

مدل سازی مسئله مسیریابی - موجودی سبز با در نظر گرفتن وسائل نقلیه هیبریدی و

حل آن توسط الگوریتم جستجوی همسایگی بزرگ

زهرا دشتیان، دانش آموخته کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی صنایع و مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد قزوین، قزوین، ایران

فرهاد اعتباری (نویسنده مسئول)، استادیار، دانشکده مهندسی صنایع و مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد قزوین، قزوین، ایران

E-mail: eatebari_f@yahoo.com

پذیرش: ۱۳۹۷/۰۵/۱۰

دریافت: ۱۳۹۷/۰۲/۰۷

چکیده

مسئله مسیریابی-موجودی جزو مسائل پرکاربرد در حوزه توزیع کالا محسوب می شود. این مسئله در واقع حاصل ادغام و یکپارچه سازی دو مسئله کلاسیک است. مسئله اول، مربوط به مسیریابی است که مسیر حرکت وسائل نقلیه بین چندین مکان را مشخص می کند. مسئله بعدی در حوزه موجودی است که با توجه به هزینه های نگهداری و کمبود، سیاست های موجودی را برنامه ریزی و تعیین می نماید. یکی از ویژگی های این مسئله، پویایی آن است که بیان می کند تصمیمات فوق وابسته به زمان بوده و در طی افق زمانی بایستی چندین بار تکرار گردد. از سوی دیگر، بحث بکارگیری وسائل نقلیه با سوخت های الکتریکی و هیبریدی امروزه جایگاه ویژه ای در سیستم های توزیع سبز پیدا کرده است. در این پژوهش تلاش شده است با ترکیب دو رویکرد فوق، مسئله مسیریابی-موجودی سبز با در نظر گرفتن ناوگان هیبریدی توسعه داده شود. به این منظور، ابتدا مدل ریاضی مسئله مسیریابی-موجودی سبز با در نظر گرفتن ناوگان هیبریدی ارائه شده و سپس به منظور حل این مدل در ابعاد واقعی، از الگوریتم جستجوی همسایگی بزرگ استفاده گردیده است. برای بررسی صحت مدل ریاضی ارائه شده از نرم افزار GAMS استفاده شده و به منظور اعتبارسنجی الگوریتم، نتایج الگوریتم پیشنهادی با نتایج روش دقیق مقایسه شده است. سپس نتایج حاصل از اجرای الگوریتم فراابتکاری برای نمونه مسائل تولید شده ارائه و مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است. نتایج گزارش شده عملکرد مناسب الگوریتم پیشنهادی را تایید می نماید. در نهایت، آنالیز حساسیت بر روی پارامترهای مسئله صورت گرفته است.

واژه های کلیدی: الگوریتم جستجوی همسایگی بزرگ، زنجیره تامین، مسیریابی موجودی، وسائل نقلیه هیبریدی

۱. مقدمه

در سیستم‌های تولیدی، سازمانها به دنبال کاهش همزمان هزینه‌های موجودی و حمل و نقل خود هستند. مسئله مسیریابی-موجودی، زمانی به وجود می‌آید که در یک زنجیره تامین، مسئولیت مدیریت موجودی تمامی خرده فروشها به فروشنده منتقل می‌گردد. هدف مسئله مسیریابی- موجودی تعیین سیاستهای توزیع به همراه تصمیم‌گیری در مورد موجودی به منظور کمینه سازی هزینه‌هاست. در مسئله مسیریابی موجودی سبز، علاوه بر کمینه کردن هزینه‌های نگهداری حمل و نقل، هزینه‌های سوخت نیز کمینه می‌شود. مصرف سوخت به عوامل زیادی بستگی دارد که یکی از آنها بحث مقدار کالای تحویلی است. [Alighiyan and Kaviyani, 2013]

از آنجایی که نقش بالای دو مولفه مسیریابی و موجودی در یک زنجیره تامین، بر کسی پوشیده نیست، بنابراین یکپارچگی این دو عنصر در یک زنجیره تامین، کارآ و موثر خواهد بود. در این مقاله صورت جدیدی از مسئله مسیریابی موجودی ارائه شده است که به طور همزمان تصمیمات مسیریابی و موجودی را با در نظر گرفتن وسائل نقلیه هیبریدی بهینه‌سازی می‌کند. وسائل نقلیه هیبریدی از دو نوع منبع انرژی الکتریکی و سوختهای فسیلی برای حرکت استفاده می‌کنند. هزینه سفر و میزان آلاینده‌گی زیست محیطی برای حالتی که وسیله نقلیه از سوخت الکتریکی خود استفاده می‌کند بسیار کمتر است، ولی هر باتری ظرفیت محدودی دارد و باید در جایگاه‌های سوخت، شارژ مجدد گردد. استفاده از خوروهای هیبریدی می‌تواند هزینه‌های حمل و نقل و میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای را کاهش می‌دهد [Vincent et al. 2017] از این رو این خودروها به خوروهای سبز نیز معروفند. در این مقاله، ابتدا مدل ریاضی مربوط به مسئله مسیریابی- موجودی سبز، با در نظر گرفتن ناوگان توزیع هیبریدی با امکان شارژ مجدد در ایستگاه‌های موجود ارائه شده است. سپس با توجه به اینکه این مسئله در

زیرمجموعه مسائل سخت قرارداد، الگوریتم جستجوی همسایگی بزرگ^۱ برای حل آن توسعه داده شده است. امروزه با توجه به کارایی این روش، در اکثر مقالات از روش مذکور به منظور حل مسائل مسیریابی استفاده می‌گردد. سپس از خروجی روش دقیق که از حل مدل ریاضی بدست آمده به منظور اعتبارسنجی الگوریتم استفاده شده و در نهایت، خروجی الگوریتم برای مثال‌های مختلف مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است. ادامه مقاله به شرح زیر است.

بخش ۲ به بررسی مختصری از ادبیات مسیریابی موجودی و مسیریابی وسائل نقلیه هیبریدی پرداخته شده است. در بخش ۳ بیان مساله و مدل پیشنهادی ارائه شده است. روش حل پیشنهادی در بخش ۴ بیان شده است. در بخش ۵ به تنظیم پارامتر پرداخته می‌شود. مثالهای عددی و تحلیل نتایج محاسباتی جهت اعتبارسنجی مدل در بخش ۶ ارائه شده است. در نهایت در بخش ۷ نتیجه‌گیری و تحقیقات آتی ارائه شده است.

۲. مرور ادبیات

در این بخش مروری بر دو دسته از مسائل مسیریابی- موجودی و مسیریابی وسائل نقلیه هیبریدی انجام شده است.

[Jaillet et al. 2002] در یک مسئله مسیریابی موجودی یک زمان‌بندی دوهفته‌ای تهیه و تنها هفته اول را اجرا نمودند. مدل شامل یک مرکز توزیع و تعدادی مشتری بود که می‌بایست جایگزینی برای آنها به نحوی انجام شود که برای هیچ یک کمبود پیش نیاید. [Campbell and Savelsbergh, 2004]

با استفاده از رویکرد Jaillet و همکارانش در سال ۲۰۰۲ فرآیند حل مسئله را به مرحله تقسیم نمودند. مرحله اول به تخصیص ارسال کالا به مشتریان در یک دوره زمانی برنامه‌ریزی شده و مرحله دوم به تعیین مسیرهای بهینه پرداختند. آنها در مدل خود تقاضا را قطعی، ظرفیت انبار مشتری و ظرفیت هر یک از وسائل نقلیه را محدود در نظر گرفتند و هزینه‌های نگهداری موجودی را

مدل‌سازی مسئله مسیریابی - موجودی سبز با در نظر گرفتن وسائل نقلیه هیبریدی و حل آن توسط الگوریتم

ناهمگن، ظرفیت انبار مشتریان محدود و سفارشات عقب افتاده نیز مجاز فرض شده و انبار ظرفیت تأمین کل کالای مورد نیاز در طول افق برنامه ریزی را دارد. آنها با استفاده از برنامه ریزی عدد صحیح، حد پایین توابع هدف را استخراج کرده‌اند و پاسخ‌های حاصل از چند الگوریتم ابتکاری ارائه شده را با حدود پایین تعیین شده مقایسه کرده‌اند. [Jimenez et al. 2011] به طراحی و آنالیز سوخت خوردوهای الکتریکی پرداختند. آنها یک مدل برای به حداقل رساندن کل مصرف سوخت و انتشار گازهای گل‌خانه‌ای ارائه کردند. در نتیجه مدل ارائه شده به صرفه جویی و ذخیره سوخت مصرفی منجر شد. همچنین در مسئله‌ای دیگر [Shams-Zaraei et al. 2012] مدلی برای وسیله نقلیه الکتریکی هیبریدی با هدف کاهش هزینه مصرف سوخت که تابع هزینه بر اساس دو متغیر حالت: شارژ باتری و دمای داخلی موتور است ارائه کردند. آنها مدل را به وسیله الگوریتم برنامه نویسی پویا حل کردند. نتایج ثابت کرد که تغییر بهینه برای مصرف سوخت و انتشار دما برای چرخه یکسان است. [Liu Chen, 2012] به بررسی مسئله مسیریابی موجودی تک محصولی با افق زمانی نامحدود پرداختند. در این تحقیق ناوگان وسائل نقلیه همگن در نظر گرفته شده و کمبود مجاز نیست. همچنین تأمین کننده خود به نگهداری موجودی نمی‌پردازد. هدف کاهش هزینه‌های سیستم و نگهداری موجودی محصولات توسط خرده فروشان است. آنها مدل را با استفاده از الگوریتم جستجوی همسایگی متغیر حل کردند. نتایج محاسباتی بیانگر عملکرد خوب الگوریتم پیشنهادی است. در پژوهشی دیگر [Li et al. 2014] مسئله سوخت‌رسانی به جایگاه‌های سوخت در یک مسئله مسیریابی موجودی مدل‌سازی کردند. آنها مدل را با استفاده از روش آزادسازی لاگرانژ و الگوریتم جستجوی ممنوع حل کردند [Chen et al. 2014]. مدلی برای مسیریابی وسائل نقلیه هیبریدی و رابطه بین میزان سوخت و میزان فعلی باتری ارائه دادند. آنها مدل را با استفاده از الگوریتم شبیه‌سازی تبرید حل

در مدل دخالت ندادند. آنها همچنین مرحله اول را با استفاده از برنامه‌ریزی عدد صحیح و مرحله دوم را با استفاده از الگوریتم ابتکاری حل نمودند. [Rusdiansyah and Tsao, 2005]

مدلی برای مسئله مسیریابی - موجودی که برای تأمین دستگاه‌های فروش بود ارائه کردند. هدف مدل ارائه شده کاهش مجموع هزینه‌های توزیع و هزینه‌های نگهداری در هر دوره بود. آنها مدل را با استفاده از روش ابتکاری دو مرحله‌ای حل کردند. در نتیجه روش پیشنهادی کارایی الگوریتم را ثابت می‌کند [Aghezzaf and Raa, Van, 2006] مسئله مسیریابی موجودی را در حالتی که یک مرکز توزیع و چند مرکز فروش وجود داشت بررسی کردند. آنها ظرفیت وسائل حمل و نقل و انبار و مراکز فروش را محدود گرفتند و کمبود غیرمجاز بود. آنها یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح غیرخطی را ارائه دادند و با روش تخمینی پیشنهادی آن را حل کردند. [Yu, Chen and Chu, 2008] مدلی را برای مسئله مسیریابی موجودی ارائه کردند که در آن ارسال‌ها از نوع شکسته^۲ در نظر گرفته شده است. در ارسال‌های شکسته شده، تقاضای هر مشتری در هر دوره می‌تواند شکسته شده و توسط چند وسیله حمل و نقل برای او ارسال شود. در نظر گرفتن چنین فرضی می‌تواند باعث افزایش انعطاف پذیری مسئله و همچنین منجر به کاهش هزینه‌های حمل و نقل شود. آنها مدل را با استفاده از روش آزادسازی لاگرانژ حل کردند که در نتیجه مدل تجزیه شده به یک مسئله موجودی و یک مسئله مسیریابی شد. [Kermani et al. 2008] یک مسئله وسیله نقلیه الکتریکی هیبریدی را ارائه کردند و از پارامترهای لاگرانژی در بهینه‌سازی مسئله استفاده کردند. در نهایت ثابت کردند نتایج شبیه‌سازی برای اولین بار در مقایسه با استراتژی‌های دیگر مزایای بهتری دارد. [Abdelmaguid, Dessouky and Ordones, 2009] توانسته‌اند مدلی برای مسئله مسیریابی موجودی ارائه دهند. در این مدل افق برنامه‌ریزی شامل T دوره و در هر دوره تقاضای مشتریان متفاوت بوده و وسائل نقلیه

پیشنهادی مسیرهای حرکت و سائل نقلیه و توالی سرویس دهی به مشتریان مشخص شد و در مرحله سوم جواب های به دست آمده از دو مرحله قبل با استفاده از یک مدل عدد صحیح آمیخته مجددا بهبود داده شد. [Dimitrova and Marechal, 2015] مدلی برای و سائل نقلیه الکتریکی ترکیبی به منظور انتقال قدرت و برآورد هزینه تجهیزات برای نشان دادن اثرات زیست محیطی ارائه کردند. آنها از تکنیک های بهینه سازی چندهدفه و الگوریتم ژنتیک برای حل استفاده نمودند در نتیجه کارایی الگوریتم ها را نشان دادند. [Doppstadt and Koberstein, 2016] یک مسئله مسیریابی و سائل نقلیه الکتریکی هیبریدی با مجموعه ای از مکانهای مشتریان و توسعه مسئله فروشنده دوره گرد ارائه کردند. آنها از الگوریتم جستجوی جواب اولیه از یک الگوریتم ابتکاری دوفازی استفاده شد. در نهایت با مقایسه نتایج کارایی الگوریتم نامبرده تایید شد. [Vincent et.al, 2017] یک مساله مسیریابی وسیله نقلیه هیبریدی که از منابع انرژی هیبریدی استفاده می کردند به منظور کمینه کردن هزینه کل سفر ارائه دادند. این مدل، استفاده از هر دو نوع انرژی سوخت و الکتریکی با توجه به در دسترس بودن مراکز شارژ الکتریکی و ایستگاه های سوختگیری را در نظر می گیرد. این مسئله به وسیله الگوریتم شبیه سازی تبرید نیز حل شد. تحلیل ها نشان داد که شبیه سازی تبرید با یک استراتژی شروع مجدد نسبت به شبیه سازی تبرید بدون یک استراتژی شروع مجدد، عملکرد بهتری دارد. در جدول ۱ یک دسته بندی اجمالی از مقالات منتشره در راستای این تحقیق آمده است

کردند. در نهایت به این نتیجه رسیدند که الگوریتم پیشنهادی باعث کاهش مصرف سوخت در مقایسه با کاهش شارژ مصرفی است. [Mirzaei and Seifi, 2015] مدلی برای مدیریت موجودی و مسیریابی و سائل نقلیه ارائه کردند. در این مدل و سائل نقلیه همگن با ظرفیت محدود بود. آنها مدل را توسط دو الگوریتم شبیه سازی تبرید و جستجوی ممنوع حل کردند. [Cordeau and Lagana, 2015] یک روش جدید برای حل مسئله مسیریابی موجودی چند محصولی و چند دوره ای ارائه کردند. آنها یک الگوریتم ابتکاری سه مرحله ای پیشنهاد کردند. در مرحله اول با استفاده از آزادسازی لاگرانژ، مشتریانی که می بایست سرویس دهی می شدند و مقدار کالایی که باید به آنها تحویل داده می شد، مشخص شد. در مرحله دوم با استفاده از الگوریتم ممنوع برای حل مدل استفاده کردند. نتایج صرفه جویی بیشتر در محل انبارها و بهترین تور وسیله نقلیه را نشان داد. [Mancini, 2017] یک مسئله مسیریابی وسیله نقلیه هیبریدی را ارائه داد. برای حل از روشی که ترکیبی از روش های الگوریتم فراابتکاری جستجوی همسایگی بزرگ و برنامه ریزی ریاضی استفاده کرد. در نتیجه ثابت شد که الگوریتم جستجوی همسایگی بزرگ در زمان محاسباتی بسیار کمی جواب ها را بررسی می کند. [Vakili et al, 1396] به بررسی همزمان مدیریت موجودی و مسیریابی و سائل نقلیه، بر مبنای فروشنده پرداختند. در این مدل اقلام دارویی در یک زنجیره تامین که شامل به توزیع کننده مجموعه ای از خرده فروشان بود مورد بررسی قرار گرفت. هدف مینیمم سازی هزینه های حمل و نقل و نگهداری موجودی بود. آنها مدل را با الگوریتم جستجوی همسایگی بزرگ انطباقی حل کردند و برای ساخت

جدول ۱. دسته بندی مقالات منتشره در زمینه مسیریابی موجودی و مسیریابی و سائل نقلیه هیبریدی

ردیف	نویسندگان	سال	افق زمانی	تقاضا	تنوع ناوگان	تابع هدف کاهش هزینه	روش حل
------	-----------	-----	-----------	-------	-------------	---------------------	--------

مدل‌سازی مسئله مسیریابی - موجودی سبز با در نظر گرفتن وسائل نقلیه هیبریدی و حل آن توسط الگوریتم

فرآیند	ابتکاری	تحلیلی	کمبود	نگهداری	توزیع	مسیر	هیبریدی	ناهمگن	همگن	احتمالی	قطعی	چند دوره‌ای	تک دوره‌ای			
*				*	*			*		*	*			۲۰۰۲	Jaillet et al	۱
	*	*				*		*		*	*			۲۰۰۴	Campbell, Savelsbergh	۲
		*		*	*			*		*	*			۲۰۰۵	Rusdiansyah, T sao	۳
		*		*	*					*		*		۲۰۰۶	Aghezzaf, Raa, Van	۴
		*		*		*		*		*		*		۲۰۰۸	Yu, chen, chu	۵
		*				*	*			*		*		۲۰۰۸	Kermani et al	۶
	*	*	*	*		*		*		*	*			۲۰۰۹	Abdelmaguid	۷
		*				*	*			*		*		۲۰۱۱	Jimenez et al	۸
*				*		*		*		*	*			۲۰۱۲	Liu, Chen	۹
		*				*	*			*		*		۲۰۱۲	shams-Zaraei et al	۱۰
*				*		*		*		*	*			۲۰۱۴	Li et al	۱۱
*						*	*			*		*		۲۰۱۴	Chen et al	۱۲
*				*	*	*		*		*	*			۲۰۱۵	Mirzaei, Seifi	۱۳
	*	*		*	*	*		*		*	*			۲۰۱۵	Cordeau, Lagana	۱۴
*						*	*			*		*		۲۰۱۵	Dimitrova, Marechal	۱۵
*	*			*	*	*		*		*	*			۱۳۹۶	Parizad vakili et al	۱۶
*						*	*			*		*		۲۰۱۶	Doppstadt, Koberstein	۱۷

۱۸	Mancini	۲۰۱۷	*	*	*	*
۱۹	Vincent et.al	۲۰۱۷	*	*	*	*

۳-۱ مدل سازی ریاضی

در این بخش، مدل ریاضی مسئله مسیریابی-موجودی با در نظر گرفتن وسائل نقلیه هیبریدی فرموله می شود. محتوای این بخش در ادامه در سه بخش مجموعه ها، پارامترها و متغیرها و در نهایت مدل ریاضی بیان شده است.

مجموعه ها:

N : مجموعه تمامی رئوس شامل مشتریان، انبار و جایگاه های سوخت

Nc : مجموعه مشتریان

Nfe : ایستگاه های شارژ الکتریکی

Ncf : مشتریان و ایستگاه های شارژ

T : دوره زمان

V : مجموعه وسائل نقلیه

پارامترها:

cap_i : ظرفیت موجودی برای مشتری i

h_i : هزینه نگهداری موجودی

Π_i : هزینه کمبود

d_{it} : تقاضای مشتری i در دوره t

q : ظرفیت وسیله نقلیه

I_0 : موجودی اولیه

cfe : هزینه سفر با سوخت الکتریکی (per kwh)

cfs : هزینه سفر با سوخت سنتی (per liter)

re : نرخ مصرف سوخت الکتریکی (kwh per km)

rs : نرخ مصرف سوخت سنتی (liter per km)

ffe : ظرفیت باتری (kw)

C_{ij} : هزینه تردد بین راس i و j (ماتریس مسافت)

با توجه به تحقیقاتی که تا حال حاضر به انجام رسیده، بسیاری از مسائل مسیریابی موجودی، از روش های متفاوت و با اهداف گوناگون مورد بررسی قرار گرفته اند. با توجه به اینکه این مسائل به صورت مجزا مورد استفاده قرار گرفته، اما موضوعی که به آن پرداخته نشده، استفاده از وسائل نقلیه هیبریدی در مسئله مسیریابی موجودی است. بنابراین این تحقیق به مدل سازی مسئله مسیریابی موجودی سبز با در نظر گرفتن وسائل نقلیه هیبریدی پرداخته می شود.

۳. بیان مسئله و مدل ریاضی

سیستم مورد مطالعه در این مسئله، شامل یک انبار به عنوان مرکز توزیع که Nc مرکز فروش را به عنوان مشتری های خود دارد و مجموعه ای از ایستگاه های شارژ (الکتریکی) و چند وسیله نقلیه همگن از نوع هیبریدی است. تصمیم در خصوص مقدار و زمان تحویل محصول بر عهده انبار است. در این تحقیق به طور همزمان در خصوص مقدار و زمان تحویل و مسیرهای تردد وسایل نقلیه و همچنین نوع سوخت مصرفی تصمیم گیری می شود به گونه ای که مجموع هزینه های حمل و نقل، موجودی و سوخت مصرفی حداقل گردد. سایر مفروضات مدل به شرح زیر است:

- ۱- افق برنامه ریزی شامل T دوره و تقاضا قطعی است.
- ۲- هر بار که وسیله به انبار برمی گردد، ظرفیت مخازن الکتریکی و سوخت تا حد ظرفیت پر می شود
- ۳- هر ایستگاه سوخت گیری حداکثر یک بار توسط هر وسیله نقلیه ملاقات می شود.
- ۴- کمبود مجاز است.
- ۵- هر وسیله نقلیه بیش از یک بار به مشتری مراجعه نخواهد کرد.
- ۶- ظرفیت انبار و ظرفیت وسیله نقلیه محدود است.

مدل سازی مسئله مسیریابی - موجودی سبز با در نظر گرفتن وسائل نقلیه هیبریدی و حل آن توسط الگوریتم

$$\sum_{l \in N} y_{litv} - \sum_{k \in N} y_{ikt v} \geq 0 \quad (5)$$

$$\forall i \in Nf \cup Nc, \forall t \in T, \forall v \in V$$

$$Inv_{it-1} - b_{it-1} - Inv_{it} + Inv_o + b_{it} + (\sum_{l \in N} y_{litv} - \sum_{k \in N} y_{ikt v}) = d_{it}$$

$$\forall i \in Nc, \forall t \in T, \forall v \in V \quad (6)$$

$$Inv_{it} \leq cap_i \quad \forall i \in Nc, \forall t \in T \quad (7)$$

$$\frac{ze_{ijtv}}{re} + \frac{zs_{ijtv}}{rs} = c_{ij} \cdot X_{ijtv}$$

$$\forall i, j \in N, \forall t \in T, \forall v \in V \quad (8)$$

$$ze_{ijtv} - ffe(1 - x_{ijtv}) \leq ye_{it} - ye_{jt} \leq ze_{ijtv} + ffe(1 - x_{ijtv})$$

$$\forall i \in N, \forall j \in Nc, \forall t \in T, \forall v \in V \quad (9)$$

$$ze_{ijtv} - ffe(1 - x_{ijtv}) \leq ye_{it} - qe_{jt} \leq ze_{ijtv} + ffe(1 - x_{ijtv})$$

$$\forall i \in N, \forall j \in Nf, \forall t \in T, \forall v \in V \quad (10)$$

$$ye_{it} = ffe \quad \forall i \in \{0\} \cup Nf, \forall t \in T \quad (11)$$

$$ye_{it} \geq ze_{iotv} \quad \forall i \in Nc \cup Nf, \forall t \in T, \forall v \in V \quad (12)$$

$$X_{ijtv} \in \{0, 1\}$$

$$Inv_{it}, b_{it}, y_{it}, ye_{it}, qe_{it}, ze_{ijtv}, zs_{ijtv} \geq 0 \text{ \& int eger} \quad (13)$$

رابطه (۱) بیانگر تابع هدف است که شامل کاهش هزینه های ثابت سفر وسیله نقلیه با سوخت الکتریکی و سنتی، هزینه های نگهداری موجودی و کمبود است. رابطه (۲) تضمین می کند که در هر دوره هر وسیله نقلیه بیشتر از یکبار به یک مشتری مراجعه نخواهد کرد. رابطه (۳) باعث حفظ پیوستگی مسیر حرکت وسائل نقلیه در هر دوره می شود. رابطه (۴) دو نوع محدودیت را ارضا می کند، اول این که تضمین می کند اگر وسیله نقلیه ای در دوره ای در یک مسیر حرکت نکرد مقدار کالای حمل شده متناظر با آن برابر صفر شود. دوم تضمین می کند در صورت حرکت وسیله نقلیه در یک دوره

متغیرهای تصمیم:

X_{ijtv} : برابر ۱ اگر وسیله نقلیه v از راس i به راس j در دوره t

برود در غیر این صورت صفر است.

Inv_{it} : موجودی مشتری i در دوره t

b_{it} : سفارشات به تاخیر افتاده مشتری i در دوره t

y_{ijtv} : مقدار بار حمل شده بین راس i تا راس j در دوره t توسط

وسيله نقلیه v

ye_{it} : سطح سوخت وسیله نقلیه در هنگام ورود به گره i در دوره

t

qe_{it} : سطح باتری وسیله نقلیه در هنگام ورود به ایستگاه شارژ i

در دوره t

ze_{ijtv} : مقدار باتری استفاده شده از راس i تا راس j در دوره t

توسط وسیله نقلیه v

zs_{ijtv} : مقدار سوخت سنتی استفاده شده از راس i تا راس j در

دوره t توسط وسیله نقلیه v

مدل ریاضی ارائه شده بصورت زیر است:

$$\min .z = \sum_{t=1}^T [\sum_{v \in V} \sum_{i \in N} \sum_{j \in N} (cfe \cdot ze_{ijtv} cfs \cdot zs_{ijtv}) + \sum_{i \in Nc} (h_i Inv_{it} + \pi_i \cdot b_{it})]$$

(۱)

$$\sum_{j \in N} X_{ijtv} \leq 1 \quad (2)$$

$$\forall i \in N, \forall t \in T, \forall v \in V$$

$$\sum_{k \in N} X_{ikt v} - \sum_{l \in N} X_{litv} = 0 \quad (3)$$

$$\forall i \in N, \forall t \in T, \forall v \in V$$

$$y_{ijtv} - q \cdot X_{ijtv} \leq 0$$

$$\forall i \in N, \forall j \in N, \forall t \in T, \forall v \in V \quad (4)$$

تدریجی جواب اولیه با استفاده از عملگرهای تخریب و تعمیر بوده و جستجوی همسایگی با استفاده از تخریب چند مشتری از جواب و دوباره قرار دادن آنها (تعمیر) در مسیر به دست می‌آید. الگوریتم ابتدا با یک جواب اولیه شدنی شروع به کار می‌کند و این جواب توسط عملگرهای تخریب و تعمیر تغییر کرده و جواب جدید تولید می‌شود. این جواب در صورت بهبود در تکرار بعد به عنوان ورودی الگوریتم در نظر گرفته می‌شود. از موارد مهم در ارائه الگوریتم‌های فراابتکاری، ساخت جواب اولیه مناسب و استفاده از الگوریتم‌های بهبود دهنده متناسب با نوع مسئله است.

۴-۱ نمایش جواب اولیه

یکی از نکات کلیدی در طراحی الگوریتم LNS تصمیم‌گیری در خصوص نحوه نمایش جواب اولیه و چگونگی تفسیر آن است. یکی از نکات کلیدی در طراحی الگوریتم در مسئله مسیریابی موجودی با در نظر گرفتن ماتریس تقاضا، ماتریسی به نام ماتریس تحویل ساخته می‌شود. بر اساس این ماتریس میزان کالای تحویلی به هر مشتری در هر دوره زمانی مشخص می‌گردد. نمایش جواب اولیه پیشنهادی برای سه دوره و چهار مشتری با در نظر گرفتن ماتریس تقاضا و تحویل در جدول ۲ و ۳ آمده است.

جدول ۲. ماتریس تقاضا جدول

	T=1	T=2	T=3
مشتری ۱	۲۱	۳۸	۲۷
مشتری ۲	۱۱	۲۳	۲۵
مشتری ۳	۱۳	۴۸	۴۱
مشتری ۴	۴۳	۱۱	۴۲

در آن مسیر مقدار کالای حمل شده متناظر با آن از ظرفیت وسیله نقلیه بیشتر نشود. رابطه (۵) این محدودیت به این صورت عمل می‌کند که تفاضل مجموع بارهایی که از همه گره‌ها وارد گره i در دوره t می‌شود و همچنین مجموعه بارهایی که از گره i در دوره t به همه گره‌ها خارج می‌شود باعث از بین رفتن زیر تور می‌شود. رابطه (۶) بیان می‌کند که کالای تحویلی به مشتریان و مقادیر موجودی و کمبود در دوره‌های قبل و بعد برابر تقاضای مشتری است در واقع بالانس بین کمبود و موجودی در دوره‌ها را نشان می‌دهد. رابطه (۷) تضمین می‌کند که انبار بیشتر از ظرفیتش موجودی نمی‌گیرد در واقع ظرفیت انبار موجودی محدود است. رابطه (۸) تضمین می‌کند که سوخت الکتریکی و سستی باید برای پوشش دادن مسافت‌های طی شده استفاده شود. رابطه (۹) سطح سوخت سستی وسیله نقلیه را در هنگام ورود به گره مشتریان، انبار و جایگاه‌های سوخت نشان می‌دهد. رابطه (۱۰) سطح باتری وسیله نقلیه را در جایگاه سوخت نشان می‌دهد. این رابطه تضمین می‌کند که وقتی وسیله نقلیه به جایگاه سوخت برای سوخت‌گیری وارد شد چه مقدار از سوختش باقی مانده است رابطه (۱۱) محدودیت سوخت‌گیری وسایل نقلیه در جایگاه سوخت است، فرض بر این است که وسایل نقلیه از انبار با تمام ظرفیت سوخت‌گیری می‌کنند. رابطه (۱۲) تضمین می‌کند که میزان سوخت وسیله نقلیه برای طی کردن کل تور مورد نظر کافی است بطوریکه با سطح سوخت غیرمنفی به انبار باز می‌گردد. رابطه (۱۳) دامنه متغیرهای تصمیم را نشان می‌دهد.

۴. حل مسئله

با توجه به اینکه مسئله مسیریابی موجودی در دسته مسائل سخت است و حل مسائل سخت در ابعاد بزرگ در زمان معقول معقول امکان پذیر ناست. بنابراین از الگوریتم‌های ابتکاری یا فراابتکاری برای حل اینگونه مسائل استفاده می‌شود. در این مقاله از الگوریتم جستجوی همسایگی بزرگ برای حل مسئله استفاده شده است. ایده اصلی الگوریتم جستجوی همسایگی بزرگ (LNS) بهبود

مدل سازی مسئله مسیریابی - موجودی سبز با در نظر گرفتن وسائل نقلیه هیبریدی و حل آن توسط الگوریتم

پس از تعیین ماتریس تحویل، باید به تعداد دوره های برنامه ریزی مسئله مسیریابی وسیله نقلیه حل شود. برای این کار از الگوریتم معروف صرفه جویی کلارک و رایت^۹ برای تعیین مسیرهای حمل و نقل استفاده شده است. بعد از اینکه با استفاده از الگوریتم کلارک و رایت، توالی تخصیص تحویل کالا به مشتری و همچنین تعیین مسیرها از سوخت الکتریکی و سنتی وسیله نقلیه مشخص شد وارد الگوریتم LNS می شویم. این الگوریتم بر پایه ایده تخریب و تعمیر یک جواب اولیه بنا شده است. اگر جواب جدید به دست آمده بهتر از جواب فعلی باشد جایگزین آن می شود و به عنوان ورودی در تکرار بعدی استفاده می شود. در این الگوریتم ابتدا یک جواب اولیه که همان ماتریس مقدار کالای تحویلی به مشتریان است در نظر گرفته می شود. سپس با استفاده از عملگر تخریب قسمتی از جواب تخریب می شود. بعد از آن عملگر تعمیر مجدداً جواب را تکمیل و اصلاح می نماید. عملگرهای مورد استفاده به منظور تخریب و تعمیر در بخش بعدی توضیح داده می شود.

۴-۲ فرآیند تخریب و تعمیر

همانطور که اشاره شد در الگوریتم LNS از دو نوع عملگر تخریب و تعمیر استفاده می شود. در عملگر تخریب در هر تکرار الگوریتم، تعدادی از مشتریان با استراتژی مشخصی انتخاب می شوند و از جواب برداشته می شوند. خروجی این عملگرها یک جواب کاهش یافته و لیستی از مشتریان کاهش یافته است. تخریب مشتریان یا به صورت تصادفی است یعنی با یک لیست خالی شروع می کند و به صورت تصادفی m گره را از حل برمی دارد و برای $s=m$ تکرار اجرا می کند و یا از رابطه (۱۴) به دست می آید. این رابطه تخریب بدترین مسافت است که این عملگر در هر تکرار مشتری با بیشترین هزینه را انتخاب می کند که در آن هزینه به صورت مجموع مسافت هر گره از گره قبل و بعد از آن محاسبه می شود

$$j = \arg \max \{ |C_{ij} - C_{jk}| \} \quad (14)$$

جدول ۳. ماتریس تحویلی به مشتریان همچنین ماتریس موجودی و

	T=1	T=2	T=3
مشتری ۱	۲۱	۳۸	۲۷
مشتری ۲	۲۵	۹	۲۵
مشتری ۳	۱۸	۵۹	۲۳
مشتری ۴	۴۳	۱۱	۴۲

ماتریس سفارشهای به تاخیر افتاده به دلیل منطقی بودن در جداول شماره ۴ و ۵ به ترتیب آمده است.

جدول ۴. ماتریس موجودی

	T=1	T=2	T=3
مشتری ۱	۰	۰	۰
مشتری ۲	۱۴	۰	۰
مشتری ۳	۵	۱۶	۰
مشتری ۴	۰	۰	۰

جدول ۵. ماتریس سفارشهای به تاخیر افتاده

	T=1	T=2	T=3
مشتری ۱	۰	۰	۰
مشتری ۲	۰	۰	۰
مشتری ۳	۰	۰	۲
مشتری ۴	۰	۰	۰

زهره دشتیان - فرهاد اعتباری

تحویلی‌اش از همه بیشتر بود و امکان پاسخ گویی را در دوره بعد داشت تخریب می‌شود.

تعمیر: مشتریانی که بر اساس مقدار کالای تحویلی در دوره قبل تخریب شدند به بهترین جای ممکن خود در دوره بعد وارد می‌شوند. مثالی در زیر برای منطقی بودن این حالت آورده شده است

در جدول ۶ برای ۴ مشتری در ۳ دوره تقاضاهایی در نظر گرفته شده است. برای مثال تقاضای مشتری سوم در دوره دوم ۴۸ است و مقدار کالایی که برای آن اختصاص داده شده است ۵۹ است. چون پر هزینه است و همچنین امکان پاسخ گویی در دوره‌ی بعد را دارد پس به مقدار ۱۰ واحد از آن کم می‌شود پس ۴۹ مقدار کالای تحویلی برای مشتری سوم در دوره دوم در نظر گرفته می‌شود. آن ۱۰ تا به دوره بعد اضافه می‌شود و دوره بعد ۳۳ مقدار کالا حمل می‌شود. در این صورت دوره بعد هم کمبود کمتر می‌آورد. اینجا برای مثال یک مشتری در نظر گرفته شده است. ولی در الگوریتم چون جستجوی همسایگی بزرگ است تعداد بیشتری در نظر گرفته می‌شود.

جدول ۶. ماتریس تقاضا

	T=1	T=2	T=3
مشتری ۱	۲۱	۳۸	۲۷
مشتری ۲	۱۱	۲۳	۲۵
مشتری ۳	۱۳	۴۸	۴۱
مشتری ۴	۴۳	۱۱	۴۲

عملگر تعمیر با استفاده از لیست مشتریانی که توسط عملگر تخریب برداشته شده است با یک استراتژی مشخص مشتریان را در جایگاه‌های جدید قرار می‌دهد و به ساخت دوباره مسیر می‌پردازد. این عملگر در هر تکرار خود m گره از گره‌های تخریب شده را در بهترین جای ممکن و موجه خود قرار می‌دهد. هزینه قرار گرفتن گره در مسیر برای هر کدام از مشتریان تخریب شده توسط عملگرهای تخریب از رابطه (۱۵) محاسبه می‌شود.

$$i = \arg \min \{e(i)\}$$

$$e(i) = C_{ji} + C_{ik} + C_{jk}, i \in m \quad \text{رابطه (۱۵)}$$

۳-۴ روش‌های ایجاد همسایگی

برای ایجاد همسایگی از چهار همسایگی تخریب و تعمیر استفاده شده است که در زیر به آنها اشاره می‌شود:

• همسایگی اول:

تخریب: چند مشتری انتخاب می‌شود (تصادفی یا از طریق رابطه ۱۴) این رابطه اینگونه عمل می‌کند که در هر تکرار مشتریان با هزینه زیاد را انتخاب می‌کند که در آن هزینه به صورت مجموع مسافت هر گره از گره قبل و بعد از آن به دست می‌آید.

تعمیر: آن مشتریانی که تخریب شده بودند وسیله نقلیه ای که به آنها اختصاص داده شده است عوض می‌شوند و در بهترین جای ممکن خود و موجه خود قرار می‌گیرند اینجا تمرکز روی رد مشتری است. یعنی اول مشتریان پر هزینه در نظر گرفته می‌شود. هزینه قرار گرفتن وسائل نقلیه در مسیر برای هر کدام از مشتریان با استفاده از رابطه (۱۵) به دست می‌آید.

• همسایگی دوم:

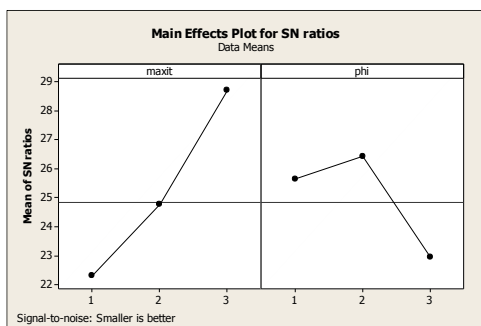
تخریب: مشتریانی که انتخاب می‌شوند مقدار کالای تحویلی به مشتریان عوض می‌شود. یعنی بین چند مشتری آنکه مقدار کالای

مدل سازی مسئله مسیریابی - موجودی سبز با در نظر گرفتن وسائل نقلیه هیبریدی و حل آن توسط الگوریتم

آزمایش ها، رویه سطح پاسخ و طراحی آزمایش ها به روش تاگوچی، برای تنظیم پارامتر الگوریتم ها مورد استفاده قرار می گیرد. در این مقاله، از روش تاگوچی به منظور تنظیم پارامتر الگوریتم فراابتکاری پیشنهادی استفاده شده است. برای انجام تنظیم پارامتر به روش تاگوچی بعد از تعیین شاخص ارزیابی باید فاکتورهای موثر و سطوح آنها تعیین شوند. در جدول ۸ برای الگوریتم LNS سطوح مختلف پارامترها، از جمله حداکثر تعداد (maxit) و تعداد تکرار معین (phi) که همان شرط توقف الگوریتم است نشان داده شده است و در شکل ۱ چگونگی تغییر مقادیر شاخص S/N را در سطوح مختلف الگوریتم نشان می دهد. با توجه به شاخص S/N میزان اثر بخش بودن هریک از فاکتورها بدست آمده است که نتایج آن در جدول ۹ ارائه شده است.

جدول ۸. سطوح پارامترهای الگوریتم LNS

Factors	Low	Medium	High
Maxit	۲۰۰	۵۰۰	۱۰۰۰
Phi	۳۰	۵۰	۸۰



شکل ۱. شاخص S/N پارامترهای الگوریتم LNS

جدول ۹. سطوح بهینه پارامترهای الگوریتم LNS

Factor	maxit	phi
Level Optimal	۱۰۰۰	۵۰

جدول ۷. ماتریس تحویلی به مشتریان

	T=1	T=2	T=3
مشتری ۱	۲۱	۳۸	۲۷
مشتری ۲	۲۵	۹	۲۵
مشتری ۳	۱۸	۵۹	۲۳
مشتری ۴	۴۳	۱۱	۴۲

• همسایگی سوم

تخریب: چند مشتری از یک دوره حذف می شوند (تخریب می شوند) در حالت قبلی فقط تمرکز روی کالای تحویلی در دوره بود ولی در اینجا اگر مشتری در یک دوره از هر نظر پر هزینه بود تخریب شود

تعمیر: در فاز تعمیر مشتریانی که از دوره قبل تخریب شده بود به بهترین جای خود (بهینه) وارد می شوند. از طریق رابطه ۱۵. این همسایگی Insertion بین ۲ دوره هست.

• همسایگی چهارم

تخریب: چند مشتری از چند وسیله نقلیه تخریب می شوند. در اینجا تمرکز روی وسیله نقلیه است. تعمیر: از مشتریان آن ماشین های تخریب شده جابه جایی رخ می دهد (exchange)

۵. تنظیم پارامتر

عملکرد الگوریتم های فراابتکاری به مقادیر پارامترهای ورودی آنها وابسته است به طوری که اگر پارامترهای یک الگوریتم کارآمد به طور صحیح تنظیم نگردد، باعث ناکارآمدی این الگوریتم خواهد شد. تکنیک های مختلفی مانند تکنیک طرح های چند عاملی طراحی

۶. نتایج محاسباتی

به منظور مقایسه روش‌های حل، مسائل را در سایزهای مختلف با استفاده از الگوریتم پیشنهادی به اجرا گذاشته و بهترین مقدار شاخص‌های الگوریتم را در نظر گرفته‌ایم. در ابتدا به منظور بررسی صحت مدل پیشنهادی، مسئله را در سایز کوچک با نرم افزار GAMS 23.6 به اجرا درآورده و با مقادیر بهینه الگوریتم فراابتکاری مقایسه می‌شود. پارامترهای ورودی مسئله در جدول ۱۰

و نتایج اولیه در جدول ۱۱ نشان داده شده است.

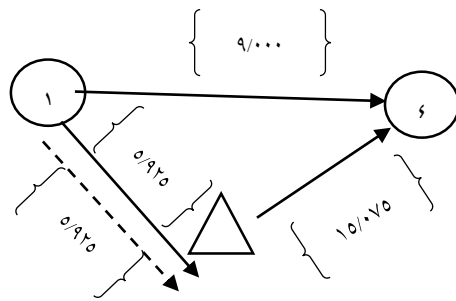
جدول ۱۰. پارامترهای ورودی مسئله

دوره زمانی	وسیله نقلیه	جایگاه سوخت	مشتری	Parameter
۳	۱	۲	۴	data

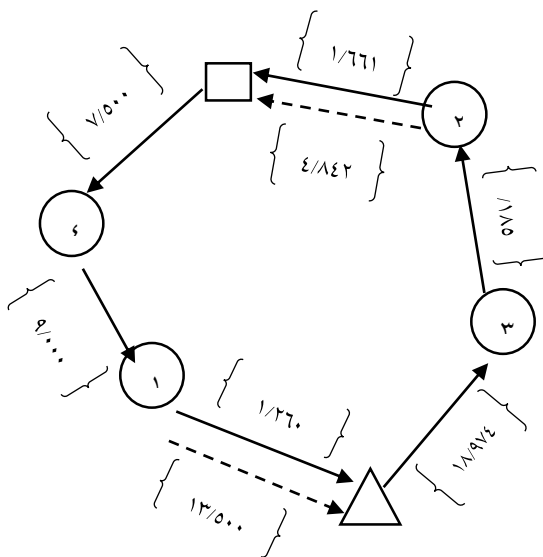
جدول ۱۱. نتایج اولیه الگوریتم LNS و نرم افزار GAMS

Algorithm	GAMS		LNS	
	Objective function	Cpu-time	Objective function	Cpu-time
solution	۳۶۵۴/۳۶۹	۴/۶۸۱	۳۸۲۰/۶۹۵	۴/۴۵۶

همچنین خروجی گرافیکی گمز در شکل‌های ۲ و ۳ آمده است

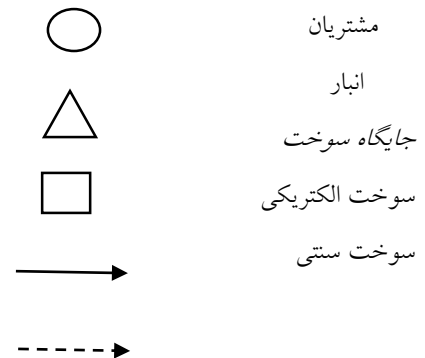


شکل ۲. خروجی گرافیکی گمز در دور اول



شکل ۳. خروجی گرافیکی گمز در دوره دوم

به منظور بررسی مدل پیشنهادی، ۳۰ مسئله در اندازه کوچک، متوسط و بزرگ برای الگوریتم پیشنهادی تعریف شدند. تفاوت اندازه مسئله‌ها در تعداد مشتریان، جایگاه سوخت، وسائل نقلیه و تعداد دوره‌ها است. مشخصات اندازه مختلف مثال‌های عددی استفاده شده از اجرای ۳۰ مسئله از نظر تابع هدف و زمان حل در سه بار اجرا در جداول ۱۳ و ۱۴ و همچنین مقادیر پارامترهای ورودی در جدول ۱۲ قابل مشاهده است.



۱-۶. آزمایش مسئله

مدل‌سازی مسئله مسیریابی - موجودی سبز با در نظر گرفتن وسائل نقلیه هیبریدی و حل آن توسط الگوریتم

جدول ۱۲. مقادیر پارامترهای ورودی

parameters	cap	h	Π_i	d_i	q	I_0	cfe	cfs	ffe	re	rs
Values	(۲۰,۳۰)	(۵۰,۱۵۰)	(۵۰,۱۵۰)	(۱۰,۵۰)	۱۵۰	۱۰	۱۵	۲۰	۳۰	۱/۵	۱/۲

جدول ۱۳. نتایج محاسبه شده حاصل از حل مسئله در ابعاد کوچک

شماره مسئله	مشخصات مسئله			GAMS		LNS		درصد خطا	
	مشتريان	جايگاه سوخت	وسيله نقلیه	دوره زمانی	تابع هدف	زمان اجرا	تابع هدف		
۱	۴	۲	۱	۳	۳۶۵۴/۳۶۸	۴/۶۸۱	۳۸۱۸/۲۹۵	۴/۴۵۶	۴/۴۸۵
۲	۵	۲	۱	۳	۳۷۵۴/۹۸۸	۳/۷۷۰	۳۸۵۷/۳۵۵	۴/۴۷۲	۲/۷۲۶
۳	۴	۲	۲	۳	۶۲۴۱/۶۴۹	۴/۳۳۸	۶۷۲۷/۶۲۹	۲/۶۵۳	۲/۹۷۹
۴	۵	۲	۲	۳	۷۰۵۵/۸۸۹	۹/۵۲۴	۷۳۳۰/۲۰۵	۲/۸۰۹	۳/۸۸۷
۵	۶	۲	۲	۳	۹۹۳۰/۲۱۵	۱۳/۶۷۶	۱۰۳۲۳/۱۱۴	۵/۹۲	۳/۹۵۶
۶	۷	۳	۲	۳	۱۲۳۴۰/۷۴۲	۰۱:۳۲/۲	۱۲۷۰۹/۵	۵/۳۴۴	۲/۹۸۸
۷	۷	۳	۳	۳	۱۴۳۷۰/۹۹۵	۰۵:۳۳/۷	۱۵۰۱۴/۴	۶/۳۴۹	۲/۴۴۷
۸	۸	۳	۴	۴	۱۹۴۷۹/۱۶۸	۰۸:۳۸/۷	۲۰۲۴۰/۶	۹/۵۸۷	۳/۹۰۸
۹	۱۰	۳	۴	۴	۲۹۶۶۳/۸۶۳	۱۶:۴۰/۶	۳۰۷۵۹/۶	۳/۰۳۵	۳/۶۹۳
۱۰	۱۲	۳	۴	۴	۳۶۰۳۸/۴۷۶	۱۶:۴۰/۷	۳۷۲۱۹/۹	۴/۴۷۸	۳/۲۷۸

زهره دشتیان - فرهاد اعتباری

جدول ۱۴. نتایج محاسبه شده حاصل از حل مسئله در ابعاد متوسط

شماره مسئله	مشخصات مسئله			GAMS		LNS		درصد خطا
	مشتریان	جایگاه سوخت	وسیله نقلیه	دوره زمانی	تابع هدف	زمان اجرا	تابع هدف	زمان اجرا
۱	۱۴	۳	۴	۴	۴۱۴۸۲/۸۹۵	۱۶:۴۰/۸	۴۳۱۴۴/۲	۶/۶۴۷
۲	۱۶	۴	۵	۵	-	-	۵۳۲۵۱/۶	۳/۹۴
۳	۱۸	۴	۵	۵	-	-	۷۳۴۳۴/۶	۴/۷۳۱
۴	۲۰	۴	۵	۵	-	-	۷۹۱۳۶/۱	۳/۲۶۱
۵	۲۲	۴	۵	۵	-	-	۸۸۵۳۵/۷	۴/۳۱۵
۶	۲۴	۵	۶	۶	-	-	۹۶۰۰۲/۱	۶/۹۶۹
۷	۲۸	۵	۶	۶	-	-	۱۱۶۶۵۴/۶	۴/۴۹
۸	۳۰	۵	۶	۶	-	-	۱۴۴۶۲۴/۱	۳/۹۶۴
۹	۳۲	۶	۷	۷	-	-	۱۸۲۵۳۳/۸	۳/۸۴۳
۱۰	۳۵	۶	۷	۷	-	-	۲۰۸۱۷۴/۷	۴/۷۲

مدل سازی مسئله مسیریابی - موجودی سبز با در نظر گرفتن وسائل نقلیه هیبریدی و حل آن توسط الگوریتم
جدول ۱۵. نتایج محاسبه شده حاصل از حل مسئله در ابعاد بزرگ

شماره مسئله	مشخصات مسئله						میانگین ۳ اجرا
	مشتریان	جایگاه سوخت	وسیله نقلیه	دوره زمانی	تابع هدف	زمان اجرا	
۱	۳۸	۶	۷	۷	۳۰۰۸۹۷/۹	۶/۲۲۷	۳۰۵۰۷۳/۶
۲	۴۰	۷	۸	۸	۳۴۷۴۷۳/۲	۳/۴۹۱	۳۶۵۹۹۲/۳
۳	۴۴	۷	۸	۸	۴۶۱۱۴۲/۷	۶/۹۲۸	۴۶۳۴۶۹/۹
۴	۴۸	۷	۸	۸	۵۵۸۸۷۸/۳	۶/۰۸۴	۵۶۹۶۸۷/۴
۵	۵۰	۷	۸	۸	۷۲۳۵۳۳/۲	۷/۴۲۵	۷۳۶۲۱۴/۶
۶	۵۵	۸	۹	۹	۷۷۴۹۴۰/۸	۳/۳۵	۷۸۹۰۰۲/۶
۷	۶۰	۸	۹	۹	۹۳۲۸۱۵/۹	۳/۹۰۳	۹۴۱۲۳۵/۳
۸	۶۵	۸	۹	۹	۱۱۲۱۷۸۰/۳	۴/۵۷۱	۱۱۳۸۹۸۵/۲
۹	۷۰	۸	۱۰	۱۰	۳۵۱۷۸۱۱/۸	۵/۲۸	۳۵۲۴۹۵۳/۷
۱۰	۸۰	۸	۱۰	۱۰	۶۵۰۲۷۳۳/۶	۴/۲۷۵	۶۵۱۰۲۳۴/۳

۶-۲ مقایسه آماری عملکرد الگوریتم LNS و نرم افزار

GAMS

به منظور تحلیل آماری نتایج حاصل از اجرای الگوریتم فراابتکاری پیشنهادی و نرم افزار GAMS، از آنالیز واریانس استفاده می شود. خروجی تحلیل واریانس برای الگوریتم LNS و نرم افزار GAMS به کمک نرم افزار Minitab 16 در جدول ۱۶ برای مقادیر تابع هدف و جدول ۱۷ برای زمان حل ارائه شده است.

جدول ۱۶. خروجی تحلیل واریانس الگوریتم LNS و GAMS

برای معیار تابع هدف

Source	DF	SS	MS	F	P
Factor	۱	۱۷۷۴۲۸۹۰۱۲	۱۷۷۴۲۸۹۰۱۲	۲۸ و ۲۶۱۸۱۰	۰ و ۰۰۰
Error	۹	۶۰۹۹۳	۶۷۷۷		
Total	۱۰	۱۷۷۴۳۵۰۰۰۵			

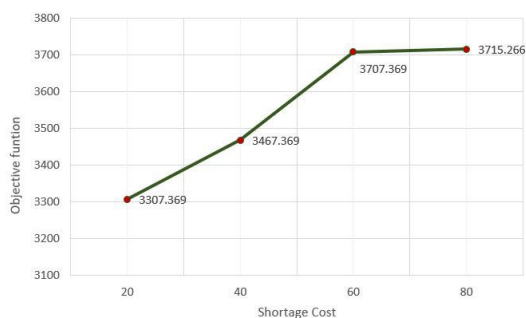
جدول ۱۷. خروجی تحلیل واریانس الگوریتم LNS و GAMS

برای معیار زمان حل

Source	DF	SS	MS	F	P
Factor	۱	۱۰۵۲۷	۱۰۵۲۷	۰.۳۴	۰.۵۷۲
Error	۹	۳۹۰۹۷۷	۱۰۴۴۲		
Total	۱۰	۴۱۵۰۴			



شکل ۵. هزینه سوخت سنتی و تابع هدف



شکل ۶. هزینه کمبود و تابع هدف

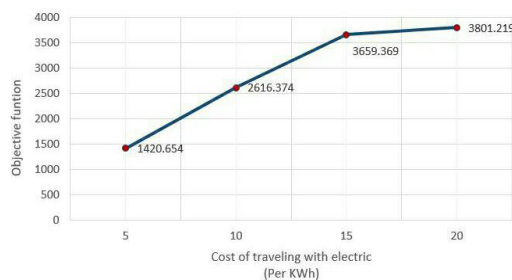
۷. نتیجه گیری

در این پژوهش ابتدا یک مدل مسیریابی موجودی سبز با در نظر گرفتن وسائل نقلیه هیبریدی ارائه شد. در این مسئله فرض شده است که ناوگان موجود می تواند از سوخت های سنتی و الکتریکی استفاده کرده و با توجه به محدود بودن شارژ باتری، امکان شارژ مجدد توسط ایستگاه های از پیش تعیین شده در مدل در نظر گرفته شده است. سپس مدل ریاضی این مسئله در قالب مسئله برنامه ریزی عدد صحیح مختلط ارائه شده است. در قدم بعدی، این مسئله با استفاده از رویکرد حل الگوریتم فراابتکاری LNS حل شده و نتایج مورد بررسی قرار گرفت. جهت اعتبارسنجی مدل ریاضی از نرم افزار گمز استفاده شد و نتایج آن صحت مدل ریاضی را نشان فصلنامه مهندسی حمل و نقل / سال یازدهم / شماره چهارم (۴۵) / تابستان ۱۳۹۹

خروجی تحلیل واریانس بیانگر این است که در معیار مقدار تابع هدف تفاوت معناداری وجود ندارد و الگوریتم LNS و GAMS قابلیت رقابت با یکدیگر را دارند و در معیار زمان تفاوت معناداری وجود دارد. بنابراین اگر مقدار تابع هدف مد نظر باشد، نرم افزار GAMS بهتر عمل می کند و اگر مقدار زمان مد نظر باشد الگوریتم LNS بهتر است.

۳-۶ آنالیز حساسیت

با توجه به مسئله حساسیت چندین پارامتر نسبت به تابع هدف در نظر گرفته می شود. شکل ۴ آنالیز حساسیت را بر روی هزینه سوخت الکتریکی و شکل ۵ آنالیز حساسیت را بر روی هزینه سوخت سنتی نشان می دهد. با توجه به شکل زمانیکه هزینه افزایش می یابد، مقدار تابع هدف نیز افزایش می یابد. شکل ۶ آنالیز حساسیت را بر روی هزینه کمبود تخصیص داده شده نشان می دهد که با افزایش این هزینه، مقدار تابع هدف نیز افزایش می یابد.



شکل ۴. هزینه سوخت الکتریکی و تابع هدف

the inventory-routing problem with backlogging", Computers and Industrial Engineering, Vol.56, No.4, pp. 1519-1534.

-Aghezzaf, E. H., Raa, B. and Van Landeghem, H. (2006) "Modeling inventory routing problems in supply chains of high consumption products", European Journal of Operational Research, Vol.169, No.3, pp. 1048-1063.

-Campbell, A. M. and Savelsbergh, M. W. (2004) "A decomposition approach for the inventory-routing problem" Transportation science, Vol.38, No.4, pp.488-502.

-Chen, Z., Mi, C. C., Xiong, R., Xu, J. and You, C. (2014) "Energy management of a power-split Plug - in hybrid electric vehicle based on genetic algorithm and quadratic programming", Journal of Power Sources, Vol. 248, pp. 416-426.

-Cordeau, J., and Laganà, D. (2015) "A decomposition-based heuristic for the multiple-product inventory-routing problem", Computers and Operations, Vol. 55, pp.153-166.

-Dimitrova, Z., and Maréchal, F. (2015) "Techno-economic design of hybrid electric using multi objective optimization vehicles techniques", Energy, Vol.91, pp.630-644.

-Doppstadt, C., Koberstein, A., and Vigo, D. (2016) "The Hybrid Electric Vehicle-Traveling Salesman Problem", European Journal of Operational Research, Vol.253, No.3, pp.825-842.

-Jaillet, P., Bard, J. F., Huang, L., and Dror, M. (2002) "Delivery cost approximations for inventory routing problems in a rolling horizon framework", Transportation Science, Vol.36, No.3, pp.292-300.

داد. برای حل با استفاده از الگوریتم‌های فراابتکاری ابتدا پارامترها به روش تاگوچی تنظیم شدند و نتایج برای مسائل آزمایشی مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. خروجی تحلیل واریانس نیز بیانگر این است که الگوریتم LNS در زمان کمتری قادر به حل مدل است. در نهایت نیز آنالیز حساسیت بر روی پارامتر هزینه سوخت الکتریکی و سستی و هزینه کمبود صورت گرفته است. به منظور توسعه مدل ارائه شده می‌توان امکان مبادله کالا مابین مشتریان و از تحویل چندبخشی برای تحویل تقاضا استفاده کرد. در نظر گرفتن هزینه و زمان شارژ باتری و استفاده از الگوریتم‌های فراابتکاری نوین برای مسئله مسیریابی موجودی از دیگر پیشنهادات توسعه آتی است.

پی نوشت‌ها :

1. Large Neighbourhood Search
2. Split Delivery
3. Clarke and Wright

۸. مراجع

-وکیلی، پریراد، حسینی مطلق، سید مهدی، غلامیان، محمدرضا و جوکار، عباس (۱۳۹۶) "ارائه مدل ریاضی مسیریابی — موجودی چندمحصوله برای اقلام دارویی در زنجیره تأمین سرد و روش حل ابتکاری مبتنی بر جست‌وجوی همسایگی انطباقی"، نشریه مدیریت صنعتی، سال نهم، شماره دوم، ص. ۴۰۷-۳۸۳.

-علینقیان، مهدی و کاویانی دزکی، زهرا (۱۳۹۲) "مسیریابی موجودی سبز"، دهمین کنفرانس بین‌المللی مهندسی صنایع، تهران، انجمن مهندسی صنایع ایران.

-Abdelmaguid, T. F., Dessouky, M. M. and Ordóñez, F. (2009) "Heuristic approaches for

- Jimenez-Espadafor, F. J., Marín, J. J. R
- Liu, S. C., and Chen, A. Z. (2012) "Variable neighborhood search for the inventory routing and scheduling problem in a supply chain" *Expert Systems with Applications*, Vol.39, No.4, pp.4149-4159.
- Mancini, S. (2017) "The hybrid vehicle routing problem", *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, Vol.78, pp.1-12.
- Mirzaei, S. and Seifi, A. (2015) "Considering lost sale in inventory routing problems for perishable goods", *Computers and Industrial Engineering*, Vol. 87, pp. 213-227.
- Rusdiansyah, A., and Tsao, D. B. (2005) "An integrated model of the periodic delivery
- Vincent, F. Y., Redi, A. P., Hidayat, Y. A., and Wibowo, O. J. (2017) "A simulated annealing heuristic for the hybrid vehicle routing problem" *Applied Soft Computing*, Vol.53, pp.119-132.
- Yu, Y., Chen, H., and Chu, F. (2008) "A new model and hybrid approach for large scale inventory routing problems" *European Journal of Operational Research*, Vol.189, No.3, pp.1022-1040.
- ., Villanueva, J. A. B., García, M. T., Trujillo, E. C. and Ojeda, F. J. F. (2011) "Infantry mobility hybrid electric vehicle performance analysis and design", *Applied energy*, Vol.88, No.8, pp.2641-2652.
- Kermani, S., Delprat, S., Guerra, T. M. and Trigui, R. (2008) "Real time control of hybrid electric vehicle on a prescribed road", *IFAC Proceedings* Vol.41, No.2, pp. 3356-3361.
- Li, K., Chen, B., Sivakumar, A. and Wu, Y. (2014) "An inventory-routing problem with the objective of travel time minimization", *European Journal of Operational*, Vol. 236, No.3, pp.936-945.
- problems for vending-machine supply chains", *Journal of Food Engineering*, Vol.70, No.3, pp. 421-434.
- Shams-Zahraei, M., Kouzani, A. Z., Kutter, S., and Bäker, B. (2012) "Integrated thermal and energy management of plug-in hybrid electric vehicles", *Journal of power sources*, Vol.216, pp.237-248.

مدل‌سازی مسئله مسیریابی - موجودی سبز با در نظر گرفتن وسائل نقلیه هیبریدی و حل آن توسط الگوریتم

فرهاد اعتباری، درجه کارشناسی در رشته مهندسی صنایع را در سال ۱۳۸۲ از دانشگاه صنعتی شریف و درجه کارشناسی ارشد در رشته مهندسی صنایع را در سال ۱۳۸۵ از دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی اخذ نمود. در سال ۱۳۹۱ موفق به کسب درجه دکتری در رشته مهندسی صنایع از دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی گردید. زمینه های پژوهشی مورد علاقه ایشان طراحی سیستم لجستیک، طراحی شبکه های حمل و نقل، مسیریابی وسائل نقلیه و توسعه انواع الگوریتم های ابتکاری و فراابتکاری بوده و در حال حاضر عضو هیات علمی با مرتبه استادیاری در دانشگاه آزاد اسلامی قزوین است



زهرا دشتیان، درجه کارشناسی در رشته مهندسی صنایع را در سال ۱۳۹۳ از دانشگاه آزاد اسلامی سنندج و درجه کارشناسی ارشد در رشته مهندسی صنایع در سال ۱۳۹۶ را از دانشگاه آزاد اسلامی واحد قزوین اخذ نمود. زمینه های پژوهشی مورد علاقه ایشان برنامه ریزی حمل و نقل و مدیریت زنجیره تامین است.

