

طراحی الگوی ریاضی مسیریابی موجودی‌ها در زنجیره تأمین با بررسی موردی در شرکت دونار خزر

داریوش محمدی زنجیرانی^۱، مجید اسعدی آقاجری^۲

۱. استادیار گروه مدیریت صنعتی دانشگاه خلیج فارس، بوشهر، ایران
۲. دانشجوی کارشناسی ارشد مدیریت صنعتی دانشگاه خلیج فارس، بوشهر، ایران

(تاریخ دریافت: ۱۳۸۸/۶/۲۸، تاریخ تصویب: ۱۳۸۸/۱۰/۲۷)

چکیده

هماهنگی و یکپارچه‌سازی مراحل و رده‌های مختلف در یک زنجیره تأمین، به تعادل مبادلات بین مراکز و دسترسی به عملکرد برتر در آن زنجیره خواهد انجامید [۴]. با توجه به رابطه معکوس میان دو دسته هزینه‌های موجودی و هزینه‌های حمل و نقل، مسیریابی موجودی‌ها، به مسأله هماهنگی موثر سیاست‌های بازسازی و برنامه‌های توزیع موجودی‌ها در سطح مراکز یک زنجیره تمرکز دارد. در واقع مسیریابی موجودی دو جزء مهم از زنجیره تأمین، یعنی فعالیت‌های حمل و نقل و کنترل موجودی را ادغام می‌نماید. در مسیریابی موجودی‌ها، یک یا چند مرکز توزیع موجودی به موازات مجموعه‌ای متفاوت و غالباً پرشمار از مراکز فروش که هر یک دارای نرخ تقاضای بخصوصی می‌باشند، وجود خواهد داشت. مقاله حاضر، هماهنگ‌سازی دو مولفه مهم حمل و نقل و کنترل موجودی زنجیره‌های تأمین را در قالب یک مدل برنامه‌ریزی ریاضی عدد صحیح به تصویر کشیده است. در بخش اول مقاله، به بیان مسأله و اهمیت آن پرداخته شده، دسته‌بندی و مرور مطالعات مرتبط با مبانی تئوریک مسأله در بخش دوم ارائه شده است. بخش سوم، به تبیین الگوی ریاضی طراحی شده، روش‌های جمع‌آوری اطلاعات و شیوه‌های محاسبه پارامترهای مدل پرداخته و بالاخره در بخش پایانی مقاله، تحلیل جواب‌ها و نتایج عددی حاصل از اجرای مدل در بررسی موردی یک زنجیره تأمین تجاری ارائه شده است.

واژه‌های کلیدی: مسیریابی موجودی، زنجیره تأمین، توزیع ناب، مدل ریاضی عدد صحیح، متوسط‌گیری فازی

۱- مقدمه و بیان مسأله

نحوه برنامه‌ریزی وسایل نقلیه به منظور تحویل گرفتن قطعات و محصولات مورد نیاز از تامین کنندگان یا مراکز توزیع و تحویل آنها به شرکت‌های تولیدی و یا فروشگاه‌ها، علاوه بر تأثیر مستقیمی که بر هزینه‌های حمل و نقل دارد، در سطح هزینه‌های مربوط به نگهداری موجودی قطعات و محصولات نیز نقش بسزایی دارد [۱۱].

تقابل هزینه‌های حمل و نقل و انبارداری در بخش توزیع محصولات و خدمات، موضوع تمرکز فعالیت‌های برنامه‌ریزی است. هدف اصلی این بخش را بایستی حداقل نمودن موجودی انبار خرده‌فروشان (مراکز) و در عین حال ممانعت از کمبود موجودی هر یک از محصولات قلمداد نمود. از طرف دیگر، حداقل نمودن موجودی انبار در مراکز فروش، منجر به افزایش دفعات حمل می‌شود. حال مسأله این است که تا چه اندازه‌ای تعداد دفعات حمل می‌تواند افزایش یابد و در عین حال هزینه کل سیستم توزیع و انبارداری نیز در سطح مناسب قرار داشته باشد؟ لذا بهبود سیستم حمل و نقل، به منظور اطمینان از در دسترس بودن به موقع قطعات و محصولات مورد نیاز، از جایگاه ویژه‌ای برخوردار بوده و برنامه‌ریزی فروشندگان برای انبار خرده فروش تابع دیدگاه نوین «کنترل موجودی توسط فروشنده» است.

در سیستم توزیع ناب، حداقل مقدار تحویل هر یک از محصولات به خرده‌فروشان، تابع طول مسیر حرکت یا مدت زمان گردش وسیله نقلیه است. طول مدت زمان گردش هر وسیله نقلیه نیز به تعداد و توالی سرویس‌دهی به مشتریان یا خرده فروشان بستگی دارد. بنابراین، برای خرده فروشان (مراکز توزیع) ایده‌آل‌ترین حالت آن است که برای هر کدام از آنها یک وسیله نقلیه تخصیص داده شود تا طول مسیر حرکت و در نتیجه مقدار موجودی‌ها و هزینه‌های مربوط به خواب سرمایه (ذخیره موجودی) حداقل شود. چنین وضعیتی استفاده از تعداد زیادی وسیله نقلیه با ظرفیت پایین را ایجاب می‌کند. بدیهی است استفاده از وسایل نقلیه با ظرفیت کوچک، غالباً افزایش هزینه‌ها را بدنبال خواهد داشت. لذا در سیستم توزیع ناب اختصاص یک وسیله نقلیه به هر مشتری (مرکز)، مقرون به صرفه نبوده [۲] و مسیریابی وسایل نقلیه، به منظور ایجاد شرایط حمل چندین محصول توسط یک وسیله نقلیه (با ظرفیتی بزرگ) به چندین مشتری و در عین حال کاهش هزینه‌های مربوط به نگهداری محصولات در مراکز دریافت، مهم تلقی می‌شود.

مسیریابی وسایل نقلیه در سیستم‌های توزیع به هنگام، در چهارچوب محدودیت‌های موجود و با توجه به ضریب مصرف محصولات، می‌تواند به نحوی انجام گیرد که طول بازه یا پنجره زمانی مصرف، طول مسیر حرکت یا گردش وسایل نقلیه، حجم محصولات در هر یک از تحویل‌ها و تعداد وسایل نقلیه مورد نیاز به‌طور همزمان کاهش داده شود. به‌علاوه، هدف این است که موجودی هر یک از محصولات موجود در انبار خرده‌فروشان نیز هنگام تحویل محصولات (در هر تواتر تحویل) در حداقل مقدار ممکن باشد. بنابراین بهره‌گیری از مسیریابی وسایل نقلیه در سیستم توزیع ناب، افزایش انعطاف‌پذیری سیستم حمل و نقل در پاسخ‌گویی به نوسانات نیازهای بازار، کاهش هزینه‌ها و افزایش بهره‌وری را بدنبال خواهد داشت. این عوامل، انگیزه اصلی مسیریابی وسایل نقلیه برای تأمین بهنگام محصولات در سیستم توزیع ناب محسوب می‌شود.

مقاله حاضر، ادغام دو موضوع اساسی " مسیریابی وسایل نقلیه و کاهش هزینه‌های نگهداری مواد و محصولات " را در قالب یک مدل برنامه‌ریزی ریاضی بررسی می‌نماید، لذا مسأله حاصل را می‌توان در زمره مسایل مسیریابی موجودی قلمداد نمود.

برنامه‌ریزی، همزمان‌سازی و هماهنگی دو سیستم کنترل موجودی و حمل و نقل در یک بررسی موردی از یک شبکه توزیع بازرگانی در داخل کشور، مسأله اصلی این تحقیق بوده است. برای پرداختن به طراحی مدل، وضعیتی تصور می‌شود که یک انبار مرکزی معین و چندین خرده‌فروش (مرکز) دارای نرخ تقاضای ثابت یا متفاوت، برای هر یک از محصولات وجود داشته باشد. تعداد بهینه خودروهای مورد نیاز در این شبکه نیز توسط مدل تعیین خواهد شد. در ابتدا ضرورت دارد تا بر مبنای متدولوژی تحقیق، حد بالایی برای تعداد خودروهای موجود در این شبکه توزیع برآورد شود. بدیهی است این مقدار در تعداد محدودیت‌ها و نیز تعداد گردش مسیرها توسط مدل تأثیر خواهد داشت. در عالم واقع، این حد بالا می‌تواند تعداد خودروهای در دسترس باشد. تعداد خودروهای در دسترس بایستی انعطاف‌پذیر باشند چرا که در نهایت، تعداد بهینه آنها بر اساس برنامه‌ریزی موجودی و حمل و نقل تعیین خواهد شد.

۲. اهمیت و هدف پژوهش

در بررسی عمیق‌تر مسأله مورد بررسی، نکات چندی دریافت می‌شوند، از جمله این که از یک سو، در راستای کاهش هزینه‌های حمل و نقل بهتر است که حجم محصول در هر بار سفارش بیشتر باشد و از سوی دیگر به طور متقابل، برای کاهش هزینه‌های انبارداری و فرصت از دست رفته سرمایه خوابیده در انبار نیز معقول است که مقدار سفارش به حداقل برسد. مدل‌های زیادی برای حل این تناقض ارایه شده‌اند که معروف‌ترین آنها مدل "میزان بهینه سفارش" است. با این حال، در هیچ یک از آنها به موارد زیر به صورت همزمان توجه نشده است.

(۱) کاهش تعداد خودروهای حامل مواد یا محصولات، (۲) حداقل نمودن مسیر پیمایش خودروها، (۳) بهنگام نمودن بازپرسازی انبار مشتریان، با توجه به نرخ مصرف هر محصول در هر کدام از آنها.

مدل طراحی شده در این تحقیق؛ علاوه بر اهداف عمومی مدل‌های کنترل موجودی، موارد فوق را نیز لحاظ نموده است، لذا در نوع خود، مدلی منحصر به فرد و نوآورانه محسوب شده و از این نقطه نظر دارای اهمیت زیادی در کاهش هزینه‌های عملیاتی در فرایند حمل و نگهداری موجودی‌ها است. هم‌چنین، با طراحی یک مدل ریاضی می‌توان بررسی‌های بیشتری را با تحلیل حساسیت پارامترهای آن دامن زد.

۳. پیشینه تحقیق

همان‌طور که در بخش قبلی ذکر شد، مسأله برنامه‌ریزی ناوگان حمل و نقل به منظور اخذ محصولات از انبار مرکزی و تحویل آنها به خرده فروشان (مراکز فروش)، حالت توسعه یافته‌ای از مسأله مسیریابی وسیله نقلیه و بالاخص مسأله مسیریابی با محدودیت پنجره‌های زمانی است. مسأله مسیریابی موجودی نیز از خانواده مسایل مسیریابی خودروها است. با وجود این، تفاوت‌هایی نیز با مسایل مسیریابی سنتی دارد که در بخش حاضر به بیان آنها پرداخته می‌شود. در سال‌های اخیر با توجه به رویکردهای تسهیم اطلاعات در رابطه با تقاضا و تهیه و تأمین موجودی در بین شرکای زنجیره تأمین، مسأله توزیع اهمیت بیشتری پیدا کرده است و شرکت‌ها به طور فزاینده‌ای از مدل‌های هماهنگی بازپرسازی و حمل و نقل برای مدیریت سیستم توزیع خود استفاده کرده‌اند.

مسئله مسیریابی موجودی (IRP) از جمله مسائلی است که به ادغام دو فرآیند مهم مدیریت زنجیره تأمین یعنی فرایندهای توزیع و کنترل موجودی می‌پردازد. در رابطه با هر دو موضوع تحقیقات بسیاری انجام گرفته است. ولی در این تحقیقات نیز به بررسی تأثیر متقابل آنها کمتر توجه شده است. با این حال تحقیقات پیشین بر این نکته نیز صحه گذاشته‌اند که ادغام این دو عنصر زنجیره تأمین می‌تواند مزیت‌هایی اساسی برای کل زنجیره تأمین (از دیدگاه زنجیره تأمین یکپارچه) به ارمغان آورد. IRP، در مدل کسب و کار کنترل موجودی توسط فروشنده (VMI)، قابلیت اجرا پیدا می‌کند [۳]. بر اساس استراتژی VMI، فروشنده (تأمین کننده) در تعیین زمان و مقدار محصولی که به مشتری تحویل می‌دهد، با این شرط که مشتری هیچ وقت با کمبود کالا مواجه نشود، آزادی عمل دارد. منابع [۹،۳] اطلاعات بیشتری را در این زمینه ارائه نموده‌اند.

امانوئل و همکاران وی در مطالعات خود (بر مبنای افق زمانی برنامه ریزی) تحقیقات علمی انجام گرفته در زمینه IRP و نیز مدل‌ها و رویکردهای مربوط به آنها را در سه دسته طبقه‌بندی کردند: ۱) مدل‌های یک دوره‌ای؛ ۲) مدل‌های چند دوره‌ای؛ ۳) مسایل با دوره‌های نامحدود [۵].

پی مینگ چن و چوون تالین در تحقیقی بیان داشتند که مدیریت زنجیره تأمین در مسایل IRP با دو نوع محدودیت مواجه است: محدودیت‌های مربوط به حمل و نقل و محدودیت‌های مربوط به سیاست‌های موجودی. این سیاست‌ها در مدل مورد طراحی آنها، به شکل متغیرهای تصمیم یا محدودیت‌ها ظاهر می‌شدند [۱۲].

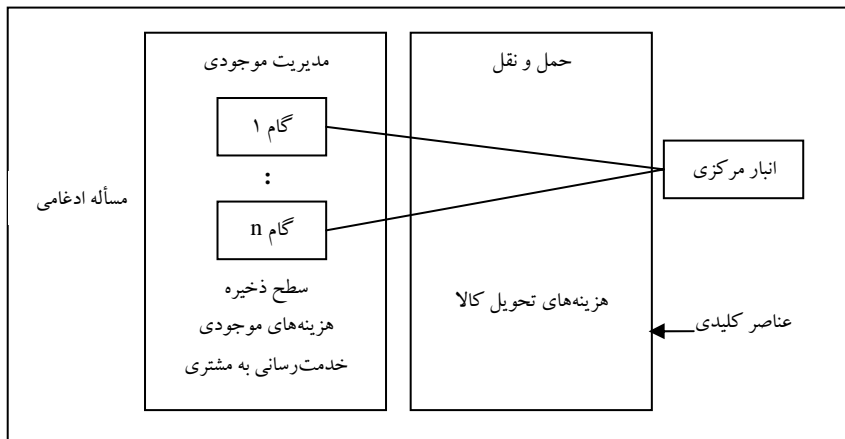
چندی بعد، یوگانگ یو و همکاران، یک مسئله IRP با محدودیت‌های تحویل‌های جداگانه و اندازه ناوگان خودروها را بررسی کردند که در آن یک محصول از یک انبار مرکزی (کارخانه) به تعدادی مشتری در طول یک افق برنامه‌ریزی توزیع می‌شد. در این تحقیق رویکردی ابتکاری و تقریبی ارائه شد که با استفاده از تکنیک آزادسازی لاگرانژی (LR) حل شده است [۱۳].

بیرگرا و الحسین عاقزاف در مطالعه دیگری یک مسئله بهینه‌سازی را بررسی کردند که از رویکرد (VMI) برخاسته بود. در این تحقیق، علاوه بر محدودیت‌های عمومی مسئله IRP محدودیت‌های اضافه‌تری نیز که در عمل رخداد آنها اجتناب‌ناپذیر است، اعمال شدند [۳].

ژندونگ پن و همکاران در تحقیق مستقلی، برنامه‌ریزی همزمان موجودی و حمل و نقل را در حالت محدودیت‌های منعطف وسایل نقلیه، مورد بررسی قرار دادند. مسأله مورد بررسی در این مقاله در قالب یک مسأله برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط فرموله شده بود. نتایج حاصل بیانگر این بود که تعادل خوبی بین هزینه‌های موجودی و هزینه‌های حمل و نقل توسط این الگوریتم ابتکاری به وجود آمده بود [۱۴].

سیلا چتین کایا و همکاران در مقاله‌ای سیاست‌های مختلف حمل و نقل و تاثیر آنها بر مقدار و تناوب بازپرسازی انبار را مورد بررسی قرار دادند. در حال حاضر انواع متفاوتی از این سیاست‌ها در عمل بکار برده می‌شود. دو نوع پرکاربرد از این سیاست‌ها، "توزیع و حمل و نقل بر اساس زمان" و "توزیع و حمل و نقل بر اساس مقدار" می‌باشد. نتایج عددی این تحقیق نشان می‌دهد که صرفه‌جویی در هزینه‌ها در سیاست توزیع بر اساس مقدار بیشتر است. ولی با در نظر گرفتن رضایت و زمان انتظار مشتریان، استفاده از یک سیاست ادغامی می‌تواند باعث صرفه‌جویی بیشتر در هزینه کل شود [۱۱].

نمودار ۱، یک زنجیره تامین دو سطحی را با یک انبار مرکزی نشان می‌دهد. اگر چه هر دو مسأله مدیریت موجودی و حمل و نقل در عمل به صورت یکی بعد از دیگری حل می‌شوند، ولی بایستی توجه داشت که این دو مسأله به یکدیگر وابستگی داشته و هدف مقاله حاضر نیز مطالعه این وابستگی است [۹].



نمودار ۱. مسأله ادغامی مدیریت موجودی و حمل و نقل [۹]

۴. سوال‌های پژوهش

در هنگام طراحی یک الگوی ریاضی جهت بهینه‌سازی همزمان تعداد خودروها، مسیر حرکت خودروها و موجودی انبار خرده‌فروشان در سیستم توزیع ناب، سوالات زیر مطرح هستند:

سوال اصلی:

چگونه می‌توان مسأله همزمان سازی مسیریابی و کنترل موجودی در سیستم توزیع ناب را با رویکرد مدل ریاضی دقیق مدلسازی نمود؟

سوالات فرعی:

آیا الگوی ریاضی طراحی شده باعث ایجاد بهبود در هزینه‌های حمل و نقل می‌شود؟
آیا الگوی ریاضی طراحی شده باعث ایجاد بهبود در هزینه‌های نگهداری محصولات در انبار خرده‌فروشان می‌شود؟

۵. روش تحقیق

قدرمسلّم، روش تحقیق حاضر از نوع تحلیلی/ریاضی است و مشتمل بر طراحی مدل، تعیین جامعه و نمونه، تهیه جدول‌های جمع‌آوری اطلاعات، تعیین روش‌های تجزیه و تحلیل اطلاعات و محاسبه پارامترهای مدل، حل مدل، بررسی اعتبار مدل طراحی شده و در نهایت تحلیل نتایج به دست آمده است. در بررسی موردی تحقیق حاضر، جامعه آماری شامل شرکت تولیدی صنعتی دونا ر خزر و شرکت‌های حمل و نقل همکار این شرکت در فاصله زمانی فروردین الی اسفندماه ۱۳۸۷ است.

۶. مفاهیم و پیش فرض‌های طراحی مدل

به منظور اینکه درک خواننده از ابعاد مدل طراحی شده، وضوح بیشتری داشته باشد، در ذیل به تعدادی از مهمترین پیش‌فرض‌های آن اشاره می‌شود:

- انبار مرکزی همواره توانایی تأمین محصولات مورد نیاز را داشته و هیچ کمبودی مجاز نمی‌باشد.
- تنوع محصولات مورد نیاز خرده‌فروشان بایستی در مدل ریاضی لحاظ گردد.
- نرخ مصرف هر یک از محصولات، نزد خرده‌فروشان طی دوره برنامه‌ریزی ثابت بوده و تغییری نخواهد داشت.

- مقدار تحویل هریک از محصولات بستگی به طول مسیر حرکت یا مدت زمان گردش وسیله نقلیه مربوطه داشته و هر چه مدت زمان گردش بیشتر باشد مقدار محصولات بیشتری باید تحویل داده شود و برعکس.
- ظرفیت وسایل نقلیه مختلف، متفاوت است. زیرا یک ناوگان حمل و نقل معمولاً دارای وسایل نقلیه متفاوتی است و استفاده از هر یک از آنها برای حجم مشخصی از بار توجیه پذیر است.
- ماتریس زمان سفر (با ابعاد مسافت یا هزینه)، نامتقارن بوده و تمامی درایه‌های آن، اعداد صحیح است. معمولاً به دلیل محدودیت‌های ترافیکی، مدت زمان رفت و برگشت بین دو نقطه با هم متفاوت است.

۷. طراحی و تجزیه و تحلیل مدل

با توجه به الزامات و پیش فرض‌های مدل و نیز ماهیت متغیرهای تصمیم، مدل ریاضی مسأله از دو تابع هدف مجزا و چهارده نوع محدودیت مستقل تشکیل شده است.

۷-۱. تعریف علائم و نمادهای مورد استفاده در مدل

علائم و نمادهایی که در مدل ریاضی فوق بکار گرفته شده‌اند، به شرح زیر است:

P : مجموعه انواع محصولات، $P = \{1, 2, \dots, m\}$ و نیز داریم $(k \in P)$.

PP : مجموعه تمامی ترکیبات دوتایی محصولات، $PP = \{(k, h) | k, h \in N, k \neq h\}$

R : مجموعه خرده فروشان، $R = \{1, 2, \dots, r\}$. تعداد خرده فروشان.

N : مجموعه تمامی گره‌های گراف مسأله (خرده فروشان به علاوه انبار مرکزی)

$N = \{1, 2, \dots, n\}$ $n = r + 1$

$Arcs$: مجموعه تمامی سویه‌های ارتباط دهنده بین هر دو گره عضو N است.

$Arcs = \{(i, j) | i, j \in N, i \neq j\}$

G : شبکه (گراف) مسأله، متشکل از دو مجموعه N و A است، یعنی $G = (N, A)$.

CW : مجموعه انبار مرکزی که تنها یک عضو دارد. $CW = N - R$.

S : مجموعه گره‌های هر زیر گردش (هر زیر گردش حلقه بسته‌ای از گره‌هاست که شامل انبار مرکزی نباشد).

Vehicles Set (VS): مجموعه ناوگان حمل و نقل به تعداد f دستگاہ خودرو، که در

آن f یک حد بالای تخمینی است. $VS = \{1, 2, \dots, f\}$.

t_{ij} : زمان سفر از گره i به j .

$size_k$: فضای مورد نیاز برای محصول نوع k . $(k \in P)$.

k : زمان مورد نیاز برای بارگذاری محصول نوع k ام بر روی خودرو.

U_k : زمان مورد نیاز برای تخلیه محصول نوع k ام از روی خودرو.

d_{kj} : نرخ مصرف (فروش) محصول نوع k ام در گره j ام، بر حسب تعداد در واحد زمان.

C_v : حداکثر ظرفیت قابل حمل توسط خودروی v ام.

MTS_{kj} : حداکثر طول بازه زمانی مجاز برای تحویل قطعه k ام به گره j ام.

M : یک عدد بسیار بزرگ مثبت.

۲-۲. تعریف متغیرهای تصمیم

متغیرهای تصمیم مورد استفاده در تحقیق حاضر از نوع عدد صحیح هستند. بیان ریاضی این

متغیرها به صورت زیر است:

$$X_{ijv} = \begin{cases} 1 & \text{اگر خودروی } v \text{ عهده دار خدمتدهی به گره } i \text{ و سپس گره } j \text{ باشد} \\ 0 & \text{در غیر این صورت} \end{cases}$$

متغیر اشاره شده بالا از نوع عدد صحیح دودویی (باینری) است. متغیر تصمیم بعدی نیز

به صورت زیر تعریف می‌گردد:

Q_{kij} : تعداد محصولات نوع k که توسط خودروی v به گره j حمل می‌شود.

متغیر تصمیم فوق نیز از نوع عدد صحیح است.

۳-۲. تعریف توابع هدف

در مدل ریاضی مسأله، دو تابع هدف تبیین شده‌اند. بیان ریاضی اولین تابع هدف عبارت

است از:

$$MinZ = \sum_{j=1}^r \sum_{v=1}^f X_{njv} \quad (1)$$

رابطه (۱) درصد حداقل سازی تعداد وسایل نقلیه مورد استفاده است، بدیهی است در صورت وجود ظرفیت‌های مختلف ناوگان حمل و نقل، مدل ریاضی همواره تمایل دارد تا حد امکان از وسایل نقلیه‌ای با ظرفیت بزرگ‌تر استفاده نماید. تابع هدف دوم، در راستای یافتن حداقل متوسط موجودی هر یک از محصولات در انبار هر کدام از خرده‌فروشان به شرح زیر طراحی شده است:

$$MinZ = \sum_{k=1}^m \sum_{j=1}^r \sum_{v=1}^f Q_{kjh} \quad (2)$$

برای حل مسایلی با چنین توابع هدفی، روش‌های مختلفی وجود دارد. با توجه به اینکه توابع هدف مسأله از یک جنس نبوده و نیز دارای واحد مشترک نیستند، لذا بهتر است از روش لکسیکوگرافیک به عنوان روشی مناسب جهت حل مسأله استفاده نمود.

۴-۷. تعریف محدودیت‌ها

همان‌طور که اشاره شد، محدودیت‌هایی که ناشی از الزامات و شرایط مدل‌سازی مسأله تحقیق حاضر هستند، دارای ۱۴ نوع می‌باشند که بر حسب اولویت بکارگیری در مدل طراحی شده، به ترتیب ذیل شرح داده می‌شوند:

$$X_{iv} = 0 \quad \forall i \in R, \forall v \in Vehicles \ Set(VS) \quad (3)$$

این محدودیت بیانگر این است که هیچ یک از وسایل نقلیه اجازه ندارد بلافاصله به گرهی که حرکت را از آن آغاز نموده است، برگردد. به عبارت دیگر، در گراف مسأله نباید هیچ کمانی (مسیر) دارای ابتدا و انتهای یکسان باشد. [۷]

$$\sum_{j=1}^r X_{njv} = 1; \quad \forall v \in VS \quad (4)$$

رابطه فوق حاکی از آن است که نقطه شروع سفر هر یک از وسایل نقلیه باید انبار مرکزی باشد. چراکه وسایل نقلیه در ابتدا بایستی از انبار مرکزی بارگیری کرده و سپس به سوی خرده‌فروشان حرکت نمایند. [۷،۶]

$$\sum_{i=1}^r X_{inv} = 1; \quad \forall v \in V \quad (5)$$

محدودیت شماره ۵، نشان دهنده این است که نقطه پایان سفر نیز برای هر کدام از وسایل نقلیه انبار مرکزی است. وسایل نقلیه بایستی بعد از پیمایش مسیر مشخص شده و اتمام محموله، برای بارگیری بعدی به انبار مرکزی مراجعه نماید.

$$\sum_{v=1}^f \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq j}}^r X_{ijv} = 1; \quad \forall j \in R \quad (6)$$

$$\sum_{v=1}^f \sum_{\substack{j=1 \\ i \neq j}}^r X_{ijv} = 1; \quad \forall i \in R \quad (7)$$

این مجموعه محدودیت‌ها بیانگر این است که در هر دوره برنامه‌ریزی، هر یک از خرده فروشان را فقط یک وسیله نقلیه، آن هم فقط یک بار، می‌تواند سرویس‌دهی نماید. وسیله نقلیه فوق باید از یک مکان قبل آمده و به مکان بعدی نیز برود [۷،۶].

$$\sum_{\substack{i=1 \\ i \neq j}}^r X_{ijv} - \sum_{\substack{h=1 \\ h \neq j}}^r X_{jihv} = 0; \quad \forall j \in R, \forall v \in VS \quad (8)$$

این مجموعه محدودیت‌ها تضمین می‌نمایند که اگر وسیله نقلیه‌ای به یک خرده فروش وارد شده و ارایه خدمت کند، تنها باید همین وسیله نقلیه این خرده فروش را ترک کند [۷،۶].

$$\sum_{i \in S} \sum_{\substack{j \in S \\ i \neq j}} X_{ijv} \leq |S| - 1; \quad \forall v \in VS, \quad \forall S \subseteq R, |S| \geq 2 \quad (9)$$

این مجموعه محدودیت‌ها عدم تشکیل زیر گردش برای هر خودرو را تضمین می‌کنند [۷].

$$X_{ijv} \in \{0,1\}; \quad \forall (i, j) \in Arcs, \forall v \in VS \quad (10)$$

مجموعه محدودیت‌های فوق نیز الزام صفر و یک بودن مقدار هر متغیر X_{ijv} را تضمین می‌کنند.

$$\sum_{k=1}^m \sum_{j=1}^r (Size)_k \cdot Q_{kijv} \leq C_v \quad \forall v \in VS, (k \in P) \quad (11)$$

مجموعه محدودیت‌های شماره ۱۱ نشان دهنده این است که مجموع حجم محصولاتی که توسط یک وسیله نقلیه حمل می‌شود (حجم هر یک از انواع محصولات در خودروی v ضربدر تعداد همان نوع محصول در همان خودرو)، نباید از ظرفیت آن وسیله نقلیه بیشتر باشد.

$$\left[\sum_{\substack{i=1 \\ i \neq j}}^r t_{ij} X_{ijv} + (l_k + u_k) Q_{kijv} \right] \text{Sign} Q_{kijv} \leq MTS_{kj}; \quad \forall k \in P, \forall v \in VS, \forall j \in R \quad (12)$$

مجموعه محدودیت‌های فوق تضمین می‌کنند که زمان تحویل هر یک از محصولات به هر یک از گره‌ها (خرده فروشان)، کمتر از سقف زمانی تعیین شده توسط مشتری باشد.

زمان تحویل، از جمع زمان مسیرهای پیمایش شده به علاوه جمع زمان بارگیری و تخلیه هر نوع محصول، ضربدر تعداد همان نوع محصول به دست می آید.

$$d_{kj} \left[\sum_{\substack{i=1 \\ i \neq j}}^r t_{ij} X_{ijv} + (l_k + u_k) Q_{kvj} \right] \text{Sign} Q_{kvj} \leq Q_{ijv}; \quad \forall k \in P, \forall v \in VS, \forall j \in R \quad (13)$$

این مجموعه محدودیت‌ها تضمین می‌کنند که تعداد محصولاتی که توسط یک وسیله نقلیه به یک مشتری حمل می‌شود، حداقل برابر مقدار مصرف آن محصول در مدت زمان گردش وسیله نقلیه فوق (زمان تحویل ضربدر نرخ مصرف)، باشد.

$$Q_{kvj} \leq M \sum_{i=1}^r X_{ijv}; \quad \forall k \in P, \forall v \in VS, \forall j \in R \quad (14)$$

مجموعه محدودیت‌های شماره ۱۴ تضمین می‌کنند که اگر یک خودرو در یک گردش به یک خرده فروش مراجعه نکند، نایستی هیچ محصولی در آن خودرو برای مقصد مذکور (آن گره) جایگذاری شده باشد.

$$\frac{Q_{kvj}}{d_{kj}} - \frac{Q_{ijv}}{d_{ij}} + [\text{Sign}(Q_{kvj}) + \text{Sign}(Q_{ijv})] M \leq 2M; \quad \forall (k, h) \in PP, \forall v \in VS, \forall j \in R \quad (15)$$

مجموعه محدودیت‌های شماره ۱۵ تضمین می‌کند که هر دو نوع محصولی که توسط یک وسیله نقلیه به یک گره (خرده فروش) حمل می‌شوند، دارای پنجره زمانی مصرف یکسان باشند. پنجره زمانی مصرف یک محصول در یک گره از تقسیم تعداد محصولات نوع k ام که توسط خودروی v ام به گره j ام حمل می‌شود (Q_{kvj})، بر نرخ مصرف محصول مربوطه (k) در آن گره (j) به دست می‌آید. [۸].

$$Q_{kvj} \text{ is integer} \quad \forall k \in P, \forall v \in VS, \forall j \in R \quad (16)$$

محدودیت شماره ۱۶ نیز تضمین می‌کنند که تعداد هر نوع محصولی که در یک گردش حمل می‌شود بایستی عددی صحیح باشد.

۸. روش‌های جمع‌آوری داده‌ها و محاسبه پارامترهای مدل

از آنجایی که پارامترهای مورد استفاده در مدل از دو نوع تجربی / قطعی و برآوردی هستند، شیوه جمع‌آوری و محاسبه داده‌های مدل نیز به دو صورت مختلف صورت خواهد گرفت، پارامترهای تجربی / قطعی مدل شامل اطلاعات ابعاد و فضای اشغالی هر محصول در وسیله نقلیه، بازه زمانی تعیین شده از سوی خرده‌فروشان برای تحویل محصولات

مختلف و نیز ظرفیت حمل وسایل نقلیه مورد استفاده است. جمع‌آوری داده‌های مربوط به دسته از پارامترها از طریق طراحی فرم‌های مقتضی و نیز مراجعه به برخی اسناد و گزارشات عملکردی شرکت دونا ر خزر و سایر شرکت‌های حمل و نقل مرتبط صورت گرفته است. به منظور جمع‌آوری داده‌های مربوط به پارامترهای برآوردی نظیر زمان سفر از گرهی به گره دیگر و زمان بارگیری و تخلیه محصولات، از مشاهدات میدانی و زمان‌سنجی استفاده شد. هم‌چنین جهت جمع‌آوری داده‌های مربوط به پارامتر تقاضای خرده فروشان برای هر یک از محصولات نیز از فرم‌های طراحی شده تقاضای خرده فروشان استفاده شد.

از آنجا که داده‌های مربوط به این پارامترهای برآوردی، بر مبنای روش متوسط‌گیری فازی و با استفاده از اعداد فازی مثلثی، جمع‌آوری می‌شوند، لذا برای کاربرد آنها در مدل، نخست بایستی آنها را به اعداد قطعی تبدیل نمود. برای دستیابی به اعداد قطعی نیز از هفت روش متعدد و مشهور می‌توان استفاده کرد که یکی از متداول‌ترین آنها روش مرکز سطح است. در روش مرکز سطح که رایج‌ترین روش تبدیل کمیت فازی به کمیت کلاسیک می‌باشد، از رابطه (۱۷) برای میانگین‌گیری فازی یا فازی زدایی استفاده می‌شود. [۱]

$$z^* = \frac{\int \mu_{\tilde{z}}(z) \cdot z \, dz}{\int \mu_{\tilde{z}}(z) \, dz} \quad (17)$$

۹. ویژگی‌های مدل طراحی شده

- توسعه مسأله حمل و نقل مرکب و تعیین نوع محصول قابل حمل در وسایط نقلیه موجود در هر مسیر از شبکه حمل.
- مورد توجه و کنکاش قرار دادن مسایل کاربردی تأمین و توزیع به هنگام محصولات مورد نیاز در مراکز فروش وابسته به مراکز تولید یا توزیع عمده.
- جمع‌آوری داده‌های مربوط به پارامترهای تخمینی مدل به صورت اعداد مثلثی و محاسبه اعداد کلاسیک متناظر آنها از شیوه میانگین‌گیری مرکز سطح.
- قابلیت حل مسایل گوناگون در حوزه مسیریابی موجودی.
- قابلیت کاربرد مدل برای حالت‌های مختلفی نظیر ظرفیت متغیر وسایل نقلیه، تعداد و اندازه‌های متفاوت محصولات با توانایی لحاظ زمان‌های تخلیه و بارگیری محصولات.

۱۰. اجرای مدل و تحلیل نتایج

برای اجرای مدل، بررسی موردی حاضر مشتمل بر شبکه‌ای مرکب از ۳ محصول، ۳ نوع خودرو و ۶ خرده فروش می‌باشد. مدل ریاضی شبکه مورد اشاره، دارای ۱۸۰ متغیر تصمیم و ۲۵۵ محدودیت است. این مدل پس از نگارش، با استفاده از نرم افزار لینگو ۸ حل شد. از آنجا که مدل دارای دو نوع متغیر تصمیم می‌باشد لذا مقدار متغیرهای تصمیم به تفکیک و به شرح نگاره‌های ۷ و ۸ ارایه و تشریح می‌شوند.

نگاره ۷. نتایج عددی برای متغیر تصمیم X

متغیر تصمیم	مقدار
$X(۷,۲,۱)$	۱
$X(۲,۷,۱)$	۱
$X(۷,۴,۲)$	۱
$X(۴,۶,۲)$	۱
$X(۶,۷,۲)$	۱
$X(۷,۱,۳)$	۱
$X(۱,۳,۳)$	۱
$X(۳,۵,۳)$	۱
$X(۵,۷,۳)$	۱

لازم به ذکر است سایر متغیرهای تصمیم X که در نگاره فوق آورده نشده‌اند، مقدار صفر را در جواب نهایی مسأله اختیار نموده‌اند. هم‌چنین، متغیر Q بیانگر تعداد محصولی است که از یک گره به گره دیگر حمل می‌شود. در نگاره (۸) مقادیر بهینه Q ارایه شده است.

نگاره ۸. نتایج عددی برای متغیر تصمیم Q

$Q(۱,۲,۱) = ۲۳$	$Q(۱,۱,۳) = ۱۱$
$Q(۲,۲,۱) = ۲۶$	$Q(۲,۱,۳) = ۱۲$
$Q(۳,۲,۱) = ۱۹$	$Q(۳,۱,۳) = ۱۰$
$Q(۱,۴,۲) = ۲۸$	$Q(۱,۳,۳) = ۲۲$
$Q(۲,۴,۲) = ۴۳$	$Q(۲,۳,۳) = ۲۵$
$Q(۳,۴,۲) = ۲۳$	$Q(۳,۳,۳) = ۱۹$
$Q(۱,۶,۲) = ۳۳$	$Q(۱,۵,۳) = ۱۳$
$Q(۲,۶,۲) = ۳۷$	$Q(۲,۵,۳) = ۱۵$
$Q(۳,۶,۲) = ۲۹$	$Q(۳,۵,۳) = ۱۲$

۱-۱۰. محاسبه هزینه در هر دوره سرویس دهی (برنامه‌ریزی)

جهت محاسبه هزینه کل بایستی مدت زمان استفاده از هر یک از وسایل نقلیه را به دست آورد. این زمان شامل زمان طی مسیر و زمان‌های تخلیه و بارگیری است. برای محاسبه مدت زمان پیمایش هر یک از خودروها، زمان کمان‌های طی شده جمع می‌شود. هم‌چنین جهت محاسبه زمان‌های بارگیری و تخلیه هر یک از خودروها، ابتدا تعداد هر یک از انواع محصولات در هر یک از خودروها محاسبه شده و سپس در نرخ زمان مربوط به تخلیه/بارگیری ضرب می‌شود. مجموع زمان بارگیری و تخلیه به علاوه زمان طی مسیر، کل زمان استفاده از هر یک از وسایل نقلیه را تشکیل می‌دهد.

زمان‌های حاصل در نرخ هزینه بکارگیری هر یک از خودروها ضرب می‌شود. با توجه به تفاوت ظرفیت حمل خودروها، نرخ هزینه‌های آنها نیز متفاوت خواهد بود. در نگاره ۹ نرخ هزینه متغیر در مدت زمان استفاده از خودرو ضرب شده تا حاصل، هزینه متغیر هر خودرو در یک دوره باشد؛ این هزینه با هزینه ثابت مربوط به هر یک از خودروها جمع شده و به این ترتیب هزینه کل در یک دوره سرویس دهی حاصل می‌شود.

نگاره ۹. محاسبه هزینه یک دوره حمل در مدل پیشنهادی

خودرو	ظرفیت (فوت مکعب)	نرخ هزینه متغیر	مدت زمان استفاده از خودرو (ساعت)	هزینه متغیر	هزینه ثابت	جمع هزینه
۱	۸۰۰	۲۵	۱۴/۴۵	۳۶۱/۲۵	۲۵۰	۶۱۱/۲۵
۲	۲۲۴۰	۵۰	۳۴/۳۵	۱۷۱۷/۵	۵۰۰	۲۲۱۷/۵
۳	۱۱۲۰	۳۵	۳۰/۸	۱۰۷۸	۳۵۰	۱۴۲۸
جمع	۴۱۶۰					۴۲۵۶/۷۵

در نگاره فوق هزینه‌ها بر حسب هزار ریال می‌باشد. در واقع، نگاره ۹، هزینه یک دوره گردش خودروها را محاسبه می‌نماید. در هر دوره گردش، مجموع حجم خودروها ۴۱۶۰ فوت مکعب می‌باشد. به دلیل بدیع بودن مدل طراحی شده، شرکتی یافت نشد که از سیستمی مشابه استفاده نماید تا بتوان به بررسی تطبیقی نتایج حاصل از مدل پرداخت و لذا اطلاعات مورد نیاز با توجه به وضعیت فعلی شرکت دونا ر خزر جمع آوری و تحلیل شد.

۱۱. نتیجه گیری

با محاسبات انجام گرفته در بخش قبل، مشاهده شد که هزینه کل یک دوره حمل در مدل پیشنهادی، بدون در نظر گرفتن زمان‌های بارگیری و تخلیه برابر ۱۸۵۰ هزار ریال است. این مقدار کمتر از ۲۳۲۷/۵ است که هزینه حمل همان مقدار محصول در سیستم فعلی بررسی موردی حاضر است. شایان ذکر است، این مقدار صرفه جویی در هر دوره حمل، صرف نظر از میزان صرفه جویی حاصل از کاربرد مدل از نقطه نظر حداقل نمودن موجودی انبار خرده‌فروشان است.

محاسبه و تخمین دقیق حجم صرفه جویی ناشی از کاهش موجودی انبار خرده‌فروشان، منوط به در اختیار داشتن اطلاعات واقعی مربوط به سطح موجودی آنها در مقطع زمانی مورد بررسی در شرکت دونارخزر بود که به لحاظ محدودیت‌های عملی دسترسی به این اطلاعات میسر نشد. با وجود این، در خصوص صرفه جویی مرتبط با سطح موجودی می‌توان گفت که در وضعیت موجود، هر یک از خرده‌فروشان حداقل سطح معینی از هر یک از محصولات را به عنوان ذخیره احتیاطی موجودی، نگهداری می‌کنند؛ ولی در مدل طراحی شده سطح موجودی خرده‌فروشان صفر در نظر گرفته می‌شود. در نتیجه، به‌طور منطقی در سطح هزینه‌های خرده‌فروشان نیز صرفه جویی شده و لذا در مجموع هزینه کل زنجیره تأمین کاهش می‌یابد.

۱۱. پیشنهادهای تحقیق

مدل طراحی شده از نظر تعداد وسایل نقلیه مورد نیاز و متوسط موجودی حمل شده توسط وسایل نقلیه که در واقع موجودی انبار خرده‌فروشان را تشکیل می‌دهد، جواب بهینه را ارائه می‌دهد ولی زمان لازم برای اجرای آن با افزایش تعداد وسایل نقلیه در دسترس و گره‌های مسئله به شدت افزایش می‌یابد که این مسئله مستلزم ارائه مدل‌های اصلاح شده در مطالعات آتی است. هم‌چنین به دلیل ارتباط نزدیک مسئله مسیریابی ناوگان حمل و نقل و مسئله مسیریابی موجودی که در بخش سوم مقاله به آن اشاره شد، می‌توان از حالت‌های مختلفی که برای مسئله مسیریابی خودروها قابل طرح است، به عنوان زمینه‌های آتی تحقیق استفاده نمود. با این حال مطالعات مشخص زیر در امتداد تحقیق حاضر پیشنهاد می‌شود:

۱. توسعه مسأله برای حالتی که برخی از پارامترهای مسأله (ضریب مصرف قطعات، زمان‌های سفر و...) از توابع توزیع احتمال خاصی تبعیت کند.
۲. توسعه مسأله برای حالتی که هر یک از وسایل نقلیه بتوانند هم عملیات توزیع محصولات و هم عملیات جمع‌آوری مواد و قطعات مورد نیاز را انجام دهند.
۳. توسعه مسأله برای حالتی که انبار مرکزی توزیع دارای محدودیت در مقدار موجودی باشد. (در دنیای واقعی معمولاً این حالت زیاد اتفاق می‌افتد).
۴. سنجش اعتبار مدل ریاضی ارایه شده در تحقیق حاضر در مقایسه با الگوریتم‌های دیگر.
۵. توسعه مسأله برای حالتی که توزیع از چندین مرکز انجام شود.
۶. استفاده از روش‌های دیگر حل مدل‌های چندین هدفه برای حل مسأله تحقیق حاضر.

۱۳. منابع

۱. کوزه‌پزان دزفولی امین (۱۳۸۴). "اصول تئوری مجموعه‌های فازی و کاربردهای آن در مدل‌سازی مسایل مهندسی آب". چاپ اول. تهران؛ انتشارات جهاد دانشگاهی، واحد صنعتی امیر کبیر.
2. Adam N. Letchford, Amar Ouki. (2009). "Exploiting Sparsity in Pricing Routines for the Capacitated arc Routing Problem", *Computers & Operations Research*, Vol. 36, pp. 2320-2327.
3. Birger Raa, El-Houssaine Aghezzaf, (2009). "A Practical Solution Approach for the Cyclic Inventory Routing Problem", *European Journal of Operational Research*, Vol. 192, pp. 429-441.
4. Ching Chyi Lee, Wai Hung Julius Chu, (2005). "Who Should Control Inventory in a Supply Chain?", *European Journal of Operational Research*, Vol. 164; pp. 158-172.
5. Emmanouil E. Zachariadis, Christos D. Tarantilis, Chris T. Kiranoudis, (2009). "An Integrated Local Search Method for Inventory and Routing Decisions", *Expert Systems with Applications*, Vol. 36, pp. 10239-10248.

6. Erhan Kutanoglu, Divi Lohiya.(2008). "Integrated Inventory and Transportation Mode Selection: A Service Parts Logistics System", *Transportation Research Part E*, Vol. 44, pp. 665–683.
7. Hipólito Hernández-Pérez, Juan-José Salazar-González, (2009). "The Multi-Commodity One-to-One Pickup-and-Delivery Traveling Salesman Problem', *European Journal of Operational Research*, Vol. 196, pp. 987–995.
8. Letchford A. and Eglese R. (1998). "The Rural Postman Problem with Deadline Classes". *European Journal of Operational Research*, Vol. 105, pp. 390-400.
9. Manuel Cardos, Jose´ P. Garcı´a-Sabater. (2006). "Designing a Consumer Products Retail Chain Inventory Replenishment Policy with the Consideration of Transportation Costs", *Int. J. Production Economics*, Vol. 104, pp. 525–535.
10. Qiu-Hong Zhao, Shou-Yang Wang, K.K. Lai,(2007). "A Partition Approach to the Inventory/Routing Problem", *European Journal of Operational Research*, Vol. 177, pp. 1015-1032.
11. Sıla Çetinkaya, Fatih Mutlu, Chung-Yee Lee. (2006). "A Comparison of Outbound Dispatch Policies for Integrated Inventory and Transportation Decisions", *European Journal of Operational Research*, Vol. 171, pp. 1094–1112.
12. Yee Ming Chen, Chun-Ta Lin, (2009). "A Coordinated Approach to Hedge the Risks in Stochastic Inventory-Routing Problem". *Computers & Industrial Engineering*. Vol. 56, 1095–1112.
13. Yugang Yu, Haoxun Chen, Feng Chu. (2008). "A New Model and Hybrid Approach for Large scale Inventory Routing Problems". *European Journal of Operational Research*, Vol. 189, pp. 1022–1040.
14. Zhendong Pan, Jiafu Tang, Richard Y.K. Fung. (2007). "Synchronization of Inventory and Transportation under Flexible Vehicle Constraint: A Heuristics Approach Using Sliding Windows and Hierarchical Tree Structure". *European Journal of Operational Research*, Vol. 192, pp. 824–836.