طراحی مدل و ارائه روش حل برای مسأله حمل و نقل هزینه ثابت با در نظر گرفتن محدودیت تخفیف

سمیرا صادقی مقدم، دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و فنآوری مازندران، بهشهر، ایران

مصطفی حاجی آقائی کشتلی (مسئول مکاتبات)، استادیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و فنآوری مازندران، بهشهر، ایران

مهدی محمود جانلو، مربی، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و فنآوری مازندران، بابل، مازندران، بهشهر، ایران

E-mail: mostafahaji@mazust.ac.ir

دریافت: ۱۳۹۵/۰۹/۱۶ پذیرش: ۱۳۹۶/۰۴/۲۰

چکیده

زنجیره تامین شبکه‌ای از تسهیلات و مراکز توزیع است که تهیه و تدارک مواد خام، تبدیل آن به محصولات نهایی و واسطه‌ای و توزیع این محصولات نهایی به مشتریان را انجام می‌دهد. هزینه‌های حمل و نقل امروزه به عنوان یکی از مهم‌ترین هزینه‌های موثر در قیمت تمام شده کالا و قیمت نهایی مصرف برای مشتری محسوب می‌گردد. این بخش دربرگیرنده فعالیت‌هایی است که به شکلی گسترده در تمامی زمینه‌های تولید، توزیع و مصرف کالا و خدمات جریان داشته و در مجموعه فعالیت‌های اقتصادی نقش غیرقابل انکاری برعهده دارد. مسأله حمل و نقل با هزینه ثابت توسعه‌ای از مسأله عمومی حمل و نقل است. این مساله از جمله مسائل پایه‌ای و مهم حوزه حمل و نقل به شمار می‌رود که اخیرا روشهای حل این مساله و فرضیات دنیای واقعی بسیار مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است. در این تحقیق، مسأله حمل و نقل هزینه ثابت با در نظر گرفتن محدودیت تخفیف، مدل‌سازی و حل شده است. با توجه به NP- Hard بودن مسأله، سه الگوریتم فراابتکاری برای حل مدل توسعه داده شده است، الگوریتم پایه‌ای ژنتیک که الگوریتمی مبتنی بر جمعیت است، الگوریتم شبیه‌سازی تبرید که الگوریتمی مبتنی بر جستجوی تک نقطه ای است و همچنین الگوریتم جمعیت محور وال که الگوریتمی جدید است و برای اولین بار در این زمینه استفاده شده است. به علاوه، روش نمایش پروفر برای کد کردن مسأله در نظر گرفته شده است. به دلیل اهمیت تنظیم پارامترها در طراحی الگوریتم‌ها، از روش تاگوچی برای این مهم استفاده شده است. همچنین ۲۸ مسأله در ابعاد مختلف، حل و نتایج آنها با حل دقیق بدست آمده با نرم‌افزار GAMS مقایسه شده است.

واژه های کلیدی: الگوریتم تبرید شبیه‌سازی شده، الگوریم ژنتیک، الگوریتم وال، تخفیف، حمل و نقل هزینه ثابت.

۱. مقدمه

عبارت زنجیره تأمین توسط اولیور و وبر در اوایل سال ۱۹۸۲ ابداع شد و در دهه ۱۹۹۰ به طور گسترده‌ای مورد استفاده قرار گرفت. زنجیره تامین شبکه‌ای از تسهیلات و مراکز توزیع است که تهیه و تدارک مواد خام، تبدیل آن به محصولات نهایی و واسطه‌ای و توزیع این محصولات نهایی به مشتریان را انجام می‌دهد. سیستم‌های برنامه‌ریزی زنجیره تامین بر پایه چهار بخش مرتبط با هم شکل گرفته‌اند. این بخش‌ها عبارتند از بخش مدیریت تقاضا، بخش برنامه‌ریزی مواد و تولید، بخش زمانبندی تولید و بخش برنامه‌ریزی حمل و نقل. امروزه حمل و نقل یکی از اجزاء مهم اقتصاد ملی محسوب می‌گردد و بدلیل داشتن نقش زیربنایی تأثیر فراوانی بر فرآیند رشد اقتصادی کشور دارد. این بخش دربرگیرنده فعالیتهایی است که به شکلی گسترده در تمامی زمینه‌های تولید، توزیع و مصرف کالا و خدمات جریان داشته و در مجموعه فعالیتهای اقتصادی نقش غیرقابل انکاری برعهده دارد. هزینه‌های حمل و نقل امروزه به عنوان یکی از مهم‌ترین هزینه‌های موثر در قیمت تمام شده کالا و قیمت نهایی مصرف برای مشتری محسوب می‌گردد. از این رو تمرکز بر هزینه‌های حمل و نقل به سبب کاهش قیمت تمام شده، بالا بردن رضایت مشتری و افزایش جایگاه صنعت مورد نظر در میان رقبا امری ضروری است. در نظر گرفتن تابع هدف هزینه در این مسأله با توجه به موارد ذکر شده ضرورت دارد. مسأله حمل و نقل با هزینه ثابت، توسعه‌ای از مسأله عمومی حمل و نقل است که در آن تعدادی از یک محصول برای ارضای تقاضا به محل‌های تقاضا حمل می‌شود در حالیکه هزینه ثابتی علاوه بر هزینه متغیر قبلی اعمال می‌شود. در عمل بسیاری از مسائل توزیع و حمل و نقل را می‌توان به عنوان مسائل حمل و نقل با هزینه ثابت فرموله کرد. همچنین مسأله هزینه ثابت در بسیاری از مسائل زمان-بندی، مکان‌یابی، تخصیص وسایل نقلیه، مدیریت پسماندهای جامد، انتخاب فرآیند و غیره کاربرد دارد. این مسأله در عمل بطور گسترده‌ای در کاربردهای صنعتی، بازرگانی و تجاری استفاده شده-است و همزمان به صورت گسترده‌ای از لحاظ تئوری گسترش یافته است.

مسأله هزینه ثابت برای اولین بار توسط هایرش و دانتزیگ [Hirsch and Dantzig, 1954] در سال ۱۹۵٤ فرمول‌بندی شد. گری [Gray, 1971] در سال ۱۹۷۱ یک روش حل برای FCTP به نام جستجو در میان نقاط راسی در راس‌هایی که هزینه ثابت کمینه است، معرفی کرد. هم‌چنین، وی یک کران بالا برای هزینه‌های ثابت بدست آورد و نشان داد که این روش برای مسأله‌هایی که هزینه ثابت در مقایسه با هزینه‌های متغیر کوچک نیست، موثر و کارآمد است. سان و همکاران [Sun, Patrick and Drinka, 1998] در سال ۱۹۹۸ یک فرآیند ابتکاری جستجوی ممنوعه[1] را با بکار گرفتن اطلاعات ذخیره شده در تکرارهای قبل به همراه یک شبکه برای پیاده‌سازی روش سیمپلکس به عنوان یک روش جستجوی موضعی[2] برای FCTP ارائه دادند. در سال ۱۹۹۹ ادلخا و کوالسکی [Adlakha and Kowalski, 1999] تحلیل "بیشتر برای کمتر"[3]را برای FCTP مطرح کردند که می‌تواند به مدیران برای تصمیم‌گیری‌هایی از قبیل افزایش ظرفیت انبارها، تحلیل سودآوری شرکت، ادغام دو یا چند شرکت و نظایر آنها مفید واقع شود. آنها هم‌چنین یک شرط سریع و کافی برای تعیین بازارهای تقاضا، منابع و موجودی برای حمل در FCTP مطرح کردند.

در سال ۲۰۰۳ ادلخا و کوالسکی یک الگوریتم ساده برای حل FCTP در مقیاس کوچک پیشنهاد دادند و اظهار کردند که این روش اغلب اوقات کاربرد بیشتری نسبت به الگوریتم‌های حل مسأله‌ی حمل و نقل معمولی دارد [Adlakha and Kowalski, 2003]. در سال ۲۰۰۵ ژن و همکاران درخت پوشا براساس الگوریتم ژنتیک[4] را برای حل FCTP پیشنهاد کردند ودر آن از اعداد پروفر[5] به عنوان کدبردار استفاده کردند [Gen and

[Syarif, 2005]. کلوزه در سال ۲۰۰۸ مسأله هزینه ثابت حمل و نقل با مقصد منفرد را مطرح کرد و یک الگوریتم شمارشی ضمنی را برای حل آن ارائه داد [Klose, 2008].

جواهر و بلاجی در سال ۲۰۰۹ ، با در نظر گرفتن هزینه حمل و هزینه ثابت مربوط به هر مسیر توزیع یا انبار، یک الگوریتم ژنتیک برای حل FCTP دومرحله‌ای پیشنهاد کردند [Jawahara and Balajib, 2009]. بلاجی و جواهر در سال ۲۰۱۱ الگوریتم شبیه‌سازی تبرید را برای حل FCTP دو مرحله‌ای که توسط خود آنها در سال ۲۰۰۹ مطرح شده بود، ارائه کردند [Jawahar and Balaji, 2011]. ادلخا در ۲۰۱۰ یک روش شاخه‌ای تحلیلی بر اساس محاسبه یک کران پایین و بالا، برای حل FCTP پیشنهاد کرد. این روش با یک مدل خطی از مسأله شروع کرده و با جدا سازی متوالی هزینه‌های ثابت و یافتن یک جهت، مدل خطی را به سمت یک جواب بهینه سوق می‌دهد [Adlakha, Kowalski and Lev, 2010]. حاجی آقایی کشتلی و همکاران در سال ۲۰۱۰ مسأله FTCP را با استفاده از درخت پوشا و الگوریتم ژنتیک حل کردند [Hajiaghaei-Keshteli, Molla-Alizadeh-Zavardehi and Tavakkoli-Moghaddam, 2010] ملا علیزاده و همکاران [Molla-Alizadeh-Zavardehi, Hajiaghaei-Keshteli and Tavakkoli-Moghaddam, 2011] در ۲۰۱۱ با در نظر گرفتن هزینه حمل هر واحد و هزینه ثابت مربوط به هر مسیر و هزینه ثابت برای مراکز توزیع بالقوه و انبارها، الگوریتم ژنتیک بانمایش اعداد پروفر را برای حل FCTP دومرحله‌ای ظرفیت‌دار پیشنهاد کردند.

لطفی و همکاران [Lotfi and Tavakkoli-Moghaddam, 2013] در سال ۲۰۱۲ مسأله FCTP خطی و غیرخطی را با استفاده از الگوریتم ژنتیک و با اپراتورهای جدید حل کردند. آنها برای کد کردن مسأله از روش کد کردن بر اساس اولویت استفاده کردند. آنها عملکرد الگوریتم ژنتیک بر اساس اولویت را با روش اخیر الگوریتم ژنتیک بر اساس درخت پوشا مقایسه کردند. زی و همکاران [Xie and Jia, 2012] در سال ۲۰۱۲ یک مسأله حمل و نقل هزینه ثابت غیرخطی را با استفاده از مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح ترکیبی فرموله کردند. آنها الگوریتم ژنتیک را به عنوان الگوریتم چهارچوب مسأله و الگوریتم حداقل جریان هزینه را برای نمایش جواب و همچنین یک الگوریتم ژنتیک ترکیبی را به عنوان روشی برای حل مدل استفاده کردند.

آلتاسان و همکاران [Altassan, El-Sherbiny and Abid, 2014] نیز در سال ۲۰۱٤ به جای عدد پروفر از روش دیگری برای دیکدینگ –نحوه نمایش جواب –مسأله استفاده کردند و با استفاده از الگوریتم مصنوعی مسأله را حل کردند. جومان و همکاران [Juman and Hoque, 2015] در سال ۲۰۱۵ یک روش ابتکاری برای رسیدن به یک جواب اولیه موجه برای مسأله حمل و نقل ارائه دادند. آنها روش خود را با استفاده از زبان برنامه‌ریزی C++ کد کردند. روش آنها در ۸۸٫۸۹ درصد از موارد در مسائل بزرگ منجر به یافتن کمترین هزینه می‌شود.

پارامانیکا و همکاران [Pramanik, Janab, Mondala and Maiti, 2015] در سال ۲۰۱۵ یک شبکه زنجیره تامین دو سطحی را در محیط فازی قوسی نوع دو مدل کردند که در سطح اول آن کالا از مراکز تولید به مراکز توزیع منتقل می‌شود و در سطح دوم آن کالا از مراکز توزیع به خورده فروش‌ها ارسال می‌گردد. مدل آنها یک مدل قطعی است که با الگوریتم‌ها ژنتیک و ازدحام ذرات اصلاح شده که در آن موقعیت هر ذره با توجه به موقعیت شخصی خود و همسایه‌اش در هر لحظه تعیین می‌شود. همچنین ابراهیم نژاد [Ebrahimnejad, 2016] در سال ۲۰۱٦ یک روش جدید برای حل مسأله حمل و نقل فازی ارائه داد که در آن هزینه‌های حمل و همچنین عرضه و تقاضا فازی بودند. مسأله حمل و نقل فازی به چهار مسأله حمل و نقل تبدیل می‌شود که با الگوریتم‌های سیمپلکس استاندارد حل می‌شوند.

در این پژوهش یک مسأله حمل و نقل هزینه ثابت متوازن با مدل تخفیف در نظر گرفته می‌شود. مسأله حمل و نقل در یک سطح شامل حمل محصولات از نقاط منبع (کارخانه، تولیدکننده وغیره) به نقاط تقاضا (مشتری، خرده‌فروش وغیره) و برای یک محصول در نظر گرفته می‌شود. تابع هدف مسأله مینیمم کردن هزینه حمل با توجه به محدودیت‌های عرضه و تقاضا است.

با بررسی مقالات مختلف، برخی از آنها جهت نمایش شکاف تحقیقاتی به شرح جدول ۱ گردآوری و با تحقیق حاضر مقایسه گردیده است.

همانگونه که در جدول فوق مشخص است در برخی کارهای قبلی پارامترهای تابع هدف زمان و در برخی تابع هدف هزینه است. پارامترهای مسأله در بعضی از مقالات قطعی و در بعضی تصادفی است. بعضی از مقالات مسأله چند محصولی و بعضی تک محصولی را در نظر گرفته‌اند. همچنین برخی از کارها چند سطحی و برخی یک سطحی است. همانطور که مشاهده می‌گردد تحقیقی که در آن مسأله تخفیف به کار برده شده باشد به ندرت دیده می‌شود. در این تحقیق مساله حمل و نقل با تابع هدف هزینه به صورت تک محصول و تک سطحی با مسأله تخفیف در نظر گرفته شده است.

با توجه به اهمیت حمل و نقل در دنیای پیشرفته امروزی، این تحقیق به بررسی مسأله حمل و نقل هزینه ثابت از نقطه نظر کاهش هزینه‌ها و زمان پرداخته است. در زمینه حمل و نقل هزینه ثابت تحقیقات بسیاری صورت گرفته است. در این تحقیق در ادامه کارهای قبلی پیرامون مسأله حمل و نقل هزینه ثابت، فرض تخفیف مطابق با شرایط دنیای واقعی، استفاده شده است. مسأله با چند الگوریتم فراابتکاری به طور همزمان حل شده و نتایج بررسی و مورد مقایسه قرارگرفته‌اند. همچنین الگوریتم وال برای اولین بار در این تحقیق استفاده شده است.

۲. مدل پایه‌ای مسأله حمل و نقل

مدل حمل و نقل هزینه ثابت را می‌توان به عنوان یک مسأله‌ی تخصیص در نظر گرفت که در آن m تامین‌کننده و n متقاضی وجود دارد. هر یک از آن m تامین‌کننده توانایی ارسال کالا به هریک از n مشتری را دارد. در حالیکه هزینه‌ی cij را به ازای هر واحد کالای ارسالی از تامین‌کننده i به مشتری j خواهیم داشت، و همچنین علاوه بر این یک هزینه ثابت به ازای فعال شدن مسیر i,j به اندازه fij در نظر گرفته می‌شود. هریک از تامین‌کننده‌ها به مقدار ai عرضه و هریک از مشتریان به مقدار bj تقاضا دارند. تابع هدف مساله، تعیین کننده این است که چه مسیری بازگشایی شود و چه سایزی از کالا از آن مسیر منتقل شود که محدودیت‌ها ارضا شده و هزینه کل انتقالات حداقل شود. این مدل یک مسأله حمل و نقل هزینه ثابت با احتساب تخفیف در هزینه حمل را در نظر میگیرد که در کارهای پیش از این در نظر گرفته نشده است. برای رسیدن به یک جواب موجه اولیه از ساختار درخت پوشا و پروفر نامبر استفاده شده است.

فرضیات اولیه در این تحقیق به شرح ذیل است:

کمبود بودجه در مسأله مورد بررسی وجود ندارد. مسأله برای حالت متوازن بررسی شده است (مجموع عرضه و تقاضا برابر است). پارامترهای مدل به صورت قطعی در نظر گرفته شده است. مسأله برای یک دوره برنامه‌ریزی مدل‌بندی شده است (تک دوره‌ای). همچنین هر دو هزینه‌ی ثابت و متغیر از تخفیف برخوردار هستند.

این تحقیق به سوالات زیر پاسخ می‌دهد: چه مقدار کالا از تسهیل i به تسهیل j ارسال می‌شود؟ چه الگوریمی در بین الگوریتم‌های فراابتکاری مورد استفاده در این تحقیق مناسب‌تر است؟

پارامترهای مناسب الگوریتم‌ها کدام هستند کدام روش از بین روش های کد کردن در این تحقیق مناسب‌تر هستند؟

جدول ۱. مقایسه مقاله های مرتبط با این تحقیق در سال های مختلف و نمایش شکاف تحقیقاتی

مقاله	تابع هدف			چند محصولی	تک محصولی	توع پارامترها			چند سطحی	محدودیت تخفیف
	هزینه	زمان	سایر			قطعی	فازی	تصادفی		
یانگ (۲۰۰۷)	✓	✓			✓			✓		
کوالسکی (۲۰۰۸)	✓				✓	✓				
ادلخا (۲۰۰۸)	✓				✓	✓				
حاجی آقایی (۲۰۱۰)	✓				✓	✓				
ملاعلیزاده(۲۰۱۱)	✓				✓	✓			✓	
جومان (۲۰۱۱)	✓			✓		✓				
یانگ (۲۰۱۱)	✓				✓		✓	✓		
ال شربینی (۲۰۱۲)	✓				✓	✓				
رجبی (۲۰۱۳)	✓				✓		✓			
آلتاسان (۲۰۱۳)	✓				✓					
ملاعلیزاده (۲۰۱۳)	✓				✓		✓			
پانیچر (۲۰۱۳)	✓				✓	✓			✓	
ملاعلیزاده (۲۰۱٤)	✓				✓					
اوجها (۲۰۱٤)	✓				✓		✓			
کومار (۲۰۱٤)	✓	✓			✓		✓	✓		
کنان (۲۰۱٤)	✓				✓	✓			✓	
هینوجوسا (۲۰۱٤)	✓			✓				✓		
پرامانیکا (۲۰۱۵)	✓				✓		✓		✓	
ابراهیم نژاد (۲۰۱٦)	✓				✓		✓			
این تحقیق	✓				✓	✓				✓

مدلسازی استاندارد مساله حمل و نقل هزینه ثابت، به صورت زیر است:

۲-۱ متغیرها و پارامترهای مدل:

اندیس‌ها: i : اندیس نقاط عرضه (منبع) j **: اندیس نقاط تقاضا (مشتری)**

پارامترها:

m: تعداد تامین‌کنندگان (منابع) n: تعداد مشتریان (متقاضیان)

a_i : مقدار عرضه‌ی تامین‌کننده iام b_j: مقدار تقاضای مشتری jام

c_{ij}: میزان هزینه‌ی متغیر به ازای وا حد کالای ارسالی از منبع iام به مقصد jام

f_{ij}: میزان هزینه‌ی ثابت به ازای ارسال کالا از منبع iام به مقصد jام، (هزینه‌ی بازگشایی مسیر ij)

x_{ij}: مقدار کالای ارسالی از منبع iام به مشتری jام

y_{ij}: نشان‌دهنده بازگشایی یا عدم بازگشایی مسیرij

متغیر تصمیم: x_{ij} : مقدار کالای ارسالی از منبع iام به مشتری jام

۲-۲ مدل :

$$Min\ Z = \sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{n}(c_{ij}.x_{ij} + f_{ij}.y_{ij}) \qquad (۱)$$

$$\sum_{i=1}^{m} x_{ij} \geq b_j \qquad \forall\ j = 1, 2, \dots, n \qquad (۲)$$

$$\sum_{j=1}^{n} x_{ij} \leq a_i \leq a_i \qquad \forall\ i = 1, 2, \dots, m \qquad (۳)$$

$$x_{ij} \geq 0 \qquad \forall\ i = 1, 2, \dots, m \quad , \quad j = 1, 2, \dots, n \qquad (٤)$$

$$y_{ij} = 0 \qquad \text{if} \qquad x_{ij} = 0 \qquad (٥)$$

$$y_{ij} = 1 \qquad \text{if} \qquad x_{ij} > 0 \qquad (٦)$$

محدودیت اول نشان می‌دهد که مجموع جریان‌های خروجی از مبدا بایستی کوچکتر یا برابر با ظرفیت آن باشد و همچنین محدودیت دوم نشان می‌دهد که مجموع مقادیر دریافتی هر مشتری نمی‌تواند کمتر از میزان تقاضایش باشد. متغیر yij یک متغیر ۰و۱ است که با توجه به مقدار xij تعیین می‌شود. در واقع اگر مقدار xij بزرگ‌تر از صفر باشد، یعنی نیاز به باز گشایی مسیر ij خواهیم داشت و مقدار yij برابر یک است و در غیر این‌صورت برابر صفر است. در واقع، yij متغیری است که فعال شدن یا نشدن یک مسیر را نشان می‌دهد

۳. روش‌های حل

الگوریتمهای فراابتکاری در حوزه حمل و نقل همواره مورد استفاده قرار می‌گیرند [Shourvarzi, Naeemi and Taleiee, 2016] . در این تحقیق، مدل با دو روش دقیق و فراابتکاری حل می‌شود. نرم‌افزار تحقیق در عملیات گمز [٦] برای حل مدل‌های برنامه‌ریزی ریاضی مورد استفاده قرار می‌گیرد. هدف از استفاده از این نرم‌افزار اعتبار سنجی مدل می‌باشد. دو الگوریتم فراابتکاری مبتنی بر جمعیت شامل الگوریتم ژنتیک و الگوریتم وال و همچنین الگوریتم شبیه‌سازی تبرید که نقطه محور است در این تحقیق استفاده شده است. ژنتیک یک الگوریتم پایه و شناخته شده وقوی

در زمینه مسایل حمل و نقل است و الگوریتم وال یک الگوریتم جدید است که در کارهای قبلی استفاده نگردیده است.

٤. الگوریتم ژنتیک

ایده اصلی الگوریتم ژنتیک، بر اساس تکامل در طبیعت است و برای اولین بار توسط هالند در سال ۱۹۷۵ ارائه شده است [Holland, 1975]. اولین گام در یک الگوریتم ، ارتباط دادن مسئله‌ی اصلی با ساختار الگوریتم است. در عمل، باید یک روش برای نمایش افراد (کروموزوم‌ها) جمعیت انتخاب شود. بنابراین انتخاب یک روش نمایش مناسب، یکی از مهم‌ترین قسمت‌های طراحی یک الگوریتم است. روش نمایش جواب در این تحقیق براساس عدد پروفر است. در این روش ما یک کروموزوم را از تولید تصادفی m+n-2 رقم در محدوده ی [1, m+n] ایجاد می‌کنیم. کننده و یک رشته اعداد دیگر با m-1 رقم عدد با مجموعه اعداد موجود در متقاضی تولید می‌کنیم و در نهایت این دو رشته از اعداد به صورت تصادفی در کنار هم قرار گرفته و یک کروموزوم شدنی خواهیم داشت. بعد از تولید کروموزوم شدنی، رویه تولید گراف شبکه ای حمل ونقل را به شرح جدول ۲ ادامه می دهیم: در واقع رویه تولید گراف (تا انتهای مرحله ۳) توسط جو و همکاران [Jo and Gen, 2007] در سال ۲۰۰۷ ارائه شده است.

جدول ۲. رویه تولید گراف شبکه ای حمل ونقل

۱	اعداد باقی مانده از گره ها که جزء اعداد پروفر نیستند = P'(T) , عدد پروفر = P(T)
۲	اولین عدد سمت چپ در P(T) =j , کمترین عدد در P'(T) =i
۳	آیا i و j جزء مجموعه بله کمان (i,j) را به درخت T اضافه کنید یکسان تامین‌کننده یا متقاضی نیستند؟ خیر عدد بعدی را در P(T) انتخاب کنید که در مجموعه یکسانی با i نباشد، j را با k عوض کرده و کمان (i,k) را به درخت T اضافه کنید
٤	j یا k را از P(T) حذف کنید و i را از P'(T) . اگر j (k) در مجموعه P(T) دیگر تکرار نشده است آنرا به مجموعه P'(T) اضافه می‌کنیم.
٥	مقدار انتقال کالا را برای شاخه (i, j) یا شاخه (i, k) به صورت (xik = min{ai, bk}) xij = min{ai,bj} تعریف می‌کنیم.
٦	مقادیر عرضه و تقا ضا را در ai و bj را به صورت (ai = ai–xij and bj = bj–xij (or bk = bk–xik به روز می‌کنیم.
۷	اگر رقم دیگری در مجموعه P(T) موجود نیست پس دو گره i و j در مجموعه P'(T) باقی مانده است، شاخه (i, j) را به درخت پوشا اضافه می‌کنیم.
۸	اگر مقادیری برای تخصیص وجود ندارد پس مراحل پایان یافته اگر نه، وجود دارد y عرضه کننده با a>0 و z متقاضی با b>0 واحد، پس یکی از حالات زیر رخ می‌دهد: ۸,۱. اگر y=1 و z=1 شاخه ای به درخت پوشا اضافه کرده و مقدار ممکن را به آن اختصاص می‌دهیم. ۸,۲. اگر y>1 و z=1 شاخه های از عرضه کنندگان به متقاضی اضافه می‌کنیم و مقادیر ممکن را به آن ها اختصاص می‌دهیم. ۸,۳. اگر y=1 و z>1 شاخه های از عرضه کننده به متقاضی ها اضافه می‌کنیم و مقادیر ممکن را به آن ها اختصاص می‌دهیم. ۸,٤. اگر y>1 و z>1 در این حالت مساله را یک مساله حمل ونقل جدید باy عرضه کننده و z متقاضی در نظر گرفته و پروفر نامبر جدیدی تولید می‌کنیم و تمام مراحل ۱ تا ٤ را از ابتدا انجام می‌دهیم.

این رویه در سال ۲۰۱۰ توسط حاجی آقائی-کشتلی و همکاران [Hajiaghaei-Keshteli, Molla-Alizadeh-Zavardehi and Tavakoli-Moghaddam, 2010] اصلاح شده است. در این بین اگر سیکلی در تهیه درخت پوشا ایجاد شد، شاخه‌ای که میزان جریان کالا در آن صفر است را حذف می‌کنیم و درختی با m+n-1 شاخه خواهیم داشت. این نحوه کدبندی مسئله باعث می‌شود تا هر جایگشتی از ژن‌های کروموزوم به یک درخت انتقال قابل قبول برای مسئله تبدیل شود.

۵. الگوریتم تبرید شبیه‌سازی شده[۷]

نام تبرید شبیه‌سازی شده از فرآیند تبرید (به تدریج سرد شدن) فیزیکی اجسام جامد گرفته شده است که در آن به یک کریستال جامد حرارت داده می‌شود و سپس به صورت تدریجی سرد می‌شود تا جایی که کریستال تشکیل شده، به بالاترین سطح پایداری ممکن برسد.

به کارگیری الگوریتم تبرید شبیه‌سازی شده برای مسائل بهینه‌سازی اولین بار توسط کریک پاتریک، گلت و ویچی در سال ۱۹۸۳ انجام شد [Kirkpatrick and Vecchi, 1983]. مزیت اصلی تبرید شبیه‌سازی شده در توانایی آن در جلوگیری از گیر افتادن در مینیمم محلی است. این رویکرد نه تنها تغییراتی را که باعث بهبود تابع هدف را می‌شود می‌پذیرد، بلکه حتی بعضی از تغییراتی را که باعث بهبود نمی‌شوند را به منظور به دام حل محلی نیفتادن با احتمال مشخصی می‌پذیرد. احتمال پذیرش اینگونه از حل‌ها، وابسته به پارامتر دما می‌باشد. برای مثال در مسائل کمینه‌سازی، نه تنها هر حرکت یا تغییری که مقدار تابع هدف f را کاهش دهد، پذیرفته خواهد شد، بلکه تغییراتی که مقدار تابع هدف را افزایش می‌دهند، با احتمال p پذیرفته می‌شوند. احتمال p که احتمال انتقال هم نامیده می‌شود، از طریق رابطه (۷) به دست می‌آید.

$$p = e^{-\frac{\Delta E}{k_B T}} \quad (۷)$$

که در آن، k_B مقدار ثابت بولتزمن است و برای سادگی می‌توان از k که همان k_B است، استفاده کرد. اغلب از $k = 1$ استفاده می‌شود. T همان دما برای کنترل فرآیند سرمایش است. ΔE، همان تغییر در سطح انرژی است. رابطه احتمال انتقال، بر پایه‌ی توزیع بولتزمن در فیزیک است.

۶. الگوریتم وال (نهنگ)[۸]

نهنگ یا وال پستانداری آبزی است از رده آب بازسانان که دمی بلند دارد. نکته جالبی که در زندگی نهنگ‌ها وجود دارد که منبع الهام این الگوریتم است شیوه تغذیه و شکار در نهنگ‌های گوژ پشت است که به نام شکار حبابی شناخته می‌شود. در این روش، هر نهنگ حباب‌های هوا را در زیر دریا آزاد می‌کند و دیوارهایی از هوای بالارونده در آب پدید می‌آورد. کریل‌ها و ماهیانی که درون دیوار هوایی هستند از ترس به مرکز محدوده دایره‌شکل حبابی می‌روند و در این هنگام نهنگ با باز کردن دهان خود تعداد بسیاری از آن‌ها را در یک بار بالا آمدن از آب می‌بلعد. سید علی میرجلالی در سال ۲۰۱۶ این الگوریتم را ارائه کرد [Mirjalili and Lewis, 2016].

نهنگهای گوژ پشت قادر هستند که موقعیت شکار را تشخیص داده و آنرا احاطه کنند. به دلیل اینکه موقعیت بهینه در فضای جستجو نامشخص است، الگوریتم بهینه‌سازی وال فرض می‌کند که بهترین جواب کنونی همان شکار مورد نظر یا نقطه ای نزدیک آن است. بعد از اینکه این نقطه مشخص شد جستجو برای سایر نقاط بهینه و بروزرسانی موقعیت ادامه دارد. این رفتار با معادله زیر نشان داده می‌شود:

$$\vec{D} = \left|\vec{c}.\overrightarrow{X^*}(t) - \vec{X}(t)\right| \quad (۸)$$

$$\vec{X}(t+1) = \overrightarrow{X^*}(t) - \vec{A}.\vec{D} \quad (۹)$$

که در آن t تکرار فعلی، A , C بردار ضرائب، X^* بردار بهترین موقعیت بدست آمده تا کنون و X نیز بردار موقعیت است. ذکر این

نکته ضروری است که X^* در هر تکرار به روز می‌شود. بردارهای A و C از طریق زیر بدست می‌آیند:

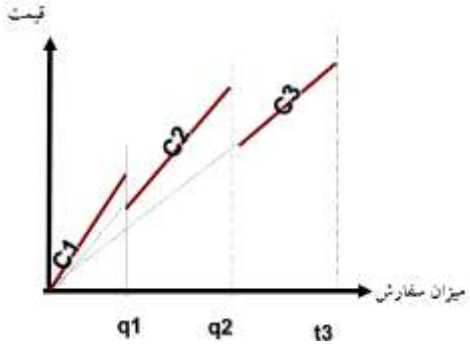
$$\vec{A} = 2\vec{a}.\vec{r} - \vec{a} \quad (10)$$

$$\vec{C} = 2.\vec{r} \quad (11)$$

که در آن بردار a برداری است که در هر دو فاز تنوع و تمرکز از عدد ۲ به عدد صفر در هر تکرار کاهش می‌یابد و بردار r یک بردار تصادفی در بازه $[0,1]$ است.

۷. تخفیف

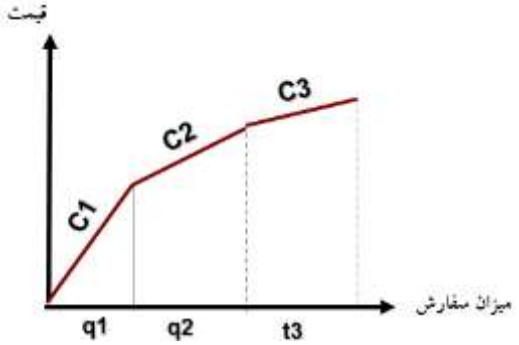
تخفیف یعنی قیمت هر واحد کالا با افزایش مقدار سفارش کاهش می‌یابد بدین صورت که هر چه خرید بیشتر باشد در قیمت خرید کالا تخفیف بیشتری اعمال می‌شود. تخفیف بر دو نوع است، تخفیف کلی و تخفیف افزایشی. [محمد تقی فاطمی قمی، ۱۳۸۷: ٤٠٠-٤١٥]. تخفیف کلی: در این حالت تخفیف بر کل کالاها به صورت یکسان اعمال می‌شود بعبارت دیگر تمام واحدهای خریداری شده با یک قیمت واحد محصول خریداری می‌شوند. نمودارهای مربوط به هر دو حالت تخفیف در شکل‌های زیر نمایش داده می‌شوند. شکل ۱ نمودار قیمت و میزان سفارش را در حالت تخفیف کلی نمایش می‌دهد. c نشان‌دهنده قیمت و q نشان‌دهنده میزان سفارش است.



شکل ۱. قیمت و میزان سفارش در حالت تخفیف کلی

تخفیف افزایشی : دراین حالت تخفیف بر هر محدوده به صورت جداگانه اعمال می‌شود بعبارت دیگر تمامی واحدهای خریداری شده با یک قیمت واحد محصول خریداری نمی‌شوند.

شکل ۲ نمودار قیمت و میزان سفارش را در حالت تخفیف افزایشی نمایش می‌دهد.



شکل۲. قیمت و میزان سفارش در حالت تخفیف افزایشی

تخفیف در نظر گرفته شده در این پژوهش تخفیف افزایشی است یعنی در یک بازه خرید مشخص قیمت A تومن و در یک بازه دیگر قیمت B تومن است.

این تخفیف بر هزینه‌های متغیر اعمال شده است. به این صورت که اگر میزان خرید یا همان سفارش هر متقاضی از ۱ تا ۵۰۰ واحد کالا باشد هزینه‌های متغیر تغییری نداشته و اگر بیش از ۵۰۰ واحد کالا سفارش داشته باشد.

هزینه‌های متغیر در یک عدد بین صفر و یک ضرب می‌شوند تا تخفیف مورد نظر اعمال شود. در اینجا اگرمیزان خرید بیش از ۵۰۰ واحد کالا باشد هزینه‌های متغیر در ۰,۵ ضرب می‌شوند. به عنوان مثال اگر در یک مسأله ۵*۵ بعد از حل مدل ماتریس تخصیص و هزینه متغیر برای این مسأله به صورت جدول زیر باشد، آنگاه تابع هدف با توجه به تخفیف اعمال شده به صورت زیر محاسبه خواهد شد:

Z=۲۲۲*۱٤۷+٤۷۸*۱٤۲+۲۷۳*۱۲۸+۱۸٥٦*(۱۱۲/۲) = ۲۳۹۳۹۰

ماتریس تخصیص مسأله ۵*۵											
	D۱	D۲	D۳	D٤	D۵	fij	۱	۲	۳	٤	۵
O۱	۰	۰	۰	۰	۰	۱	۱۰٦	۱۳۲	۱۰۵	۱۳۵	۱۵٤
O۲	۲۲۲	۰	۰	۰	۰	۲	۱٤۷	۱۲۹	۱۰٦	۱٤۳	۱۳۹
O۳	۰	۰	٤۷۸	۰	۰	۳	۱۰۷	۱۲۹	۱٤۲	۸٦	۱۵۳
O٤	۰	۰	۲۷۳	۰	۰	٤	۱۳۹	۱٤۹	۱۲۸	۱۰۷	۱۲۳
O۵	۰	۱۸۵٦	۰	۰	۰	۵	۱۳۰	۱۱۲	۱۲۵	۱۳۲	۱۲۹

۸. طراحی مسأله

۸-۱ تولید داده

در این بخش برای حل مدل و همچنین ارزیابی اثربخشی الگوریتم‌های فراابتکاری ۷ مسأله در ٤ سطح یعنی به طور کلی ۲۸ مساله در ابعاد گوناگون طراحی گردیده‌اند که محدوده هزینه‌های ثابت و متغیر و همچنین عرضه و تقاضای آن بر اساس مقاله سان و همکاران در سال ۱۹۹۸ است

[Sun, Patrick and Drinka, 1998]. این مسایل هم از طریق روش دقیق و هم از طریق روشهای فراابتکاری حل می‌شوند. مشخصات ۲۸ مسأله مذکور به همراه هزینه‌های ثابت و متغیر و عرضه و تقاضا در جدول شماره ۳ نشان داده شده‌اند.

۸-۲ طراحی آزمایش[۹]

۸-۲-۱ مقدمه

طراحی آزمایش‌ها برای تعیین ارتباط بین عوامل موثر در یک فرایند و خروجی‌های آن فرایند مورد استفاده قرار می‌گیرد. انجام آزمایش همواره متضمن هزینه و زمان است. بنابراین به روشی نیاز است که در آن بتوان با صرف حداقل هزینه و زمان، به بیشترین اطلاعات در مورد فرآیند دست پیدا کرد.

روشی که به بهترین شکل اهداف ذکر شده را برآورده می‌سازد، طراحی آزمایش‌های صنعتی نام دارد. در حال حاضر طراحی آزمایش‌های صنعتی به روش‌های مختلفی صورت می‌پذیرد که برخی از آنها عبارتند از روش کلاسیک، روش تاگوچی و روش سطح پاسخ[۱۰]. روش تاگوچی نسبت به روشهای دیگر تحلیل آسانتری دارد.

۸-۲-۲ روش تاگوچی

تاگوچی مفاهیم آماری جدیدی را مطرح کرد [1986 ,Taguchi]. او برای ارائه آزمایشاتش گروه‌های ویژه‌ای از آرایه‌های عمود بر هم[۱۱] را ترکیب و ایجاد نمود. آرایه‌های عمود بر هم فرآیند طراحی آزمایش‌ها را سهولت می‌بخشند.

جدول ۳. مشخصات ۲۸ مسأله طراحی شده برای حل توسط روشهای پیشنهادی

محدوده ی هزینه‌های ثابت		محدوده هزینه‌های متغیر		نوع مسأله	عرضه/تقاضای کل	اندازه مسأله
حد بالا	حد پایین	حد بالا	حد پایین			
۲۰۰	۵۰	۸	۳	A	۱۰,۰۰۰	۱۰×۱۰
٤۰۰	۱۰۰	۸	۳	B	۱۵,۰۰۰	۱۰×۲۰
۸۰۰	۲۰۰	۸	۳	C	۱۵,۰۰۰	۱۵×۱۵
۱,٦۰۰	٤۰۰	۸	۳	D	۱۵,۰۰۰	۱۰×۳۰
					۵۰,۰۰۰	۵۰×۵۰
					۳۰,۰۰۰	۳۰×۱۰۰
					۵۰,۰۰۰	۵۰×۱۰۰

طراحی یک آزمایش شامل انتخاب مناسب‌ترین آرایه عمود بر هم، تعیین فاکتورها با ستون‌های مناسب و نهایتا موقعیت آزمایش‌ها (شرایط آزمایش) می‌باشد. نسبت سیگنال به نویز در آزمایش تاگوچی برای مسایل هر چه کوچکتر بهتر به صورت زیر بدست می‌آید:

$$SN_s = -10\log\left(\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} y_i^2\right) \quad (۱۲)$$

برای انجام آزمایشات تجزیه و تحلیل آماری بهتر است بر روی داده‌ها بی مقیاس‌سازی صورت گیرد. یکی از روش‌های اجرای این عمل RPD است. مقدار RPD برای داده‌ها با استفاده از رابطه زیر بدست می‌آید.

$$RPD = \frac{|Sol - Best\ Sol|}{Best\ Sol} * 100 \quad (۱۳)$$

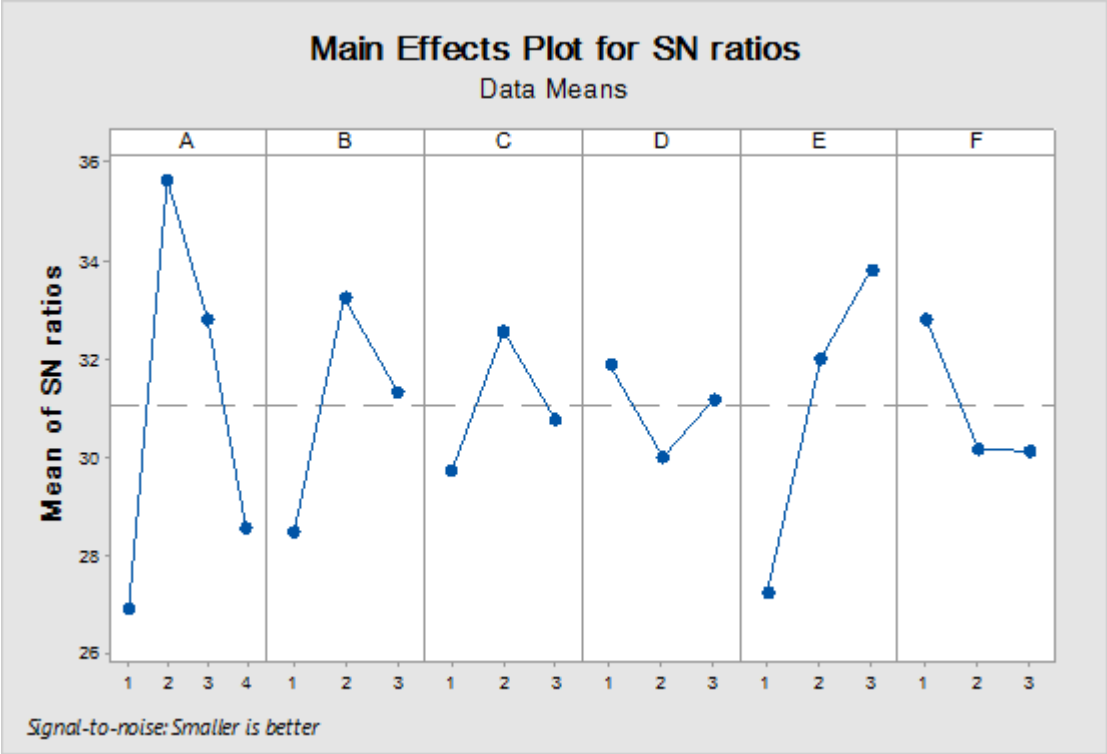
۸-۲-۳ نتایج طراحی آزمایش

روش تاگوچی با کم کردن تعداد آزمایشات زمان تنظیم پارامتر را کاهش می‌دهد. پارامترهایی را که در هر الگوریتم می‌خواهیم تنظیم کنیم مشخص می‌کنیم. الگوریتم ژنتیک دارای ۵ فاکتور ۳ سطحی و یک فاکتور ٤ سطحی، الگوریتم شبیه‌سازی تبرید دارای ۳ فاکتور ۳ سطحی و یک فاکتور ٤ سطحی و الگوریتم وال دارای ۲ فاکتور ۳ سطحی است. بنابراین الگوریتم‌های ژنتیک و شبیه‌سازی تبرید دارای آرایه‌های عمود بر هم L18 و الگوریتم وال دارای آرایه عمود بر هم L9 خواهند بود. به دلیل حجم بالای پارامترهای هر الگوریتم و هم‌چنین سطوح آنها که از روش تاگوچی بدست آمده فقط جدول ٤ مربوط به الگوریتم ژنتیک مشخص شده است.

جدول ٤. فاکتورها و سطوح آزمایش الگوریتم ژنتیک

الگوریتم GA		
فاکتورها	علائم	سطوح
تعداد تکرار	A	A(١)- ٥٠ A(٢)- ١٠٠ A(٣)- ٧٥
اندازه جمعیت	B	B(١)- ٣٠ B(٢)- ٤٥ B(٣)- ٥٠
احتمال تقاطع	C	C(١)- ٠/٥ C(٢)- ٠/٧ C(٣)- ٠/٨٥
احتمال جهش	D	D(١)- ٠/٠٥ D(٢)- ٠/١ D(٣)- ٠/١٥
نوع جهش	E	E(١)- Swap mutation E(٢)- Big swap mutation E(٣)- Inversion mutation E(٤)- Displacement mutation
نوع تقاطع	F	F(١)- One-point crossover F(٢)- Two-point crossover F(٣)- Uniform crossover

به عنوان مثال در الگوریتم ژنتیک پارامتر تعداد تکرار یکبار مقدار ۵۰، یکبار مقدار ۱۰۰ و یکبار مقدار ۷۵ را اختیار می‌کند و برای سایر پارامترها نیز به همین ترتیب است. مقدار الگوریتم‌ها را با پارامترهای مشخص شده در جداول فوق اجرا کرده و نتایج را با استفاده از نرم‌افزار مینی‌تب تحلیل کرده تا بهترین پارامترها برای الگوریتم‌ها بدست بیاید. نمودارهای S/N بدست آمده از نتایج اجرای آزمایشات به ما نشان می‌دهد که بهترین مقادیر برای پارامترها کدام است. اعداد بالاتر در نمودار S/N معرف مقدار بهتر برای پارامتر است. نمودارهای S/N برای الگوریتم ژنتیک در شکل ۳ مشخص شده است. در نمودار سیگنال به نویز برای تابع هدف حداقل‌سازی بالاترین سطح برای هر الگوریتم بهترین سطح آن است. همان‌طور که در نمودارها مشخص است،



شکل ۳. نمودار سیگنال به نویز برای الگوریتم ژنتیک

در الگوریتم GA، بهترین سطح برای فاکتور A سطح دوم، برای فاکتور B سطح دوم، برای فاکتور C سطح دوم، برای فاکتور D سطح اول، برای فاکتور E سطح سوم و برای فاکتور F سطح اول است.

۹. نتایج

بعضی مسائل در اندازه‌های کاربردی و عملی خود به قدری بزرگ هستند که نمی‌توان جواب بهینه آنها را در مدت زمان قابل قبولی به دست آورد و روش دقیق در این گونه مسائل قادر به حل مسأله نیست. به همین دلیل می‌توان به جواب‌های نزدیک به بهینه بسنده نمود، به گونه‌ای که دارای کیفیت قابل قبول بوده و در مدت زمان قابل قبول بدست آیند.

چندین رویکرد از جمله الگوریتم‌های ابتکاری برای طراحی جواب‌های با کیفیت قابل پذیرش تحت محدودیت زمانی قابل پذیرش پیشنهاد شده است.

الگوریتم‌های ابتکاری هیچ تضمینی در ارائه جواب ندارند اما بر اساس شواهد و سوابق نتایج آنها، به طور متوسط بهترین تقابل کیفیت و زمان حل برای مسأله مورد بررسی را به همراه داشته‌اند. بدین جهت از الگوریتم‌های فراابتکاری جهت حل مسائل استفاده می‌کنیم.

جوابی که با استفاده از گمز برای مسائل با ابعاد بزرگ بدست می‌آوریم یک جواب نزدیک به بهینه و نه یک جواب لزوما بهینه است.

۲۸ مسأله طراحی شده را با ۳ الگوریتم یکبار برای حالتی که مسأله بدون تخفیف است و یکبار برای حالت با تخفیف، اجرا می‌کنیم.

جـدول ۵ و ٦ نتایج حاصـــل برای مســـأله بدون در نظر گرفتن تخفیف و مسأله با در نظر گرفتن تخفیف را نشان می‌دهند.

در جداول و نمودارها مســائلی که شــامل تخفیف هســتند با D مشخص شده‌اند. همانطور که از جداول پیداست، در هر دو حالت با و بدون اعمال تخفیف الگوریتم WOA دارای بهترین عملکرد در بین سایر الگوریتم‌ها است.

همانطور که در ادامه مشاهده خواهیم کرد، این موضوع در شکل‌ها و جداول بعدی نیز مشهود است.

با در نظر گرفتن جدول ۵ و ٦ شکل‌های ٤ و ۵ را خواهیم داشت کـه بـه ترتیـب اختلاف عملکرد ۳ الگوریتم در حـالت‌های بدون تخفیف و با تخفیف را نشان می‌دهند.

همانطور که از شکل‌ها و نمودارها مشاهده می‌شود در یک مقایسه کلی بین حالت‌های مختلف مسأله بدون تخفیف بهترین جوابها به ترتیب متعلق به الگوریتم‌های WOA، GA و نهایتاً SA است.

نمودار سـبز رنگ مربوط به الگوریتم وال اسـت که پایین‌تر از دو نمودار دیگر اسـت بدین‌معنی که این الگوریتم در بدسـت آوردن جوابهای مینیمم موفق‌تر عمل کرده است.

جدول ۵. نتایج حاصل از حل ۲۸مسأله (نوع **A** و **B**) برای هر دو حالت با و بدون تخفیف

مقایسه نتایج مسائل در اندازه های کوچک، متوسط و بزرگ

OF= Objective function; L= Local; G= Global; Gap=Percentage deviation from best solutions $(Z - Z^* / Z^*) \times 100$

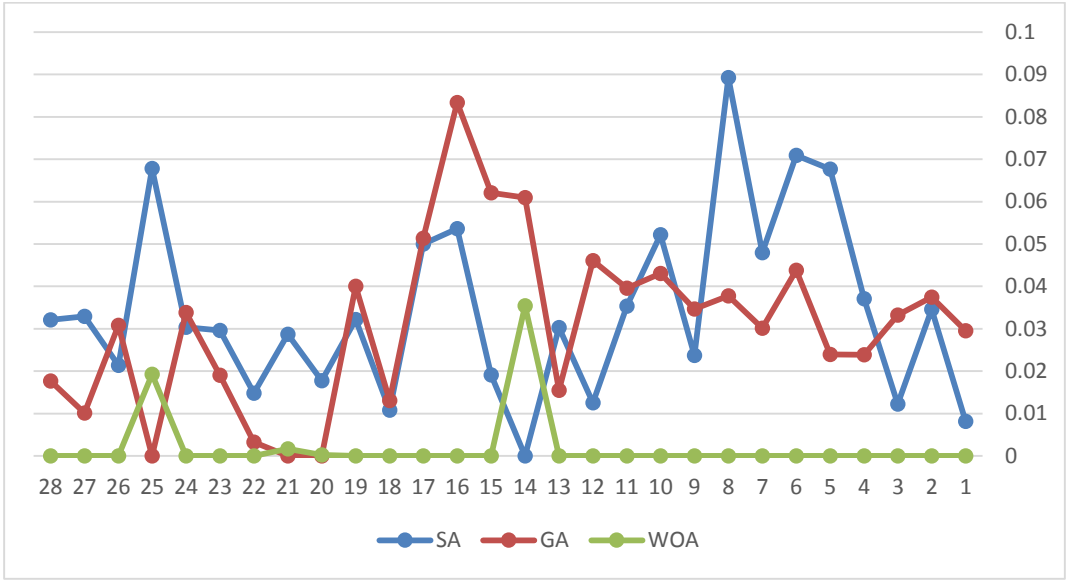
نوع	اندازه	نتیجه مسایل بدون در نظر گرفتن تخفیف										نتیجه مسایل با در نظر گرفتن تخفیف									
		SA		GA		WOA		GAMS		D-SA		D-GA		D-WOA		GAMS	
		OF	Gap	OF	Gap	OF	Gap	OF	Gap	OF	Gap	OF	Gap	OF	Gap	OF	Gap
A	۱۰*۱۰	٤٧٥٩٢	۳/۸	٤٨٥٥٩	٦	٤٧٢٠٥	۲/۹٦	٤٥٨٤٨	۰	٢٥٧٨١	۷/۰۷	٢٤٥٥٦	٥/٩٣	٢٤٥٢٦	۱/۸٦	٢٤٠٧٩	۰
	۱۰*۲۰	٧٥٩٠٨	۱٥/٧٥	٧٦١٢١	۱٦/۰٧	٧٣٣٧٢	۱۱/۸۸	٦٥٥٨٢	۰	٤٠٩٤٤	۱۹/۱۱	٣٩٨٤٠	۱٥/٩٠	٣٩٠٧٢	۱۳/٦٦	٣٤٣٧٥	۰
	۱۵*۱۵	٧٣٩١٠	۱۳/۸٤	٧٥٤٤٢	۱٦/۲۰	٧٣٠١٤	۱۲/٤٦	٦٤٩٢٧	۰	٤١٢٨٣	۲۰/٦۳	٣٩٥٩٨	۱٥/۷۰	٣٨١٧٦	۱۱/٥٥	٣٤٢٢٤	۰
	۱۰*۳۰	٧٧٣٩٤	۱۷/٥۳	٧٦٤١٠	۱٦/۰٤	٧٤٦٢٦	۱۳/۳۳	٦٥٨٤٨	۰	٤٠٨٦٠	۱۷/٥٥	٤٢٣٠٤	۲۱/۷۱	٤٠٣٧٥	۱٦/۱٦	٣٤٧٥٩	۰
	۵*۵۵	٢٦٠٩٧٦	٦۳/٦٩	٢٥٠٢٨٧	٥٦/٩٩	٢٤٤٤٣٩	٥۳/۳۲	١٥٩٤٣١	۰	١٣٣٥٩٩	٥٨/٢٣	١٢٤٠٧٣	٤٦/٩٥	١٢٩٢٧٤	٥٣/١١	٨٤٤٣١	۰
	۳۰*۱۰۰	١٦٧٢٠٧	٦٤/١٠	١٦٢٩٦٩	٥٩/٩٤	١٥٦١٣٣	٥٣/٢٤	١٠١٨٩١	۰	٨٨٤٣٥	۷/٤٨	٨٧٤٨٠	٦/٣٢	٨٦٤٣٣	٥/٠٥	٨٥٩٣٥	۰
	۵*۱۰۰	٢٧٢٥٠٢	٦٩/٣٢	٢٦٧٨٥٩	٦٦/٤٤	٢٦٠٠٣٢	٦١/٥٨	١٦٠٩٣٥	۰	١٤١٦١٩	٣٨/٩٩	١٤٠٩٣٧	٣٨/٣٢	١٣٨٧٦٣	٣٦/١٩	١٠١٨٩١	۰
	۱۰*۱۰	٥٣٧٨٠	۱۲/۰٤	٥١٢٣٨	٦/٧٤	٤٩٣٧٢	۲/۸٦	٤٨٠٠١	۰	٢٧٨٨٧	۲/٥٤	٢٧٧٧٨	٥/٨٩	٢٦٨٩٧	٦/٣١	٢٦٢٣٢	۰
	۱۰*۲۰	٧٩٢٣٤	۱٤/٤٥	٨٠٠٨٢	۱٥/٦٨	٧٧٣٩٧	۱۱/۸۰	٦٩٢٢٩	۰	٤٣٨٧١	۱٥/٣٨	٤٣٥١٢	۱٤/٤٤	٤٢٢٢٠	۱۱/۰٤	٣٨٠٢٢	۰
	۱۵*۱۵	٧٩١٣٩	۱٥/٩٥	٧٨٤٥٢	۱٤/٩٤	٧٥٢١٤	۱۰/۲۰	٦٨٢٥٣	۰	٤٣٣٥٨	۱٥/٤٧	٤١٧٢١	۱۱/۱۱	٤٢١٣٣	۱۲/۲۱	٣٧٥٥٠	۰
	۱۰*۳۰	٨٤٠٥٦	۲۰/۸٥	٨٤٣٩٥	۲۱/۳٤	٨١١٨٥	۱٦/۷۲	٦٩٥٥٥	۰	٤٦٨٤١	۲۱/۷۷	٤٥٢٩٨	۱۷/۷٦	٤٤٩٦٨	۱٦/۹۰	٣٨٤٦٦	۰
	۵*۵۵	٢٥٩٩٢٢	٥٥/۰۲	٢٣٨٥١٩	٦۰/۱٥	٢٥٦٦٩٣	٥۳/۰٩	١٦٧٧٢٢	۰	١٤٦٣٨٤	٥٧/٩٦	١٤١٦١٠	٥٢/٨١	١٤٠٧٠٥	٥١/٨٣	٩٢٦٧٢	۰
	۳۰*۱۰۰	١٧٨٩٣٥	٥٧/٧٤	١٧٦٣٦٠	٥٥/٤٧	١٧٣٧٧٠	٥٣/١٠	١١٣٤٣٦	۰	١٠٦٣٠٢	٥٥/٨٣	١٠١٦٨٣	٤٩/٠٦	١٠٢٢٠٩٣	٤٩/٦٦	٦٨٢١٦	۰
	۵*۱۰۰	٢٦٦٨٦٧	٥٥/٣٧	٢٨٣١٣٦	٦٤/٨٥	٢٧٦٣٢٤	٦٠/٨٨	١٧١٧٥٨	۰	١٦٠٤٧٧	٦٥/٨٥	١٥٩١٦١	٦٤/٤٩	١٥٧٢٢٧	٦٢/٥٠	٩٦٧٥٨	۰

جدول ٦. نتایج حاصل از حل ۲۸مسأله (نوع C و D) و میانگین آنها برای هر دو حالت با و بدون تخفیف

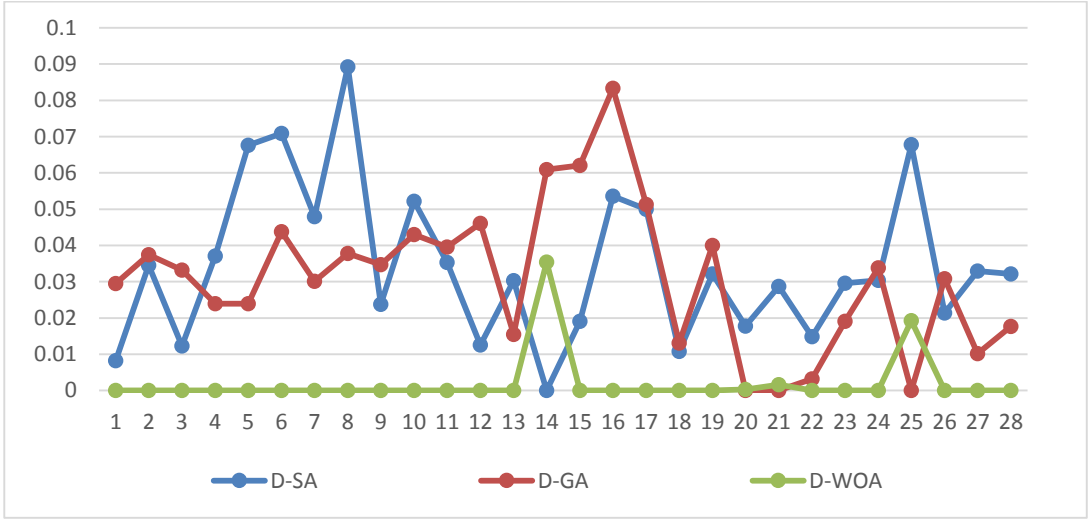
مقایسه نتایج مسائل در اندازه های کوچک، متوسط و بزرگ

OF= Objective function; L= Local; G= Global; Gap=Percentage deviation from best solutions $(Z - Z'/Z') \times 100$

نوع	اندازه	نتیجه مسایل بدون در نظر گرفتن تخفیف								نتیجه مسایل با در نظر گرفتن تخفیف							
		SA		GA		WOA		GAMS		D-SA		D-GA		D-WOA		GAMS	
		OF	Gap	OF	Gap	OF	Gap	OF	Gap	OF	Gap	OF	Gap	OF	Gap	OF	Gap
C	۱۰e۱۰	٥٤٥٩٠	٤/۳۸	٥٦٨٩١	۸/۷۸	٥۳٥٦٦	۲/٤۲	٥۲۳۰۱	۰	۳۲۸٥۳	۷/٦۰	۳۲۱۸۱	٥/٤۰	۳۱٤۳۲	۲/۹٥	۳۰٥۳۲	۰
	۱۰e۲۰	۸٦٥۸۸	۱۳/۸٥	۸۹۰۳۳	۱۷/۰۷	۸۲۱۸٤	۸/۰٦	۷٦۰٥۲	۰	٥۰٦۹٦	۱۳/۰٥	٥۱۱۲۱	۱۳/۹۹	٤۸٦۸٦	۸/۹۷	٤٤۸٤٥	۰
	۱٥e۱٥	۸۷۷۳۲	۱۷/۳۲	۸۷۸٤٥	۱۷/٤۷	۸۳٥٥٥	۱۱/۷٤	۷٤۷۷۸	۰	٤۹٦٤۹	۱۱/٤٤	٥۰۰٦۲	۱۲/۳۷	٤۸٥۳۱	۸/۹۳	٤٤٥٥۱	۰
	۱۰e۳۰	۸۹٦۰۸	۱٦/٤٦	۸۹۸۰٦	۱٦/۷۲	۸۸٦٤۸	۱٥/۲۲	۷٦۹٤۱	۰	٥٥٦٤۹	۲۱/۳۷	٥٥۳٥۰	۲۰/۷۱	٥۳۱٤۸	۱٥/۹۱	٤٥۸٥۲	۰
	٥۰e٥۰	۲۸۸۳٦۸	٥٦/۷۲	۲۹۰٥٥٤	٥۷/۹۱	۲۷۹۳۸۰	٥۱/۸٤	۱۸۳۹۹۷	۰	۱٦۸۳۲۱	٥٤/٤۳	۱٦٤۷۸۷	٥۱/۱۸	۱٦۳٤۹۰	٤۹/۹۹	۱۰۸۹۹۷	۰
	۳۰e۱۰۰	۲۰۸٥۱۲	٥٦/۷۷	۲۰٤۸۷۲	٥٤/۰٤	۲۰٤۹۲۷	٥٤/۰۸	۱۳۳۰۰۱	۰	۱۳٥۱۸٦	٥/۹۹	۱۳۳٥۲٦	٤/٦۹	۱۳۳۹٦٦	٥/۰۳	۱۳۳۰۰۱	٤/۲۸
	٥۰e۱۰۰	۳۱۹۸۷۹	٦٤/۳۸	۳۱۰۹٦۲	٥۹/۸۰	۳۱۱٤۷۳	٦۰/۰٦	۱۹٤٥۹۳	۰	۱۹۳٤٥۱	٦۱/۷٦	۱۹۸۲٦۹	٦٥/۷۹	۱۹۱۷۹۱	٦۰/۳۷	۱۱۹٥۹۳	۰
D	۱۰e۱۰	٦۳۰۹۹	۲/۳۱	٦۲۳۷۸	۱/۱٤	٦۲۱۷٦	۰/۸۱	٦۱٦۷٤	۰	٤۰٦۰۳	۳/۳۰	٤۱۹۲٥	٦/٦٦	۳۹۹۲۸	۱/٥۸	۳۹۷۹٤	۱/۲٤
	۱۰e۲۰	۹۸۹۲٦	۱۱/۱۲	۹۷۹۱۳	۹/۹۸	۹٦۰۸۱	۷/۹۲	۸۹۰۲۹	۰	٦٤۲۸۹	٦/٤۷	٦۲٤۱۳	۳/۳٦	٦۲٤٤۱	۳/٤۰	٦۰٤۰۹	۰
	۱٥e۱٥	۹۸۳٦٥	۱۰/۳۲	۹۸٦۹۸	۱۰/٦۹	۹٥٤٦۸	۷/۰۷	۸۹۱٦۳	۰	٦٤۰۲۱	۹/٦۸	٦۲۱۰٦	٦/٤۰	٦۱۸٦۹	٦/۰۰	٥۸۳٦۹	۰
	۱۰e۳۰	۱۱۱۰٥۷	۲۰/۹۷	۱۰٤۰۰۲	۱۳/۲۸	۱۰٦۰۰٦	۱٥/٤٦	۹۱۸۰۹	۰	۷۳۹۰٥	۲۱/۷۱	۷۲۰٦۱	۱۸/٦۸	۷۱۱٥۱	۱۷/۱۸	٦۰۷۲۰	۰
	٥۰e٥۰	۳۳۱۳۷	٥۳/۱۱	۳۳٥۲۱٤	٥٤/٥۳	۳۲٥۹۹۳	٤۹/۹۱	۲۱٦۹۲۸	۰	۲۱۷٤۱۸	٥٥/۱۹	۲۱۸۳۲۳	٥٥/۸۳	۲۱۱۸۳٦	٥۱/۲۰	۱٤۰۱۰۰	۰
	۳۰e۱۰۰	۲۷۳۷٤٦	٥٦/۷٦	۲٦۷۷۱٤	٥۳/۳۰	۲٦٥۰۲۱	٥۱/۷٦	۱۷٤۳۳۲	۰	۱۹٤۳۱۱	۱۱/۳۷	۱۹۳۳۱۹	۱۰/۱۳	۱۹۰۸۹۲	۹/۳۱	۱۷٤٦۳۳	۰
	٥۰e۱۰۰	۳۹٥۲۲۲	٦٤/۲۱	۳۸۹٦۹۹	٦۱/۹۲	۳۸۲۹۱۹	٥۹/۱۰	۲٤۰٦۸۰	۰	۲٦٥٤٥۷	٦۱/۱۲	۲٦۱۰۰۰	٥۸/٤۲	۲٦۱٥۳۹	٥۸/۷٥	۱٦٤۷٥۳	۰
میانگین		۳۳/۱٥		۳۲/٦۲		۲۹/۰۳		۰		۲٦/۱۷		۲۳/۷۳		۲۲/۱۳		۰/۲	



شکل ٤. مقایسه عملکرد ۳ الگوریتم در حالت بدون تخفیف



شکل ۵. مقایسه عملکرد ۳ الگوریتم در حالت با تخفیف

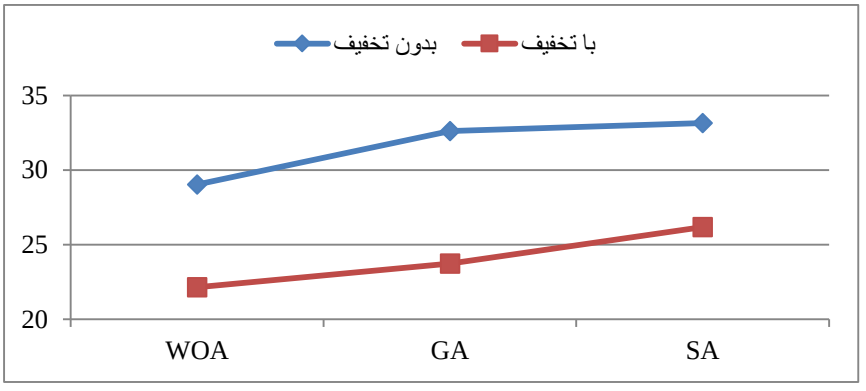
همچنین در مسائل با اعمال محدودیت تخفیف در یک مقایسه مشاهده می‌شود در یک مقایسه کلی بین حالت‌های مختلف مسأله بدون تخفیف بهترین جوابها به ترتیب متعلق به الگوریتم‌های WOA، GA و نهایتاً SA است. نمودار سبز رنگ مربوط به الگوریتم وال است که پایین‌تر از دو نمودار دیگر است بدین معنی که این الگوریتم در بدست آوردن جواب‌های کمینه موفق‌تر عمل کرده است.

جهت بررسی کارآیی الگوریتم‌ها بر روی مساله حمل و نقل هزینه ثابت و همچنین بر مساله جدید با فرض

وجود محدودیت تخفیف، میانگین اختلاف جوابها در هر الگوریتم با بهترین جواب در این دو مساله، مورد بررسی قرار گرفت. همانطور که در شکل شماره ٦ مشاهده می‌شود، الگوریتم‌ها در مساله ی با محدودیت تخفیف، عملکرد بهتری از خود نشان دادند. همچنین ترتیب کارآیی سه الگوریتم در هر دو مساله یکسان است.

۱۰. جمع بندی

با توجه به اهمیت حمل و نقل در دنیای پیشرفته امروزی، این تحقیق به بررسی مسأله حمل و نقل هزینه ثابت از نقطه نظر کاهش هزینه‌ها و زمان پرداخته است. در زمینه حمل و نقل هزینه ثابت تحقیقات بسیاری صورت گرفته است. در این تحقیق در ادامه کارهای قبلی پیرامون مسأله حمل و نقل هزینه ثابت، فرض تخفیف مطابق با شرایط دنیای واقعی، استفاده شده است. الگوریتم‌ها در مساله‌ی با محدودیت تخفیف، عملکرد بهتری از خود نشان دادند. همچنین ترتیب کارآیی سه الگوریتم در هر دو مساله یکسان است. در هر دو مساله به ترتیب الگوریتم‌های WOA، GA و SA عملکرد بهتری از حود نشان دادند. مسأله با چند الگوریتم فراابتکاری به طور همزمان حل شده و نتایج بررسی و مورد مقایسه قرارگرفته‌اند. فرضیاتی همچون بررسی حمل و نقل هزینه ثابت در حالت چند دوره‌ای، بررسی حمل و نقل هزینه ثابت چند سطحی، در نظر گرفتن عدم قطعیت برای دیگر پارامترهای مسأله مانند عرضه، تقاضا، اجرای مدل و انجام یک مطالعه موردی، در نظر گرفتن محدودیت بودجه و ترکیب مسأله اقتصادی با مسأله بررسی شده، استفاده از الگوریتم‌های فراابتکاری چند هدفه (مانندMOPSO,NSGA-II) را می‌توان جهت انجام مطالعات آتی پیشنهاد نمود.



شکل ٦. مقایسه عملکرد ۳ الگوریتم در حالت با و بدون تخفیف

۱۱. پی نوشت‌ها:

[1]Tabu Search Heuristic Procedure
[2] local search method
[3] More for less
[4] Genetic Algorithm
[5] Prüfer number
[6] GAMS
[7] Simulated Annealing (SA)
[8] Whale Optimization Algorithm (WOA)
[9] Design Of Experiments
[10] RSM
[11] Orthogonal Arrayes (OA)

۱۲. مراجع

– شـــورورزی، حســـین، نعیمی، احید و طالعی، محمد. (۱۳۹۵) "بهینه ســازی ســیســتم حمل و نقل ادارات با خوشـــه بندی به روش K میانگین و تـرکـیـب الگوریتم Saving و جســـتجوی ممنوع"، فصلنامه مهندسی حمل و نقل، دوره ۷، شماره ٤، ص. ٦٦٥–٦٧٨.

–فـاطمی قمی، ســید محمد تقی (۱۳۸۳)" برنامه ریزی و کنترل تولید و موجودیها"، شرکت نشر و چاپ بین الملل، ۵۵۰ ص.

-Adlakha, V. and Kowalski, K. (2003) "A simple heuristic for solving small fixed-charge transportation problems", Omega, Vol.31, No. 3, pp. 205-211.

-Adlakha, V., Kowalski, K. and Lev, B. (2010) "A branching method for the fixed charge transportation problem", Omega, Vol.38, No. 5, pp. 393-397.

-Altassan, K. M., El-Sherbiny, M. M. and Abid, A. D. (2014) "Artificial immune algorithm for solving fixed charge transportation problem", Appl. Math, Vol. 8, No. 2, pp. 751-759.

-Ebrahimnejad, A. (2016) "New method for solving Fuzzy transportation problems with LR flat fuzzy numbers", Information Sciences, No. 357, pp.108–124.

-Gen, M. and Syarif, A. (2005) "Hybrid genetic algorithm for multi-time period production/distribution planning", Computers and Industrial Engineering, No. 48, pp.799–809.

-Hajiaghaei-Keshteli, M., Molla-Alizadeh-Zavardehi, S. and Tavakkoli-Moghaddam, R. (2010) "Addressing a nonlinear fixed-charge transportation problem using a spanning tree-based genetic algorithm", Computers and Industrial Engineering, Vol.59, No. 2, pp. 259-271.

-Holland, J. H. (1975) "Adaptation in natural and artificial systems", University of Michigan Press, Ann Arbor.

-Jawahara, N. and Balajib, A.N. (2009) "A genetic algorithm for the two-stage supply chain distribution", Vol.194, No. 2, 496-537.

-Jawahar, N. and Balaji, N. (2011) "A genetic algorithm based heuristic to the multi-period fixed charge distribution problem", Applied Soft Computing, Vol. 12, No. 2, pp. 682–699.

-Jo, J. B., Li, Y. and Gen, M. (2007) "Nonlinear fixed charge transportation problem by spanning tree-based genetic algorithm", Computers and Industrial Engineering, Vol. 53, No. 2, pp. 290-298.

-Juman, Z.A.M.S. and Hoque, M. A. (2015) "An efficient heuristic to obtain a

capacitated fixed-charge transportation problem by artificial immune and genetic algorithms with a Prüfer number representation", Expert Systems with Applications, Vol. 38, No. 8, pp.10462-10474.

فا-Pramanik, S., Janab, D. K, Mondala, S. K. and Maiti, M. (2015) "A fixed-charge transportation problem in two-stage supply chain network in Gaussian type-2 fuzzy environments", Information Sciences, No. 325, pp.190–214.

-Sun, M., Aronson, J. E., Patrick, P. G. and Drinka, D. (1998) "A tabu search heuristic procedure for the fixed charge transportation problem", European Journal of Operational Research, Vol. 106, pp. 441-456.

-Taguchi, G. (1986) "Introduction to quality engineering", Asian Productivity Organization/UNIPUB, White Plains.

-Xie, F. and Jia, R. (2012) "Nonlinear fixed charge transportation problem by minimum cost flow-based genetic algorithm", Computers and Industrial Engineering, Vol. 63, No. 4, pp.763-778.

better initial feasible solution to the transportation problem", Applied Soft Computing, Vol. 34, pp. 813-826.

-Kirkpatrick, S., Gelatt, C. D. and Vecchi, M. P. (1983) "Optimization by simulated annealing", Science, Vol. 220, Issue 4598, pp.671–679.

-Klose, A. (2008) "Algorithms for solving single-sink fixed-charge transportation problem", Computers & Operations Research, Vol. 35, pp.2079–2092.

-Lotfi, M. M. and Tavakkoli-Moghaddam, R. (2013) "A genetic algorithm using priority-based encoding with new operators for fixed charge transportation problems", Applied Soft Computing, Vol. 13, No. 5, pp. 2711-2726.

-Mirjalili, S. A. and Lewis, A. (2016) "The Whale Optimization Algorithm", Advances in Engineering Software, Vol. 95, pp.51–67.

-Molla- Alizadeh- Zavardehi, S., Hajiaghaei-Keshteli, M. and Tavakkoli-Moghaddam, R. (2011) "Solving a

مصطفی حاجی آقائی کشتلی، درجه کارشناسی در رشته مهندسی صنایع را در سال ۱۳۸۵ از دانشگاه علم و صنعت ایران و درجه کارشناسی ارشد در رشته مهندسی صنایع را در سال ۱۳۸۷ از دانشگاه علم و فرهنگ و همچنین درجه دکتری خود در رشته مهندسی صنایع را در سال ۱۳۹۳ از دانشگاه صنعتی امیرکبیر اخذ نمود. زمینه‌های پژوهشی مورد علاقه ایشان مدیریت زنجیره‌های تامین، مسائل حمل و نقل و مسیریابی، تئوری بازی‌ها و کاربردهای آن بوده و در حال حاضر عضو هیات علمی با مرتبه استادیار در دانشگاه علم و فنآوری مازندران است.

سمیرا صادقی مقدم، درجه کارشناسی در رشته مهندسی صنایع گرایش تحلیل سیستم را در سال ۱۳۸٦ از دانشگاه آزاد کرمانشاه و درجه کارشناسی ارشد در رشته مهندسی صنایع گرایش سیستم های اقتصادی اجتماعی را در سال ۱۳۹۵ از دانشگاه علم و فنآوری مازندران اخذ نمود. ایشان فارغ التحصیل ممتاز در دوره کارشناسی ارشد و دارای ده سال سابقه کار در زمینه مدیریت و کنترل پروژه های سد سازی، احداث جاده، خطوط انتقال آب، شبکه های آبیاری و زهکشی و ساختمان می باشد. زمینه های پژوهشی مورد علاقه ایشان بهینه سازی مسائل حمل و نقل، مدیریت پروژه، مدیریت ریسک، و مدیریت استراتژیک است.

مهدی محمودجانلو، درجه کارشناسی در رشته مهندسی صنایع را در سال ۱۳۸٤ از دانشگاه صنعتی شریف و درجه کارشناسی ارشد در رشته مهندسی صنایع را در سال ۱۳۸٦ از دانشگاه صنعتی امیرکبیر اخذ نمود. زمینه‌های پژوهشی مورد علاقه ایشان مدیریت زنجیره‌های تامین، مسائل حمل و نقل و مسیریابی، تئوری بازی‌ها و کاربردهای آن بوده و در حال حاضر عضو هیات علمی با مرتبه مربی در دانشگاه علم و فناوری مازندران است.