فصلنامه مهندسی حمل و نقل، دوره ۱٤، شماره ۱، پاییز ۱٤۰۱، ص. ۲۱۵٤-۲۱۳۱

مقاله علمی-پژوهشی

مدل‌سازی بازی توزیع و تولید در مسئله مسیریابی تولید سبز به کمک برنامه‌ریزی آرمانی فازی دوسطحی

فرزانه ادبی، دانشجوی دکتری، گروه مهندسی صنایع، دانشکده مهندسی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران

امیرسامان خیرخواه (مسئول مکاتبات)، دانشیار، گروه مهندسی صنایع، دانشکده مهندسی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران

E-mail: kheirkhah@basu.ac.ir

رضا توکلی مقدم، استاد، دانشکده مهندسی صنایع، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران

دریافت: ۱٤۰۰/۰۲/۰۳ پذیرش: ۱٤۰۰/۰٦/۰۳

چکیده

مقاله حا ضر تلاش دارد تا مدل ریا ضی م سئله م سیریابی تولید را با اعمال سیا ست‌های حفاظت از محیط‌زی ست ارائه نماید. شرکت موردبرر سی از دو بخش م ستقل تولید و توزیع ت شکیل شده ا ست. این زیرمجموعه‌ها به صورت غیرمتمرکز اداره می‌شوند و ارتباط دوطرفه میان آن‌ها یک بازی ا ستکلبرگ را شکل می‌دهد. زیرمجموعه اول (شرکت توزیع) ت صمیم‌گیرندۀ سطح اول ا ست و برای و سایل نقلیه تعیین م سیر نموده و میزان انتقال مح صول به هر یک از م شتریان را م شخص می‌کند. شرکت پخش دو هدف را پیگیری می‌نماید که عبارت‌اند از کمینه‌سازی هزینه‌های توزیع و نگهداری و کمینه‌سازی میزان آلایندگی وسایل نقلیه. ازآنجاکه محدودیت ظرفیت تولید، مانع از تأمین تمامی خواسته‌های بخش توزیع توسط تولیدکننده می‌شود؛ شرکت توزیع می‌تواند محصول را از شرکت تولیدی زیرمجموعه تهیه کرده و یا با پرداخت هزینۀ بیشتری از سایر تولیدکنندگان، کالای جایگزین را تأمین نماید، که در این صورت از تولیدکننده غرامت دریافت می‌کند. در سطح پایین‌تر، زیرمجموعه دوم (تولیدکننده) با هدف کمینه‌سازی هزینه‌های تولید و نگهداری، به زمان‌بندی تولید می‌پردازد. درنهایت الگوریتم حل مسئله دوسطحی چندهدفه، بر مبنای رویکرد برنامه‌ریزی آرمانی فازی دوسطحی تشریح و بسط داده می‌شود. تحلیل نتایج عددی حاکی از آن است که مطلوبیت تصمیمات نهایی از دید توزیع‌کننده و تولیدکننده به میزان هزینه کالای جایگزین و غرامت د ساس ا ست. الگوریتم پی شنهادی برای بهبود میزان توافق بین ت صمیم‌گیرندگان سطح اول و دوم تلورانس‌هایی را در نظر می‌گیرد که با تنظیم مناسب آن‌ها نیز می‌توان به برنامه‌های اجرایی‌تر رسید. همچنین نتایج عددی حاصل بیان می‌دارند که جواب‌های روش برنامه‌ریزی آرمانی فازی دوسطحی برابر یا بسیار نزدیک به جواب ضدایده‌آل هستند.

کلمات کلیدی: مسیریابی تولید، برنامه‌ریزی دوسطحی، بهینه‌سازی چندهدفه، بهینه‌سازی سبز، برنامه‌ریزی آرمانی فازی دوسطحی

۱. مقدمه

مسئله مسیریابی تولید، مسئله ایست که به‌طور هم‌زمان مسائل بهینه‌سازی تولید، موجودی، توزیع و تصمیمات مسیریابی را مدنظر می‌گیرد [Adulyasak Cordeau and Jans, 2015]. در مسئله مسیریابی تولید فرض شده است که تصمیمات برای تمامی بخش‌های شرکت یک تصمیم‌گیرنده وجود دارد؛ این در حالی است که در بعضی از کسب‌وکارها، برای بقاء و حفظ بهره‌وری در بازار رقابتی، واحدهای استراتژیکی با وظایف و اهداف خاص، شکل می‌گیرند و بین این واحدها در سطح محلی یا ملی و یا حتی بین‌المللی اتحادهای جدیدی شکل می‌گیرد. نیازهای صنایع مختلف در دنیای واقعی، سبب پیدایش مطالعات متعدد PRP در جامعه تحقیقات عملیاتی شده است. از آن جمله، می‌توان به زنجیره تأمین دارو، صنعت حمل‌ونقل جاده‌ای، زنجیره تأمین پتروشیمی، و زنجیره تأمین جمع‌آوری و بازیافت زباله و زنجیره تأمین مواد غذایی، محصولات کشاورزی و سایر اقلام فاسدشدنی مثل فراورده‌های خونی، که ویژگی‌ها و مسئولیت‌های خاصی را متوجه تصمیم‌گیرندگان این صنایع می‌سازد و شامل کلیه فعالیت‌ها از تولید تا توزیع آن‌ها می‌شود، اشاره نمود در این صنایع، واحدهایی برای تولید و توزیع به‌صورت مسیر وجود دارد که باوجود تعامل با یکدیگر، اهداف مستقلی را دنبال می‌کنند ازاین‌جهت مدل‌سازی مسئله مسیریابی تولید با در نظر گرفتن چند سطح تصمیم‌گیری اهمیت پیدا می‌کند. تصمیمات تولید و مسیریابی در سازمان‌ها علی‌رغم ایجاد رشد اقتصادی، آثار زیست‌محیطی منفی مانند انتشار گازهای گلخانه‌ای و آلودگی صوتی و اثرات سمی بر اکوسیستم مانند باران اسیدی وجود خواهد داشت. بنابراین، علاوه بر هزینه اقتصادی حمل‌ونقل، باید آثار زیست‌محیطی و اجتماعی را نیز در نظر گرفت، کاهش مصرف سوخت و انتشار آلاینده‌ها منجر به ایجاد حمل‌ونقل پایدار و سازگار با محیط‌زیست می‌شود [Salehi Sarbijan and Behnamian, 2021].

در ادامه در بخش ۲ مروری بر ادبیات گذشته موضوع صورت می‌گیرد. در بخش ۳ مسئله و مفروضات تحقیق همچنین روش‌شناسی پژوهش و مدل‌سازی مسئله تبیین شده و در بخش ٤ الگوریتم حل مسئله چندهدفه دوسطحی بر طبق رویکرد برنامه‌ریزی آرمانی فازی دوسطحی برای حل مدل پیشنهادی تشریح می‌گردد. در بخش ۵ مطالعه کاربردی و تحلیل نتایج عددی جهت تبیین چگونگی پیاده‌سازی الگوریتم ارائه می‌گردد. در بخش نهایی نتیجه‌گیری و پیشنهادهایی برای مطالعات آتی تبیین می‌شود.

۲. مرور ادبیات

مقاله حاضر، مسئله مسیریابی تولید با رویکرد بهینه‌سازی دوسطحی را در شرایط رقابت و تعامل بین تولیدکننده و توزیع‌کننده، مدل می‌نماید. مرور جامعی از مسائل برنامه‌ریزی دوسطحی و چندسطحی و روش‌های حل آن‌ها توسط [Lu Han Hu and Zhang, 2016] و برر سی جامعی از م سئله مسیر یابی تولید و تکنیک های حل آن در [Adulyasak Cordeau and Jans, 2015] فراهم شده است. در میان تحقیقات صورت گرفته در راستای مسئله مسیریابی تولید هیچ پژوهشی به مدل‌سازی مسئله با دو یا چند سطح تصمیم‌گیرنده نپرداخته است. تنها دو تحقیق [Chaabani and Said, 2019] و [Calvete Galé and Oliveros, 2011] با مدل‌هایی نزدیک به مسیریابی تولید از برنامه‌ریزی دوسطحی استفاده نموده‌اند که مدل‌هایشان در یک دوره و بدون در نظر گرفتن سیاست‌های نگهداری و موجودی است و به علت حذف هزینه‌های نگهداری و آماده‌سازی، مدل سطح پایین ساده‌سازی شده و قابلیت حل با برنامه‌ریزی خطی را داشته است به عبارت دیگر این دو مدل مسئله مسیریابی خودرو با تخصیص ظرفیت تولید هستند. برخلاف مسئله مسیریابی تولید، تحقیقات بسیاری به مسئله تولید- توزیع (حمل‌ونقل به‌صورت مستقیم) دوسطحی پرداخته‌اند. مسئله تولید- توزیع مسئله

زنجیره تأمینی است که در آن تولیدکننده به‌صورت مستقیم کالا را به مشتری ارسال می‌دارد. مقاله [Kumar Ganapathy Gokhale and Tiwari., 2020] مرور جامعی از مدل‌ها و روش‌های حل مسائل تولید-توزیع ارائه شده در بازه زمانی سال ۲۰۰۰ الی ۲۰۱۹ را تدوین نموده است. تحقیقاتی که در مسئله تولید- توزیع دو سطحی خود سیاست‌های نگهداری موجودی را در چند دوره زمانی پیاده سازی نموده‌اند به مسئله مسیریابی تولید نزدیک‌تر هستند. جدول ۱ مقالات مسیریابی تولید و مقالات مرتبط با برنامه‌ریزی دوسطحی را در زنجیره تامین دسته‌بندی کرده، سطر آخر جدول، مشخصات پژوهش حاضر را ارائه می‌کند. در جدول ۱ مقالات از لحاظ معیارهایی چون برنامه‌ریزی دوسطحی، اهداف چندگانه، برنامه‌ریزی در دوره‌های چندگانه، امکان عدم تامین تقاضا، نوع توزیع، اجزای تشکیل‌دهنده توابع هدف و رویکرد حل مورد مقایسه قرار گرفته‌اند، تا خلا تحقیقاتی و تفاوت‌های تحقیق حاضر با ادبیات موضوع روشن گردد. در این جدول U نشان‌دهنده تابع هدف سطح بالا و L نشان‌دهنده تابع هدف سطح پایین است برای مثال در ستون اهداف چندگانه U بیان می‌کند که سطح بالا چندهدفه است، برای مسائلی که تک هدفه هستند از نماد + به منظور نمایش وجود یک معیار در توابع هدف استفاده شده است. با دقت در جدول ۱ تفاوت‌های تحقیق حاضر با ادبیات موضوع قابل‌مشاهده است و تفاوت شایان تحقیق حاضر با سایر تحقیقات مرور شده، در مدل سازی دو سطحی هم‌زمان اهداف چندگانه با مسیریابی در تور و هزینه‌های موجودی همچنین در کمینه‌سازی آلودگی به‌عنوان تابع هدف دوم در سطح اول در چند دوره است. همان‌طور که در جدول ۱ قابل‌مشاهده است. در میان مقالات تولید-توزیع دوسطحی مسئله تولید- توزیع تحقیقات [Haque Paul Sarker and Essam, 2020]، [Cheraghalipour Paydar and Hajiaghaei, 2019] و [Makui and Ghavamifar, 2016] به برنامه‌ریزی در دوره‌های چندگانه با نگهداری موجودی پرداخته‌اند. در مدل [Makui and Ghavamifar, 2016] توزیع‌کننده در سطح اول به کمینه‌سازی هزینه‌های توزیع و نگهداری می‌پردازد و تولیدکننده به‌عنوان پیرو هزینه آماده سازی را کمینه می سازد. اما در [Cheraghalipour Paydar and Hajiaghaei, 2019] شرکت مادر تولید و توزیع‌کننده به‌عنوان رهبر هزینه‌های کل تولید، توزیع و نگهداری را کمینه می‌سازد و توزیع‌کننده در سطح دوم تنها هزینه‌های توزیع را حداقل می‌کند. در [Haque Paul Sarker and Essam, 2020] فرض شده است که هر یک از توزیع‌کننده و تولیدکننده در سطح پایین اهداف خود را بهینه با در نظر گرفتن ملاحظات زیست‌محیطی نموده و مجموع کل توابع آن‌ها توسط سیستم ناظر دولت بهینه می‌گردد.

جدول ۱. دسته‌بندی مقالات مسئله تولید-توزیع دوسطحی و مسئله مسیریابی تولید دوسطحی

نوع مسئله	مراجع	برنامه‌ریزی دوسطحی	اهداف چندگانه	دوره چندگانه	عدم تأمین تقاضا	نوع توزیع		اجزای توابع هدف				روش حل	
						مستقیم	تور	توزیع	آماده‌سازی	تولید	نگهداری	آلودگی	دقیق	فرا ابتکاری
تولید-توزیع	[Roghanian Sadjadi and Aryanezhad, 2007]	*	U			*		U		L	U		*	
	[Ehrgott Naujoks Stewart and Wallenius, 2010]	*	L			*		U		L	L			
	[Jia Feng and Zou, 2013]	*	U			*		U		L	U			*

نوع مسئله	مراجع	برنامه‌ریزی دوسطحی	اهداف چندگانه	دوره چندگانه	عدم تأمین تقاضا	نوع توزیع: مستقیم	نوع توزیع: تور	اجزای توابع هدف: توزیع	اجزای توابع هدف: آماده‌سازی	اجزای توابع هدف: تولید	اجزای توابع هدف: نگهداری	روش حل: آلودگی	روش حل: دقیق	روش حل: فرا ابتکاری
	[Jia Wang and Fan, 2014]	*	L			*			U	L	L			*
	[Mokhlesian and Zegordi, 2014]	*	U			*		U		L	U			*
	[Saranwong and Likasiri, 2016]	*				*		L U					*	*
	[Ma Yan Kang and Wei, 2016]	*	L			*		L U		L U	L U			*
	[Makui and Ghavamifar, 2016]	*		*		*		U	L		U		*	
	[An and Ouyang, 2016]	*			*	*		L U	L U				*	
	Cheraghalipour Paydar and Hajiaghaei, 2019]	*		*		*		L U		U	U			*
	Setak Feizizadeh Tikani and Ardakani, 2019]	*				*		L		L	U L			*
	Haque Paul Sarker and Essam, 2020]	*		*		*		L U		L U	L	L		*
	Shi Deng Wang and Xu, 2020]	*	U			*		L U		L U		U		*
	Babaeinesami Tohidi and Seyedaliakbar, 2020]	*				*		L U	L	L				*
	Pakseresht Shirazi Mahdavi and Mahdavi-Amiri, 2020]	*	U			*		L		U		U		*
مسیریابی با ظرفیت تولید	Calvete Galé and Oliveros, 2011]	*				*	*	U		L				*
	[Chaabani and Said, 2019]	*				*	*	U		L U				*
مسیریابی تولید	Li Chu Feng Chu and Zhou, 2018]	+		*		+	+	+	+	+	+		*	
	Darvish Archetti and Coelho, 2019]	+		*		*	+	+	+	+	+	+	*	
	[Li Chu Chu and Zhu, 2019]			*	*	*	+	+	+	+	+			*
	[Golsefidi and Jokar, 2020]			*		*	+	+	+	+	+			*

نوع مسئله	مراجع	برنامه‌ریزی دوسطحی	اهداف چندگانه	دوره چندگانه	عدم تأمین تقاضا	نوع توزیع		اجزای توابع هدف					روش حل	
						مستقیم	تور	توزیع	آماده‌سازی	تولید	نگهداری	آلودگی	دقیق	فرا ابتکاری
	Torkaman Jokar Mutlu and Woensel, 2020]			*			+	+	+	+	+			*
	Schenekemberg, Scarpin, Pecora Guimarães and Coelho, 2021]			*			+	+	+	+	+		*	
	Zhang Luo Baldacci and Lim, 2021]			*			+	+	+	+	+		*	
	Salehi Sarbijan and Behnamian, 2021]			*	*		+	+	+	+	+			*
	تحقیق حاضر	*	U	*	*	*		U	L	L	U L	U	*	

U= تابع هدف سطح بالا (تصمیم‌گیرنده اول)، L= تابع هدف سطح پایین (تصمیم‌گیرنده دوم) و +: نماد مدل های تک سطحی است

با توجه به چندهدفه بودن مدل تحقیق حاضر مقالات تولید-توزیع دوسطحی از نظر اهداف چندگانه نیز در جدول ۱ مورد بررسی قرار گرفته‌اند، برخی از تحقیقات برای سطح اول دو هدف تعیین کرده‌اند مانند: [Roghanian Sadjadi and Aryanezhad, 2007]، [Jia Feng and Zou, 2013]، [Mokhlesian and Zegordi, 2014]، [Shi Deng Wang and Xu, 2020] و [Pakseresht Shirazi Mahdavi and Mahdavi-Amiri, 2020] و برخی دیگر برای سطح دوم اهداف چندگانه داشته‌اند مانند: [Ehrgott Naujoks Stewart and Wallenius, 2010]، [Jia Wang and Fan 2014] و [Ma Yan Kang and Wei, 2016]. در [Ma Yan Kang and Wei, 2016] تابع هدف اول سطح پایین عبارت‌اند از هزینه راه‌اندازی، تولید و مواد اولیه و حمل تا توزیع‌کننده و تابع هدف دوم سطح پایین هزینه نگهداری و حمل تا مشتری است. در مدل ایشان سطح اول به کمینه‌سازی مجموع توابع هدف سطح پایین می‌پردازد. در [Jia Wang and Fan 2014] بازی میان واحد ثبت سفارش و برنامه‌ریزی تولید و واحد تولیدکننده صورت می‌گیرد و در سطح اول هزینه آماده‌سازی کمینه می‌شود و اهداف سطح دوم کمینه‌سازی هزینه تولید و کمینه‌سازی هزینه نگهداری است. در سایر مقالات مذکور بازی میان تولیدکننده و توزیع‌کننده صورت می‌گیرد. در [Roghanian Sadjadi and Aryanezhad, 2007]، [Jia Feng and Zou, 2013] و [Mokhlesian and Zegordi, 2014] اهداف توزیع‌کننده در سطح اول کمینه‌سازی هزینه توزیع و کمینه‌سازی هزینه نگهداری است و تولیدکننده به‌عنوان پیرو به دنبال کاهش هزینه تولید است. اما در [Ehrgott Naujoks Stewart and Wallenius, 2010] توزیع‌کننده در سطح اول هزینه توزیع را حداقل می‌کند و تولیدکننده در سطح دوم به کمینه‌سازی هزینه تولید و در تابع دیگر به کمینه‌سازی هزینه نگهداری می‌پردازد. در تحقیق [Shi Deng Wang and Xu, 2020] در سطح اول یک تابع برای کمینه‌سازی کل هزینه‌ها و تابعی برای کمینه‌سازی آلایندگی کربن و در سطح دوم تابع هدفی برای بیشینه کردن سود کل فرض شده است. به طور عکس در تحقیق [Pakseresht Shirazi Mahdavi and Mahdavi-Amiri, 2020] در سطح اول به دنبال بیشینه کردن سود کل و بیشینه کردن ملاحظات

زیست‌محیطی و در سطح پایین به کمینه‌سازی هزینه‌های تولید و توزیع می‌پردازد.

اخیراً روش‌های متنوعی برای حل مسائل دوسطحی ارائه‌شده‌اند مانند روش برنامه‌ریزی آرمانی فازی [Baky, 2010]، تلفیق دسته‌بندی تاپسیس و برنامه‌ریزی آرمانی فازی [Nayak and Ojha, 2019]، الگوریتم اصلاح و تجزیه مبتنی بر طرح‌ریزی [Yue Gao Zeng and You, 2019] و الگوریتم مبتنی بر تجزیه ترکیبی تکاملی [Chaabani Bechikh and Said, 2019] همچنین الگوریتم‌های فرا ابتکاری دوسطحی مانند الگوریتم ژنتیک و تکاملی [Naviddi, Kheirkhah and Messi Bidgoli, 2017]. باکی [Baky, 2010] بر مبنای روش برنامه‌ریزی آرمانی فازی ارائه‌شده برای حل مسائل چندهدفه، دو الگوریتم حل برای مسائل چندسطحی چندهدفه با روش برنامه‌ریزی آرمانی فازی ارائه نمود. مفهوم اصلی روش‌های برنامه‌ریزی فازی برای مسائل چندسطحی این است که هر تصمیم‌گیرندهٔ سطح پایین‌تر با در نظر گرفتن یک هدف و اولویت تصمیم‌گیرندگان سطح اول، تابع خود را بهینه می‌کند. اولین الگوریتم پیشنهادشده در [Baky, 2010]، به ازای تمامی سطوح به‌جز سطح پایین، به‌طور مجزا توابع عضویت را برای اهداف و متغیرهای تصمیم‌گیری، ارزیابی می‌کند. الگوریتم پیشنهادی دوم، توابع هدف چندگانه را به روش لکسیکوگرافی با توجه به تصمیمات سطوح بالاتر حل می‌کند. در تحقیق حاضر از الگوریتم دوم ایشان برای حل مدل پیشنهادی استفاده می‌شود. علاوه بر عوامل اجتماعی و فشار مصرف‌کنندگان در رعایت الزامات زیست‌محیطی، قوانین و نظارت دقیق دولت برای شرکت‌های دولتی و نیمه‌دولتی از عوامل اصلی اهتمام این شرکت‌ها به رعایت این الزامات است، ازاین‌جهت تحقیق حاضر به مدل‌سازی ریاضی مسئله با اعمال سیاست‌های حفاظت از محیط‌زیست می‌پردازد. تحقیقات بسیاری به کمینه‌سازی میزان آلودگی در تأمین و توزیع کالا پرداخته‌اند، برای مثال [Zulvia Kuo and Nugroho, 2020] در مسئله مسیریابی خودرو با کالای فاسدشدنی به کمینه‌سازی میزان آلودگی تولیدشده خودرو در زمان شروع، بارگیری و طی مسیر پرداخته‌اند. همچنین [Salmabadi and Beheshtinia, 2020] مدلی برای مسئله مسیریابی تولید چندهدفه دارو با الزامات محیط‌زیست ارائه نموده‌اند. مسئله مسیریابی سبزی در [Bektaş and Laporte, 2011] مدل شده‌اند که در آن هزینه آلایندگی متناسب با مسافت طی شده، وزن کالای بارگیری شده در هر مسیر، سرعت وسیله نقلیه و مصرف انرژی محاسبه شده است. در تحقیق حاضر از روابط ایشان برای محاسبه هزینه آلایندگی متناسب با وزن بار در مسافت طی شده استفاده می‌شود.

نوآوری‌های اصلی و جنبه های جدید مقاله حاضر عبارت‌اند از:

- بازنگری در تعریف رابطه بین تولیدکننده و توزیع کننده در مسئله مسیریابی تولید با استفاده از نظریه بازی ها.
- مدلسازی بازی تولید و توزیع به شکل برنامه‌ریزی دوسطحی چندهدفه با اهداف کمینه‌سازی آلودگی محیط‌زیست و کمینه‌سازی هزینه‌های نگهداری موجودی و توزیع.
- استفاده از روش برنامه‌ریزی آرمانی فازی و الگوریتم طرح شده در مقاله [Baky,2010] برای حل مسئله برنامه ریزی دوسطحی و چندهدفه پیشنهادی.

۳. بیان مسئله و مفروضات تحقیق

تحقیق حاضر به دنبال یافتن بهترین پاسخ برای تصمیمات یک شرکت تولید و توزیع است، به‌طوری‌که این شرکت از دو زیرمجموعه تولیدکننده و توزیع‌کننده تشکیل شده و ادارهٔ این زیرمجموعه‌ها به‌طور غیرمتمرکز هستند. هریک از زیرمجموعه‌های تصمیم‌گیرنده، برای ایجاد توان رقابتی از توانمندی‌ها و منابع داخلی خود به‌عنوان فاکتورهایی برای موفقیت بهره می‌برند. زیرمجموعهٔ اول (شرکت توزیع) از طریق فعالیت‌های بازاریابی، توزیع و فروش و زیرمجموعهٔ دوم (شرکت تولید) از طریق تولید کالا کسب درآمد می‌کنند.

هزینه‌های آماده‌سازی و محدودیت ظرفیت بخش تولید نسبت به تقاضای بازار مانع از آن می‌شود که تمامی خواسته‌های پخش‌کننده تأمین شود ازاین‌جهت شرکت پخش می‌تواند در صورت عدم تأمین نیازهایش توسط تولیدکننده، کالا را با هزینه بیشتری از سایر تولیدکنندگان تهیه کند. در این صورت غرامتی از تولیدکننده بابت عدم تأمین خواسته‌های خود دریافت می‌نماید. در این میان تولیدکننده در راستای حداقل‌سازی کل هزینه‌های خود، سعی می‌کند در طول زمان با تولید و نگهداری کالا در دوره‌های کم تقاضا، تقاضای توزیع‌کننده را تأمین کند. از طرفی شرکت پخش زمان‌بندی توزیع را به‌گونه‌ای انجام می‌دهد که ضمن تأمین تقاضا استفاده بهینه را از تولیدات کم‌هزینه واحد تولید ببرد. این ارتباط دوطرفه شرکت‌ها و غیرمتمرکز بودن نحوه اداره آن‌ها، منجر به یک بازی استکلبرگ می‌شود که در این مقاله در قالب یک مسئله برنامه‌ریزی دوسطحی فرموله شده است. شکل ۱ نمایی از مسئله مسیریابی تولید دوسطحی را به تصویر کشیده است. مسئله مسیریابی تولید دوسطحی چندهدفه با ملاحظات زیست‌محیطی دارای مفروضات زیر است:

۱. به دلیل وجود فرصت بازاریابی و افزایش سهم بازار در تأمین به‌موقع کالا همچنین وجود تولیدکنندگان محصولات مشابه و جایگزین، فرض شده است که توزیع‌کننده از برتری و قدرت بیشتری نسبت به تولیدکننده برخوردار است، ازاین‌جهت تولیدکننده در سطح پایین به‌عنوان پیرو به کمینه‌سازی هزینه‌های نگهداری در انبار تولیدکننده و هزینه‌های تولید و آماده‌سازی می‌پردازد و توزیع‌کننده در سطح بالا و رهبر به کمینه‌سازی هزینه‌های مسیریابی، توزیع و اختصاص وسیله نقلیه همچنین هزینه‌های نگهداری در انبار توزیع‌کننده و در تابعی دیگر به کمینه‌سازی آلایندگی می‌پردازد.

۲. مسئله دارای یک تولیدکننده با ظرفیت محدود تولید است که به تولید یک محصول می‌پردازد.

۳. محصولات در تولیدکنندگان و مشتریان با ظرفیت محدود برای تأمین تقاضای دوره‌های آتی انبار می‌گردد.

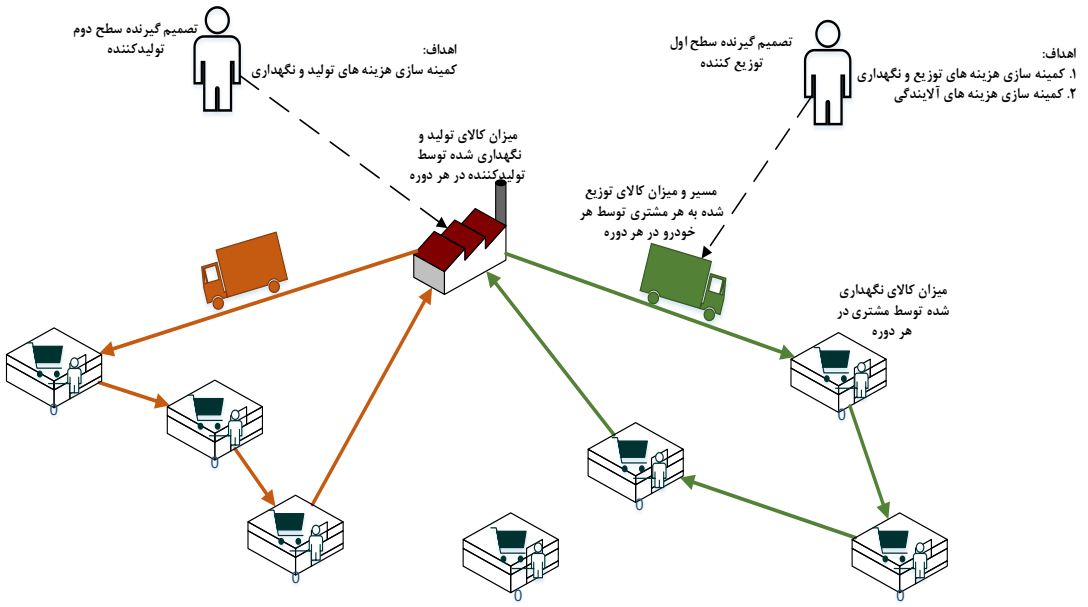
٤. توزیع‌کننده موظف به تأمین تمامی تقاضای مشتریان است. در صورت عدم تأمین به‌موقع تقاضا، مشتری اعتماد خود را از دست داده و به دلیل نیاز از برند دیگری خریداری می‌نماید و این موضوع منجر می‌شود که توزیع‌کننده و تولیدکننده برای جبران فرصت ازدست‌رفته و تبلیغ آن برند و ترغیب مشتری به خرید کالای خود هزینه بپردازد.

۵. هر مشتری در هر دوره تنها توسط یک وسیله نقلیه تأمین می‌شود.

٦. امکان اختصاص چند وسیله نقلیه همگن با تعداد و ظرفیت محدود و یکسان و هزینه ثابت در هر دوره وجود دارد.

۷. تمامی پارامترهای مسئله، معلوم فرض شده‌اند.

درنهایت این تحقیق به دنبال مدل‌سازی و بررسی تأثیر داشتن دو تصمیم‌گیرنده در مسئله مسیریابی تولید و تأثیر اهداف چندگانه با ملاحظات زیست‌محیطی است، همچنین در پی پاسخگویی به این سوال است که در ابعاد مختلف جریمه عدم تأمین تقاضا و مقادیر مختلف لقی متغیرهای سطح اول، آیا ارتباطی بین پاسخ نامغلوب مسئله تک سطحی چندهدفه با پاسخ مسئله دوسطحی چندهدفه وجود دارد و میزان تغییرات توابع هدف در این ابعاد چقدر است.



شکل ۱. نمایی از مسئله مسیریابی تولید دوسطحی

۳-۱ مدل ریاضی پیشنهادی

در این بخش مدل ریاضی مسئله موردبحث ارائه می‌شود.

مجموعه‌ها و اندیس‌ها:

N $N=\{i,j,g \mid i,j,g \in (۱,...,n)\}$ تولیدکننده و مشتریان

N_c $N_c = N \mid ۱$ مجموعه مشتریان

A $A=\{(i,j): i,j \in N, i \neq j\}$ مجموعه یال‌ها

T $T=\{t \mid t \in (۱,...,T')\}$ مجموعه دوره زمانی محدود

K $K=\{k \mid k \in (۱,...,K')\}$ مجموعه وسایل نقلیه

پارامترها:

d_{jt} میزان تقاضای مشتری j در دوره t

Q ظرفیت وسیله نقلیه

C ظرفیت تولید

u_t هزینه تولید هر واحد محصول در دوره t

cs هزینه ثابت راه‌اندازی

c'_k هزینه اجاره‌بهای وسیله نقلیه k در هر دوره

c_{ij} هزینه حمل‌ونقل از گره i به گره j

h_j هزینه نگهداری واحد محصول در هر گره j

$I_{j.}$ موجودی اولیه در گره j

L_j حداکثر سطح موجودی در گره j

we_k وزن خالی وسیله نقلیه k ام

α_{ij} هزینه میزان آلودگی متناسب با ضریب آلودگی در هر کیلو و مسافت بین گره i و j

Pep جریمه تولیدکننده به ازای عدم تأمین تقاضای توزیع‌کننده

Ped هزینه‌ای که توزیع‌کننده بابت تأمین تقاضای خود از سایر تولیدکنندگان می‌پردازد.

M نمایانگر یک عدد بسیار بزرگ است

M'_t مقدار ظرفیت تولید و مجموع میزان تقاضاهای تمامی گره‌ها در طول دوره‌ها یعنی $M'_t = \min\{C, \sum_{r=t}^{T} \sum_{j \in N_c} d_{jr}\}$

$\tilde{M}_{jt}$ کمترین مقدار ظرفیت وسیله نقلیه، حداکثر سطح موجودی در گره j و مجموع میزان تقاضاها در طول دوره‌ها در گره j یعنی $\tilde{M}_{jt} = \min\{Q, L_j, \sum_{r=t}^{T} d_{jr}\}$

متغیرهای تصمیم سطح اول (توزیع‌کننده):

I_{jt} میزان موجودی در گره j (به‌جز گره ۱ تولیدکننده) در انتهای دوره t

q_{jkt} میزان انتقال محصول و تأمین تقاضای مشتری i توسط وسیله نقلیه k در دوره t

y_t در صورت تولید در دوره t مقدار یک و در غیر این صورت مقدار صفر می‌گیرد.

f_{ijkt} میزان وزن بار حمل شده بین گره i و j توسط وسیله نقلیه k در دوره t

x_{ijkt} اگر وسیله نقلیه k به‌طور مستقیم از گره i به گره j در دوره t حرکت کند مقدار یک و در غیر این صورت مقدار صفر می‌گیرد.

z_{jkt} اگر به مشتری j در دوره t توسط وسیله نقلیه k سرکشی شود مقدار یک و در غیر این صورت مقدار صفر می‌گیرد.

U_{ikt} متغیر کمکی آزاد در علامت برای حذف زیر تور

متغیرهای تصمیم سطح دوم (تولیدکننده):

PR_t میزان تولید در دوره t

I_{1t} میزان موجودی در گره ۱ در انتهای دوره t

S_t میزان تقاضای توزیع‌کننده در دوره t که توسط تولیدکننده برآورد نشده است.

با توجه به فرضیات، مدل مسئله مسیریابی تولید دوسطحی چندهدفه با رهبری توزیع‌کننده عبارت‌اند از:

$$\min \sum_t \sum_i \sum_j \sum_k c_{ij} x_{ijkt} + \sum_t \sum_k c'_k z_{1kt} + \sum_t \sum_{j|1} h_j I_{jt} + \sum_t (ped - pep) S_t \quad (1)$$

$$\min \sum_t \sum_i \sum_j \sum_k \alpha_{ij} we_k c_{ij} x_{ijkt} + \sum_t \sum_i \sum_j \sum_k \alpha_{ij} c_{ij} f_{ijkt} \quad (2)$$

$$f_{ijkt} \le M x_{ijkt} \qquad \forall i,j,k,t \quad (3)$$

$$f_{ijkt} \ge q_{jkt} - M(1 - x_{ijkt}) \qquad \forall i,j,k,t \quad (4)$$

$$q_{jkt} \le \tilde{M}_{jt} z_{jkt} \qquad \forall t,k,j|1 \quad (5)$$

$$\sum_k z_{jkt} \le 1 \qquad \forall t,j|1 \quad (6)$$

$$\sum_i x_{ijkt} + \sum_i x_{jikt} = 2 z_{jkt} \qquad \forall t,k,j \quad (7)$$

$$U_{ikt} - U_{jkt} + Q x_{ijkt} \le Q - q_{jkt} \qquad \forall i \ne j \ge 2,k,t \quad (8)$$

$$\sum_i x_{igkt} - \sum_j x_{gjkt} = 0 \qquad \forall t,g,k \quad (9)$$

$$\sum_{j|1} q_{jkt} \le Q z_{1kt} \qquad \forall t,k \quad (10)$$

$$I_{jt} = I_{jt-1} - d_{jt} + \sum_k q_{jkt} \qquad \forall t,j|1 \quad (11)$$

$$I_{jt} \le L_j \qquad \forall t,j|1 \quad (12)$$

$$x_{ijkt}, z_{jkt} \in \{0,1\} \qquad \forall i,j,k,t \quad (13)$$

$$f_{ijkt}, q_{jkt}, I_{jt} \ge 0 \qquad \forall i,j,k,t \quad (14)$$

$$\min \sum_t cs\, y_t + \sum_t u_t PR_t + \sum_t h_1 I_{1t} + \sum_t pep S_t \quad (15)$$

$$I_{1t} = I_{1t-1} - \sum_{j|1}\sum_{k} q_{jkt} + S_t + PR_t \qquad \forall t \qquad (16)$$

$$I_{\backslash t} \le L_{\backslash} \qquad \forall t, j \qquad (17)$$

$$PR_t \le M_t' y_t \qquad \forall t \qquad (18)$$

$$y_t \in \{\cdot, \backslash\} \qquad \forall t \qquad (19)$$

$$PR_t, I_{\backslash t}, S_t \ge \cdot \qquad \forall t \qquad (20)$$

رابطه (۱) تابع هدف اول سطح اول یعنی هزینه‌های توزیع که شامل هزینه‌های حمل‌ونقل، اجاره وسیله نقلیه و جریمه عدم تأمین تقاضا است، را بیان می‌کند. رابطه (۲) نشان‌دهنده تابع هدف دوم سطح اول است که در آن هزینه آلودگی متناسب با وزن بار حمل شده و مسافت طی شده محاسبه می‌گردد. روابط (۳) و (٤) وزن بار طی شده بین دو گره یعنی f_{ijkt} را با توجه به مسیر تعیین‌شده یعنی x_{ijkt} و میزان کالای ارسالی به هر گره در هر دوره یعنی q_{jkt} محاسبه می‌نمایند. محدودیت (۵) بیان می‌کند که اگر مشتری i ام در دوره t توسط وسیله نقلیه مشاهده شود مقدار توزیع می‌تواند مقدار مثبتی باشد. محدودیت (٦) بیان می‌کند که هر مشتری نمی‌تواند با بیش از یک وسیله نقلیه ویزیت شود. روابط (۷) الی (۹) تضمین می‌کنند که در مسیر هر یک از وسایل نقلیه هیچ زیرتری رخ ندهد و وسایل نقلیه از مشتری که به آن واردشده‌اند خارج شوند. محدودیت (۱۰) ظرفیت هر یک از انواع وسایل نقلیه را محدود می‌کند. رابطه (۱۱) به تعادل ظرفیت موجودی در انبار مشتریان می‌پردازد. رابطه (۱۲) بیان‌گر حداکثر ظرفیت موجودی مشتریان است. محدودیت‌های (۱۳) و (١٤) نوع متغیرهای سطح اول را تعریف می‌کنند.

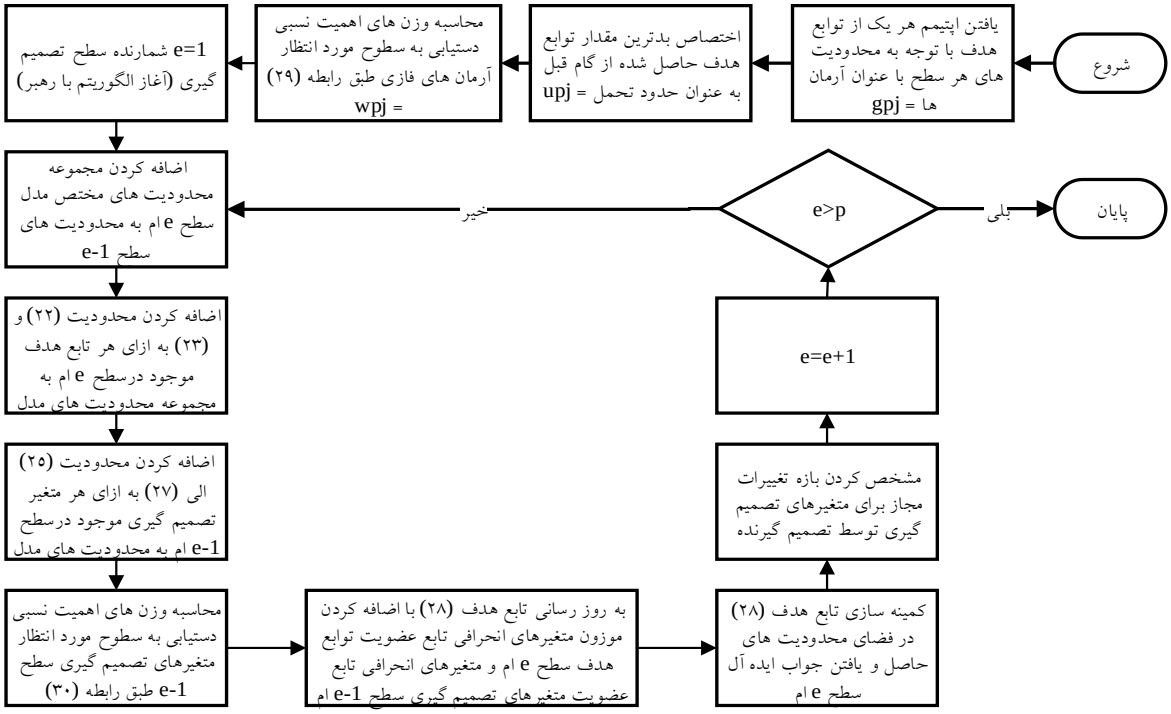
رابطه (۱۵) تابع هدف سطح دوم و تولیدکننده است که به کمینه‌سازی مجموع هزینه‌های کل تولید، راه‌اندازی و نگهداری موجودی در انبار تولیدکننده می‌پردازد. محدودیت (١٦) به بالانس موجودی تولیدکننده می‌پردازد. محدودیت (۱۷) حداکثر موجودی تولیدکننده را محدود می‌کند. محدودیت (۱۸) هم‌زمان متغیر هزینه راه‌اندازی و محدودیت تولید را بیان می‌کند به‌این‌ترتیب که در صورت تولید محصول در یک دوره متغیر هزینه راه‌اندازی مقدار یک می‌گیرد در این صورت بیشترین مقدار تولید به‌اندازه حداقل مجموع تقاضاهای باقی‌مانده و یا ظرفیت تولید است. روابط (۱۹) و (۲۰) نوع متغیرهای تصمیم مسئله سطح دوم را تعریف می‌کنند.

٤. روش حل

روش‌های کروش کان تاکر و برنامه‌ریزی آرمانی فازی جزو معدود روش‌های حل دقیق برای مسائل چندسطحی ارائه شده‌اند برای حل مسئله دوسطحی چندهدفه با روش کروش کان تاکر نیاز به تلفیق روش با روش‌های برنامه‌ریزی چندهدفه است درحالی‌که برنامه‌ریزی آرمانی فازی هم‌زمان قابلیت حل مسئله چندسطحی چندهدفه دارد همچنین روش کروش کان تاکر برای مسئله‌های خطی با اعداد حقیقی کاربرد دارد و برای حل مسائل عدد صحیح نیاز به آزادسازی متغیرهای عدد صحیح وجود دارد. در مسائل برنامه‌ریزی خطی چند سطحی چندهدفه اگر یک سطح انتظار مبهم (غیردقیق) به هر یک از اهداف در هر سطح اختصاص داده شود، اهداف تبدیل به اهداف فازی شده و به آن‌ها آرمان‌های فازی گفته می‌شود. این اهداف با توابع عضویت متناظر خود از طریق مشخص کردن حدود تحمل برای دستیابی به سطوح انتظار شان مشخص می شوند. همان‌طور که در بخش مرور ادبیات ذکر شد در این تحقیق از الگوریتم پیشنهادی دوم برنامه‌ریزی آرمانی فازی ارائه‌شده در مقاله [Baky, 2010] برای حل مسئله استفاده شده است، در این روش به ازای هر سطح (به ترتیب از سطح بالا به پایین)

یک مدل حل می‌شـــود که در هر مدل به ازای هر یک از توابع هدف ســـطح مرتبط تابع عضـــویت شـــکل می‌گیرد. این توابع عضـویت برای حل چندهدفه هر سـطح مدل می‌شـوند. با حل مدل معادل ســـطح بالا مقادیر متغیرهای ســـطح بالا در حالت ایده‌آل به د ست می‌آید. روش حل با ت صمیم‌گیرنده سطح اول شروع می‌شود و با اپتیمم‌سازی تابع سطح اول، جواب رضایت بخشی حاصل می‌شود. برای جلوگیری از شکل‌گیری بن‌بست برای ســطوح بعدی، از تصــمیمات تصــمیم‌گیرنده ســطح اول تنش‌زدایی می‌شـــود به این معنی که بازه‌ای برای امکان تغییر پاسخ بهینه متغیرهای تصمیم‌گیرنده سطح اول تعریف می‌شود.

تصـــمیم‌گیرنده ســـطح بعدی، با توجه به آرمان‌های عضـــویت اهداف و متغیرهای تصـــمیم‌گیری تصـــمیم‌گیرنده ســـطح اول اهداف خود را بهینه می‌کند. این فرآیند تا رسـیدن به پایین‌ترین سطح تکرار می‌شود. شکل ۲ گام‌های روش برنامه‌ریزی آرمانی فازی را به تصـویر کشـیده اسـت. تنش‌زدایی میان توابع هدف چندگانه هر سطح و توابع سطوح بالاتر با آرمان‌های عضویت اهداف صورت می‌گیرد. مقدار $\mu_{f_{pj}}(F_{pj}(x))$ نشان‌دهنده تابع عضـویت j امین تابع هدف سـطح pام اسـت که با رابطه (۲۱) محاسبه می‌شود.



شکل ۲. نمایی از الگوریتم حل مسئله دوسطحی چندهدفه بر طبق رویکرد برنامه‌ریزی آرمانی فازی

$$\mu_{f_{pj}}(F_{pj}(x)) \underset{\forall p\in\{1,\dots,q\},\ j\in\{1,\dots,m_p\}}{} = \begin{cases} 1 & \leftarrow F_{pj}(x) \le g_{pj} \\ \dfrac{u_{pj}-F_{pj}(x)}{u_{pj}-g_{pj}} & \leftarrow g_{pj} \le F_{pj}(x) \le u_{pj} \\ 0 & \leftarrow F_{pj}(x) \ge u_{pj} \end{cases} \qquad (۲۱)$$

در رابطه (۲۱) g_{pj} آرمان و u_{pj} حد تحمل بالایی برای j امین تابع هدف سطح pام یعنی $F_{pj}(x)$ هستند. به ازای هر یک از توابع هدف موجود در سطح pام و سطوح بالاتر محدودیتی معادل با (۲۲) و (۲۳) به مدل آن سطح اضافه می‌شود، d_{pj}^{+} متغیر انحرافی بالایی از آرمان توابع هدف سطح pام و بالاتر است.

$$\mu_{f_{pj}}(F_{pj}(x))+d_{pj}^{-}-d_{pj}^{+}=1 \quad \forall p\in\{1,..,q\},\ j\in\{1,..,m_p\} \tag{۲۲}$$

$$d_{pj}^{-},d_{pj}^{+}\geq 0,\ d_{pj}^{-}\times d_{pj}^{+}=0 \quad \forall p\in\{1,..,q\},\ j\in\{1,..,m_p\} \tag{۲۳}$$

همچنین تنش‌زدایی متغیرهای تصمیم با تابع عضویت متغیر تصمیم صورت می‌گیرد. $\mu_{x_{pk}}(x_{pk})$ نشان‌دهنده تابع عضویت k امین متغیر تصمیم‌گیری سطح pام است و با استفاده از رابطه (۲٤) محاسبه می‌شود. با اپتیمم‌سازی توابع هدف سطح بالایی جواب ایده‌آل x^{1*} به دست می‌آید. t_k^{iR},t_k^{i1} مقادیر حداکثر خطای قابل‌تحمل مثبت و منفی در سطح تصمیم‌گیری k ام هستند که توسط تصمیم‌گیرنده سطح i ام در نظر گرفته شده‌اند. در رابطه (۲٤) $d_{pk}^{L-},d_{pk}^{L+},d_{pk}^{R-},d_{pk}^{R+}$ متغیرهای انحرافی بالایی و پایینی از مقادیر متغیرهای تصمیم‌گیری سطوح بالاتر هستند.

$$\underset{\forall p\in\{1,...,q-1\},\ j\in\{1,...,n_p\}}{\mu_{x_{pk}}(x_{pk})}=\begin{cases}\dfrac{x_{pk}-(x_{pk}^{*}-t_k^{iL})}{t_k^{iL}} & \leftarrow x_{pk}^{*}-t_k^{iL}\leq x_{pk}\leq x_{pk}^{*}\\ \dfrac{(x_{pk}^{*}+t_k^{iR})-x_{pk}}{t_k^{iR}} & \leftarrow x_{pk}^{*}\leq x_{pk}\leq x_{pk}^{*}+t_k^{iR}\\ 0 & \leftarrow else\end{cases} \tag{۲٤}$$

به ازای هر یک از متغیرهای تصمیم‌گیری سطوح بالاتر از سطح موردبررسی محدودیتی معادل با روابط (۲۵) الی (۲۷) به مدل اپتیمم‌سازی آن سطح اضافه می‌شود.

$$\mu_{x_{pk}}(x_{pk})+d_{pk}^{L-}-d_{pk}^{L+}=1 \quad \forall p\in\{1,...,q-1\},\ k\in\{1,...,n_p\} \tag{۲۵}$$

$$\mu_{x_{pk}}(x_{pk})+d_{pk}^{R-}-d_{pk}^{R+}=1 \quad \forall p\in\{1,..,q-1\},\ k\in\{1,..,n_p\} \tag{۲٦}$$

$$d_{pk}^{L-},d_{pk}^{L+}\geq 0,\ d_{pk}^{L-}\times d_{pk}^{L+}=0\ \forall p\in\{1,..,q-1\},\ k\in\{1,..,n_p\} \tag{۲۷}$$

تابع هدف اپتیمم‌سازی هر سطح با رابطه (۲۸) معادل است.

$$\min=\sum_{p=1}^{q-1}\sum_{k=1}^{n_p}[W_{pk}^{L}(d_{pk}^{L-}+d_{pk}^{L+})+W_{pk}^{R}(d_{pk}^{R-}+d_{pk}^{R+})]+\sum_{p=1}^{q}\sum_{j=1}^{m_p}W_{pj}^{+}d_{pj}^{+} \tag{۲۸}$$

وزن‌های عددی $W_{pj}^{+},W_{pk}^{L},W_{pk}^{R}$ اهمیت نسبی دستیابی به سطوح مورد انتظار آرمان‌های فازی مربوطه را با توجه به مجموعهٔ محدودیت‌ها در موقعیت تصمیم‌گیری نشان می‌دهند که با روابط (۲۹) و (۳۰) محاسبه می‌شوند.

$$W_{pj}^{+}=\frac{1}{u_{pj}-g_{pj}} \qquad \forall p\in\{1,...,q\},j\in\{1,...,m_p\} \tag{۲۹}$$

$$W_{pk}^{L}=\frac{1}{t_k^{pL}},W_{pk}^{R}=\frac{1}{t_k^{pR}} \quad \forall p\in\{1,...,q-1\},k\in\{1,...,n_p\} \tag{۳۰}$$

بر طبق این الگوریتم، ابتدا باید مدل زیر که مربوط به سطح اول است، حل شود.

$$\min z_{۱\,fuzzy} = \frac{۱}{u_{۱۱} - g_{۱۱}} d_{۱۱}^{+} + \frac{۱}{u_{۱۲} - g_{۱۲}} d_{۱۲}^{+} \quad (۳۱)$$

$$\frac{u_{۱۱} - (\sum_t \sum_i \sum_j \sum_k c_{ij} x_{ijkt} + \sum_t \sum_k c'_k z_{۱kt} + \sum_t \sum_{j|۱} h_j I_{jt} + \sum_t (ped - pep) S_t)}{u_{۱۱} - g_{۱۱}} + d_{۱۱}^{-} - d_{۱۱}^{+} = ۱ \quad (۳۲)$$

$$\frac{u_{۱۲} - (\sum_t \sum_i \sum_j \sum_k \alpha_{ij} we_k c_{ij} x_{ijkt} + \sum_t \sum_i \sum_j \sum_k \alpha_{ij} c_{ij} f_{ijkt})}{u_{۱۲} - g_{۱۲}} + d_{۱۲}^{-} - d_{۱۲}^{+} = ۱ \quad (۳۳)$$

$$d_{۱۱}^{-} \times d_{۱۱}^{+} = ۰, \quad d_{۱۲}^{-} \times d_{۱۲}^{+} = ۰ \quad (۳۴)$$

$$d_{۱۱}^{-}, d_{۱۱}^{+}, d_{۱۲}^{-}, d_{۱۲}^{+} \geq ۰ \quad (۳۵)$$

روابط (۳) الی (۱٤) نیز عیناً تکرار می‌شوند.

بنابراین بعد از حل مدل بالا و تعیین جواب بهینه تصمیم‌گیرنده سطح اول به ازای هر یک از متغیرهای تحت کنترل خود خطاهای مجاز مثبت و منفی $t_{۱}^{۱L} = t_{۱}^{۱R}$ تعیین می‌کند. با وزن‌های $w_{۱۱}^{L} = w_{۱۱}^{R}$ خطاهای مجاز مثبت و منفی قابل محاسبه هستند. بنابراین مدل برنامه‌ریزی آرمانی فازی سطح دوم عبارت خواهد بود از:

$$\begin{aligned}\min z_{۲\,fuzzy} = {} & \frac{۱}{u_{۱۱} - g_{۱۱}} d_{۱۱}^{+} + \frac{۱}{u_{۱۲} - g_{۱۲}} d_{۱۲}^{+} + \frac{۱}{u_{۲۱} - g_{۲۱}} d_{۲۱}^{+} \\ & + \sum_i \sum_j \sum_k \sum_t [w_{ijkt}^{Lx} (d_{ijkt}^{Lx+} + d_{ijkt}^{Lx-}) + w_{ijkt}^{Rx} (d_{ijkt}^{Rx+} + d_{ijkt}^{Rx-}) \\ & + w_{jkt}^{Lz} (d_{jkt}^{Lz+} + d_{jkt}^{Lz-}) + w_{jkt}^{Rz} (d_{jkt}^{Rz+} + d_{jkt}^{Rz-}) + w_{ijkt}^{Lf} (d_{ijkt}^{Lf+} + d_{ijkt}^{Lf-}) \\ & + w_{ijkt}^{Rf} (d_{ijkt}^{Rf+} + d_{ijkt}^{Rf-}) + w_{jkt}^{Lq} (d_{jkt}^{Lq+} + d_{jkt}^{Lq-}) + w_{jkt}^{Rq} (d_{jkt}^{Rq+} + d_{jkt}^{Rq-})] \\ & + \sum_{j|۱} \sum_t [w_{jt}^{LI} (d_{jt}^{LI+} + d_{jt}^{LI-}) + w_{jt}^{RI} (d_{jt}^{RI+} + d_{jt}^{RI-})]\end{aligned} \quad (۳۶)$$

$$\frac{u_{۲۱} - (\sum_t cs\, y_t + \sum_t u_t PR_t + \sum_t h_{۱} I_{۱t} + \sum_t pepS_t)}{u_{۲۱} - g_{۲۱}} + d_{۲۱}^{-} - d_{۲۱}^{+} = ۱ \quad (۳۷)$$

$$\frac{x_{ijkt} - (x_{ijkt}^{*} - t_{ijkt}^{Lx})}{t_{ijkt}^{Lx}} + d_{ijkt}^{Lx-} - d_{ijkt}^{Lx+} = ۱ \qquad \forall i, j, k, t \quad (۳۸)$$

$$\frac{(x_{ijkt}^{*} + t_{ijkt}^{Rx}) - x_{ijkt}}{t_{ijkt}^{Rx}} + d_{ijkt}^{Rx-} - d_{ijkt}^{Rx+} = ۱ \qquad \forall i, j, k, t \quad (۳۹)$$

$$\frac{z_{jkt} - (z_{jkt}^{*} - t_{jkt}^{Lz})}{t_{jkt}^{Lz}} + d_{jkt}^{Lz-} - d_{jkt}^{Lz+} = ۱ \qquad \forall j, k, t \quad (٤۰)$$

$$\frac{(z_{jkt}^{*} + t_{jkt}^{Rz}) - z_{jkt}}{t_{jkt}^{Rz}} + d_{jkt}^{Rz-} - d_{jkt}^{Rz+} = ۱ \qquad \forall j, k, t \quad (٤۱)$$

$$\frac{f_{ijkt} - (f_{ijkt}^{*} - t_{ijkt}^{Lf})}{t_{ijkt}^{Lf}} + d_{ijkt}^{Lf-} - d_{ijkt}^{Lf+} = ۱ \qquad \forall i, j, k, t \quad (٤۲)$$

$$\frac{(f^{*}_{ijkt}+t^{Rf}_{ijkt})-f_{ijkt}}{t^{Rf}_{ijkt}}+d^{Rf-}_{ijkt}-d^{Rf+}_{ijkt}=۱ \qquad \forall i,j,k,t \qquad (٤٣)$$

$$\frac{q_{jkt}-(q^{*}_{jkt}-t^{Lq}_{jkt})}{t^{Lq}_{jkt}}+d^{Lq-}_{jkt}-d^{Lq+}_{jkt}=۱ \qquad \forall j,k,t \qquad (٤٤)$$

$$\frac{(q^{*}_{jkt}+t^{Rq}_{jkt})-q_{jkt}}{t^{Rq}_{jkt}}+d^{Rq-}_{jkt}-d^{Rq+}_{jkt}=۱ \qquad \forall j,k,t \qquad (٤٥)$$

$$\frac{I_{jt}-(I^{*}_{jt}-t^{LI}_{jt})}{t^{LI}_{jt}}+d^{LI-}_{jt}-d^{LI+}_{jt}=۱ \qquad \forall j|۱,t \qquad (٤٦)$$

$$\frac{(I^{*}_{jt}+t^{RI}_{jt})-I_{jt}}{t^{RI}_{jt}}+d^{RI-}_{jt}-d^{RI+}_{jt}=۱ \qquad \forall j|۱,t \qquad (٤٧)$$

$$\begin{aligned}
&d^{-}_{۲۱}\times d^{+}_{۲۱}=۰\\
&d^{Lx+}_{ijkt}\times d^{Lx-}_{ijkt}=۰,\quad d^{Rx+}_{ijkt}\times d^{Rx-}_{ijkt}=۰\\
&d^{Lz+}_{jkt}\times d^{Lz-}_{jkt}=۰,\quad d^{Rz+}_{jkt}\times d^{Rz-}_{jkt}=۰\\
&d^{Lf+}_{ijkt}\times d^{Lf-}_{ijkt}=۰,\quad d^{Rf+}_{ijkt}\times d^{Rf-}_{ijkt}=۰\\
&d^{Lq+}_{jkt}\times d^{Lq-}_{jkt}=۰,\quad d^{Rq+}_{jkt}\times d^{Rq-}_{jkt}=۰\\
&d^{LI+}_{jt}\times d^{LI-}_{jt}=۰,\quad d^{RI+}_{jt}\times d^{RI-}_{jt}=۰
\end{aligned} \qquad \forall i,j,k,t \qquad (٤٨)$$

$$\begin{aligned}
&d^{-}_{۲۱},d^{+}_{۲۱},d^{Lx+}_{ijkt},d^{Lx-}_{ijkt},d^{Rx+}_{ijkt},d^{Rx-}_{ijkt},d^{Lz+}_{jkt},d^{Lz-}_{jkt},d^{Rz+}_{jkt},d^{Rz-}_{jkt},d^{LI-}_{jt},d^{RI+}_{jt},d^{RI-}_{jt},\\
&d^{Lf+}_{ijkt},d^{Lf-}_{ijkt},d^{Rf+}_{ijkt},d^{Rf-}_{ijkt},d^{Lq+}_{jkt},d^{Lq-}_{jkt},d^{Rq+}_{jkt},d^{Rq-}_{jkt},d^{LI+}_{jt}\geq ۰
\end{aligned} \qquad \forall i,j,k,t \qquad (٤٩)$$

روابط (١٦) الی (٢٠) و روابط (٢٧) الی (٣٠) نیز عیناً تکرار می‌شوند.

باید توجه داشت که هر انحراف پایین از یک آرمان فازی دستیابی کامل به مقدار عضویت را نشان می‌دهد. بعلاوه، $d^{+}_{ij}=۰$ وقتی رخ می‌دهد که کاملاً به یک آرمان عضویت دست یافته باشیم و $d^{+}_{ij}=۱$ وقتی رخ می‌دهد که میزان دستیابی به آن آرمان صفر باشد. برای خطی‌سازی روابط بالا می‌توان به ازای $d^{-}_{ij}\times d^{+}_{ij}=۰$ از روابط (٥٠) استفاده نمود.

$$\begin{aligned}
&d^{-}_{ij}\leq d^{\text{boolean}-}_{ij}\\
&d^{+}_{ij}\leq d^{\text{boolean}+}_{ij}\\
&d^{\text{boolean}-}_{ij}+d^{\text{boolean}+}_{ij}\leq ۱\\
&d^{\text{boolean}-}_{ij},d^{\text{boolean}+}_{ij}\in\{۰,۱\}
\end{aligned} \qquad \forall i,j,k,t \qquad (٥٠)$$

٥. مطالعه کاربردی و تحلیل نتایج عددی

در این تحقیق جهت بررسی نتایج عددی، داده‌ها با توجه به تحقیقات مشابه با توزیع یکنواخت تولید شده‌اند. مکان هر مشتری و تولیدکننده به‌صورت در بازه [١٠٠ ٠] در صفحه، هزینه واحد تولید در بازه [١٠ ٤]، هزینه واحد نگهداری در انبار مشتریان در بازه [٢٠ ١٥]، هزینه واحد نگهداری در انبار تولیدکننده در بازه [١٥ ١٠] و تقاضا در بازه [٢٠٠ ١٠٠] محاسبه شده است. حداکثر ظرفیت وسایل نقلیه متناسب با میانگین تقاضاها نسبت به هر دوره و وسیله نقلیه ($a=\frac{\sum_t\sum_i d_{it}}{T*k}$) در بازه [١/٥a ٢a] و به همین ترتیب حداکثر ظرفیت نگهداری هر مشتری در بازه [١/٥b ٢b] ($b=\frac{\sum_t d_{it}}{T}$)، حداکثر ظرفیت

نگهداری تولیدکننده نیز در بازه [۱/۵C ۲C] ($c=\frac{\sum_i\sum_t d_{it}}{T}$) هزینه آماده‌سازی در بازه [۲C ۳C] محاسبه شده‌اند. حداکثر ظرفیت تولید ۱,۵ برابر حداکثر ظرفیت نگهداری تولیدکننده و جریمه توزیع‌کننده دو برابر جریمه تولیدکننده فرض شده‌اند. ضریب آلایندگی به ازای تمامی مسیرها یکسان و برابر با ۱ در نظر گرفته شده است. در ابتدا یک مسئله با ابعاد ۵ مشتری ۲ وسیله نقلیه در ۲ دوره فرض شده است که مقادیر داده‌های آن در جدول ۲ آمده است. این مسئله به ازای مقادیر مختلف جریمه و لقی حل شده و پاسخ الگوریتم با پاسخ مسئله تک‌سطحی چندهدفه مقایسه شده است. در ادامه این بخش، ۸ مسئله با ابعاد مختلف با میزان جریمه تولیدکننده برابر ۱۰ به ازای مقادیر مختلف لقی حل شده‌اند تا از لحاظ میزان فاصله از جواب ایده‌آل و زمان حل با یکدیگر مقایسه شوند. برای محاسبات از نرم‌افزار سیپلکس ورژن ۱۲,٦,۰ در سیستم با پردازنده ۲,۳ گیگاهرتز و حافظه ٤ گیگابایت استفاده شده است.

جدول ۲. داده‌های مثال عددی

		ت	م۱	م۲	م۳	م٤	م۵
مسافت	ت	۰	۱۱۲	۸۷	٦٤	۱۸	۹٦
	م۱	۱۱۲	۰	۵۷	۵۳	۹۵	٤٦
	م۲	۸۷	۵۷	۰	٦۱	۷٤	۱۳
	م۳	٦٤	۵۳	٦۱	۰	٤٦	٦۱
	م٤	۱۸	۹۵	۷٤	٤٦	۰	۸۲
	م۵	۹٦	٤٦	۱۳	٦۱	۸۲	۰
ظرفیت نگهداری		۱۲٦۱	۲۳٦	۲۸۷	۲۳۰	۲۷٤	۲٦۰
تقاضا	دوره۱	۰	۱۷۵	۱۸٦	۱٤٤	۱۲٦	۱۷۷
	دوره۲	۰	۱۱۲	۱۲۷	۱۰۲	۱۸۹	۱۲۸
هزینه نگهداری		۱۰	۱۸	۱۷	۱۷	۱۹	۱۵
هزینه تولید		۵	۷	ظرفیت خودرو		۵۷۲	۷۲٦
ظرفیت تولید		۱۸۹۱		ضریب آلایندگی			۱
هزینه آماده‌سازی		۱٦۷۳		۱۵۵۹			

م= مشتری، ت= تولیدکننده

جدول ۳. مقادیر حاصل از کمینه‌سازی تک‌تک توابع

اولویت۱		کمینه‌سازی f1		کمینه‌سازی f2		کمینه‌سازی f3	
اولویت۲		f۲	f۳	f۱	f۳	f۱	f۲
ج.تولید=۰/۱	f۱	۵٦۳	۵٦۳	۱۳٤٤	۱٤۹۱	۷۰۹	۱٤۹۱
	f۲	۵۳۵۲۰	۵۳۵۲۰	۵۲۵٤۰	۵۲۵٤۰	۵۳۵۲۰	۵۲۵٤۰
	f۳	۱۱۸۷۸	۱۱۸۷۸	۱۱۷۹۰	۱٤۷	۱٤۷	۱٤۷
ج.تولید=۱	f۱	۵٦۳	۵٦۳	۱۳٤٤	۲۸۱۰	۲۸۱۰	۲۰۲۹
	f۲	۵۳۵۲۰	۵۳۵۲۰	۵۲۵٤۰	۵۲۵٤۰	۵۲۵٤۰	۵۳۵۲۰
	f۳	۱۱۸۷۸	۱۱۸۷۸	۱۱۷۹۰	۱٤٦٦	۱٤٦٦	۱٤٦٦
ج.تولید=۱۰	f۱	۵٦۳	۵٦۳	۱۳٤٤	۸۸۱٦	۱۰۹۱٤	۱۰۸٤٦
	f۲	۵۳۵۲۰	۵۳۵۲۰	۵۲۵٤۰	۵۲۵٤۰	۷۵۰۹٦	۷۲۳۱۵
	f۳	۱۱۸۷۸	۱۱۸۷۸	۱۱۷۹۰	۱۱۳۳۳	۹۸۹۸	۹۸۹۸
ج.تولید=۱۰۰	f۱	۵٦۳	۵٦۳	۱۳٤٤	٤۱۵٦	۹۱۹۸	۹۰۵٦
	f۲	۵۳۵۲۰	۵۳۵۲۰	۵۲۵٤۰	۵۲۵٤۰	۷۹۳۳٤	۷۲۳۱۵
	f۳	۱۱۸۷۸	۱۱۸۷۸	۱۱۷۹۰	۱۱٤۹٤	۱۰۷۹۳	۱۰۷۹۳

ج.تولید= جریمه تولیدکننده

بر طبق الگوریتم برنامه‌ریزی آرمانی فازی ابتدا اپتیمم تک‌تک توابع هدف محاسبه می‌شود با توجه به کمینه‌سازی بودن توابع هدف، کمترین مقادیر آن‌ها مقادیر آرمان‌های g_{ij} بوده و مقادیر بیشینه آن‌ها حدود تحمل بالایی یا u_{ij} هستند. جدول ۳ مقادیر توابع حاصل از حل این مدل‌ها با مقادیر مختلف جریمه تولیدکننده برای عدم تأمین تقاضا (۰/۱، ۱، ۱۰ و ۱۰۰) و به تبع آن تغییرات میزان جریمه توزیع‌کننده (جریمه توزیع‌کننده دو برابر جریمه تولیدکننده فرض شده است)، را نشان می‌دهد. f1 الی f3 به ترتیب برابرند با توابع توزیع‌کننده، محیط‌زیست و تولیدکننده.

جدول ٤ بیانگر مقادیر حاصل از کمینه‌سازی تک‌تک توابع هدف در فضای شدنی است. مقدار مینیمم هر سطر در جدول ۳ معادل

با مقدار آرمان آن تابع در جدول ٤ است و حد تحمل در جدول ٤ برابر است با بیشینه هر سطر جدول ٣. با حل مدل فازی شده سطح اول (روابط (٣٠) الی (٣٤) و (٣) الی (١٦)) مقادیر x^*,q^*,z^*,f^* و I^* به دست می‌آیند. ازآنجایی‌که z، f و I متغیرهای وابسته به x و q هستند با استفاده از محدودیت‌ها و تغییر متغیر قابل محاسبه بوده و در این مسئله به تعیین تلورانس برای مقادیر x^* و q^* بسنده شده است. بازه مجاز تغییرات تعیین‌شده توسط تصمیم‌گیرنده سطح اول برای این متغیرها با tx و tq در جدول ٥ نشان داده شده‌اند. مدل به ازای مقادیر tx برابر با ٠/١ و ١ و tq برابر با ١ و ١٠٠ حل شده است.

جدول ٤. مقادیر آرمان‌ها و حدود تحمل بالایی توابع هدف

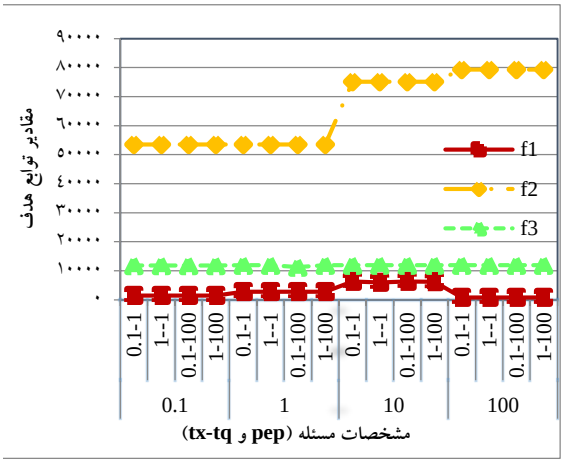
		f١	f٢	f٣
ج.تولید=٠/١	آرمان‌ها	٥٦٣	٥٢٥٤٠	١٤٧
	حدود تحمل	١٤٩١	٥٣٥٢٠	١١٨٧٨
ج.تولید=١	آرمان‌ها	٥٦٣	٥٢٥٤٠	١٤٦٦
	حدود تحمل	٢٨١٠	٥٣٥٢٠	١١٨٧٨
ج.تولید=١٠	آرمان‌ها	٥٦٣	٥٢٥٤٠	٩٨٩٨
	حدود تحمل	١٠٩١٣	٧٥٠٩٦	١١٨٧٨
ج.تولید=١٠٠	آرمان‌ها	٥٦٣	٥٢٥٤٠	١٠٧٩٣
	حدود تحمل	٩١٩٨	٧٩٣٣٤	١١٨٧٨

جدول ٥. نتایج حاصل از حل مسئله در حالت دوسطحی و تک سطحی

		tx-tq	f١	f٢	f٣			tx-tq	f١	f٢	f٣
ج.تولید=١٠	مسئله دوسطحی	١–٠/١	٦٢٩٤	٧٥٠٩٦	١١٨٧٨	ج.تولید=٠/١	مسئله دوسطحی	١–٠/١	١٤٩١	٥٣٥٢٠	١١٧٨٠
		١–١	٥٩٩٥	٧٥٠٩٦	١١٨٧٨			١–١	١٤٩١	٥٣٥٢٠	١١٧٨٠
		١٠٠–٠/١	٦٢٩٤	٧٥٠٩٦	١١٨٧٨			١٠٠–٠/١	١٤٩١	٥٣٥٢٠	١١٧٨٠
		١٠٠–١	٦١٩٤	٧٥٠٩٦	١١٨٧٨			١٠٠–١	١٤٩١	٥٣٥٢٠	١١٧٨٠
	مسئله تک سطحی	١	٥٦٣	٥٣٥٢٠	١١٨٧٨		مسئله تک سطحی	١	٥٦٣	٥٣٥٢٠	١١٨٧٨
		٢	١٣٤٤	٥٢٥٤٠	١١٧٩٠			٢	١٣٤٤	٥٢٥٤٠	١١٧٩٠
		٣	٨٨١٦	٥٢٥٤٠	١١٣٣٣			٣	١٤٩١	٥٢٥٤٠	١٤٧
		٤	١٠٨٤٦	٧٢٣١٥	٩٨٩٨			٤	٧٠٩	٥٣٥٢٠	١٤٧
ج.تولید=١٠٠	مسئله دوسطحی	١–٠/١	٧٥٠	٧٩٣٣٤	١١٨٧٨	ج.تولید=١	مسئله دوسطحی	١–٠/١	٢٨١٠	٥٣٥٢٠	١١٨٧٨
		١–١	٧٥٠	٧٩٣٣٤	١١٨٧٨			١–١	٢٨١٠	٥٣٥٢٠	١١٨٧٨
		١٠٠–٠/١	٧٥٠	٧٩٣٣٤	١١٨٧٨			١٠٠–٠/١	٢٨١٠	٥٣٥٢٠	١١٢٨٩
		١٠٠–١	٧٥٠	٧٩٣٣٤	١١٨٧٨			١٠٠–١	٢٨١٠	٥٣٥٢٠	١١٨٧٨
	مسئله تک سطحی	١	٥٦٣	٥٣٥٢٠	١١٨٧٨		مسئله تک سطحی	١	٥٦٣	٥٣٥٢٠	١١٨٧٨
		٢	١٣٤٤	٥٢٥٤٠	١١٧٩٠			٢	١٣٤٤	٥٢٥٤٠	١١٧٩٠
		٣	٤١٥٦	٥٢٥٤٠	١١٤٩٤			٣	٢٨١٠	٥٢٥٤٠	١٤٦٦
		٤	٩٠٥٦	٧٢٣١٥	١٠٧٩٣			٤	٢٠٢٩	٥٣٥٢٠	١٤٦٦

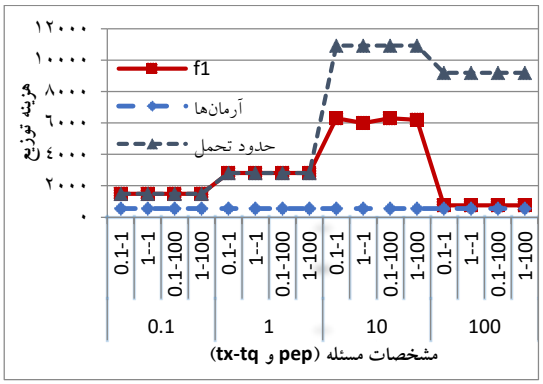
نتایج حاصل از حل مسئله مسیریابی دوسطحی چندهدفه با الگوریتم پیشنهادی و جواب‌های نامغلوب حاصل از حل مسئله در حالت تک سطحی چندهدفه به روش پارامتریک در جدول ٥ مقایسه شده‌اند. مدل تک سطحی چندهدفه با یک تصمیم‌گیرنده فرض شده که به کمینه‌سازی سه تابع در فضای شدنی می‌پردازد. جدول ٥ نشان می‌دهد که مسئله دوسطحی با

مقادیر جریمه اندک و زیاد به ازای مقادیر مختلف تلورانس‌ها پاسخ‌های یکسانی دارد و این امری بدیهی است چراکه زمانی که مقادیر جریمه به اندازه کافی کم باشند مقادیر جریمه در مقابل هزینه توزیع ناچیز شده و توزیع‌کننده دیگر تلاشی برای اجبار تولیدکننده به تولید محصول نمی‌کند. زمانی که مقادیر جریمه به اندازه کافی زیاد باشند دیگر تولیدکننده مایل نخواهد بود تا بجای تولید، جریمه بپردازد و خود تولیدکننده تمایل خواهد داشت تا تمامی تقاضای توزیع‌کننده را تولید نماید. در جدول ۵ تفاوت بارز نتایج مسائل دوسطحی و تک‌سطحی قابل‌مشاهده است می‌توان گفت در مقام مقایسه تقریباً جواب‌های دوسطحی، مغلوب جواب‌های مسئله تک سطحی هستند، به این دلیل جواب‌های نامغلوب مسئله تک‌سطحی، پاسخ‌های پایدار و متعادلی برای مسئله در شرایط رقابتی نیستند.

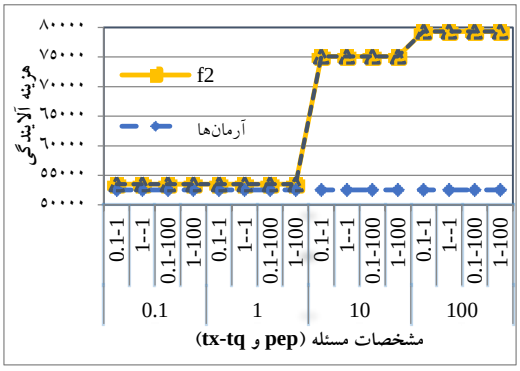


شکل ۳. مقادیر توابع هدف مسئله دوسطحی با تغییر مقادیر جریمه

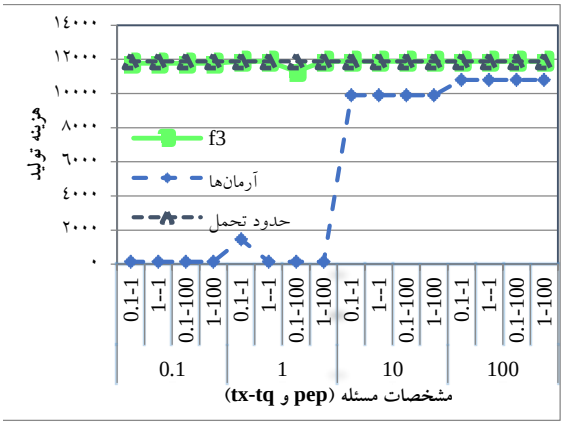
شکل ۳ نشان‌دهنده روند تغییرات توابع هدف مسئله دوسطحی با تغییر میزان جریمه‌های عدم تأمین تقاضا و میزان تلورانس متغیرهای سطح اول است. با توجه به شکل ۳ می‌توان دید به ازای مقادیر مختلف جریمه تولیدکننده (۰/۱، ۱، ۱۰ و ۱۰۰) با لقی‌های متفاوت برای متغیرهای تصمیم سطح بالا (۱ و ۰/۱) برای x و (۱و ۱۰۰) برای q، میزان تابع هدف تولیدکننده در مقایسه با سایر توابع هدف دامنه تغییرات بسیار پایینی داشته و بعد از آن تابع هدف کمینه‌سازی هزینه‌های توزیع نسبت به کمینه سازی هزینه‌های آلایندگی از بازه تغییرات کمی برخوردار است، این نکته نشان می‌دهد تابع آلایندگی به تصمیمات سطح اول و میزان جریمه‌ها حساس‌تر است. جزئیات تغییرات هر یک از توابع در مقایسه با حدود تحمل و آرمان‌هایشان در نمودارهای ٤ الی ٦ رسم شده است. همان‌طور که در نمودار ۳ قابل‌مشاهده است، باوجود عدم حضور مستقیم جریمه‌ها در تابع آلایندگی، این تابع با تغییر میزان جریمه‌ها تغییرات محسوسی داشته و بیشترین دامنه تغییرات مربوط به این تابع است، مقادیر آلایندگی شدیداً به مسیر طی شده حساس هستند. همچنین تابع تولیدکننده از دامنه تغییرات کمتری برخوردار بوده و تقریباً بدترین مقدار ممکن خود را گرفته است. با دقت در نمودارهای ٤ الی٦ می‌توان گفت که مقدار بهینه تابع آلایندگی در حل مسئله دوسطحی دقیقاً معادل با میزان حدود تحمل آن است و میزان تابع تولیدکننده برابر و یا نزدیک به حدود تحمل خود است اما میزان تابع توزیع‌کننده با افزایش میزان جریمه عدم تأمین تقاضا از حدود تحمل فاصله گرفته و به سمت آرمان‌هایش نزدیک می‌شود. درواقع با دقت در آرمان‌ها و حدود توابع هدف و مقادیر آن‌ها در پاسخ مسئله دوسطحی می‌توان گفت الگوریتم تلاش می‌کند تا بدترین پاسخ ممکن را بهبود دهد.



شکل ٤. تغییرات تابع توزیع‌کننده مسئله دوسطحی در مقایسه با حدود تحمل و آرمان‌هایش

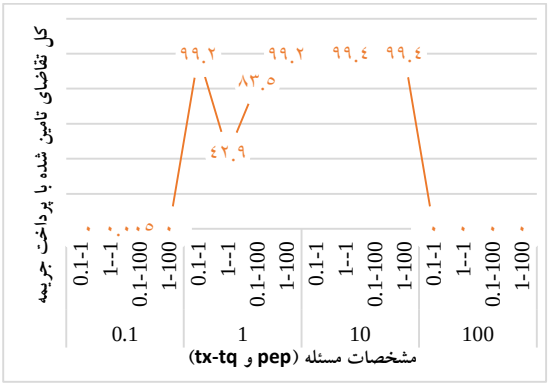


شکل ۵. تغییرات تابع آلایندگی مسئله دوسطحی در مقایسه با حدود تحمل و آرمان‌هایش

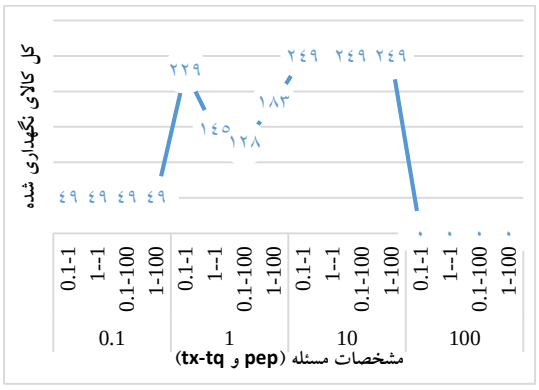


شکل ٦. تغییرات تابع تولیدکننده مسئله دوسطحی در مقایسه با حدود تحمل و آرمان‌هایش

نمودارهای ۷ و ۸ و جدول ٦ به تحلیل تأثیر مقادیر جریمه‌ها در جواب بهینه متغیرها می‌پردازند. شکل‌های ۷ و ۸ به ترتیب مجموع میزان کالای خریداری‌شده از سایر تولیدکنندگان و مجموع کالای نگهداری شده را به ازای مقادیر مختلف جریمه و تلورانس‌ها به تصویر می‌کشند. همان‌طور که از شکل ۷ قابل‌مشاهده است زمانی که جریمه تولیدکننده برای عدم تأمین تقاضا مقادیر ۱ و ۱۰ می‌گیرند تولیدکننده در رقابت با توزیع‌کننده تصمیم به عدم تولید تمامی تقاضا می‌گیرد اما در صورت کم بودن میزان جریمه (۰/۱) عدم تولید در تضاد منافع تولیدکننده و توزیع‌کننده بی‌تأثیر بوده و ازاین‌جهت مقادیر آن در حدود صفر است. همچنین در صورت زیاد بودن این جریمه (۱۰۰) تولیدکننده اقدام به تولید تمامی تقاضاها می‌نماید بدین دلیل که عدم تولید منجر به افزایش بیش‌ازحد تابع هدف خود تولیدکننده می‌شود. جالب توجه است که طبق نمودار ۸ توزیع‌کننده در جریمه‌های پایین اقدام به نگهداری کالا در انبار مشتری می‌نماید درواقع به نظر می‌رسد که توزیع‌کننده با آگاهی از امکان عدم تولید توسط تولیدکننده به ذخیره‌سازی کالا می‌پردازد.



شکل ۷. مجموع میزان کالای تهیه‌شده از تولیدکننده جانبی به ازای مقادیر مختلف جریمه و تلورانس



شکل ۸. مجموع میزان کالای نگهداری شده به ازای مقادیر مختلف جریمه و تلورانس

جدول ٦ میزان کالای ارسالی به هر گره q را به ازای مقادیر مختلف جریمه نشان می‌دهد شایان ذکر است که این مقادیر به ازای تلورانس‌های مختلف ثابت هستند. در جدول ٦ مقادیری که با مقادیر سایر ستون‌ها متفاوت است با رنگ تیره مشخص شده‌اند. همان‌طور که قابل‌مشاهده است این مقادیر در ستون جریمه ۱۰ نسبت به سایر ستون‌ها بیشتر است بدین معنی که کالای نگهداری شده در این ستون بیشتر است. برای مثال در گره دوم با جریمه ۱۰ بخشی از تقاضای دوره دوم در دوره اول نگهداری شده است. مقادیر ارسالی کالا که در جدول ٦ ذکر

شده‌اند تنها وابسته به مقادیر نگهداری در دوره‌های پیشین است و از مقدار تقاضای تأمین‌شده از تولیدکننده جایگزین مستقل است چراکه این کالاها همراه با کالاهای تهیه‌شده از تولیدکننده توسط توزیع‌کننده ارسال می‌شوند و به‌عبارت‌دیگر در صورت عدم تأمین تقاضا توسط تولیدکننده میزان کالای ارسالی توزیع‌کننده کاهش پیدا نمی‌کند به همین جهت جمع میزان کالای ارسالی به ازای تمام دوره‌ها ثابت است و برابر با مجموع تقاضا است.

جدول٦. الگوی توزیع کالا

pep	۱۰۰		۱۰		۱		۰/۱	
گره	دوره اول	دوره دوم	دوره اول	دوره دوم	دوره اول	دوره دوم	دوره اول	دوره دوم
۱	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
۲	۱۱ ۲	۱۷ ۵	۲۳ ٦	۵۱	۱۷ ۵	۱۱ ۲	۱۷ ۵	۱۱ ۲
۳	۱۲ ۷	۱۸ ٦	۱۸ ۸	۱۲ ۵	۱۸ ٦	۱۲ ۷	۱۸ ٦	۱۲ ۷
٤	۱۰ ۲	۱٤ ٤	۲۳ ۰	۱٦	۱٤ ٤	۱۰ ۲	۱٤ ٤	۱۰ ۲
۵	۱۸ ۹	۱۲ ٦	۱۲ ٦	۱۸ ۹	۱۲ ٦	۱۸ ۹	۱۷ ۵	۱٤ ۰
٦	۱۲ ۸	۱۷ ۷	۱۷ ۷	۱۲ ۸	۲۲ ۱	۸٤	۱۷ ۷	۱۲ ۸

در ادامه تحلیل نتایج عددی ۸ مسئله با ابعاد مختلف با جریمه تولیدکننده ۱۰ به ازای مقادیر مختلف لقی حل شده و از لحاظ زمان حل و نزدیکی توابع هدف به آرمان نسبت به مقادیر حدود تحمل در جدول ۷ مقایسه می‌شوند. شایان ذکر است که در هر گام از الگوریتم درصورت تجاوز زمان حل از ۳۰ دقیقه فرایند حل متوقف شده و جواب نزدیک به بهینه برای ادامه روش حل منظور شده است. با توجه به جدول ۷ می‌توان مشاهده کرد که با افزایش ابعاد زمان کل محاسبات رو به افزایش است، نسبت نزدیکی به آرمان از طریق رابطه (۵۱) محاسبه شده است.

$$\delta_{pj} = \frac{u_{pj} - F_{pj}(x)}{g_{pj} - u_{pj}} \qquad \forall i,j,k,t \qquad (۵۱)$$

رابطه (۵۱) برگرفته از رابطه بی‌مقیاس‌سازی فازی برای شاخص‌های منفی است و در آن g_{pj} جواب ایده‌آل (آرمان)، u_{pj} جواب ضدایده‌آل (حد تحمل بالا) و $F_{pj}(x)$ j امین تابع هدف سطح pام و δ_{pj} نسبت نزدیکی به آرمان است که برای مسائل با ابعاد مختلف در جدول ۷ محاسبه شده است. با توجه به تعریف رابطه این عدد بین ۰ و ۱ است. مقدار ۱ نشان‌دهنده آن است که تابع هدف دقیقاً معادل آرمان بوده و مقدار ۰ برابری با حدود تحمل را بیان می‌دارد. با دقت در جدول ۷ می‌توان مشاهده کرد که اکثر مقادیر صفر و یا نزدیک به صفر هستند و در موارد اندکی می‌توان نزدیک شدن تابع هدف اول (کمینه‌سازی هزینه‌های توزیع) به آرمان‌هایش مشاهده نمود. در درجه بعدی تابع کمینه‌سازی هزینه‌های تولید در مواردی تلاش کرده تا از حدود تحمل خود جدا شده و به سمت آرمان‌هایش حرکت نماید اما تابع هدف آلایندگی در اکثر مواقع (تمامی به غیر از یک مورد) در بدترین مقدار خود باقی مانده است.

جدول ۷. مقایسه مسائل با ابعاد مختلف از لحاظ زمان حل و نسبت نزدیکی به آرمان‌ها

ابعاد مسئله	زمان حل به ثانیه	نسبت نزدیکی به جواب ایده‌آل											
		۱ ،۰/۱			۱ ،۱			۱۰۰ ،۰/۱			۱۰۰ ،۱		
N,T,K		f۱	f۲	f۳	f۱	f۲	f۳	f۱	f۲	f۳	f۱	f۲	f۳
٦,۲,۲	۱۰۹/۲	۰/٤٤٦	۰	۰	۰/٤۷۵	۰	۰	۰/٤٤٦	۰	۰	۰/٤۵٦	۰	۰

٦,٤,٢	٣٦٣٠/١	٠/٦٧٣	٠	٠/٠٦٩	٠/٦٧٣	٠	٠/٠٦٩	٠	٠	٠/٣٢٦	٠/٠٩٦	٠	٠
٦,٦,٢	٧٢١٩	٠	٠	٠/٠٦٨	٠	٠	٠/٠٧٢	٠	٠	٠/٠٨٦	٠	٠	٠
٨,٣,٣	٣٧٨٠	٠	٠	٠/٠١٨	٠/٠٥٩	٠	٠	٠	٠	٠/٠٦	٠	٠	٠/٠٧
٨,٦,٣	٩٣٢٣/٩	٠	٠	٠/٠٤٩	٠/٠٥٧	٠	٠/١٢٧	٠	٠	٠	٠	٠	٠
١١,٣,٣	٩٠١٠/٥	٠/٢٢٩	٠	٠	٠/٤٤٦	٠	٠	٠/١٦٤	٠	٠	٠/١٦٤	٠/٠١٩	٠
١١,٦,٣	١٠٨١١	٠	٠	٠/٠٠٥	٠/٠٧	٠/٠٠٤	٠/٢١	٠	٠/٠٠٤	٠/٠٠٥	٠	٠/٠٠٤	٠/٠٠٥
٢١,٢,٧	٩٤٢٧/٨	٠/٧٦٦	٠	٠/١٨٨	٠/٧٦٦	٠	٠	٠/٧٦٦	٠	٠/١٨٨	٠/٧٦٦	٠	٠

N: تعداد گره (جمع تعداد مشتری و تولیدکننده)، T: تعداد دوره، K: تعداد خودرو

٦. نتیجه‌گیری و جمع‌بندی

در مقاله حاضر مسئله مسیریابی تولید دوسطحی چندهدفه مدل‌سازی شد که در آن توزیع‌کننده در سطح بالاتر به توزیع کالا از تولیدکننده به مشتریان توسط تعداد محدودی از وسایل نقلیه با ظرفیت محدود می‌پردازد. اهداف توزیع‌کننده کمینه‌سازی مجموع هزینه‌های توزیع و نگهداری خرده‌فروشان همچنین کمینه‌سازی میزان آلایندگی وسایل نقلیه متناسب با وزن و مسافت طی شده تبیین گردید، به‌طوری‌که در سطح پایین‌تر تولیدکننده به کمینه‌سازی هزینه‌های تولید و آماده‌سازی و نگهداری موجودی در انبار تولیدکننده می‌پردازد. در مدل ارائه‌شده گرچه توزیع‌کننده موظف به تأمین تمامی تقاضای مشتریان است اما تولیدکننده می‌تواند با پرداخت جریمه تمامی تقاضای توزیع‌کننده را تأمین ننماید. توزیع‌کننده با دریافت جریمه از تولیدکننده و پرداخت هزینه (بیشتر از دریافتی) اقدام به خرید محصول از سایر تولیدکنندگان می‌نماید. در این تحقیق برای مدل‌سازی شرایط با چند سطح تصمیم‌گیری از برنامه‌ریزی دوسطحی استفاده شد. درنهایت روش برنامه‌ریزی آرمانی فازی برای حل مسئله مسیریابی دوسطحی چندهدفه تشریح شد. همچنین یک مثال عددی برای تبیین چگونگی پیاده‌سازی الگوریتم و تحلیل حساسیت مدل به میزان جریمه و پارامترهای الگوریتم ارائه گردید و پاسخ‌های مسئله دوسطحی چندهدفه با مسئله تک‌سطحی چندهدفه مقایسه و تحلیل شدند. نتایج حاکی از آن است که همچنین در این روش پاسخ نهایی مدل‌های تک‌سطحی و دوسطحی به ضرایب اهمیت و تلورانس وابسته هستند.

درنهایت برای تحقیقات آتی موضوعات زیر پیشنهاد می‌گردد:

- مدل‌سازی و حل مسئله با تعداد سطوح تصمیم‌گیرنده بیشتر مانند تأمین‌کننده و یا خرده‌فروش
- مدل‌سازی و حل مسئله‌های مطرح در صنایع عملی مانند مسئله مسیریابی دومرحله‌ای و یا توزیع جانبی
- بررسی اهداف دیگر مطرح در مسئله مسیریابی تولید مانند ملاحظات اجتماعی
- ارائه روش‌های حل ابتکاری و فرا ابتکاری

٧. منابع

- خیرخواه، امیرسامان، نویدی، حمیدرضا، مسی بیدگلی، معصومه. (١٣٩٦). "مدلسازی عدم تقارن اطلاعات در مسئله حمله به شبکه حمل‌ونقل مواد خطرناک"، فصلنامه مهندسی حمل‌ونقل، دوره ٩، شماره ١، ص. ١٧-٣٦.

- سلم آبادی، نرجس، بهشتی نیا، محمد علی. (١٣٩٩). "مدل ریاضی چندهدفه برای مسئله تولید-موجودی-مسیریابی دو مرحله‌ای محصولات دارویی"، فصلنامه مهندسی حمل‌ونقل، دوره ١١، شماره ٤، ص. ٧٩٣-٨١٨.

- Adulyasak, Y., Cordeau, J. F. and Jans, R. (2015) "The production routing problem: A review of

- Cheraghalipour, A., Paydar, M. M. and Hajiaghaei-Keshteli, M. (2019) "Designing and solving a bi-level model for rice supply chain using the evolutionary algorithms", Computers and Electronics in Agriculture, Vol.162, pp.651-668.

- Darvish, M., Archetti, C. and Coelho, L. C. (2019). "Trade-offs between environmental and economic performance in production and inventory-routing problems." International Journal of Production Economics, Vol.217, pp.269-280.

- Ehrgott, M., Naujoks, B., Stewart, T. and Wallenius, J. (2010) "Multiple criteria decision making for sustainable energy and transportation systems: proceedings of the 19th International Conference on Multiple Criteria Decision Making, Auckland, New Zealand, 7th-12th January 2008", Springer Science & Business Media, Vol.634.

- Golsefidi, A. H. and Jokar, M. R. A. (2020). "A robust optimization approach for the production-inventory-routing problem with simultaneous pickup and delivery." Computers & Industrial Engineering, Vol.143, p.106388.

- Haque, M., Paul, S. K., Sarker, R. and Essam, D. (2020). "Managing decentralized supply chain using bilevel with Nash game approach." Journal of Cleaner Production, Vol.266, p.121865.

- Jia, L., Feng, X. and Zou, G. (2013) "Solving multiobjective bilevel transportation-distribution planning problem by modified NSGA II.", In 2013 Ninth International Conference on Computational Intelligence and Security, IEEE, pp.303-307.

- Jia, L., Wang, Y. and Fan, L. (2014) "Multiobjective bilevel optimization for production-distribution planning problems using hybrid genetic algorithm", Integrated Computer-Aided Engineering, Vol.21, No.1, pp.77-90.

formulations and solution algorithms", Computers & Operations Research, Vol.55, pp.141-152.

- An, K. and Ouyang, Y. (2016) "Robust grain supply chain design considering post-harvest loss and harvest timing equilibrium", Transportation Research Part E, Logistics and Transportation Review, Vol.88, pp.110-128.

- Babaeinesami, A., Tohidi, H. and Seyedaliakbar, S. M. (2020). "A closed loop Stackelberg game in multi-product supply chain considering information security: A case study." Advances in Production Engineering & Management, Vol.15, No.2.

- Baky, I. A. (2010) "Solving multi-level multi-objective linear programming problems through fuzzy goal programming approach", Applied Mathematical Modelling, Vol.34, No.9, pp.2377-2387.

- Bektaş, T. and Laporte, G. (2011) "The pollution-routing problem", Transportation Research Part B: Methodological, Vol.45, No.8, pp.1232-1250.

- Calvete, H. I., Galé, C. and Oliveros, M. J. (2011) "Bilevel model for production–distribution planning solved by using ant colony optimization", Computers & operations research, Vol.38, No.1, pp.320-327.

- Chaabani, A. and Said, L. B. (2019) "Transfer of learning with the co-evolutionary decomposition-based algorithm-II: a realization on the bi-level production-distribution planning system", Applied Intelligence, Vol.49, No.3, pp.963-982.

- Chaabani, A., Bechikh, S. and Said, L. B. (2019) "A co-evolutionary hybrid decomposition-based algorithm for bi-level combinatorial optimization problems", Soft Computing, pp.1-19.

nonlinear fractional programming problem", Soft Computing, Vol.23, No.14, pp.5605-5618.

- Pakseresht, M., Shirazi, B., Mahdavi, I. and Mahdavi-Amiri, N. (2020). "Toward sustainable optimization with stackelberg game between green product family and downstream supply chain." Sustainable Production and Consumption, Vol.23, pp.198-211.

- Roghanian, E., Sadjadi, S. J. and Aryanezhad, M. B. (2007) "A probabilistic bi-level linear multi-objective programming problem to supply chain planning", Applied Mathematics and computation, Vol.188, No.1, pp.786-800.

- Salehi Sarbijan, M. and Behnamian, J. (2021). "Multi-product production routing problem by consideration of outsourcing and carbon emissions: particle swarm optimization." Engineering Optimization, Vol.53, No.8, pp.1298-1314.

- Saranwong, S. and Likasiri, C. (2016) "Product distribution via a bi-level programming approach: Algorithms and a case study in municipal waste system", Expert Systems with Applications, Vol.44, pp.78-91.

- Schenekemberg, C. M., Scarpin, C. T., Pecora Jr, J. E., Guimarães, T. A., & Coelho, L. C. (2021). "The two-echelon production-routing problem." European Journal of Operational Research, Vol.288, No.2, pp.436-449.

- Setak, M., Feizizadeh, F., Tikani, H. and Ardakani, E. S. (2019). "A bi-level stochastic optimization model for reliable supply chain in competitive environments: Hybridizing exact method and genetic algorithm." Applied Mathematical Modelling, Vol.75, pp.310-332.

- Shi, Y., Deng, Y., Wang, G. and Xu, J. (2020). "Stackelberg equilibrium-based eco-economic approach for sustainable development of kitchen

- Kumar, R., Ganapathy, L., Gokhale, R. and Tiwari, M. K. (2020). "Quantitative approaches for the integration of production and distribution planning in the supply chain: a systematic literature review." International Journal of Production Research,Vol.58, No.11, pp.3527-3553.

- Li, Y., Chu, F., Chu, C. and Zhu, Z. (2019). "An efficient three-level heuristic for the large-scaled multi-product production routing problem with outsourcing." European Journal of Operational Research, Vol.272, No.3, pp.914-927.

- Li, Y., Chu, F., Feng, C., Chu, C. and Zhou, M. (2018). "Integrated production inventory routing planning for intelligent food logistics systems." IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, Vol.20, No.3, pp.867-878.

- Lu, J., Han, J., Hu, Y. and Zhang, G. (2016) "Multilevel decision-making: A survey", Information Sciences, Vol.346, pp.463-487.

- Ma, Y., Yan, F., Kang, K. and Wei, X. (2016) "A novel integrated production-distribution planning model with conflict and coordination in a supply chain network", Knowledge-Based Systems, Vol.105, pp.119-133.

- Makui, A. and Ghavamifar, A. (2016) "Benders Decomposition Algorithm for Competitive Supply Chain Network Design under Risk of Disruption and Uncertainty", Journal of Industrial and Systems Engineering, Vol.9, pp.30-50.

- Mokhlesian, M. and Zegordi, S. H. (2014) "Application of multidivisional bi-level programming to coordinate pricing and inventory decisions in a multiproduct competitive supply chain", The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol.71, pp.1975-1989.

- Nayak, S. and Ojha, A. (2019) "An approach of fuzzy and TOPSIS to bi-level multi-objective

waste disposal with subsidy policy: A case study from China." Energy, Vol.196, p.117071.

- Torkaman, S., Jokar, M. R. A., Mutlu, N., & Van Woensel, T. (2020). "Solving a production-routing problem with price-dependent demand using an outer approximation method." Computers & Operations Research, Vol.123, p.105019.

- Yue, D., Gao, J., Zeng, B. and You, F. (2019) "A projection-based reformulation and decomposition algorithm for global optimization of a class of mixed integer bilevel linear programs", Journal of Global Optimization, Vol.73, No.1, pp.27-57.

- Zhang, Z., Luo, Z., Baldacci, R. and Lim, A. (2021). "A Benders Decomposition Approach for the Multivehicle Production Routing Problem with Order-up-to-Level Policy." Transportation Science, Vol.55, No.1, 160-178.

- Zulvia, F. E., Kuo, R. J. and Nugroho, D. Y. (2020) "A many-objective gradient evolution algorithm for solving a green vehicle routing problem with time windows and time dependency for perishable products", Journal of Cleaner Production, Vol.242, pp.118428.

فرزانه ادبی، درجه کارشناسی از مهندسی صنایع را در سال ۱۳۹۰ از دانشگاه تبریز و درجه کارشناسی ارشد را در همان رشته در سال ۱۳۹۳ از دانشگاه صنعتی ارومیه اخذ نمود. در حال حاضر دانشجوی دکتری مهندسی صنایع در دانشگاه بوعلی سینا است. زمینه‌های پژوهشی مورد علاقه ایشان تئوری بازی‌ها، تصمیم‌گیری در شرایط عدم قطعیت، طراحی شبکه زنجیره تامین و مسیریابی تولید است.

امیرسامان خیرخواه، درجه کارشناسی در رشته مهندسی صنایع را در سال ۱۳۷٤ از دانشگاه علم و صنعت و درجه کارشناسی ارشد در رشته مهندسی صنایع را در سال ۱۳۷۵ از دانشگاه علم و صنعت اخذ نمود. در سال ۱۳۷۹ موفق به کسب درجه دکتری در رشته مهندسی صنایع از دانشگاه علم و صنعت گردید. زمینه‌های پژوهشی مورد علاقه ایشان تصمیم گیری با معیارهای چندگانه، تحقیق در عملیات، مدل سازی سیستم های اقتصادی و اجتماعی بوده و در حال حاضر عضو هیات علمی با مرتبه دانشیار در دانشگاه بوعلی همدان است.

رضا توکلی مقدم، درجه کارشناسی در رشته مهندسی صنایع را در سال ۱۳٦۷ از دانشگاه علم و صنعت ایران و درجه کارشناسی ارشد در رشته مهندسی صنایع را در سال ۱۳۷۲ از دانشگاه ملبورن – استرالیا اخذ نمود. ایشان در سالل ۱۳۷٦ موفق به کسب درجه دکتری در رشته مهندسی صنایع از دانشگاه سوین برن - استرالیا گردید. زمینه‌های پژوهشی مورد علاقه ایشان طراحی سیستمهای صنعتی (مکانیابی و استقرارتسهیلات ،) مسیریابی وسایط حمل و نقل، لجستیک و طراحی شبکه زنجیره تامین، زمانبندی و توالی عملیات، الگوریتم‌های فرابتکاری در بهینه‌سازی بوده و در حال حاضر عضو هیات علمی با مرتبه استاد تمام در دانشگاه تهران است.