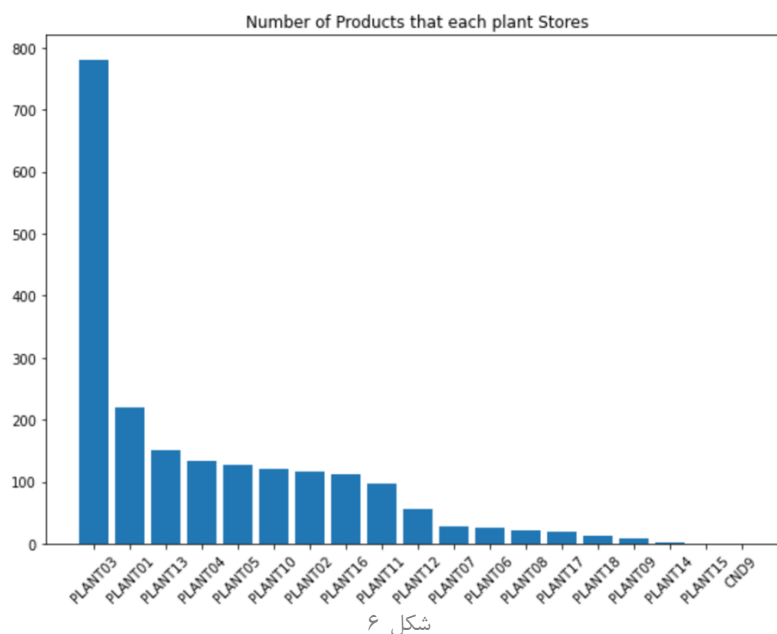
GPUs: 4x Nvidia GTX1070, 8 GB GDDR5 per GPU, 1.9 GHz core, 4.1 GHz memory. PCIe with 16x/8x/16x/8x.

Toolchain: Visual Studio v140 toolset, Windows SDK version 8.1, x64, CUDA 9.0, compute_35, sm_35

زمانی برابر با ۷۵۱ ثانیه مورد نیاز است. برای افزایش دقت از ۹۹ درصد به ۹۹.۹ درصد، زمان اجرای برنامه به ۳۷۷۱۹ ثانیه افزایش پیدا می‌کند.

هرچند با توجه به اینکه برنامه‌ی پیوست شده‌ی این مقاله در سرور گوگل^{۲۵} اجرا شده است، همچنین از ساده‌ترین نوع الگوریتم کلونی مورچگان استفاده شد (در هر اجرا یک کلونی به دنبال جواب بهینه می‌گردد و با تکرار برنامه چند کلونی جواب‌های متفاوتی پیدا می‌کنند و بهترین جواب به عنوان جواب بهینه انتخاب می‌شود) کد ذکر شده می‌تواند قابل اطمینان باشد.

در شکل ۶ و ۷ اطلاعات و نتایجی در ارتباط با سیاست بهینه نشان داده شده است که در ادامه به تعریف و تفسیر آن‌ها می‌پردازیم.

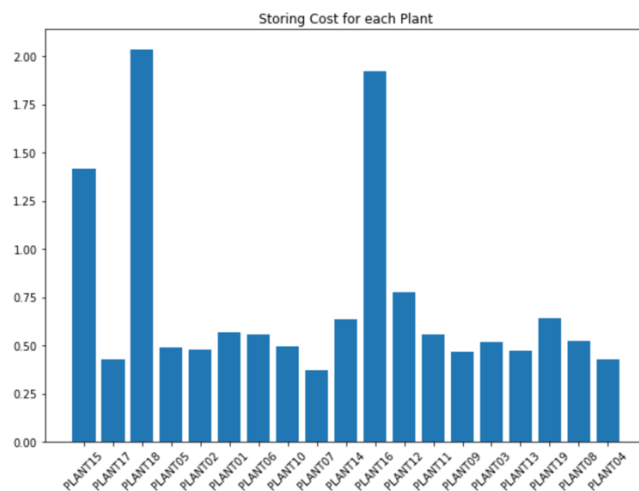


شکل ۶

²⁵ <https://colab.research.google.com/>

با توجه به این نمودار، در صورتی که از سیاست بهینه‌ی به دست آمده استفاده کنیم تعداد محصولاتی که در هر انبار نگهداری می‌کند مطابق شکل ۶ خواهد بود.

از طرفی هزینه نگهداری و انبارداری برای هر انبار مطابق شکل ۷ خواهد بود.



شکل ۷

برای مثال توجه به این نکته حائز اهمیت است که در انبار شماره ۳ بیشترین تعداد محصول نگهداری می‌شود اما هزینه‌ی انبارداری برای انبار شماره ۱۶ با تعداد محصولات به مراتب کمتر، بسیار بیشتر است. از این مورد می‌توان به این نتیجه رسید که محصولات بسیار متفاوت هستند و نرخ نگهداری یکی از مهم‌ترین معیارهایی است که در نحوه‌ی توزیع کالا باید به آن توجه کرد.

- [1]
Ivars Dzalbs, Tatiana Kalganova,
Accelerating supply chains with Ant Colony Optimization across a range of hardware solutions,
Computers & Industrial Engineering,
Volume 147,
2020,
ISSN 0360-8352,
<https://doi.org/10.1016/j.cie.2020.106610>
- [2]
Ulrich Teschemacher, Gunther Reinhart,
Ant Colony Optimization Algorithms to Enable Dynamic Milkrun Logistics
Procedia CIRP,
Volume 63,
2017,
ISSN 2212-8271,
<https://doi.org/10.1016/j.procir.2017.03.125>
- [3]
C.A. Silva, J.M.C. Sousa, T.A. Runkler, J.M.G. Sá da Costa,
Distributed supply chain management using ant colony optimization,
European Journal of Operational Research,
Volume 199,
2009,
ISSN 0377-2217,
<https://doi.org/10.1016/j.ejor.2008.11.021>
- [4]
M. Dorigo, M. Birattari and T. Stutzle,
Ant colony optimization
IEEE Computational Intelligence Magazine,
Volume 1,
2006,
doi: 10.1109/MCI.2006.329691
- [5]
Maniezzo, V., Gambardella, L.M., de Luigi, F,
Ant Colony Optimization. In: New Optimization Techniques in Engineering,
Fuzziness and Soft Computing,
Volume 141,
2004,
https://doi.org/10.1007/978-3-540-39930-8_5
- [6]
Jiangtao Hong, Ali Diabat, Vinay V. Panicker, Sridharan Rajagopalan,
A two-stage supply chain problem with fixed costs: An ant colony optimization approach,
International Journal of Production Economics,
Volume 204,
2018,
ISSN 0925-5273,
<https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2018.07.019>