



پژوهش‌های نوین در تصمیم‌گیری

دوره ۷، شماره ۱، بهار ۱۴۰۱، صص ۱۳۴-۱۶۴

نوع مقاله: پژوهشی

## ارائه مدل برنامه‌ریزی غیرخطی عدد صحیح مختلط برای بهینه‌سازی زنجیره تأمین حلقه بسته سبز: مطالعه موردی صنعت لبنی کاله

سیده مرضیه احمدی<sup>۱</sup>، عبدالحمید صفایی قادیکلایی<sup>۲\*</sup>، جواد رضاییان زیدی<sup>۳</sup>،  
محمد ولی‌پورخطیر<sup>۴</sup>

- ۱- دانشجوی دکتری مدیریت تولید و عملیات، دانشکده علوم اقتصادی و اداری، دانشگاه مازندران، بابلسر، ایران.
- ۲- استاد، گروه مدیریت صنعتی، دانشکده علوم اقتصادی و اداری، دانشگاه مازندران، بابلسر، ایران.
- ۳- دانشیار، گروه مهندسی صنایع، دانشگاه علوم و فنون مازندران، بابل، ایران.
- ۴- استادیار، گروه مدیریت صنعتی، دانشکده علوم اقتصادی و اداری، دانشگاه مازندران، بابلسر، ایران.

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۱۰/۲۳

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۸/۱۶

### چکیده

در این پژوهش یک مدل برنامه‌ریزی غیرخطی عدصیح مختلط (MINLP) جهت مدل‌سازی زنجیره تأمین حلقه بسته صنایع لبنی در سطوح تولید، توزیع و فروش ارائه شده است. مدل ریاضی پیشنهادی تحقیق شامل دو تابع اقتصادی و زیست محیطی است. تابع هدف اقتصادی بر اساس حداکثرسازی سود کل و تابع هدف زیست محیطی به منظور حداقل‌سازی انتشار  $CO_2$  و میزان COD تعریف شده است. همچنین در بخشی از مدل که بیانگر رابطه بین توزیع‌کننده و مشتری است، مسئله مسیریابی وسیله نقلیه سبز در نظر گرفته شده که شامل چند محصول، چند انبار، چند نوع وسیله نقلیه و چند دوره زمانی است. با توجه به پیچیدگی مسئله و ماهیت NP-hard آن در این پژوهش از الگوریتم فراابتکاری NSGAIII جهت حل مسئله استفاده شده است. به منظور بررسی کارایی این الگوریتم نیز چند مسئله در ابعاد کوچک طراحی و در نرم‌افزار لینگو حل شده و پاسخ‌های به دست آمده با جواب‌های حاصل از روش فراابتکاری مقایسه گردید. در نهایت اثر میزان هدر رفت چربی به عنوان یکی از عوامل تأثیرگذار بر آلودگی فاضلاب لبنی نیز مورد بررسی قرار گرفت. یافته‌ها بیانگر کارایی الگوریتم NSGAIII و نیز نشان‌دهنده اثر مستقیم میزان هدر رفت چربی بر آلودگی فاضلاب بود.

**کلیدواژه‌ها:** زنجیره تأمین حلقه بسته سبز، برنامه‌ریزی غیرخطی، مسیریابی وسایل نقلیه سبز، الگوریتم NSGAIII



## ۱- مقدمه

زنجیره تأمین به‌عنوان شاخه‌ای از مدیریت عملیات دارای اثرات زیست محیطی بسزایی از جمله انتشار کربن و گازهای گلخانه‌ای و آلودگی زیست محیطی است [۱]. در سال‌های اخیر توسعه پایدار به‌عنوان یک مسئله ضروری شناخته شده [۲] و پژوهشگران ادغام جنبه‌های اقتصادی و زیست محیطی زنجیره تأمین را بسیار حائز اهمیت دانسته‌اند [۳،۴]. در ادبیات زنجیره تأمین، تلفیق الزامات زیست محیطی در عملیات زنجیره تأمین به‌عنوان «مدیریت زنجیره تأمین سبز» شناخته می‌شود. در برخی از پژوهش‌ها این مفهوم با عبارات دیگری مانند تولید سبز و بازیابی محصول، لجستیک معکوس، زنجیره تأمین حلقه‌بسته<sup>۲</sup> و زنجیره تأمین پایدار زیست محیطی بیان شده است [۵]. پژوهشگران بر این باورند که مدیریت زنجیره تأمین سبز برای تأمین اولویت‌های زیست محیطی و رویارویی با مشکلاتی مانند کاهش منابع تجدیدپذیر، آلودگی زیست محیطی و گرم شدن کره زمین ضروری است [۶]. بر این اساس، مدیریت زنجیره تأمین سبز در اکثر کشورهای پیشرفته و اخیراً در کشورهای در حال توسعه مورد توجه روز افزون قرار گرفته است.

انتشار دی اکسید کربن از شاخص‌های عمده سنجش اثرات زیست محیطی زنجیره تأمین است که در پژوهش‌های مختلف مورد استفاده قرار گرفته است [۵]. بر اساس برآورد آژانس بین‌المللی انرژی<sup>۱</sup>، ۲۳ درصد انتشار گازهای گلخانه‌ای در سطح جهان مربوط به بخش حمل‌ونقل می‌باشد. بنابراین کاهش انتشار آلودگی از نگرانی‌های طراحی و توسعه زنجیره‌های تأمین مدرن تلقی می‌شود [۷]. دسته دیگر معیارهای زیست محیطی که در ادبیات تحقیق به آن اشاره شده معیارهای مربوط به آلودگی آب است. آبی و سرسی<sup>۴</sup> [۵] با مرور مقالات حوزه پایداری در مجموع ۷۶ معیار مرتبط با آب را شناسایی نمودند که از بین آن‌ها میزان مصرف آب، میزان هدر رفت آب و کاهش حجم فاضلاب پرکاربردترین معیارها بوده‌اند. مطابق بررسی‌های انجام شده، صنایع لبنی از جمله صناعی است که با توجه به حجم پساب تولید شده و همین‌طور محتویات و ترکیبات آن اثرات مخربی بر سلامت محیط زیست می‌گذارد.

فاضلاب صنایع لبنی در درجه اول از تمیز کردن و شستشوی دستگاه‌ها در کارخانجات ایجاد می‌شود. همچنین آمارها نشان می‌دهد حدود دو درصد از کل شیر فراوری شده در زهکشی‌ها به هدر می‌رود. فاضلاب لبنی با غلظت زیاد اکسیژن مورد نیاز بیولوژیکی<sup>۵</sup> (BOD) و اکسیژن مورد نیاز شیمیایی<sup>۶</sup> (COD) مشخص می‌شود و حاوی چربی‌ها، روغن‌ها و گریس‌ها، مواد مغذی مانند آمونیاک یا شوینده‌ها و مواد ضدعفونی کننده است. پساب‌های لبنی



به سرعت تجزیه می‌شوند و سطح اکسیژن محلول جریان آب را کاهش می‌دهند و سبب انتشار بوی بد و ایجاد شرایط آزاردهنده می‌شوند [۸].

با توجه به اهمیت زنجیره تأمین صنایع لبنی از منظر اقتصادی و زیست محیطی این پژوهش به دنبال بهینه‌سازی یک مدل زنجیره تأمین سه لایه حلقه بسته دوهدفه چند محصوله چند دوره‌ای در صنایع لبنی می‌باشد. مطالعه موردی این تحقیق شرکت لبنی کاله از بزرگ‌ترین شرکت‌های صنایع لبنی کشور است. مدل زنجیره تأمین حلقه‌بسته این تحقیق دارای دو تابع هدف اقتصادی و زیست محیطی بوده و به‌صورت یک مدل برنامه‌ریزی غیرخطی عدد صحیح مختلط بیان می‌شود. تابع هدف زیست محیطی بر اساس میزان انتشار کربن از تولید به توزیع و از توزیع به فروش و همچنین مقدار COD حاصل از فاضلاب لبنی تشکیل شده است. از آن جایی که محصولات لبنی در زمره کالاهای تند مصرف هستند، دوره عمر این محصولات از اهمیت بالایی برخوردار است. این نکته در مدل‌سازی زنجیره تأمین مورد توجه قرار گرفته است. علاوه بر آن، در تابع هدف زیست محیطی برای مدل‌سازی انتشار کربن از توزیع به فروش مدل مسیریابی وسایل نقلیه در نظر گرفته خواهد شد. به‌عنوان نوآوری این تحقیق، می‌توان به موارد ذیل اشاره نمود: پرداختن به موضوع تصفیه فاضلاب به‌عنوان یکی از شاخص‌های زیست محیطی، استفاده از مسئله مسیریابی سبز در زنجیره تأمین چند محصوله چند انباره با وسایل نقلیه متفاوت و در چند دوره زمانی، لحاظ نمودن دوره عمر محصولات لبنی در مدل‌سازی زنجیره تأمین، حل مدل بهینه‌سازی زنجیره تأمین بر اساس داده‌های واقعی جمع‌آوری شده از یک مجموعه تولیدی.

ادامه مقاله به شرح ذیل تنظیم شده است. در بخش دوم ادبیات تحقیق بررسی می‌شود که این بخش خود شامل چهار قسمت می‌باشد. تشریح مسئله و تبیین مدل ریاضی در بخش سوم ارائه می‌شود. در بخش چهارم روش حل مدل ریاضی و نتایج حاصل از رویکرد فراابتکاری با استفاده از داده‌های مطالعه موردی نمایش داده می‌شود. در نهایت نتیجه‌گیری مطالعه و پیشنهادات آتی در بخش پنجم ارائه می‌گردد.

## ۲- مرور ادبیات

### ۲-۱- مدیریت زنجیره تأمین سبز در صنعت غذایی

محصولات تند مصرف<sup>۱</sup> (FMCG) به‌طور گسترده بیانگر طیف مهمی از محصولات مصرفی روزانه انسان بدون در نظر گرفتن سن، جنسیت و موقعیت جغرافیایی است. FMCG ها عمدتاً



شامل غذاهای فراوری شده و آماده، نوشیدنی‌ها، غذاهای منجمد و خشک، داروها و سایر محصولات کم دوام است [۹]. از آنجا که بسیاری از مردم به‌طور مکرر این محصولات را خریداری می‌نمایند، هزینه‌ای که خانوارها برای محصولات تند مصرف پرداخت می‌کنند، بسیار قابل توجه است. از سوی دیگر، با توجه به نوع مواد اولیه مورد استفاده و مصرف زیاد انرژی در تولید این محصولات، انتشار گازهای گلخانه‌ای در این صنایع رو به افزایش است. این بدان معناست که صنایع FMCG باید به سمت سبز بودن و پایداری زیست محیطی سوق داده شوند. فرآورده‌های لبنی در زمره پرمصرف‌ترین کالاهای تند مصرف قرار دارند که تولید آنها می‌تواند منجر به اثرات زیست محیطی عمده‌ای گردد. یافته‌ها نشان می‌دهد برای تولید یک کیلو پنیر سخت حدود ده لیتر شیر مصرف می‌گردد و تولید یک لیتر شیر، در حدود ۱.۳۰۹ گرم دی اکسید کربن در سراسر زنجیره ساطع می‌کند [۱۰]. مواردی از این دست نشان‌دهنده اهمیت توجه به مسائل زیست محیطی و لزوم به‌کارگیری مدیریت زنجیره تأمین سبز در صنایع لبنی است.

## ۲-۲- معیارهای زیست محیطی بررسی شده در GSCM

بررسی‌ها نشان می‌دهد بسیاری از محققین برای ارزیابی اثرات زیست‌محیطی زنجیره تأمین از معیار انتشار کربن استفاده کرده‌اند [۱۲،۱۱،۴]. علاوه بر آن معیارهایی مانند کاهش مصرف سوخت و انرژی [۱۴،۱۳] و انتشار گازهای گلخانه‌ای [۱۶،۱۵] نیز مورد استفاده پژوهشگران قرار گرفته است. اما شاخص‌های موجود در این زمینه منحصر به موارد فوق نمی‌شود. مسئله آلودگی آب به عنوان یک عامل اثرگذار بر محیط‌زیست هنوز بطور جدی مورد بررسی قرار نگرفته و پژوهش‌های محدودی در این خصوص انجام شده است. از جمله پژوهشگرانی که آلودگی آب را در مسئله زنجیره تأمین مورد مطالعه قرار داده‌اند، محمدی و همکاران<sup>۱</sup> [۱۷] بودند که در یک مدل زنجیره تأمین پایدار صنایع غذایی، از شاخص‌های انتشار CO<sub>2</sub> و تصفیه فاضلاب جهت تشکیل تابع هدف اقتصادی و محاسبه اثرات مالی شاخص‌های مذکور استفاده نمودند.

## ۲-۳- مسئله مسیریابی وسایل نقلیه در صنعت غذایی

زنجیره تأمین مواد غذایی شامل محصولاتی است که اغلب دارای دوره عمر کوتاه، از همان لحظه تولید رو به زوال و نیازمند حمل‌ونقل سریع هستند. بنابراین در صورت فقدان سیستم حمل‌ونقل مناسب ممکن است قبل از استفاده به سرعت خراب شوند [۱۸]. مسئله مسیریابی



وسایل نقلیه<sup>۱</sup> (VRP) بر تعیین کوتاه‌ترین فاصله برای سرویس‌دهی به مجموعه‌ای از مشتریان تاکید دارد که از نظر جغرافیایی پراکنده هستند [۱۵]. در VRP سنتی مسیرها به نحوی انتخاب می‌شوند که هزینه حمل‌ونقل حداقل گردد. اما مدل‌های جدید VRP به سنجش اثرات زیست‌محیطی به انتخاب مسیر می‌پردازند. بنابراین مسئله مسیریابی وسایل نقلیه سبز<sup>۲</sup> (GVRP) با هدف هماهنگی هزینه‌های زیست‌محیطی و اقتصادی و توجه به نگرانی‌های زیست‌محیطی توسعه یافته است. از جمله پژوهش‌های انجام شده در حوزه GVRP می‌توان به پژوهش شریف و همکاران<sup>۱۱</sup> [۱۹] اشاره کرد که یک مدل برنامه‌ریزی غیرخطی عدد صحیح مختلط<sup>۱۲</sup> را برای زنجیره تأمین دو سطحی یک کارخانه تولیدی باتری توسعه دادند. هدف حداقل‌سازی هزینه حمل موجودی، هزینه حمل‌ونقل و هزینه انتشار کربن بوده و با استفاده از الگوریتم SAA با روش حل همسایگی تبادلی<sup>۱۳</sup> به حل مسئله پرداختند.

دسته دیگری از پژوهش‌های در حوزه VRP و زنجیره تأمین محصولات فاسدشدنی بود. در پژوهش بیوکی و همکاران<sup>۱۴</sup> [۲۰] مسئله مکان‌یابی، مسیریابی و موجودی در یک شبکه زنجیره پایدار دو سطحی از محصولات فاسدشدنی بررسی شد. مسئله موردنظر با استفاده از یک مدل MILP فرموله و با رویکرد ترکیبی GA و PSO حل گردید. مسئله VRP و محصولات فاسدشدنی در پژوهش [۱۵] نیز مورد بررسی قرار گرفته است.

#### ۲-۴- پیشینه تحقیق

در این پژوهش به‌منظور ارائه خلاصه‌ای از تحقیقات انجام شده، به بررسی مقالات انتشار یافته در حوزه مدیریت زنجیره تأمین سبز از سال ۲۰۱۵ تا ۲۰۲۱ پرداخته شد. علت انتخاب این بازه زمانی محدودیت صفحات مقاله حاضر است. از آنجایی که تحقیق حاضر در حوزه بهینه‌سازی زنجیره تأمین سبز است، مقالات حوزه بهینه‌سازی زنجیره تأمین سبز که در پایگاه‌های گوگل اسکالر، الزویر، اشپرینگر، جان‌وایلی و پسران و تیلور و فرانسیس چاپ شده‌اند مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج جستجو نشان داد که برخی از عناوین با کلید واژه "GSC Modelling" و "GSC Optimization" مطابقت نداشت. بنابراین با ترکیب کلمات کلیدی دیگر مانند "FMCG"، "Dairy"، "Perishable Food"، "Green VRP"، "Closed-loop"، "Green SCN"، "Environmental Sustainability" با کلمات "GSCN"، "GSC Optimization" و "GSC Modelling" به جستجوی مجدد در این پایگاه پرداخته شد. پس از بررسی یافته‌های حاصل از جستجو، با توجه به تعدد مقالات در این حوزه،



مرتبط‌ترین مقالات منتشر شده در نشریات معتبر انتخاب گردید. در جدول ۱ خلاصه‌ای از این نتایج ارائه می‌گردد. مطابق آنچه در جدول بالا آمده در ۲۲ مورد از ۲۳ مقاله معرفی شده حداقل یکی از شاخص‌های اقتصادی در تابع هدف مدل لحاظ شده است. همچنین در ۲۰ پژوهش از ۲۲ مقاله مورد اشاره، شاخص‌های زیست‌محیطی در مدل‌سازی زنجیره تأمین مورد استفاده قرار گرفته است. اما از این تعداد صرفاً در سه مقاله به مسئله مسیریابی وسیله نقلیه پرداخته شده و در هیچ‌کدام از تحقیقات ارائه شده در زمینه زنجیره تأمین سبز شاخص‌های تصفیه فاضلاب در مدل‌سازی استفاده نشده است. در حالی که پژوهش حاضر در بعد زیست محیطی شامل شاخص تصفیه فاضلاب و حداقل‌سازی انتشار کربن از طریق مسئله مسیریابی وسیله نقلیه است.

جدول ۱. خلاصه‌ای از تحقیقات انجام شده

روش حل	شاخص‌های اقتصادی						شاخص‌های زیست محیطی			مطالعه موردی	مسئله مسیریابی (VRP)	چند وسیله نقلیه	چندانباره	چند دوره‌ای	چند محصوله	نوع مدل	نوع GSCN		نویسنده
	تخفیف	هزینه کمبود	حداقل‌سازی زمان	حداکثر سازی نرخ تعویب	حداقل‌سازی هزینه	حداکثر‌سازی سود	حداکثر‌سازی میزان سبز بودن مواد خام	کاهش مصرف	Min GHG								Min CO <sub>2</sub>	حلقه بسته	
شبیه‌سازی تیرید (SA)					*						*	*	*	*	MINLP		*	[۱۹]	
محدودیت افسیلین و GA					*				*		--	--	--	--	MILP	*		[۱۲]	
MODM-Robust OP.	*				*				*		--	--	--	*	MILP	*		[۲۱]	
Modified-GA, Robust OP.					*						--	--	--	*	MILP	*		[۲۲]	
سیستم صف و GA							*				--	--	*	--	NLP	*		[۱۳]	
چهار الگوریتم فراابتکاری ترکیبی					*				*		*	*	*	*	MILP		*	[۱۵]	
رویکرد فازی		*			*				*		*	*	*	*	MILP		*	[۱۴]	
رویکرد					*				*		---	---	---	*	MILP	*		[۱۶]	



روش حل	شاخص‌های اقتصادی						شاخص‌های زیست محیطی			مطالعه موردی	مسئله مسیریابی (VRP)	چند وسیله نقلیه	چند انبار	چند دورهای	چند محصوره	نوع مدل	نوع GSCN		نویسنده
	تخفیف	هزینه کمبود	حداقل‌سازی زمان	حداکثر‌سازی نرخ تحویل	حداقل‌سازی هزینه	حداکثر‌سازی سود	حداکثر‌سازی میزان سبز بودن موادم	کاهش مصرف	Min GHG								Min CO <sub>2</sub>	حلقه بسته	
بهینه‌سازی استوار و فراابتکاری																			
رویکرد دقیق لینگو					*				*	صنعت نوشیدنی	---	---	---	*	---	MILP	*	[۲۳]	
رویکرد تصادفی و آزادسازی لاگرانژ					*				*	---	---	---	---	*	MIP	*	[۲۴]		
بهینه‌سازی پارتو روش NNC	*				*				*	صنعت کاغذسازی	---	---	---	---	MILP	*	[۸]		
برنامه ریزی تصادفی فازی استوار					*					---	---	---	*	---	MILP	*	[۳]		
روش احتمالی، محدودیت اسپیلن					*				*	---	---	*	*	*	MINLP	*	[۲۵]		
محدودیت اسپیلن، بهینه‌سازی استوار					*				*	صنعت داروسازی	--	--	*	*	MILP	*	[۲۶]		
بهینه‌سازی پارتو، Lp-metrics					*				*	---	---	*	---	*	MILP	*	[۲۷]		
بهینه‌سازی پارتو- محدودیت اسپیلن					*				*	---	---	*	---	---	MILP	*	[۲۸]		
رویکرد					*				*	---	---	*	---	---	MILP	*	[۴]		



روش حل	شاخص‌های اقتصادی						شاخص‌های زیست محیطی			مطالعه موردی	مسئله مسیریابی (VRP)	چند وسیله نقلیه	چندانبار	چند دورهای	چند محصوله	نوع مدل	نوع GSCN		نویسنده
	تخفیف	هزینه کمبود	حداقل‌سازی زمان	حداقل‌سازی نرخ تحویل	حداقل‌سازی هزینه	حداكثر‌سازی سود	حداقل‌سازی میزان سبز بودن موادم	کاهش مصرف	Min GHG								Min CO <sub>2</sub>	حلقه بسته	
scalarization																			
برنامه‌ریزی آرمانی، محدودیت اپسین، Lp- metrics			*	*	*				*						MILP		*	[۲۹]	
برنامه ریزی فازی، FMCDM					*	*							*	*	MINLP	*	*	[۳۰]	
روش Lp- metrics					*				*			*	*	*	MINLP		*	[۳۱]	
محدودیت اپسین					*				*						MILP	*		[۱۷]	
محدودیت اپسین، الگوریتم MBSA					*				*					*	MILP		*	[۳۲]	
فرایند ترکیبی					*				*						MILP		*	[۳۳]	
الگوریتم فرایند ترکیبی ژنتیک					*				*					*	MINLP چندهدفه	*		پژوهش حاضر	

### ۳- تشریح مسئله پژوهش و تبیین مدل

در این تحقیق به مدل‌سازی زنجیره تأمین لبنی به‌منظور کاهش هزینه‌ها و حداقل‌سازی اثرات زیست‌محیطی می‌پردازیم. مطالعه موردی این تحقیق شرکت فرآورده‌های لبنی کاله از بزرگ‌ترین کارخانه‌های تولید محصولات لبنی کشور است. این مجموعه دارای حدوداً ۴۰۰۰ نفر نیروی انسانی بوده و روزانه تقریباً ۲۰۰۰ تن محصول را در بیش از ۱۵۰ گروه محصول





مختلف تولید می‌کند. همچنین تصفیه خانه این کارخانه با ظرفیتی بالغ بر ۵۰۰۰ متر مکعب به صورت شبانه‌روزی مشغول فعالیت است. مجموعه لبنی کاله دارای ناوگان حمل‌ونقل اختصاصی است که انواع مختلف وسایل نقلیه با ظرفیت‌های متفاوت و شرایط زیرصفری، بالاصفری و دمای محیط را شامل می‌شود. محصولات تولیدی در انبار کارخانه ذخیره شده و بر اساس نوع سفارش به مراکز توزیع مختلف ارسال می‌شود. هر مرکز توزیع تعداد مشخصی از مشتریان را پوشش می‌دهد و با توجه به نوع و حجم سفارشات، وسایل نقلیه مختلفی جهت سرویس‌دهی به مشتریان تخصیص داده می‌شود. در این تحقیق زنجیره تأمین مورد مطالعه، سه لایه و شامل لایه‌های تولید کننده، توزیع‌کننده و مشتری در است. نکته قابل توجه این است که در مدل حاضر، دوره عمر محصولات لبنی نیز در نظر گرفته شده تا مسئله به حالت واقعی نزدیکی بیشتری داشته باشد.

جهت فرموله کردن اثرات زیست‌محیطی زنجیره تأمین لبنی میزان فاضلاب حاصل از تولید محصول و همچنین کربن حاصل از حمل‌ونقل محصول در مدل لحاظ شده است. مدل ریاضی مسئله حاضر از نوع مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط چند هدفه است. همچنین بخشی از مدل که بیانگر رابطه بین توزیع کننده و مشتری است، از نوع مسئله مسیریابی وسیله نقلیه بوده که شامل چند محصول، چند انبار، چند نوع وسیله نقلیه و چند دوره زمانی است. در ادامه مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط، مفروضات، اندیس‌ها و مجموعه‌ها، پارامترها، متغیرهای تصمیم و محدودیت‌های مسئله ارائه می‌گردد. مجموعه اندیس‌های این بخش شامل اندیس‌های مربوط به مجموعه کارخانه‌ها، گروه محصولات، دوره‌های زمانی، مشتریان، حامل‌ها، مراکز توزیع و مسیرها می‌باشد که در زیر به تفصیل آمده است.

### ۳-۱- مفروضات مدل

- ✓ انتقال محصول به صورت مستقیم از تولید به خرده فروش انجام نمی‌گیرد.
- ✓ تولید بر اساس استراتژی ساخت برای ذخیره‌سازی<sup>۱۵</sup> انجام می‌شود.
- ✓ هر خانواده محصول می‌تواند توسط خطوط تولید مختلف تولید شود.
- ✓ در هر خانواده محصول، پرتیراژترین واحد نگهداری موجودی<sup>۱۶</sup> آن محصول در نظر گرفته می‌شود.
- ✓ هر گروه محصول دارای لیست مواد و دستورالعمل تولید ثابتی می‌باشد.
- ✓ هر خرده‌فروش تقاضای مورد نیازش را تنها از یک مرکز توزیع دریافت می‌کند.



- ✓ دوره عمر هر گروه محصول به‌عنوان ضریبی از دوره‌های زمانی تعریف شده است.
- ✓ تمامی اقلام بازگشتی از یک گروه محصول در فرآیند تولید همان گروه محصول استفاده می‌شوند.
- ✓ هزینه تولید محصولات بازگشتی برابر ۰.۴ هزینه تولید محصول اولیه است.
- ✓ هزینه حمل محصول بازگشتی از خرده‌فروش به توزیع‌کننده نادیده گرفته می‌شود.
- ✓ اثر زیست‌محیطی حمل محصول بازگشتی از خرده‌فروش به توزیع‌کننده نادیده گرفته شده است.
- ✓ نوع چربی و پروتئین موردنیاز برای ساخت گروه محصولات متفاوت، ثابت و یکسان فرض می‌شود.
- ✓ هر وسیله نقلیه به همان مرکز توزیعی که در آنجا بارگیری کرده باز می‌گردد.
- ✓ تقاضای هر مشتری توسط یک وسیله نقلیه تأمین می‌شود.
- ✓ هر وسیله نقلیه تنها در یک مرکز توزیع بارگیری می‌کند.
- ✓ ناوگان حمل‌ونقل غیرهمگن بوده و ظرفیت هر نوع وسیله نقلیه و میزان مصرف سوخت آنها متفاوت است.
- ✓ هر وسیله نقلیه مختص یک مرکز توزیع بوده و وسایل نقلیه قابل انتقال به مراکز توزیع دیگر نیستند.

### ۲-۳- اندیس‌ها و مجموعه‌ها، پارامترها و متغیرهای مدل ریاضی

جدول ۲- اندیس‌ها، پارامترها و متغیرهای مدل پیشنهادی

اندیس‌ها و مجموعه‌ها			
مجموعه کارخانه‌ها	$f \in F$	مجموعه مراکز توزیع	$d \in D$
مجموعه گروه محصولات	$i \in I$	دوره‌های زمانی مختلف تولید بچ‌ها	$b \in T$
مجموعه دوره‌های زمانی	$t \in T$	مجموعه انواع وسائل حمل‌ونقل از تولید به توزیع	$v \in V$
مجموعه مشتریان	$l, m \in C$	مجموعه وسائل حمل‌ونقل از توزیع به فروش	$v' \in V$
پارامترهای فروش			
تقاضای مشتری $m$ برای گروه محصول $i$ در دوره $t$	$d_{imt}$	قیمت فروش گروه محصول $i$ به مشتری $m$ در دوره $t$	$SP_{imt}$



پارامترهای تولید			
ظرفیت زمانی در دسترس گروه محصول $i$ در کارخانه $f$ در دوره $t$		$pCap_{ift}$	
ظرفیتی که از کارخانه $f$ برای تولید یک بیج از گروه محصول $i$ در دوره $t$ اشغال می‌شود		$\alpha_{ift}$	
اندازه بیج تولید گروه محصول $i$ در کارخانه $f$ در دوره $t$		$\beta_{ift}$	
هزینه تولید محصول برای تولید گروه محصول $i$ در کارخانه $f$ در دوره $t$		$pC_{ift}$	
هزینه راه‌اندازی گروه محصول $i$ در کارخانه $f$ در دوره $t$		$sC_{ift}$	
زمان راه‌اندازی در کارخانه $f$ در دوره $t$		$st_{ift}$	
هزینه نگهداری موجودی برای یک واحد محصول از گروه محصول $i$ در کارخانه $f$ در دوره $t$		$hC_{ift}$	
ظرفیت انبار محصول در کارخانه $f$		$hCap_f$	
هزینه باز تولید به ازای هر واحد گروه محصول $i$ در کارخانه $f$ در دوره $t$		$repC_{ift}$	
درصد چربی از دست رفته گروه محصول $i$ در کارخانه $f$	$flP_{if}$	عددی بزرگ	$G$
درصد پروتئین از دست رفته گروه محصول $i$ در کارخانه $f$	$plP_{if}$	هزینه تصفیه آب به ازای هر گروه محصول $i$	$WRC_i$
ضریب تبدیل گروه محصول $i$ در کارخانه $f$	$cf_{if}$	درصد چربی گروه محصول $i$ در کارخانه $f$	$fP_{if}$
دوره ماندگاری محصول	$shel_i$	درصد پروتئین گروه محصول $i$ در کارخانه $f$	$prP_{if}$
پارامترهای توزیع			
هزینه ثابت حمل و نقل از کارخانه $f$ به مرکز توزیع $d$ با وسیله نقلیه $v$		$tfC_{fdv}$	
هزینه متغیر حمل و نقل هر واحد محصول از گروه محصول $i$ از کارخانه $f$ به مرکز توزیع با وسیله نقلیه $v$		$tvC_{ifdv}$	
ضریب اشغال فضای وسیله نقلیه $v$ برای هر واحد محصول از گروه محصول $i$		$a_{iv}$	
هزینه نگهداری هر واحد موجودی محصول از گروه محصول $i$ در مرکز توزیع $d$		$hC_{idt}$	
تعداد وسیله نقلیه نوع $v'$ در مرکز توزیع $d$	$tN_{dv'}$	ظرفیت نگهداری موجودی در مرکز توزیع $d$	$hCap_d$
ظرفیت وسیله نقلیه نوع $v'$ در مرکز توزیع $d$	$vCap_{dv'}$	تعداد کل وسیله نقلیه $v$ در کارخانه $f$	$toN_{fv}$



		زمان $t$	
نرخ انتشار کربن وسیله نقلیه نوع $v$	$CER_v$	ظرفیت حمل هر واحد وسیله نقلیه نوع $v$ در کارخانه $f$	$vCap_{fv}$
نرخ انتشار کربن وسیله نقلیه نوع $v'$	$CER_{v'}$	تعداد وسیله نقلیه $v$ قابل بارگذاری در کارخانه $f$	$KCap_{fv}$
نرخ مصرف سوخت وسیله نقلیه خالی نوع $v$	$\rho E_v$	مسافت طی شده از کارخانه $f$ به مرکز توزیع $d$	$dis_{fd}$
نرخ مصرف سوخت وسیله نقلیه پر نوع $v$	$\rho F_v$	فاصله بین مرکز توزیع $d$ و مشتری $m$	$dis_{dm}$
نرخ مصرف سوخت وسیله نقلیه خالی نوع $v'$	$\rho E_{v'}$	فاصله بین دو مشتری $m$ و $l$	$dis_{lm}$
نرخ مصرف سوخت وسیله نقلیه پر نوع $v'$	$\rho F_{v'}$	فاصله بین مشتری $m$ و مرکز توزیع $d$	$dis_{md}$
میزان انتشار کربن وسیله نقلیه نوع $v'$ در مسیر بین $m$ و $l$			$e_{lmv'}$
میزان انتشار کربن وسیله نقلیه نوع $v'$ در مسیر بین مرکز توزیع $d$ و مشتری $m$			$e_{dmv'}$
میزان انتشار کربن وسیله نقلیه نوع $v'$ در مسیر بین مشتری $m$ و مرکز توزیع $d$			$e_{mdv'}$
هزینه انتقال هر واحد محصول با وسیله نقلیه نوع $v'$ در مسیر بین مرکز توزیع $d$ و مشتری $m$			$Trc_{dmv'}$
هزینه انتقال هر واحد محصول با وسیله نقلیه نوع $v'$ در مسیر بین $m$ و $l$			$Trc_{lmv'}$
هزینه انتقال هر واحد محصول با وسیله نقلیه نوع $v'$ در مسیر بین مشتری $m$ و مرکز توزیع $d$			$Trc_{mdv'}$
<b>متغیرهای تصمیم</b>			
مقدار فروش گروه محصول $i$ به مشتری $m$ در دوره $t$			$sQ_{imt}$
مقدار تولید گروه محصول $i$ در کارخانه $f$ در دوره $t$			$pQ_{ift}$
تعداد بچ تولید شده از گروه محصول $i$ در کارخانه $f$ در دوره $t$			$pbN_{ift}$
مقدار موجودی گروه محصول $i$ در کارخانه $f$ در انتهای دوره $t$			$I_{iftb}^+$
متغیر ۰ و ۱؛ اگر برای تولید گروه محصول $i$ در کارخانه $f$ نیاز به راه اندازی باشد، ۱ و در غیر اینصورت ۰			$X_{ift}$
مقدار کالای مرجوعی گروه محصول $i$ از مرکز توزیع $d$ به کارخانه $f$ توسط وسیله نقلیه $v$ در دوره $t$			$retQ_{idfv}$
مقدار کالای حمل شده از گروه محصول $i$ از کارخانه $f$ به مرکز توزیع $d$ با وسیله نقلیه $v$ در دوره $t$			$trQ_{ifdvt}$
تعداد وسایل نقلیه $v$ موردنیاز از کارخانه $f$ به مرکز توزیع $d$ در دوره $t$			$tN_{fdvt}$
موجودی گروه محصول $i$ در مرکز توزیع $d$ در پایان دوره $t$			$I_{idtb}$



مقدار محصول $i$ در وسیله نقلیه $v'$ در مسیر بین مشتریان متوالی $l$ و $m$ در دوره $t$	$LW_{ilmv't}$
مقدار محصول $i$ در وسیله نقلیه $v'$ در مسیر بین مرکز توزیع $d$ و مشتری $m$ در دوره $t$	$LW_{idmv't}$
مقدار محصول $i$ در وسیله نقلیه $v'$ در مسیر بین مشتری $m$ و مرکز توزیع $d$ در دوره $t$	$LW_{imdv't}$
اگر وسیله نقلیه $v'$ در دوره $t$ از مرکز توزیع $d$ به سمت مشتری $m$ برود ۱ در غیر اینصورت ۰	$Y_{dmv't}$
اگر وسیله نقلیه $v'$ در دوره $t$ قبل از مشتری $m$ تقاضای مشتری $l$ را تأمین کند ۱ در غیر اینصورت ۰	$Y_{lmv't}$
اگر وسیله نقلیه $v'$ در دوره $t$ از مشتری $m$ به سمت مرکز توزیع $d$ برود ۱ در غیر اینصورت ۰	$Y_{mdv't}$

### ۳-۳- محدودیت‌های مدل ریاضی

$$sQ_{imt} \leq d_{imt} \quad \forall m \in C, i, t \quad (1)$$

$$sQ_{imt} \geq 0.7 \square d_{imt} \quad \forall m \in C, i, t \quad (2)$$

$$\sum_{f \in F} \left( pQ_{ift} + \sum_d \sum_v \text{ret}Q_{ifdv(t-1)} + \sum_{b=t-shl_i}^{t-1} I_{if(t-1)b}^+ - \sum_{b=t-shl_i}^t I_{iftb}^+ \right) + \sum_{d \in D} \left( \sum_{b=t-shl_i}^{t-1} I_{id(t-1)b} - \sum_{b=t-shl_i}^t I_{idtb} \right) = \sum_{m \in C} sQ_{imt} \quad \forall i, t \quad (3)$$

$$I_{iftb}^+ \leq I_{if(t-1)b}^+ \quad \forall b \leq t-1, i, f, t \quad (4)$$

$$I_{iftb}^+ \leq pQ_{ift} + \sum_d \sum_v \text{ret}Q_{ifdv(t-1)} \quad \forall i, f, t, b=t \quad (5)$$

$$I_{idtb} \leq I_{id(t-1)b} \quad \forall b \leq t-1, i, d, t \quad (6)$$

$$I_{idtb} \leq \sum_{v \in V} trQ_{ifdv} \quad \forall i, f, d, t, b=t \quad (7)$$

$$pQ_{ift} = pbN_{ift} \square \beta_{ift} \quad \forall i, f, t \quad (8)$$

$$G \square X_{ift} \geq pQ_{ift} \quad \forall i, f, t \quad (9)$$

$$\alpha_{ift} \square pbN_{ift} + st_{ift} \square X_{ift} \leq pCap_{ift} \quad \forall f, t \quad (10)$$

$$\sum_{i \in I} \sum_{b=t-shl_i}^t I_{iftb}^+ \leq hCap_f \quad \forall f, t \quad (11)$$



$$pQ_{ift} + \sum_{b=t-shl_i}^{t-1} I_{if(t-1)b}^+ - \sum_{b=t-sh_i}^t I_{iftb}^+ = \sum_{d \in D} \sum_{v \in V} trQ_{ifdvt} \quad \forall i, f, t \quad (12)$$

$$\sum_i \sum_f I_{iftb}^+ = \sum_i \sum_f pQ_{ift} - \sum_i \sum_f \sum_d \sum_v trQ_{ifdvt} \quad \forall t=1, b=1 \quad (13)$$

$$\sum_i I_{idtb} = \sum_i \sum_f \sum_v trQ_{ifdvt} - \sum_i \sum_m \sum_{v'} LW_{idmv't} \quad \forall t=1, b=1, d \in D \quad (14)$$

$$\sum_{f \in F} \sum_{v \in V} trQ_{ifdvt} + \sum_{b=t-shl_i}^{t-1} I_{id(t-1)b} - \sum_{b=t-sh_i}^t I_{idtb} = \sum_{m \in C} \sum_{v' \in V} LW_{idmv't} \square Y_{d,m,v',t} \quad \forall i, d, t \quad (15)$$

$$tN_{fdvt} \geq \frac{a_{iv} \square trQ_{ifdvt}}{vCap_v} \quad \forall i, f, d, v, t \quad (16)$$

$$tN_{fdvt} \leq toN_{fv} \quad \forall f, d, v, t \quad (17)$$

$$\sum_{f \in F} \sum_{v \in V} tN_{fdvt} \leq \sum_{f \in F} \sum_{v \in V} KCap_{fv} \quad \forall d, t \quad (18)$$

$$\sum_{i \in I} \sum_{m \in C} \dots \square SQ_{im(t-1)} \leq \sum_i \sum_d \sum_f \sum_v retQ_{idfvt} \leq \sum_{i \in I} \sum_{m \in C} \dots \square SQ_{imt} \quad \forall t \geq 2 \quad (19)$$

$$\sum_i \sum_f cf_{if} \cdot pQ_{ift} \leq \delta \cdot \dots \quad \forall t \quad (20)$$

$$\sum_d \sum_{v'} Y_{dmv't} \leq 1 \quad \forall m, t \quad (21)$$

$$\sum_m \sum_{v'} Y_{mdv't} = \sum_m \sum_{v'} Y_{dmv't} \quad \forall d, t \quad (22)$$

$$\sum_m \sum_{v'} Y_{dmv't} \leq \sum_{v'} tN_{dv't} \quad \forall t \in T, \forall d \in D \quad (23)$$

$$\sum_i \sum_m \sum_d \sum_{v'} LW_{idmv't} \square Y_{dmv't} = \sum_i \sum_m SQ_{imt} \quad \forall t \in T \quad (24)$$

$$\sum_i SQ_{ilt} \leq \sum_i \sum_d \sum_{v'} LW_{idlv't} \square Y_{dlv't} + \sum_i \sum_m \sum_{v'} LW_{imlv't} \square Y_{mlv't} - \sum_i \sum_j \sum_{v'} LW_{iljv't} \square Y_{ljv't}$$

$$\forall l \in C, \forall t \in T \quad (25)$$

$$\sum_i LW_{idmv't} \leq Vcap_v \square Y_{dmv't} \quad \forall m \in C, \forall t \in T, \forall v' \in V, d \quad (26)$$

$$\sum_{v'} Y_{lmv't} \square \sum_{v'} Y_{mlv't} = 0 \quad \forall l, m \in C, l \neq m, t \quad (27)$$



$$\sum_m \sum_{v'} Y_{lmv't} \left( 1 - \sum_d \sum_{v'} Y_{ldv't} \right) + \left( 1 - \sum_m \sum_{v'} Y_{lmv't} \right) \sum_d \sum_{v'} Y_{ldv't} = 1 \quad \forall l \in C, l \neq m, t \in T \quad (28)$$

$$\sum_i \sum_{v'} (LW_{idlv't} - SQ_{it}) Y_{dv't} = \sum_i \sum_m \sum_{v'} LW_{ilmv't} Y_{lmv't} Y_{dv't} \quad \forall l \in C, l \neq m, d \in D, t \in T \quad (29)$$

$$\sum_i \sum_m \sum_{v'} (LW_{ilmv't} - SQ_{imt}) Y_{lmt} = \sum_i \sum_m \sum_j \sum_{v'} LW_{imjv't} Y_{lmv't} Y_{mjv't} \quad (30)$$

$$\forall l \in C, l \neq m, d \in D, t \in T$$

$$\sum_i \sum_m \sum_{v'} LW_{ilmv't} = \sum_i \sum_m \sum_{v'} LW_{ilmv't} Y_{lmv't} \quad \forall l \in C, t \in T \quad (31)$$

$$\sum_i \sum_l \sum_{v'} LW_{idlv't} = \sum_i \sum_l \sum_{v'} LW_{idlv't} Y_{dv't} \quad \forall d \in D, t \in T \quad (32)$$

$$LW_{imdt} = 0 \quad \forall i, \forall d \in D, \forall m \in C, \forall v' \in V, \forall t \quad (33)$$

محدودیت (۱) نشان می‌دهد که میزان فروش باید کمتر یا مساوی میزان تقاضا باشد. محدودیت (۲) بیانگر حداقل تقاضای ممکن جهت تأمین سفارش مشتری است. محدودیت (۳) بیان می‌دارد که مقدار فروش، با استفاده از محصول تولید شده در کارخانجات مختلف، موجودی کارخانه‌ها و موجودی مراکز توزیع تأمین می‌شود، به نحوی که دوره عمر محصول طی نشده باشد. محدودیت‌های (۴) تا (۶) مربوط به دوره عمر محصول هستند. محدودیت (۷) بیان می‌کند که مقدار موجودی مرکز توزیع از یک محصول در انتهای دوره از محصولی که در همان دوره تولید شده، کمتر یا مساوی مقدار محصول حمل شده به مرکز توزیع در آن دوره می‌باشد. محدودیت (۸) نشان‌دهنده این است که تولید، همواره به اندازه بچ کامل انجام می‌گیرد. مطابق محدودیت (۹) در صورت تولید یک محصول از گروه محصول  $i$ ، باید یک هزینه راه‌اندازی به آن تخصیص یابد. محدودیت (۱۰)، محدودیت ظرفیت تولید است که مطابق آن، مجموع زمان‌های تولید و راه‌اندازی نباید از کل زمان در اختیار در دوره برنامه‌ریزی  $t$  بیشتر باشد. محدودیت (۱۱) ظرفیت انبارهای محصول کارخانه را تعریف می‌کند.

محدودیت (۱۲) تصمیمات تولید و توزیع را به یکدیگر مرتبط ساخته و نشانگر تعادل در کارخانه است. این محدودیت بیان می‌کنند که محصول حمل شده از کارخانه با مقدار تولید به‌علاوه موجودی اولیه منهای موجودی پایان دوره برابر است. محدودیت (۱۳) و (۱۴) نشان‌دهنده مقادیر موجودی انتهای دوره اول کارخانه و مرکز توزیع هستند. محدودیت (۱۵) بیانگر وجود تعادل جریان ورودی و خروجی محصول در مرکز توزیع می‌باشد؛ بدین معنی که



میزان محصول حمل شده به مرکز توزیع به علاوه موجودی ابتدای دوره، منهای موجودی پایانی، بایستی با کل محصول خارج شده از مرکز توزیع، برابر باشد. محدودیت (۱۶) نشان‌دهنده تعداد وسایل حمل‌ونقل مورد نیاز از انواع مختلف جهت حمل محصول از کارخانه به مرکز توزیع است. این محدودیت مبین این هستند که چه نوع وسایل حملی با چه ترکیبی از محصولات به یک مرکز توزیع قابل ارسال می‌باشد. در صورتی که محموله با تعداد کمتری وسیله نقلیه قابل ارسال باشد، تابع هدف، این متغیر را مجاب می‌کند که کوچکترین عدد صحیح اغناکننده محدودیت را در نظر بگیرد. محدودیت (۱۷) و (۱۸) تعداد وسایل نقلیه در دسترس را نمایش می‌دهند. محدودیت (۱۹) بیان می‌کند که مقدار محصول مرجوعی در هر دوره باید بین یک تا دو درصد فروش دوره قبل باشد. محدودیت (۲۰) بیانگر حداکثر مقدار مصرف آب در تصفیه خانه است. محدودیت‌های بعدی در جهت توسعه زیر مدل VRP مدل برنامه‌ریزی ریاضی معرفی شده‌اند. محدودیت (۲۱) نشان‌دهنده این است که تقاضای هر مشتری فقط با یک وسیله نقلیه و از یک مرکز توزیع تأمین می‌شود. محدودیت (۲۲) بیان می‌دارد ماشین‌هایی که از یک مرکز توزیع خارج شده‌اند به همان مرکز توزیع باز می‌گردند. محدودیت (۲۳) تعداد وسایل نقلیه‌ای که از یک مرکز توزیع خارج می‌شوند را محدود می‌کند. محدودیت (۲۴) بیانگر تعادل بین میزان فروش در یک دوره و میزان باری است که از مرکز توزیع خارج می‌شود. محدودیت (۲۵) نشان‌دهنده این است که پس از تأمین تقاضای یک مشتری آیا وسیله نقلیه قادر به تأمین مشتری بعدی هست یا خیر؟ محدودیت (۲۶) محدودیت ظرفیت وسایل نقلیه از توزیع به فروش را تضمین می‌کند. محدودیت (۲۷) بیان می‌دارد وسیله نقلیه بین دو مشتری مختلف فقط یک بار و در یک جهت حرکت می‌کند. محدودیت (۲۸) نشان‌دهنده این است که اگر بین هر مشتری با دیگر مشتریان مسیری وجود نداشته باشد وسیله نقلیه باید به مرکز توزیع بازگردد. محدودیت‌های (۲۹) تا (۳۲) برای تشکیل مسیر توسعه یافته‌اند. محدودیت (۳۳) به توزیع نشان‌دهنده این است که وسیله نقلیه پس از تخلیه کامل بار به مرکز توزیع باز می‌گردد.

### ۳-۴- تابع هدف اقتصادی

در تابع هدف اقتصادی مسئله پرائتز اول نشان‌دهنده درآمد حاصل از فروش است. پرائتز دوم شامل هزینه‌های تولید، راه‌اندازی، نگهداری موجودی در کارخانه و هزینه تصفیه آب است. در پرائتز سوم به ترتیب هزینه‌های حمل‌ونقل از مرکز تولید به مرکز توزیع، نگهداری موجودی در مرکز توزیع، حمل محصول مرجوعی از مرکز توزیع به مرکز تولید و هزینه تولید مجدد





محصولات بیان شده است. پراتنز سوم نشان‌دهنده زیرمدل VRP مدل اصلی مسئله است و شامل هزینه حمل‌ونقل از انبار به مشتری اول، هزینه حمل و نقل محصول بین مشتریان و هزینه بازگشت و سلیه نقلیه به انبار است.

$$Z_{economic} = \text{Max} \left\{ \begin{aligned} & \sum_{i \in I} \sum_{m \in C} \sum_{t \in T} (sQ_{imt} * SP_{imt}) \\ & - \left\{ \sum_{i \in I} \sum_{f \in F} \sum_{t \in T} \left( pC_{ift} \square pQ_{ift} + sC_{ift} \square X_{ift} + hC_{ift} \sum_{b=1}^t I_{iftb}^+ + WRC_i \square pQ_{ift} \right) \right\} \\ & - \left\{ \sum_{i \in I} \sum_{f \in F} \sum_{d \in D} \sum_{v \in V} \sum_{t \in T} (tvC_{ifdv} \square TrQ_{ifdv} \square dis_{fd} + tfC_{fdv} \square N_{fdvt}) + \sum_{i \in I} \sum_{d \in D} \sum_{t \in T} \left( hC_{idt} \sum_{b=1}^t I_{idtb} \right) \right\} + \\ & \left\{ \sum_{i \in I} \sum_{d \in D} \sum_{f \in F} \sum_{v \in V} \sum_{t \in T} (tvC_{idfvt} \square retQ_{idfvt} \square dis_{fd}) \right\} \\ & - \left\{ \sum_{i \in I} \sum_{d \in D} \sum_{f \in F} \sum_{v \in V} \sum_{t \in T} (repC_{ift} \square retQ_{idfvt}) \right\} \\ & - \left( \begin{aligned} & \sum_{i \in I} \sum_{d \in D} \sum_{m \in M} \sum_{v \in V} \sum_{t \in T} LW_{idmv't} \square Trc_{dmv't} \square Y_{dmv't} \square dis_{dm} \\ & + \sum_{i \in I} \sum_{l \in L} \sum_{m \in M} \sum_{v \in V} \sum_{t \in T} LW_{ilmv't} \square Trc_{lmv't} \square Y_{lmv't} \square dis_{lm} \\ & + \sum_{i \in I} \sum_{m \in M} \sum_{d \in D} \sum_{v \in V} \sum_{t \in T} LW_{imdvt} \square Trc_{mdv't} \square Y_{mdv't} \square dis_{md} \end{aligned} \right) \end{aligned} \right\} \quad (33)$$

### ۳-۵- تابع هدف زیست محیطی

تابع هدف زیست محیطی این تحقیق شامل آلودگی مایع حاصل از تصفیه فاضلاب، انتشار دی اکسید کربن توسط وسایل نقلیه حمل محصول از مرکز تولید به مرکز توزیع و توزیع به فروش است. جهت محاسبه مقدار آلودگی مایع از شاخص‌های BOD و COD استفاده می‌شود. شاخص BOD توسط فرآیندی حساس و زمانبر که به دما نیز وابسته است اندازه‌گیری می‌گردد. به‌صورت استاندارد این شاخص در دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد و در مدت زمان ۵ روز اندازه‌گیری می‌شود. مدت زمان لازم برای اندازه‌گیری COD تنها ۳ ساعت است و بنابراین در مقایسه با BOD به زمان بسیار کمتری برای به‌دست آوردن نتیجه نیاز دارد. به‌دلیل آنکه COD نتایج سریع‌تری را نسبت به BOD ارائه می‌کند، در علم تصفیه پساب



به‌عنوان روش تست استاندارد بار آلودگی فاضلاب مطرح است. در این تحقیق نیز از شاخص COD جهت اندازه‌گیری میزان آلودگی مایع کارخانه استفاده می‌شود. این شاخص بیانگر مقدار کل مواد آلی موجود در آب است. با توجه به تعداد عوامل تاثیرگذار بر مقدار COD و از آنجایی که بسیاری از این عوامل از کنترل ما خارج هستند، در این تحقیق بر دو عامل تاثیرگذار بر COD که در صنایع لبنی از اهمیت بالایی برخوردارند تمرکز شده است. این دو عامل مقدار چربی و پروتئین از دست رفته در فرآیند تولید محصول لبنی است. با داشتن میزان چربی و پروتئین از دست رفته و میزان اکسیژن لازم جهت تصفیه یک کیلوگرم چربی و پروتئین محلول در آب و با دانستن این نکته که در صنایع لبنی به ازای هر یک کیلوگرم شیر سه لیتر آب مصرف می‌شود، مقدار COD فاضلاب کارخانه لبنی بر اساس عبارت زیر در تابع هدف زیست محیطی محاسبه می‌شود.

$$\sum_{i \in I} \sum_{f \in F} \sum_{t \in T} (3 \cdot flP_{if} \cdot fp_{if} \cdot pQ_{ift} + 1.36 \cdot plP_{if} \cdot prP_{if} \cdot pQ_{ift}) \quad (34)$$

برای محاسبه میزان انتشار کربن حاصل از حمل‌ونقل بین مرکز تولید و توزیع از جمله دوم تابع هدف زیست محیطی استفاده می‌شود که عبارت‌اند از:

$$\sum_{f \in F} \sum_{d \in D} \sum_{v \in V} \sum_{t \in T} (CER_v \cdot \rho_{fLv} \cdot dis_{fd} \cdot tN_{fdvt}) \quad (35)$$

در نهایت برای محاسبه میزان انتشار دی اکسید کربن از مرکز توزیع به مشتریان، از روش پیشنهادی ژانگ و همکاران<sup>۱۷</sup> [ج] استفاده شده است. بدین منظور از برگه معاینه فنی ماشین‌ها جهت تعیین نرخ انتشار کربن هر وسیله نقلیه بهره‌گیری شده است. هم چنین دو حالت مختلف برای مشخص نمودن نرخ مصرف سوخت فرض نمودیم که شامل موارد زیر است: ۱- حالتی که وسیله نقلیه خالی است و ۲- حالتی که وسیله نقلیه به‌طور کامل بارگیری شده است. با توجه به نوع وسیله نقلیه، میزان بار و فاصله طی شده توسط وسیله نقلیه میزان انتشار کربن هر نوع وسیله نقلیه را بر اساس فرمول زیر محاسبه نمودیم:

$$e_{dmv'} = CER_{v'} \left( \rho E_{v'} + \frac{\rho F_{v'} - \rho E_{v'}}{Vcap_{v'}} \times LW_{idmv't} \right) dis_{dm} \quad (36)$$

$$e_{lmv'} = CER_{v'} \left( \rho E_{v'} + \frac{\rho F_{v'} - \rho E_{v'}}{Vcap_{v'}} \times LW_{ilmv't} \right) dis_{lm} \quad (37)$$



$$e_{mdv'} = CER_{v'} \left( \rho E_{v'} + \frac{\rho F_{v'} - \rho E_{v'}}{Vcap_{v'}} \times LW_{imdv't} \right) dis_{md} \quad (38)$$

$$\left( \sum_d \sum_m \sum_{v'} \sum_t e_{dmv'} Y_{dmv't} + \sum_l \sum_m \sum_{v'} \sum_t e_{lmv'} Y_{lmv't} \right) + \sum_m \sum_d \sum_{v'} \sum_t e_{mdv'} Y_{mdv't} \quad (39)$$

در نهایت تابع هدف زیست محیطی با توجه به سه عبارت مذکور به صورت زیر می باشد:

$$Z_{enviromental} = Min \left( \begin{aligned} & \sum_{i \in I} \sum_{f \in F} \sum_{t \in T} \left( 3 \cdot flP_{if} \cdot fP_{if} \cdot pQ_{ift} + 1.36 \cdot plP_{if} \cdot prP_{if} \cdot pQ_{ift} \right) \\ & + \sum_{f \in F} \sum_{d \in D} \sum_{v \in V} \sum_{t \in T} \left( CER_v \cdot \rho_{fLv} \cdot dis_{fd} \cdot tN_{fdvt} \right) \\ & + \left( \sum_d \sum_m \sum_{v'} \sum_t e_{dmv'} Y_{dmv't} + \sum_l \sum_m \sum_{v'} \sum_t e_{lmv'} Y_{lmv't} \right) \\ & + \sum_m \sum_d \sum_{v'} \sum_t e_{mdv'} Y_{mdv't} \end{aligned} \right) \quad (40)$$

#### ۴- یافته‌ها و بحث

علی‌رغم آنکه روش‌های دقیق در حل مسائل خطی و غیرخطی روش‌های مناسبی تشخیص داده شده‌اند اما مطالعات مختلف نشان داده که این روش‌ها برای حل مسائل پیچیده کارایی لازم را ندارند. در این حالت‌ها بجای رسیدن به جواب بهینه باید به دنبال جواب رضایت‌بخش باشیم. به همین خاطر در سال‌های اخیر شاهد بکارگیری روزافزون رویکردهای ابتکاری و فراابتکاری در حل مسائل با ابعاد بزرگ و پیچیده بوده‌ایم [۲۱، ۲۵]. در این پژوهش به منظور حل مدل MINLP دو هدفه و بررسی کارایی آن، ابتدا مسئله در نرم‌افزار Lingo<sup>۹</sup> بر روی کامپیوتری با مشخصات intel core i<sup>۵</sup> و ۶GB و با استفاده از مثال‌هایی در ابعاد کوچک اجرا گردید. اما همان گونه که پیش‌تر اشاره شد، مسئله حاضر به‌عنوان یک مسئله دوهدفه، چندمحصوله، چند وسیله نقلیه‌ای و چندانباره شامل یک زیرمسئله مسیریابی بوده و بنابراین دارای پیچیدگی بالایی است. از آن جایی که نرم‌افزار لینگو کارایی لازم برای حل مسائل در ابعاد بزرگ و پیچیده را ندارد، در این تحقیق از الگوریتم فراابتکاری NSGAI<sup>II</sup> جهت حل مسئله استفاده می‌شود. در ادامه نحوه نمایش پاسخ‌های به‌دست آمده از حل مسئله با استفاده از داده‌های نمونه مورد مطالعه ارائه می‌گردد.



## ۴-۱- نحوه نمایش جواب

در هر یک از الگوریتم‌ها هر کروموزوم نشان‌دهنده یک نقطه در فضای جستجو و یک راه‌حل ممکن برای مسئله مورد نظر است. خود کروموزوم‌ها از تعداد ثابتی ژن تشکیل می‌شوند. با توجه به مسئله تعریف شده، نمایش شماتیک ساختار یک کروموزوم به صورت شکل (۱) می‌باشد.

$SQ_{imt}$	$ASS_{wt}$	$PTR_{imwt}$	$Seq_{mwt}$	$PTR_{ifdt}$	$PRet_{idft}$	$PRet_{ift}$	$I_{idt}$	$I_{ift}$
------------	------------	--------------	-------------	--------------	---------------	--------------	-----------	-----------

شکل ۱. نمایش شماتیک ساختار کروموزومی جواب مسئله

کروموزوم طراحی شده در این مسئله شامل ۹ رشته مختلف است که در ادامه این بخش به تشریح ساختار آن پرداخته می‌شود.

- $SQ_{imt}$ : هر کدام از آرایه‌های این رشته، نشان‌دهنده مقدار محصول  $i$  ام عرضه شده به مشتری  $m$  در دوره  $t$  است. فرض می‌کنیم کروموزوم ارائه شده مربوط به مسئله‌ای باشد که در آن تقاضای مشتری شماره ۱ در دوره‌های زمانی اول و دوم به ترتیب ۴۰۰ و ۵۰۰ باشد. مقادیر ۳۶۸ و ۴۴۵ بیانگر آن است که عددی تصادفی بین ۰.۷ تا ۱ برابر تقاضا به  $SQ_{imt}$  تعلق خواهد گرفت.

- $ASS_{wt}$ : هر کدام از آرایه‌های این رشته بیانگر مرکز توزیع تخصیص داده به وسیله نقلیه  $w$  در دوره  $t$  است. در این مثال وسیله نقلیه نوع ۱ در دوره اول در مرکز توزیع شماره ۱ و در دوره دوم در مرکز توزیع شماره ۲ استفاده شده است.

- $PTR_{imwt}$ : این رشته نشان‌دهنده نسبت مقدار ارسالی محصول  $i$  به مشتری  $m$  توسط وسیله نقلیه  $w$  در دوره  $t$  است. اگر برای محصول  $i$  و مشتری  $m$  در دوره  $t$ ، رشته معادل به صورت زیر باشد یعنی  $\frac{2}{4}$  محصول ارسالی به مشتری توسط وسیله نقلیه نوع ۱،  $\frac{1}{4}$  آن توسط وسیله نقلیه نوع ۴ و هم چنین  $\frac{1}{4}$  باقیمانده توسط وسیله نقلیه ۵ حمل می‌شود. (بدیهی است که توالی خدمت‌گیری وسیله‌های ۲ و ۳ نیز در دوره  $t$  و مشتری  $m$  نیز در مسئله بی‌اهمیت می‌شوند. چون مقدار کالای حمل شده توسط این وسایل صفر در نظر گرفته شده است. باید در نظر داشته باشیم که رشته‌های مختلف کروموزوم در عین اینکه مستقل به نظر می‌رسند ولی بر هم اثر دارند و جواب مسئله با ترکیب همه آنها ایجاد می‌شود.)



وسیله نقلیه ۵	وسیله نقلیه ۴	وسیله نقلیه ۳	وسیله نقلیه ۲	وسیله نقلیه ۱
۱	۱	۰	۰	۲

شکل ۲. نمایش رشته  $PTR_{imwt}$  کروموزوم

- $Seq_{mwt}$ : هر کدام از آرایه‌های این رشته نمایانگر توالی خدمت‌گیری مشتری  $m$  توسط وسیله نقلیه  $w$  در دوره  $t$  است. در مثال ارائه شده، مشتری شماره ۱ در دوره اول به عنوان چهارمین مشتری و در دوره دوم به عنوان اولین مشتری سرویس‌دهی شده است.
- $PTR_{ifdt}$ : این رشته نیز بیانگر نسبت مقدار ارسال شده کالای  $i$  از کارخانه  $f$  به مرکز توزیع  $d$  در دوره  $t$  است و مانند رشته قبل تعیین می‌شود. اگر رشته معادل برای محصول  $i$  و مرکز توزیع  $d$  در دوره  $t$  به صورت زیر باشد، بدین معناست که مقدار ارسال به مرکز توزیع  $d$  از کارخانه‌های مختلف به ترتیب ۷۵٪، ۲۵٪، ۰، ۰ و ۰ است.

کارخانه ۵	کارخانه ۴	کارخانه ۳	کارخانه ۲	کارخانه ۱
۰	۰	۰	۱	۳

شکل ۳. نمایش رشته  $PTR_{ifdt}$  کروموزوم

- $PREt_{idft}$ : این رشته نیز نسبت کالای برگشتی محصول  $i$  از مرکز توزیع  $d$  به کارخانه  $f$  در دوره  $t$  است.
- $PREt_{ift}$ : همانند رشته‌های قبل، این رشته نیز نسبت کل کالای برگشتی محصول  $i$  به کارخانه  $f$  در دوره  $t$  را نمایش می‌دهد. این نسبت طبق محدودیت‌های مساله باید بین ۱ تا ۲ درصد کالای تولید شده محصول  $i$  در کارخانه  $f$  در دوره  $t-1$  باشد.
- $I_{idt}$ : رشته مذکور بیانگر میزان موجودی پایان دوره محصول  $i$  در مرکز توزیع  $d$  در دوره  $t$  است که به دوره بعد منتقل می‌شود. قاعدتاً مقدار ماندگاری کالا در تعیین این موجودی لحاظ شده و موجودی که شامل کالای فاسد شده باشد منجر به تولید جواب نشدنی می‌شود.
- $I_{ift}$ : رشته موردنظر نشان‌دهنده مقدار موجودی محصول  $i$  در مرکز توزیع  $f$  در انتهای دوره  $t$  است که به دوره بعد منتقل می‌شود. همانند رشته  $I_{idt}$  در اینجا نیز مقدار ماندگاری کالا لحاظ شده و موجودی که شامل کالای فاسد شده باشد، باعث تولید جواب نشدنی می‌شود.



#### ۲-۴- تولید جواب اولیه

برای تولید جمعیت اولیه در الگوریتم NSGAI تعدادی جواب به صورت تصادفی مطابق رویه زیر تولید شدند. برای تولید ۸۰ درصد از نمونه‌های ابتدا یک مقدار مجاز (بین ۰.۷ تا ۱ برابر تقاضا) برای رشته اول تولید و بر اساس آن متغیرهای بعدی تنظیم می‌شوند و ۲۰ درصد از نمونه‌ها به صورت تصادفی ایجاد شده‌اند. شایان ذکر است که جمعیت کروموزوم‌های این مسئله برابر ۴۰ می‌باشد. به منظور انجام تقاطع بین والدین و ایجاد فرزندان نیازمند انتخاب والدین از بین نمونه‌های اولیه ایجاد شده هستیم که در این پژوهش از روش انتخاب مسابقه‌ای<sup>۱۸</sup> برای این امر استفاده شده است.

#### ۳-۴- عملگرهای تقاطع و جهش

در جریان عملگر تقاطع، تغییراتی روی کروموزوم‌های والد اعمال می‌شود تا جواب‌های جدیدی تحت عنوان فرزندان تولید شوند. این موضوع باعث می‌شود که فرزندان ترکیبی از خصوصیات والدین خود را به همراه داشته باشند و دقیقاً مشابه یکی از والدین نباشند. در این تحقیق از تقاطع تک نقطه‌ای استفاده شده که در آن به صورت تصادفی یکی از رشته‌ها انتخاب می‌شود و ادغام برشی برای آن رشته اعمال می‌شود. ضریب ادغام در این مسئله معادل ۰.۷ می‌باشد. همچنین پس از انجام عملگر تقاطع بر روی کروموزوم‌ها، عملگر جهش بر روی آنها اعمال می‌شود. عملگر جهش مانع از به دام افتادن الگوریتم در نقاط بهینه موضعی می‌شود و برای حفظ پراکندگی جمعیت در نظر گرفته می‌شود. در ۵۰ درصد از موارد به صورت تصادفی یکی از رشته‌ها انتخاب می‌شود و دو ژن مختلف از آن رشته به صورت تصادفی تعیین و با هم جابجا می‌شود. احتمال جهش در این مسئله برابر ۰.۳ می‌باشد.

#### ۴-۴- شرط توقف الگوریتم‌ها

معیارهای مختلفی می‌توانند برای توقف یک الگوریتم فراابتکاری تعریف شوند که در اینجا شرط خاتمه الگوریتم را بر اساس تعداد تکرارهای الگوریتم تعریف می‌کنیم. در مسئله حاضر، الگوریتم پس از اینکه به اندازه ۱۰۰۰۰ بار تکرار شود متوقف می‌گردد.

#### ۵-۴- نتایج محاسباتی

به منظور آزمون صحت مدل پیشنهادی و بررسی کارایی NSGAI در این پژوهش ابتدا سه



مثال در ابعاد کوچک طراحی و در نرم افزار لینگو اجرا گردید. مشخصات مثال‌های طراحی شده و پاسخ به دست آمده از هر مثال در جدول (۳) ارائه شده است. با بزرگتر شدن ابعاد مدل، نرم افزار لینگو کارایی لازم جهت حل مسئله در یک زمان منطقی را نداشت. به همین دلیل مثال‌های تعریف شده با استفاده از روش NSGAI و نرم‌افزار متلب ۲۰۱۹ نیز حل شده است. نتایج به دست آمده نشان‌دهنده آن است که خروجی‌های حاصل از نرم افزار NSGAI انحراف کمی از نتایج دقیق حاصل از نرم افزار لینگو داشته است. این موضوع بیانگر کارایی الگوریتم طراحی شده برای مدل حاضر می‌باشد.

جدول ۳. پاسخ‌های به دست آمده از حل مسئله در نرم‌افزار لینگو

	لینگو							NSGA II			
	f	i	T	m	d	v	W	اقتصادی	زیست محیطی	اقتصادی	زیست محیطی
مسئله اول	۱	۱	۲	۴	۱	۱	۱	۲,۳۲۵,۰۰۰	۱۳۶,۸۴۲	۱,۸۹۹,۰۰۰	۱۴۳,۸۹۱
مسئله دوم	۱	۱	۴	۳	۱	۱	۱	۲,۷۶۱,۸۸۲	۱۵۸,۴۸۳	۲,۳۰۵,۱۲۰	۱۷۲,۴۱۱
مسئله سوم	۲	۲	۳	۴	۲	۲	۲	۳,۳۱۵,۷۰۰	۱۷۱,۸۲۵	۳,۰۵۵,۸۴۱	۱۸۸,۲۷۴

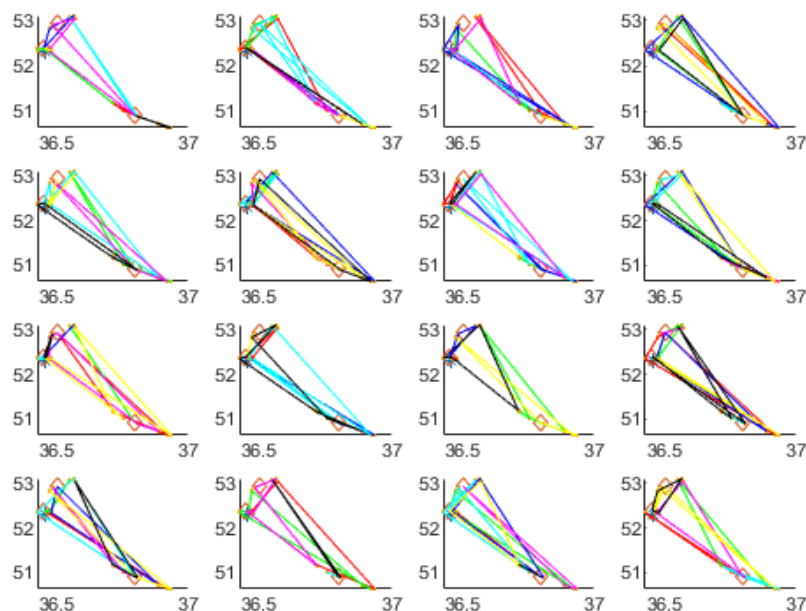
در ادامه پس از تأیید اعتبار الگوریتم NSGAI مسئله واقعی براساس داده‌های جمع‌آوری شده از یکی از شرکت‌های فعال در زمینه تولید محصولات لبنی حل شد. بدین منظور ۵ گروه محصول اصلی از محصولات شرکت شامل پنیر خامه‌ای، پنیر پیتزا، ماست، محصولات فرادما و نوشیدنی انتخاب شده است. این محصولات در سالن‌های جداگانه تولید و جهت ارسال به مراکز توزیع در انبار محصول نگهداری می‌شوند. به دلیل پراکندگی جغرافیایی بالای مراکز توزیع مربوط به کارخانه موردنظر، در این تحقیق تنها توزیع‌کنندگان استان مازندران که شامل سه مرکز توزیع می‌باشد، در نظر گرفته شده است. مشتریان مسئله خرده‌فروشان هستند که در صد درصد دوره‌های زمانی یک سال گذشته از کارخانه خرید کرده‌اند. به این ترتیب تعداد کل مشتریان شامل ۱۷ خرده فروش در شهرهای مختلف بوده و مسئله برای ۲۴ دوره زمانی حل شده است. نتایج حل مسئله به روش NSGAI در جدول (۴) ارائه شده است.



جدول ۴. مقادیر تابع هدف مسئله واقعی

مقدار تابع هدف	نوع تابع هدف
۱۶۲۳۲۱۰۲۸۵	تابع هدف اقتصادی (ریال)
۹۷۱۵۹۵	تابع هدف زیست محیطی (گرم)

با توجه به اینکه بخشی از مسئله حاضر شامل مسئله VRP سبز می‌باشد در ادامه مسیرهای تشکیل شده در دوره‌های زمانی مختلف در شکل (۴) ارائه می‌شود.



شکل ۴. مسیرهای تشکیل شده در دوره‌های زمانی مختلف

در بخشی از تابع هدف زیست محیطی به موضوع تصفیه فاضلاب پرداخته شد. با توجه به آنکه میزان COD فاضلاب را به درصد چربی و پروتئین محصول مرتبط دانستیم، افزایش میزان هدر رفت چربی و پروتئین منجر به افزایش همزمان مقدار COD و هزینه‌ها و هم چنین کاهش سود می‌شود. تحلیل حساسیت میزان هدر رفت چربی نشان می‌دهد به ازاء افزایش هدر رفت چربی محصول به جای اینکه در یک یا دو کارخانه تولید شود، در کارخانه‌های متعدد تولید می‌شود که در نتیجه آن، هزینه تولید محصول بالا می‌رود. در اغلب موارد علی‌رغم



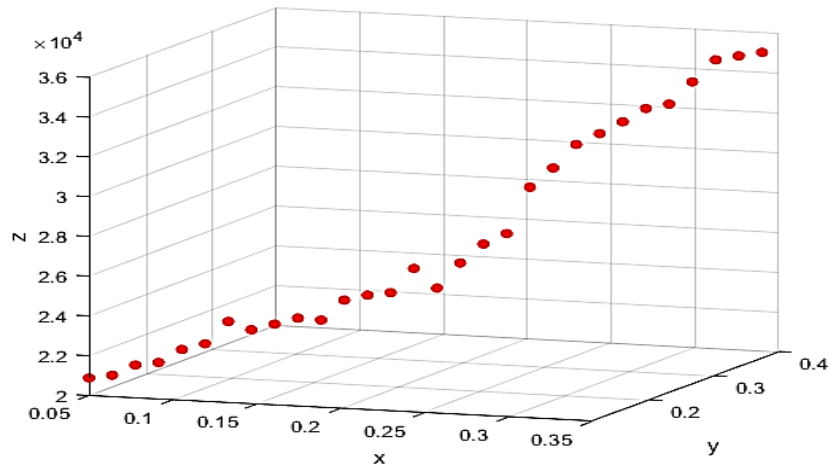


افزایش هزینه و کاهش سودآوری، ترجیح مدل به کسب سود ولو به ازاء افزایش میزان COD است. از طرف دیگر افزایش میزان تولید نیز می‌تواند منجر به افزایش COD و هزینه‌های تصفیه آب شود.

جدول ۵. تحلیل حساسیت میزان هدر رفت چربی

میزان هدر رفت چربی در کارخانه‌ها					COD	Z <sub>۱</sub>	Z <sub>۲</sub>
F <sub>۱</sub>	F <sub>۲</sub>	F <sub>۳</sub>	F <sub>۴</sub>	F <sub>۵</sub>			
۸٪	۱۲٪	۱۲٪	۱۲٪	۱۲٪	۲۰۷۴۲	۱۶۳۳۲۱۰۲۸۵	۹۷۱۵۹۵
۱۰٪	۱۵٪	۱۵٪	۱۵٪	۱۵٪	۲۲۳۱۳	۵۸۳۷۵۶۵۴۷	۹۸۳۴۸۴
۱۲٪	۲۰٪	۲۰٪	۲۰٪	۲۰٪	۲۵۹۲۰	۵۶۱۵۵۶۷۸۸	۱۰۱۰۴۵۶
۱۵٪	۲۵٪	۲۵٪	۲۵٪	۲۵٪	۲۸۳۶۶	۵۳۱۲۵۶۴۲۳	۱۰۸۷۰۴
۲۰٪	۳۰٪	۳۰٪	۳۰٪	۳۰٪	۳۴۸۳۲	۳۷۲۹۰۷۳۹۹	۱۲۴۰۶۷۴

نمودار تحلیل حساسیت میزان هدر رفت چربی برای محصول شماره یک در کارخانه‌های مختلف در شکل زیر نمایش داده شده است. در این نمودار محور X نشان‌دهنده میزان هدر رفت چربی محصول شماره یک در کارخانه یک و محور Y نشان‌دهنده میزان هدر رفت چربی محصول شماره یک در دیگر کارخانه‌ها و محور Z نمایشگر میزان COD حاصل است. همان گونه که از شکل (۵) پیداست، به ازاء افزایش میزان هدر رفت چربی مقدار COD نیز تقریباً روند افزایشی داشته است.



شکل ۵. نمای شماتیک اثر تغییر میزان هدر رفت چربی بر میزان COD

## ۵- نتیجه‌گیری

این تحقیق به بررسی زنجیره تأمین حلقه‌بسته سبز محصولات فاسد شدنی پرداخته است. مورد مطالعاتی این پژوهش شامل زنجیره تأمین سه لایه یک شرکت لبنی است که از لایه‌های تولید، توزیع و فروش تشکیل شده است. توابع هدف این مسئله شامل حداکثرسازی سود کل زنجیره تأمین و حداقل‌سازی میزان آلودگی محیط زیست در سراسر زنجیره است. علاوه بر هزینه‌های مرسوم مانند هزینه تولید، هزینه نگهداری، هزینه حمل‌ونقل و مواردی از این دست، در این پژوهش هزینه تصفیه فاضلاب نیز در مدل‌سازی لحاظ شده است. همچنین به منظور فرموله کردن اثرات زیست محیطی زنجیره تأمین، در لایه تولید به میزان فاضلاب حاصل از تولید محصول و در لایه‌های توزیع و فروش به میزان کربن حاصل از حمل‌ونقل محصول پرداخته شده است.

برای حل مسئله مذکور یک مدل MINLP توسعه داده شده است و در بخشی از مدل که بیانگر رابطه بین توزیع‌کننده و مشتری است، مسئله مسیریابی وسیله نقلیه در نظر گرفته شده که شامل چند محصول، چند انبار، چند نوع وسیله نقلیه و چند دوره بود. همچنین در مدل حاضر، با توجه به تند مصرف بودن محصولات لبنی و اهمیت بالای فاصله زمانی بین تولید و فروش محصول، دوره عمر محصولات لبنی نیز در نظر گرفته شده است. از سوی دیگر، با توجه به ماهیت NP-hard مسئله و عدم کارایی نرم‌افزار لینگو در حل مسائل با ابعاد بزرگ، از



الگوریتم NSGAI برای حل مسئله در نمونه واقعی استفاده گردید. در نهایت اثر میزان هدر رفت چربی بر آلودگی فاضلاب لبنی نیز مورد بررسی قرار گرفت که نتایج نشان‌دهنده اثر مستقیم میزان هدر رفت چربی بر آلودگی فاضلاب بود.

با توجه به عدم قطعیت‌های موجود در دنیای واقعی و در صنعت لبنیات از جمله نوسان در دسترسی به شیر به‌عنوان ماده اولیه مهم در این صنعت، تغییرات قیمت مواد اولیه و ملزومات، اختلال در واردات برخی مواد و نوسانات مربوط به تعداد نیروی کار بر اثر عواملی مانند بیماری کرونا، پیشنهاد می‌گردد مسئله بهینه‌سازی زنجیره تأمین با در نظر گرفتن عدم اطمینان مورد بررسی قرار گیرد. همچنین پیشنهاد می‌گردد علاوه بر عوامل زیست محیطی به عوامل اجتماعی مانند میزان شکایت مشتریان، میزان ایجاد فرصت‌های شغلی جدید و غیره پرداخته شود. به‌عنوان پیشنهاد دیگر، در پژوهش‌های آتی می‌توان از سایر روش‌های فراابتکاری و روش‌های ترکیبی جهت حل مسئله بهره گرفت.

#### ۶- پی‌نوشت‌ها

- |  |   |
|--|---|
| ۱- Green Supply Chain Management (GSCM)  | ۱۰- Green Vehicle Routing Problem       |
| ۲- Closed-loop Supply Chain              | ۱۱- sherif et al.                       |
| ۳- The International Energy Agency (IEA) | ۱۲- Mixed-Integer Non-Linear Programing |
| ۴- Ahi & Searcy                          | ۱۳- Swap Neighborhood Solution          |
| ۵- Biological-Oxygen Demand (BOD)        | ۱۴- Biuki et al.                        |
| ۶- Chemical Oxygen Demand (COD)          | ۱۵- Make to Stock                       |
| ۷- Fast Moving Consumer Goods (FMCG)     | ۱۶- Stock Keeping Unit (SKU)            |
| ۸- Mohammadi et al.                      | ۱۷- Zhang et al.                        |
| ۹- Vehicle Routing Problem               | ۱۸- Tournament Selection                |

#### ۷- منابع

- [۱] Tseng, M. L., Islam, M. S., Karia, N., Fauzi, F. A., & Afrin, S. (۲۰۱۹). A literature review on green supply chain management: Trends and future challenges. *Resources, Conservation and Recycling*, 141, ۱۴۵-۱۶۲.
- [۲] Mohebbi, N., Raad, A., & Motameni, A. (۲۰۱۸). Developing sustainable recovery model of end-of-life products. *Management research in Iran*, ۲۲(۲),



۲۲۷-۲۴۹.

- [۳] Farrokh, M., Azar, A., Jandaghi, G. (۲۰۱۶). A novel robust fuzzy programming approach for closed loop supply chain design. *Modern Research in Decision Making*, ۱(۳), ۱۳۱-۱۶۰.
- [۴] Nutjanni, K. P., Carvalho, M. S., & Costa, L. (۲۰۱۷). Green supply chain design: A mathematical modeling approach based on a multi-objective optimization model. *International Journal of Production Economics*, 183, ۴۲۱-۴۳۲.
- [۵] Ahi, P., & Searcy, C. (۲۰۱۵). An analysis of metrics used to measure performance in green and sustainable supply chains. *Journal of Cleaner Production*, 86, ۳۶۰-۳۷۷.
- [۶] Radfar, R., Khodadadian, D., Toloei Eshlaghi, A. (۲۰۲۰). A Multi-Objective Green Supply Chain: Multi-Product Model Considering Uncertainty. *Modern Research in Decision Making*, ۵(۳), ۱-۲۸.
- [۷] Lopes, R. B., Barreto, S., Ferreira, C., & Santos, B. S. (۲۰۰۸). A decision-support tool for a capacitated location-routing problem. *Decision Support Systems*, 46(۱), ۳۶۶-۳۷۵.
- [۸] Shete, B. S., & Shinkar, N. P. (۲۰۱۳). Comparative study of various treatments for dairy industry wastewater. *IOSR J Eng*, 3, ۴۲-۴۷.
- [۹] Nozari, H., Najafi, E., Fallah, M., & Hosseinzadeh Lotfi, F. (۲۰۱۹). Quantitative analysis of key performance indicators of green supply chain in FMCG industries using non-linear fuzzy method. *Mathematics*, 7(۱۱), ۱۰۲۰.
- [۱۰] Zhao, W. R. (۲۰۱۷). *Sustainable Procurement in British Dairy Supply Chain* (Doctoral dissertation, University of Sheffield).
- [۱۱] Talaei, M., Moghaddam, B. F., Pishvae, M. S., Bozorgi-Amiri, A., & Gholamnejad, S. (۲۰۱۶). A robust fuzzy optimization model for carbon-efficient closed-loop supply chain network design problem: a numerical illustration in electronics industry. *Journal of Cleaner Production*, 113, ۶۶۲-۶۷۳.
- [۱۲] Ahmed, M., Iqbal, S. M., Priyanka, T. J., Arani, M., Momenitabar, M., & Billal,



- M. M. (۲۰۲۰). An Environmentally Sustainable Closed-Loop Supply Chain Network Design under Uncertainty: Application of Optimization. *arXiv preprint arXiv:2009.11979*.
- [۱۳] Mohtashami, Z., Aghsami, A., & Jolai, F. (۲۰۲۰). A green closed loop supply chain design using queuing system for reducing environmental impact and energy consumption. *Journal of cleaner production*, 242, ۱۱۸۴۵۲.
- [۱۴] Gholipour, S., Ashoftehfar, A., & Mina, H. (۲۰۲۰). Green supply chain network design considering inventory-location-routing problem: a fuzzy solution approach. *International Journal of Logistics Systems and Management*, 35(۴), ۴۳۶-۴۵۲.
- [۱۵] Abdi, A., Abdi, A., Akbarpour, N., Amiri, A. S., & Hajiaghaei-Keshteli, M. (۲۰۲۰). Innovative approaches to design and address green supply chain network with simultaneous pick-up and split delivery. *Journal of Cleaner Production*, 250, ۱۱۹۴۳۷.
- [۱۶] Yavari, M., & Geraeli, M. (۲۰۱۹). Heuristic method for robust optimization model for green closed-loop supply chain network design of perishable goods. *Journal of Cleaner Production*, 226, ۲۸۲-۳۰۵.
- [۱۷] ] Mohammadi, Z., Barzinpour, F., & Teimoury, E. (۲۰۲۰). Designing sustainable supply chain network by considering direct and indirect shipment: Evidence from food industry. *Decision Science Letters*, 9(۳), ۳۲۳-۳۳۶.
- [۱۸] Amorim, P., Günther, H. O., & Almada-Lobo, B. (۲۰۱۲). Multi-objective integrated production and distribution planning of perishable products. *International Journal of Production Economics*, 138(۱), ۸۹-۱۰۱.
- [۱۹] Sherif, S. U., Asokan, P., Sasikumar, P., Mathiyazhagan, K., & Jerald, J. (۲۰۲۱). Integrated optimization of transportation, inventory and vehicle routing with simultaneous pickup and delivery in two-echelon green supply chain network. *Journal of Cleaner Production*, 287, ۱۲۵۴۳۴.
- [۲۰] Biuki, M., Kazemi, A., & Alinezhad, A. (۲۰۲۰). An integrated location-routing-



- inventory model for sustainable design of a perishable products supply chain network. *Journal of Cleaner Production*, 260, ۱۲۰۸-۱۲۱۲.
- [۲۱] Ghahremani Nahr, J., Pasandideh, S. H. R., & Niaki, S. T. A. (۲۰۲۰). A robust optimization approach for multi-objective, multi-product, multi-period, closed-loop green supply chain network designs under uncertainty and discount. *Journal of industrial and production engineering*, 37(۱), ۱-۲۲.
- [۲۲] Gholizadeh, H., & Fazlollahtabar, H. (۲۰۲۰). Robust optimization and modified genetic algorithm for a closed loop green supply chain under uncertainty: Case study in melting industry. *Computers & Industrial Engineering*, 147, ۱۰۶۶-۱۰۷۳.
- [۲۳] Jiang, Y., Zhao, Y., Dong, M., & Han, S. (۲۰۱۹). Sustainable supply chain network design with carbon footprint consideration: a case study in China. *Mathematical Problems in Engineering*, 2019.
- [۲۴] Zhen, L., Huang, L., & Wang, W. (۲۰۱۹). Green and sustainable closed-loop supply chain network design under uncertainty. *Journal of Cleaner Production*, 227, ۱۱۹۵-۱۲۰۹.
- [۲۵] Ghomi-Avili, M., Naeini, S. G. J., Tavakkoli-Moghaddam, R., & Jabbarzadeh, A. (۲۰۱۸). A fuzzy pricing model for a green competitive closed-loop supply chain network design in the presence of disruptions. *Journal of Cleaner Production*, 188, ۴۲۵-۴۴۲.
- [۲۶] Jabbarzadeh, A., Houghton, M., & Pourmehdi, F. (۲۰۱۹). A robust optimization model for efficient and green supply chain planning with postponement strategy. *International Journal of Production Economics*, 214, ۲۶۶-۲۸۳.
- [۲۷] Rad, R. S., & Nahavandi, N. (۲۰۱۸). A novel multi-objective optimization model for integrated problem of green closed loop supply chain network design and quantity discount. *Journal of cleaner production*, 196, ۱۵۴۹-۱۵۶۵.
- [۲۸] Yu, H., & Solvang, W. D. (۲۰۱۸, March). A trade-off model for green supply chain design: an efficiency-versus-emission analysis. In *2018 7th International Conference on Industrial Technology and Management (ICITM)* (pp. ۱۳۶-۱۴۲).



IEEE.

- [۲۹] Mohammed, A., & Wang, Q. (۲۰۱۷). The fuzzy multi-objective distribution planner for a green meat supply chain. *International Journal of Production Economics*, 184, ۴۷-۵۸.
- [۳۰] [۳۰] Keshavarz Ghorabae, M., Amiri, M., Olfat, L., & Khatami Firouzabadi, S. A. (۲۰۱۷). Designing a multi-product multi-period supply chain network with reverse logistics and multiple objectives under uncertainty. *Technological and Economic Development of Economy*, 23(۳), ۵۲۰-۵۴۸.
- [۳۱] Asrawi, I., Saleh, Y., & Othman, M. (۲۰۱۷). Integrating drivers' differences in optimizing green supply chain management at tactical and operational levels. *Computers & Industrial Engineering*, 112, ۱۲۲-۱۳۴.
- [۳۲] Chibeles-Martins, N., Pinto-Varela, T., Barbosa-Póvoa, A. P., & Novais, A. Q. (۲۰۱۶). A multi-objective meta-heuristic approach for the design and planning of green supply chains-MBSA. *Expert Systems with Applications*, 47, ۷۱-۸۴.
- [۳۳] Govindan, K., Jafarian, A., & Nourbakhsh, V. (۲۰۱۵). Bi-objective integrating sustainable order allocation and sustainable supply chain network strategic design with stochastic demand using a novel robust hybrid multi-objective metaheuristic. *Computers & Operations Research*, 62, ۱۱۲-۱۳۰.
- [۳۴] Zhang, S., Lee, C. K. M., Choy, K. L., Ho, W., & Ip, W. H. (۲۰۱۴). Design and development of a hybrid artificial bee colony algorithm for the environmental vehicle routing problem. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 31, ۸۵-۹۹.
- [۳۵] Dehghani, M., Aghaei, M., Taghavifard, S. (۲۰۲۱). The Model for Lot Sizing Problem with Supplier Selection and Solving by NSGA-II (Case Study: Morvarid Panberiz Company). *Management Research in Iran*, ۱۹(۲), ۶۵-۸۹.