



ارائه و حل مدل مکانیابی - مسیریابی و مسائل نقلیه الکتریکی با در نظر گرفتن پنجره زمانی و چندین دپو

یوسف آقایی پور^{۱*}، داریوش شفیع زاده^۲، امیررضا ملک آرا^۳، حمیدرضا حسن پور^۴

۱- دکترای مهندسی صنایع، کارشناس حوزه صنایع خودروسازی، مدرس دانشگاه و شرکت ایران خودرو، کنشگر حوزه خودروسازی سبز

۲- کارشناس ارشد MBA، کارشناس حوزه صنایع خودروسازی، کنشگر حوزه خودروسازی سبز

۳- کارشناس تکنولوژی مکانیک خودرو، کارشناس صنایع خودروسازی، کنشگر حوزه خودروسازی سبز

۴- کارشناس مهندسی فناوری کنترل و ابزار دقیق، کارشناس صنایع خودروسازی، کنشگر حوزه خودروسازی سبز

*yousef.a1359@yahoo.com

ارسال: بهمن ماه ۱۴۰۱ پذیرش: بهمن ماه ۱۴۰۱

چکیده

در لجستیک سبز، وسایل نقلیه دوستدار محیط زیست به شدت به عنوان یک انتخاب برای حمل و نقل توصیه می شود. وسیله نقلیه الکتریکی، یکی از وسایل نقلیه لجستیک سبز می باشد که راه حلی برای کاهش میزان انتشار گازهای گلخانه ای می باشد. در این مقاله به مسئله مکانیابی - مسیریابی و مسائل نقلیه الکتریکی با در نظر گرفتن چندین دپو و پنجره زمانی سخت و نرم در شرایط عدم قطعیت پرداخته شده است. ما یک مدل برنامه ریزی ریاضی فازی و دو هدفه برای وسایل نقلیه الکتریکی با محدودیت ایستگاه های شارژ و وابسته بودن مصرف انرژی به میزان بار وسیله نقلیه و تحویل و دریافت همزمان ارائه داده ایم و از الگوریتمهای فراابتکاری انبوه ذرات چندهدفه برپایه آرشیو پارتو و الگوریتم NSGA-II برای حل مدل استفاده کرده ایم. جهت ارزیابی اعتبار مدل و الگوریتمهای پیشنهادی، مسائل نمونه EVRPTW انتخاب گردیده و با استفاده از نرم افزار گمز و الگوریتمهای فراابتکاری پیشنهادی حل شده اند. نتایج بررسی اعتبار مدل و الگوریتم نشان داد، مدل معتبر بوده و داری ناحیه شدنی می باشد و الگوریتمهای حل، قادر به حل مدل بصورت کارا بوده و به سمت جواب بهینه همگرا می باشند. نتایج مقایسه عملکرد دو الگوریتم حل نشان داد، الگوریتم MOPSO در همه موارد توانایی بالاتری برای تولید جوابهای باکیفیت تر و پراکنده تر نسبت به الگوریتم NSGA-II دارد.

کلمات کلیدی: مسیریابی، مکانیابی، مسائل نقلیه الکتریکی، دریافت و تحویل همزمان.

۱- مقدمه

حمل و نقل در سیستم های اقتصادی، تولیدی و خدماتی از جایگاه مهمی برخوردار است و بخش قابل توجهی از تولید ناخالص ملی هر کشوری را به خود اختصاص می دهد. به همین جهت محققان نسبت به بهبود مسیرها و حذف سفرهای غیرضروری و یا ایجاد

مسیرهای کوتاه جایگزین اقدام نموده‌اند. مسئله مسیریابی و وسایل نقلیه در صدد بهینه کردن سیستم توزیع محصولات بوده، به گونه‌ای که هزینه‌های توزیع و سایر اهداف مورد نظر سازمان بهینه گردد [۱].

توسعه روزافزون شهرنشینی، صنایع بخصوص صنایع پشتیبانی، جابجایی انسان و کالا را بصورت مسئله‌ای درآورده است که پیچیدگی آن دائم در حال افزایش می‌باشد. از سوی دیگر رشد شهری باعث افزایش تقاضا و افزایش شرکت‌های توزیع در صنعت حمل و نقل شده است. هر یک از توزیع کنندگان از یک طرف به دنبال کسب حداکثر سود هستند و از طرف دیگر با مشکلاتی مانند تراکم ترافیکی، آلودگی هوا، اتلاف وقت‌های طولانی در مسیرهای سفرهای روزانه افراد، افزایش مصرف سوخت و استهلاک وسایل نقلیه به منظور توزیع کالا و کسب نقدینگی مواجه هستند [۲].

حمل و نقل، اثرات جبران ناپذیری بر محیط زیست می‌گذارد. مصرف منابع، استفاده از اراضی، تأثیرات سمی بر اکوسیستم و انسان‌ها، سر و صدا و انتشار گازهای گلخانه‌ای و آلاینده‌ها، فقط نمونه‌ای از این خطرات هستند. جدای از اثرات منفی ذکر شده، انتشار گازهای گلخانه‌ای و کربن دی‌اکسید، به طور مستقیم با سلامتی افراد جامعه و غیر مستقیم با تخریب لایه اوزون ارتباط دارد. لزوم توجه به این موضوع از آنجا ناشی می‌شود که گازهای گلخانه‌ای متصاعد توسط بخش حمل و نقل، باعث ایجاد بخش قابل توجهی از آلودگی هوا در کشورهای مختلف جهان هستند [۳]. در میان روش‌های مختلف حمل و نقل وسایل نقلیه دیزلی مخصوص کارهای متوسط تا سنگین حدود یک سوم گازهای گلخانه‌ای تولید شده بوسیله حمل و نقل را به خود اختصاص داده‌اند [۴].

یکی از راهکارهای کاهش آلودگی استفاده از وسایل نقلیه الکتریکی است. این وسایل دارای آلاینده‌گی ناچیزی می‌باشند و نقش به‌سزایی در کاهش میزان گازهای آلاینده دارند. با توجه به محدود بودن سوخت‌های فسیلی، استفاده از وسایل نقلیه الکتریکی نقش به‌سزایی در کاهش مصرف سوخت‌های فسیلی دارد. همچنین وسایل نقلیه الکتریکی کارایی بیشتری نسبت به وسایل نقلیه دیزلی و بنزینی دارد. در وسایل نقلیه دیزلی و بنزینی ۷۵ درصد انرژی به صورت گرما و اصطکاک هدر می‌رود و تنها ۲۵ درصد از انرژی به نیروی محرک چرخ‌ها تبدیل می‌شود. در حالی که در وسایل نقلیه الکتریکی تنها ۲۰ درصد انرژی اتلاف می‌شود. از آنجایی که تعداد قطعات استفاده شده در وسایل نقلیه الکتریکی نسبت به خودروهای معمولی کمتر است و حرارت ایجاد شده آن‌ها نیز کمتر می‌باشد، لذا وسایل نقلیه الکتریکی هزینه نگهداری تعمیرات کمتری نسبت به وسایل نقلیه معمول دارد. همچنین در برخی کشورها، دولت‌ها تسهیلاتی از قبیل کاهش مالیات و عوارض برای خرید وسایل نقلیه الکتریکی و اعطای تسهیلات برای خرید آن‌ها ارائه می‌دهد. مزیت دیگر وسایل نقلیه الکتریکی این است که این وسایل می‌تواند از برق تولید شده توسط چند منبع شارژ شود. این منابع می‌تواند از انرژی باد، خورشیدی، هسته‌ای، آبی و سوخت‌های زیستی تامین شود. استفاده از این منابع می‌تواند میزان وابستگی به نفت و بنزین را کاهش دهد و در نتیجه واردات سوخت کمتری صورت می‌گیرد که باعث کاهش هزینه‌های سوخت وارداتی می‌شود استفاده از این نوع وسایل در صنعت حمل و نقل (عمومی، کالا و ...) رو به افزایش است و مطالعات بسیاری برای طراحی و بهینه‌سازی عملکرد این نوع وسایل صورت گرفته است. محدودیت اصلی در استفاده از وسایل نقلیه الکتریکی حجم پایین انرژی باتری آن‌ها در مقایسه با خودروهای دارای سوخت فسیلی، زمان شارژ مجدد طولانی و محدود بودن جایگاه‌های سوختگیری (شارژ) آنها می‌باشد. از آنجایی که سوختگیری این خودروها به وسیله تجهیزات منحصر به فردی می‌باشد و برخلاف سایر خودروها (از قبیل بنزینی و گازوئیلی) دارای ایستگاه‌های سوختگیری محدودی می‌باشد، لذا باید محدودیت ایستگاه‌های شارژ این خودروها نیز در نظر گرفته شود. محدودیت دیگر این وسایل وابسته بودن مصرف میزان انرژی به میزان بار و وسیله نقلیه است که این خود باعث اعمال محدودیت‌هایی در دنیای واقعی می‌گردد. با این حال و به دلیل میزان تاثیر مثبت آنها در کاهش آلودگی هوا، طراحی و ایجاد جایگاه‌های سوختگیری رو به افزایش است. شایان ذکر است که کاهش در سوخت مصرفی به کاهش هزینه‌های سرویس دهی و در نتیجه رضایت مشتریان می‌انجامد [۵].

در مقاله حاضر به مسئله مکانیابی- مسیریابی وسایل نقلیه الکتریکی با در نظر گرفتن همزمان مفروضات چندین دپو، میزان مصرف انرژی وسایل نقلیه الکتریکی وابسته به بار، دریافت و تحویل همزمان و پنجره زمانی سخت و نرم پرداخته شده است. در این راستا یک مدل برنامه ریزی ریاضی فازی و دو هدفه برای وسایل نقلیه الکتریکی با محدودیت ایستگاه‌های شارژ و وابسته بودن مصرف

انرژی به میزان بار وسیله نقلیه ارائه شده و همچنین جهت حل مدل از الگوریتمهای فراابتکاری انبوه ذرات چندهدفه برپایه آرشو پارتو و الگوریتم NSGA-II استفاده شده است.

۲- پیشنهاد تحقیقاتی

اردوگان و میلر- هوکس (۲۰۱۲) به بررسی مساله حمل و نقل با در نظر گرفتن جایگاه های سوخت پرداختند. مدل ارائه شده توسط آنها یک مدل برنامه ریزی عدد صحیح می باشد که در آن برای هر جایگاه سوخت تعدادی گره مجازی تعریف می شود که این خود باعث افزایش ابعاد مسئله و در نتیجه افزایش جواب حل می گردد. در مدل پیشنهادی وسایل نقلیه همگن در نظر گرفته شده است و معادلات پنجره زمانی در مدل اعمال شده است. آن ها دو الگوریتم ابتکاری برای حل در ابعاد بزرگ ارائه دادند. اولین الگوریتم مبتنی بر الگوریتم صرفه جویی کلارک و رایت می باشد. دومین الگوریتم مبتنی بر چگالی خوشه بندی فاصله ای می باشد. در نتایج محاسباتی این دو الگوریتم تقریباً نتایج محاسباتی مشابهی داشتند [۵].

اشنایدر و همکاران (۲۰۱۴) یک مدل مسیریابی با در نظر گرفتن وسایل نقلیه الکتریکی، پنجره زمانی و جایگاه های سوخت ارائه دادند. در مدل آنها نیز افزودن جایگاه های سوخت مجازی اعمال شده است. آن ها برای حل از یک الگوریتم ترکیبی که شامل الگوریتم جستجوی محلی و جستجوی ممنوعه بود بهره جستند. نتایج عددی به دست آمده در مسائل نمونه متقاعد کننده بود [۶]. فیلیپ و همکاران (۲۰۱۴) مساله مسیریابی وسایل نقلیه الکتریکی را با در نظر گرفتن تکنولوژی شارژ در ایستگاه های سوختگیری مطرح نمودند. همچنین آنها شارژ نیمه کامل را نیز در مدل در نظر گرفتند. آن ها از الگوریتم های شبیه سازی تیرید و جستجوی محلی برای حل استفاده کردند. در مشاهدات با حداکثر ۲۰۰ مشتری الگوریتم جستجوی محلی و در مشاهدات بیشتر از ۲۰۰ مشتری الگوریتم شبیه سازی تیرید عملکرد بهتری داشته است [۷].

گوک و اشنايدر (۲۰۱۵) یک مساله مسیریابی وسایل نقلیه الکتریکی با پنجره زمانی و در نظر گرفتن ناوگان مختلط که شامل وسایل نقلیه الکتریکی تجاری و وسایل نقلیه مرسوم است ارائه دادند. در این مدل فرض شده است که نرخ مصرف سوخت یک تابع خطی از مسافت طی شده می باشد. همچنین معادلات مصرف سوخت، سرعت، شیب و وزن محموله در محدودیت ها اعمال شده است. روش حل آن ها استفاده از الگوریتم جستجوی همسایگی میباشد [۸].

کخ و کارااگلان (۲۰۱۶) یک مدل برنامه ریزی خطی عدد صحیح ارائه دادند که در آن نیازی به افزودن گره های مجازی برای جایگاه های سوخت نمی باشد. آن ها با استفاده از تعریف پارامترها و متغیرهای تصمیم کمکی به مدل سازی مساله مسیریابی وسایل نقلیه سبز پرداختند. آنها با استفاده از الگوریتم فراابتکاری شبیه سازی تیرید و الگوریتم دقیق شاخه و کران به حل مدل پیشنهادی پرداختند [۹].

کشین و کتی (۲۰۱۶) محدودیت شارژ کامل را آزاد کردند و به وسیله نقلیه اجازه دادند که شارژ نیمه کامل انجام دهد که در دنیای واقعی کاربردی تر است و زمان شارژ را کاهش خواهد داد. آنها یک برنامه ریزی عدد صحیح ارائه دادند و برای حل از جستجوی همسایگی انطباقی استفاده کردند. نتایج محاسباتی آن ها نشان می داد که شارژ مجدد نیمه کامل ممکن است تصمیمات مسیریابی را بهبود بخشد. هم چنین نتایج محاسباتی نشان داد که روش پیشنهادی آن ها در مقایسه با سایر مقالات مشابه در پیدا کردن راه حلها یا کیفیت موثرتر است [۱۰].

رابرتی و ون (۲۰۱۶) مسئله مسیریابی را به منظور بازدید هر مشتری در نظر گرفتند که پنجره زمانی نیز در مدل پیشنهادی آنها اعمال شده است. مدل برنامه ریزی عدد صحیح پیشنهادی مسائل با اندازه ۲۰ مشتری را در زمانی معقول حل می کند. برای به دست آوردن راه حل های با کیفیت در زمان مناسب یک الگوریتم ۳ مرحله ای مبتنی بر جستجوی همسایگی متغیر و برنامه ریزی پویا ارائه دادند. نتایج محاسباتی آن ها نشان می داد که الگوریتم پیشنهادی مشاهدات سائز کوچک را در زمان یک دهم ثانیه محاسبه می کند و برای مشاهدات بالای ۲۰۰ مشتری راه حل های خوبی به دست می آورد [۱۱].

هیرمن و همکاران (۲۰۱۶) یک مدل برنامه ریزی خطی عدد صحیح برای مساله مسیریابی وسایل نقلیه الکتریکی که ناوگان حمل و نقل مختلط است ارائه دادند. در این مدل فرض شده است ظرفیت و هزینه استفاده از وسایل نقلیه بسته به نوع آن ها متفاوت است. آن ها در مدل، محدودیت های پنجره ی زمانی و زمان شارژ هر وسیله نقلیه را نیز در نظر گرفتند. برای حل مدل از الگوریتم شاخه و قیمت و همچنین یک روش ابتکاری ترکیبی شامل جستجوی همسایگی بزرگ و جستجوی محلی درج شده به علاوه فرآیند نشانگذاری استفاده کردند [۱۲].

دایستد و همکاران (۲۰۱۶) مدلی برای وسایل نقلیه که دارای موتورهای ترکیبی احتراقی و الکتریکی است پرداختند. آن ها هزینه حمل به هر گره را در ۲ حالت در نظر گرفتند. اولین حالت که وسیله نقلیه با موتور احتراقی حرکت می کند و در این حالت موتور الکتریکی شارژ می شود. دومین حالت این است که وسیله نقلیه با ترکیبی از موتور احتراقی و الکتریکی به حرکت می پردازد. آن ها برای حل از یک روش ابتکاری ۲ مرحله ای استفاده کردند. ابتدا یک جواب اولیه تولید می گردد و سپس در فاز بهبود از عملگرهای جستجوی محلی و ۲-opt استفاده کردند [۱۳].

شیفر و والتر (۲۰۱۷) مسئله مسیریابی وسائل نقلیه الکتریکی را با در نظر گرفتن پنجره زمانی بررسی کرده اند. آنها مسئله مسیریابی وسائل نقلیه و مکانیابی ایستگاه های شارژ را بطور همزمان بررسی کرده و با توجه به محدودیت های دنیای واقعی، گزینه های مختلف شارژ را لحاظ نموده اند. در مدل آنها، فاصله سفر، تعداد وسائل نقلیه، تعداد ایستگاه های شارژی و هزینه کلی کمینه می گردد [۱۴]. کامیلو پاز و همکاران (۲۰۱۸) به مسئله مکانیابی - مسیر وسائل نقلیه الکتریکی با در نظر گرفتن چندین دپو و پنجره زمانی پرداخته اند. آنها در دسترس بودن دو تکنولوژی تامین انرژی را در نظر گرفته اند که عبارتند از: تکنولوژی شارژ متعارف "Plug-in" و

ایستگاه B Lotus

همانطور که مشاهده می گردد، در سالهای اخیر به مسیریابی - مکانیابی وسائل نقلیه الکتریکی توجه زیادی شده است. اما همانطور که مشاهده می شود، در تحقیقات گذشته، کامیلو پاز و همکاران (۲۰۱۸) و قبادی و همکاران (۲۰۲۱) در تحقیق خود چندین دپو در نظر گرفته اند و در سایر تحقیقات، تنها یک دپو را در مدل خود لحاظ نموده اند. از طرفی، در تحقیقات گذشته به فرض وابستگی میزان مصرف انرژی وسایل نقلیه الکتریکی به بار و دریافت و تحویل همزمان نیز توجه نشده است. لذا در تحقیق حاضر، جهت پر سازی شکاف تحقیقاتی موجود، مسئله مکانیابی - مسیریابی وسائل نقلیه الکتریکی با در نظر گرفتن همزمان مفروضات چندین دپو، میزان مصرف انرژی وسایل نقلیه الکتریکی وابسته به بار، دریافت و تحویل همزمان و پنجره زمانی سخت و نرم بررسی شده است.

جدول ۱- خلاصه تحقیقات پیشین

محقق (سال تحقیق)	موضوع تحقیق	مکانیابی	مسیریابی	چند دپو	میزان مصرف انرژی وابسته به بار	پنجره زمانی	دریافت و تحویل همزمان	عدم قطعیت	چند هدفه	روش حل
اردوگان و میلر- هوکس (۲۰۱۲)	حمل و نقل با در نظر گرفتن جایگاه های سوخت		*			*				الگوریتمهای ابتکاری

محقق (سال تحقیق)	موضوع تحقیق	مکانیابی	مسیریابی	چند دپو	میزان مصرف انرژی وابسته به بار	پنجره زمانی	دریافت و تحویل همزمان	عدم قطعیت	چندهدفه	روش حل
اشنایدر و همکاران (۲۰۱۴)	مسیریابی با در نظر گرفتن وسایل نقلیه الکتریکی، پنجره زمانی و جایگاه های سوخت		*			*				الگوریتم جستجوی ممنوع
فیلیپ و همکاران (۲۰۱۴)	مسیریابی وسایل نقلیه الکتریکی را با در نظر گرفتن تکنولوژی شارژ در ایستگاه های سوختگیری		*			*				الگوریتم شبیه سازی تبرید
گوک و اشنایدر (۲۰۱۵)	مسیریابی وسایل نقلیه الکتریکی با پنجره زمانی		*		*	*				الگوریتم جستجوی همسایگی
کخ و کاراگلان (۲۰۱۶)	مدلسازی مساله مسیریابی وسایل نقلیه سبز		*							الگوریتم شبیه سازی تبرید و روش شاخه و کران
کشین و کتی (۲۰۱۶)	مسیریابی وسایل نقلیه الکترونیک با شارژ کامل و نیمه		*		*	*				جستجوی همسایگی انطباقی
رابرتی و ون (۲۰۱۶)	مسیریابی وسایل نقلیه الکترونیک		*			*				مبتنی بر جستجوی همسایگی متغیر و برنامه ریزی پویا

محقق (سال تحقیق)	موضوع تحقیق	مکانیابی	مسیریابی	چند دپو	میزان مصرف انرژی وابسته به بار	پنجره زمانی	دریافت و تحویل همزمان	عدم قطعیت	چندهدفه	روش حل
هیرمن و همکاران (۲۰۱۶)	مسیریابی وسایل نقلیه الکتریکی با ناوگان حمل و نقل مختلط		*			*				روش شاخه و کران و یک الگوریتم ابتکاری مبتنی بر جستجوی همسایگی
دایستد و همکاران (۲۰۱۶)	مسیریابی وسایل نقلیه با موتورهای ترکیبی احتراقی و الکتریکی		*							الگوریتم ابتکاری
شیفر و والتر (۲۰۱۷)	مسیریابی وسایل نقلیه الکتریکی	*	*			*			*	الگوریتم ابتکاری
کامیلو پاز و همکاران (۲۰۱۸)	مکانیابی-مسیر وسایل نقلیه الکتریکی	*	*	*		*				الگوریتم ابتکاری
آلموهانا و همکاران (۲۰۱۹)	مکانیابی-مسیر وسایل نقلیه الکتریکی	*	*	*		*		*		الگوریتمهای فراابتکاری
قبادی و همکاران (۲۰۲۱)	مکانیابی-مسیر وسایل نقلیه الکتریکی	*	*	*		*	*	*		الگوریتمهای فراابتکاری
تحقیق حاضر	مکانیابی- مسیریابی وسایل نقلیه الکتریکی با در نظر گرفتن پنجره زمانی و چندین دپو	*	*	*	*	*	*	*	*	نرم افزار گمز، الگوریتمهای فراابتکاری انبوه ذرات چندهدفه برپایه آرشیو پارتو و الگوریتم NSGA-II

همانطور که در جدول (۱) مشاهده می گردد، تحقیقات اندکی در مسئله مکانیابی- مسیریابی وسایل نقلیه الکتریکی، چندین دپو و میزان مصرف شارژ وابسته به بار را در نظر گرفته اند. همچنین بیشتر مدل‌های ارائه شده بصورت تک هدفه و قطعی می باشند. این در حالی است که در تحقیق حاضر، مکانیابی- مسیریابی وسایل نقلیه الکتریکی با چندین دپو و میزان مصرف شارژ وابسته به بار در شرایط فازی بررسی شده و برای این مسئله، یک مدل ریاضی دو هدفه طراحی گردیده است. همچنین، در تحقیقات پیشین در زمینه مکانیابی- مسیریابی وسایل نقلیه الکتریکی، تاکنون فرض همزمان بودن دریافت و تحویل کالا بررسی نگردیده است. همانطور که

گفته شد، در تحقیق حاضر، این فرض لحاظ گردیده است. وجه تمایز دیگر تحقیق حاضر با تحقیقات پیشین، در روش حل است. در تحقیق حاضر از نرم افزار گمز جهت حل مسئله با اندازه های کوچک و از الگوریتمهای فراابتکاری انبوه ذرات چند هدفه برپایه آرشیو پارتو و NSGA-II جهت حل مسائل با اندازه های بزرگ استفاده شده است. در ساختار پیشنهادی الگوریتمهای حل، از روش جستجوی همسایگی متغیر (VNS) جهت بهبود جوابها استفاده گردیده است.

۳- مدل سازی ریاضی

در تحقیق حاضر مسئله مکانیابی- مسیریابی وسائل نقلیه الکتریکی با در نظر گرفتن چندین دپو و پنجره زمانی بررسی گردیده است. این مسئله شامل چندین وسیله نقلیه، چندین ایستگاه شارژ و چندین دپو می باشد که ایستگاه های شارژ و دپوها مکانیابی می گردند. در تحقیق حاضر شارژ بصورت کامل مد نظر بوده و نرخ مصرف سوخت وابسته به میزان باری است که وسایل نقلیه در هر مسیر حمل می کنند. یعنی یک وسیله نقلیه با نرخ مصرف معین اگر یک مسیر را بدون بار و همان مسیر را با بار طی کنند قطعا میزان مصرف سوخت آن متفاوت خواهد بود. لذا ما در این تحقیق بر خلاف تحقیقات پیشین مصرف سوخت وسایل نقلیه الکتریکی را وابسته به میزان بار حمل شده در نظر گرفته ایم. در نظر گرفتن این مهم می تواند در انتخاب مسیر بهینه نقش بسزایی داشته باشد و قطعا بر روی بازدید یا عدم بازدید جایگاه های سوخت نقش موثری دارد. همچنین در مدل مورد بررسی، دریافت و تحویل بصورت همزمان فرض شده و هر نقطه دارای دو نوع تقاضای دریافت و تحویل است که بصورت فازی در نظر گرفته شده است. همچنین سرویس دهی به نقاط تقاضا باید در پنجره زمانی از پیش تعیین شده صورت گیرد.

فرضیات مدل مورد بررسی به شرح زیر است:

- وسائل نقلیه دارای ظرفیت محدود هستند.
- مصرف شارژ توسط وسیله نقلیه وابسته به بار وسیله نقلیه میباشد.
- در این مدل، برخی پارامترها قطعی و برخی غیر قطعی در نظر گرفته شده اند.
- مسئله مسیریابی ترکیبی شامل مشتریان، چندین انبار (دپو) و مجموعه ای از ایستگاهها جهت شارژ باطری می باشد.
- مکانیابی دپوها و ایستگاه های شارژ مد نظر است.
- هر ایستگاه شارژ مجاز است که اصلا ملاقات نشود یا بیشتر از یکبار ملاقات شود.
- وسایل نقلیه برای ملاقات همه مشتریان نیاز می باشد. در واقع کلیه مشتریان باید ملاقات شوند.
- دو نوع پنجره زمانی سخت و نرم در نظر گرفته شده است. سرویس هایی که خارج از بازه زمانی سخت و درون بازه زمانی نرم $[Lb_i, Ub_i]$ باشند (بر حسب دیرکرد) مشمول یک هزینه جریمه ثابت و مشخص در واحد زمان می شوند.
- سرویس دهی در خارج از محدوده زمانی نرم مجاز نمی باشد.
- دریافت و تحویل بصورت همزمان در نظر گرفته شده است.
- مدل به صورت دو هدفه میباشد.

۳-۱- اندیسهای مدل

N : مجموعه کلیه گره ها (مشتریان، دپوها، ایستگاه های شارژ)

N_c : مجموعه مشتریان، C اندیس مشتریان

N_f : مجموعه نقاط بالقوه ایستگاههای شارژ، f اندیس ایستگاه شارژ

N_d : مجموعه نقاط بالقوه دپوها، d اندیس دپو

K : تعداد وسائل نقلیه، k اندیس وسیله نقلیه.

۲-۳- پارامترهای مدل

- d_{ij} : فاصله بین گره i و j
- C_k : هزینه متغیر استفاده از وسیله نقلیه k ام در واحد مسافت
- f_c : هزینه ثابت استفاده از یک وسیله نقلیه
- C_0 : هزینه هر واحد شارژ
- \bar{p}_0 : نرخ مصرف شارژ در واحد مسافت
- $\tilde{\alpha}$: نرخ مصرف شارژ وابسته به بار وسیله نقلیه در واحد مسافت
- W_p : وزن هر واحد محصول تحویل داده شده و دریافت شده
- \bar{d}_c : میزان تقاضای فازی تحویل به مشتری c ام.
- \tilde{p}_c : میزان تقاضای فازی دریافت از مشتری c ام.
- $\bar{c}ap_k$: ظرفیت فازی بار وسیله نقلیه k ام برحسب کیلوگرم.
- \bar{Q} : ظرفیت فازی باطری هر وسیله نقلیه.
- t_{ij} : زمان سفر بین گره i و j
- M : یک عدد بزرگ به دلخواه
- $\bar{P}l_i$: مقدار جریمه فازی دیرکرد
- $[e_i, l_i]$: پنجره زمانی سخت گره i ام
- $[Lb_i, Ub_i]$: پنجره زمانی نرم گره i ام



f_f : هزینه تاسیس ایستگاه شارژ در نقطه f

f_d : هزینه تاسیس دپو در نقطه d

۳-۳- متغیرهای مدل

- Z_f : اگر در نقطه f ایستگاه شارژ مکانیابی شود برابر با ۱ و در غیراینصورت برابر با ۰ خواهد بود.
- Z_d : اگر در نقطه d دپو مکانیابی شود برابر با ۱ و در غیراینصورت برابر با ۰ خواهد بود.
- Z_k : اگر از وسیله نقلیه k ام استفاده شود برابر با ۱ و در غیراینصورت برابر با ۰ خواهد بود.
- x_{ij}^{kd} : اگر وسیله نقلیه k ام که سفر خود را از دپو d آغاز کرده است، بین دو نقطه i و j سفر کند برابر با ۱ بوده و در غیر اینصورت برابر با ۰ میباشد.
- y_{ij}^{kd} : میزان تقاضای تحویل داده شده به مشتری در گره j است اگر وسیله نقلیه k ام بین دو نقطه i و j سفر کند (وسیله نقلیه ای که سفر خود را از دپو d آغاز کرده است).
- Z_{ij}^{kd} : میزان تقاضای دریافت شده از مشتری در گره j است اگر وسیله نقلیه k ام بین دو نقطه i و j سفر کند.
- a_i : زمان رسیدن وسیله نقلیه به مکان هر گره i
- p_i : زمان ترک وسیله نقلیه از مکان هر گره i
- St_i : زمان سرویس برای هر گره i
- γ_{ck} : مقدار شارژی که وسیله نقلیه k ام به هنگام ملاقات مشتری c ام دارد.
- γ_{fk} : مقدار شارژی که وسیله نقلیه k ام به هنگام رسیدن به ایستگاه شارژ f ام دارد.

w_{ij}^k : مقدار باری که وسیله نقلیه k ام بین دو گره i و j حمل می کند.

YI_i : میزان دیرکرد سرویس دهی گره i

۳-۴- ساختار اصلی مدل ریاضی

$$z1 = \sum_{f=1}^{N_f} f_f \times z_{f_c} + \sum_{d=1}^{N_d} f_d \times z_{d_c} + \sum_{k=1}^K f_c \times z_{k_c} + \sum_{k=1}^K \sum_{d=1}^{N_d} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \left[(C_{k,d} x_{ij}^{kd} + c) \times d_{ij} ((\rho_0)^{\alpha} + \alpha \times [w_{ij}^k] x_{ij}^{kd}) \right] \quad (1)$$

تابع هدف اول: کمینه سازی هزینه ها

$$z2 = \sum_{i=1}^N (PI)_i \times [YI]_i \quad (2)$$

تابع هدف دوم: کمینه سازی دیرکرد ارائه یا دریافت سرویس به هر گره بطوریکه:

$$\sum_{d=1}^{N_d} \sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^K x_{ij}^{kd} = 1 \quad \forall j \in N_c \quad (3)$$

محدودیت (۳) تضمین می کند که مشتری j حتما ملاقات می شود.

$$\sum_{j=1}^N \sum_{d=1}^{N_d} \sum_{k=1}^K x_{ij}^{kd} = \sum_{j=1}^N \sum_{d=1}^{N_d} \sum_{k=1}^K x_{ji}^{kd} \quad \forall i \in N \quad (4)$$

محدودیت (۴) نشان می دهد که وسایل نقلیه وارد شده به یک گره، حتما از آن گره خارج می گردند.

$$\sum_{j=1}^N x_{dj}^{kd} = \sum_{j=1}^N x_{jd}^{kd} \quad \forall d \in N_d, \forall k \in K \quad (5)$$

محدودیت (۵) نشان می دهد که وسایل نقلیه ای که سفر خود را از دپوی d آغاز کرده اند حتما در پایان سفر به همان دپو بازگردند.

$$\sum_{j=1}^N x_{ij}^{kd} \leq 1 \quad \forall i \in N_f, d \in N_d, \forall k \in K \quad (6)$$

محدودیت (۶) نشان می دهد یک ایستگاه شارژ ممکن است ملاقات گردد یا ننگردد.

$$\sum_{j=1}^N \sum_{d=1}^{N_d} \sum_{k=1}^K x_{ij}^{kd} y_{ji}^{kd} - \sum_{j=1}^N \sum_{d=1}^{N_d} \sum_{k=1}^K x_{ij}^{kd} y_{ij}^{kd} = d_i \quad \forall i \in N_c \quad (7)$$

$$\sum_{j=1}^N \sum_{d=1}^{N_d} \sum_{k=1}^K x_{ij}^{kd} z_{ij}^{kd} - \sum_{j=1}^N \sum_{d=1}^{N_d} \sum_{k=1}^K x_{ji}^{kd} z_{ji}^{kd} = p_i \quad \forall i \in N_c \quad (8)$$

دو محدودیت (۷) و (۸) تضمین می کنند که تقاضاهای تحویل و دریافت هر مشتری i ام پاسخ داده شود.

$$\sum_j [x_{ji}^{kd} w]_{ji}^k + \sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^K [w_p x]_{ji}^{kd} y_{ji}^{kd} = \sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^K [w_p x]_{ji}^{kd} z_{ji}^{kd} + \sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^K x_{ij}^{kd} w_{ij}^k \quad \forall i \in N, d \in N_d \quad (9)$$

محدودیت (۹)، مقدار بار وسیله نقلیه را محاسبه می کند.

$$w_{ij}^k \leq \widehat{cap}_k \times x_{ij}^{kd} \quad \forall i, j \in N, d \in N_d, k \in K \quad (10)$$

محدودیت (۱۰) تضمین می کند بار وسیله نقلیه از ظرفیت آن تجاوز نکند.

$$d_{ij}(\widehat{\rho}_0 + \widetilde{\alpha} w_{ij}^k) x_{ij}^{kd} - \widetilde{Q}(1 - x_{ij}^{kd}) \leq y_{ik} - y_{jk} \quad \forall i \in N_c, j \in N_c, d \in N_d, k \in K \quad (11)$$

$$y_{ik} - y_{jk} \leq d_{ij}(\widehat{\rho}_0 + \widetilde{\alpha} w_{ij}^k) x_{ij}^{kd} + \widetilde{Q}(1 - x_{ij}^{kd}) \quad \forall i \in N_c, j \in N_c, d \in N_d, k \in K \quad (12)$$

$$d_{ij}(\widehat{\rho}_0 + \widetilde{\alpha} w_{ij}^k) x_{ij}^{kd} - \widetilde{Q}(1 - x_{ij}^{kd}) \leq y_{ik} - y_{jk} \quad \forall i \in N_c, j \in N_f, d \in N_d, k \in K \quad (13)$$

$$y_{ik} - y_{jk} \leq d_{ij}(\widehat{\rho}_0 + \widetilde{\alpha} w_{ij}^k) x_{ij}^{kd} + \widetilde{Q}(1 - x_{ij}^{kd}) \quad \forall i \in N_c, j \in N_f, d \in N_d, k \in K \quad (14)$$

محدودیت‌های (۱۱) الی (۱۴) میزان شارژ شارژ باقیمانده را در هر گره محاسبه می کنند.

$$y_{ik} \geq d_{id}(\bar{\rho}_0 + \bar{\alpha}w_{ij}^k)x_{ij}^{kd} \quad \forall i \in N_c, d \in N_d, k \in K \quad (15)$$

محدودیت (۱۵) تضمین می کند که میزان شارژ وسیله نقلیه برای بازگشت به دپو کافی باشد.

$$y_{ik} = \bar{Q} \quad \forall i \in N_d \cup N_f, \forall k \in K \quad (16)$$

محدودیت (۱۶) تضمین میکند وسیله نقلیه به هنگام ملاقات ایستگاه شارژ، به اندازه ظرفیت خود شارژ دریافت می کند و همچنین هر وسیله نقلیه با شارژ کامل از دپوها خارج می شود.

$$a_j \geq (a_i + St_i) - ((1 - x_{ij}^{kd})M) + t_{ij}, \forall k \in K, \quad i, j \in N, d \in N_d \quad (17)$$

$$a_j \leq (a_i + St_i) + ((1 - x_{ij}^{kd})M) + t_{ij}, \quad \forall k \in K, \quad i, j \in N, d \in N_d \quad (18)$$

محدودیت های (۱۷) و (۱۸) مربوط به پنجره زمانی است و شدنی بودن برنامه زمانی هر کدام از گرهها را تضمین می کند و اگر گره i از گره j سرویس دهی نشود این دو محدودیت غیر فعال است.

$$P_1 = 0 \quad (19)$$

$$Lb_i \leq a_i \leq Ub_i \quad \forall i \in N \quad (20)$$

$$p_i \geq St_i + a_i \quad \forall i \in N \quad (21)$$

$$a_i - l_i \leq Yl_i \quad \forall i \in N \quad (22)$$

شماره (۱۹) نشان می دهد که زمان ترک مبدا در لحظه ۰ می باشد. محدودیت های (۲۰) و (۲۱) نشان می دهد که زمان رسیدن، ترک کردن و زمان سرویس هر گره باید درون بازه زمانی نرم قرار گیرد. محدودیت های (۲۲) مقدار دیرکرد سرویس دهی در هر گره را بیان می کند.

$$x_{ij}^{kd} \leq Mz_d \quad \forall k \in K, \quad i, j \in N, d \in N_d \quad (23)$$

محدودیت (۲۳) تضمین می کند در صورتی یک وسیله نقلیه از یک دپو سفر خود را جهت پیمودن یالها آغاز می کند که آن دپو تاسیس شده باشد.

$$x_{ij}^{kd} \leq Mz_f \quad \forall k \in K, \quad i \text{ or } j \in N_f, d \in N_d \quad (24)$$

$$y_{ik} \leq Mz_f \quad \forall k \in K, \quad i \in N_f, k \in K \quad (25)$$

محدودیت‌های (۲۴) و (۲۵) تضمین می کند در صورتی یک وسیله نقلیه یک ایستگاه شارژ را ملاقات می کند که آن ایستگاه تاسیس شده باشد.

$$x_{ij}^{kd}, z_d, z_f = \{0,1\}, y_{ik}, z_{ij}^{kd}, y_{ij}^{kd}, w_{ij}^k, a_i \geq 0 \quad \forall i, j \in N, d \in N_d \quad (26)$$

محدودیت (۲۶)، محدوده مقادیر متغیرهای تصمیم مدل را نشان می دهد.

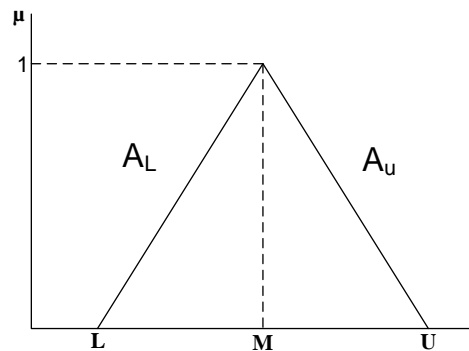
همانطور که در عبارات (۱) و (۲) مشاهده می شود، تابع هدف اول شامل کمینه سازی هزینه های مکانیابی دپوها، ایستگاههای شارژ و هزینه استفاده از وسائل نقلیه است. کمینه سازی این هزینه ها، به معنای تاسیس کمتر دپو، ایستگاه شارژ و استفاده از تعداد کمتر وسائل نقلیه است که در اینصورت، سطح خدمات رسانی و یا ارائه خدمات به موقع، پایین آمده و سبب ایجاد دیرکرد می شود. لذا بدیهی است که با کاهش هزینه های مکانیابی دپوها، ایستگاههای شارژ و هزینه استفاده از وسائل نقلیه، دیرکرد افزایش می یابد. عبارتی کاهش تابع هدف اول، سبب افزایش تابع هدف دوم شده و این دو تابع هدف با یکدیگر در تضاد هستند.

۳-۵- دیفازی کردن مدل

روشهای متعددی برای حل مسائل برنامه ریزی ریاضی فازی پیشنهاد شده است. در این تحقیق از روش رتبه بندی ارایه شده توسط خیمنز و همکاران (۲۰۰۷) استفاده شده است. خیمنز یک روش رتبه بندی اعداد فازی بر مبنای مقایسه بازه انتظار آنها پیشنهاد داد

[۱۶]. اگر عدد فازی مثلثی به شکل $\tilde{A} = \{L, M, U\}$ باشد آن را می توان بصورت زیر نوشت (شکل ۱):

$$\mu_A(x) = \begin{cases} f_A(x) = \frac{X-L}{M-L} & L \leq X \leq M \\ g_A(x) = \frac{X-L}{U-M} & M \leq X \leq U \end{cases} \quad (27)$$



شکل ۱- عدد فازی مثلثی

برای تضمین اینکه معکوس توابع $f_A(x)$ و $g_A(x)$ وجود دارد فرض می شود $f_A(x)$ پیوسته و صعودی و $g_A(x)$ پیوسته و نزولی است. بازه انتظاری یک عدد فازی بصورت زیر تعریف می شود:

$$EI(\tilde{A}) = [E_1^{\tilde{A}}, E_2^{\tilde{A}}] = \left[\int_{a_1}^{a_2} xdf_A(x) - \int_{a_3}^{a_4} xdg_A(x) \right] \quad (28)$$

با تجمیع اجزا و با تغییر متغیر خواهیم داشت:

$$EI(\tilde{A}) = [E_1^{\tilde{A}}, E_2^{\tilde{A}}] = \left[\int_0^1 f_A^{-1}(\alpha) d\alpha - \int_0^1 g_A^{-1}(\alpha) d\alpha \right] \quad (29)$$

اگر توابع $f_A(x)$ و $g_A(x)$ خطی باشند و \tilde{A} یک عدد فازی مثلثی باشد بازه انتظاری آن بصورت زیر خواهد بود:

$$EI(\tilde{A}) = \left[\frac{1}{2}(L+M), \frac{1}{2}(M+U) \right] \quad (30)$$

و همچنین ارزش انتظاری عدد فازی \tilde{A} نصف مقدار بازه انتظاری است.

$$EV(A) = \frac{E_1^{\tilde{A}} + E_2^{\tilde{A}}}{2} \quad (31)$$

و برای عدد فازی مثلثی \tilde{A} بصورت زیر است:

$$EV(A) = \frac{L+2M+U}{2} \quad (32)$$

تعریف ۱- برای هر دو عدد فازی \tilde{A} و \tilde{B} درجه عضویت بزرگتر بودن \tilde{A} از \tilde{B} به شکل زیر است:

$$\mu_M(\tilde{A}, \tilde{B}) = \begin{cases} 0 & \text{if } E_2^A - E_1^B < 0 \\ \frac{E_2^A - E_1^B}{E_2^A - E_2^B - (E_1^A - E_2^B)} & \text{if } 0 \in [E_1^A - E_2^B, E_2^A - E_1^B] \\ 1 & \text{if } E_1^A - E_2^B > 0 \end{cases} \quad (33)$$

بطوری که $[E_1^A, E_2^A]$ و $[E_1^B, E_2^B]$ بازه های انتظاری \tilde{A} و \tilde{B} هستند. وقتی که $\mu_M(\tilde{A}, \tilde{B}) = 0.5$ باشد میگوییم که \tilde{A} و \tilde{B} یکسان هستند. وقتی که $\mu_M(\tilde{A}, \tilde{B}) \geq \alpha$ باشد میگوییم که \tilde{A} با حداقل درجه α بزرگتر مساوی \tilde{B} است و آن را با نشان $\tilde{A} \geq_{\alpha} \tilde{B}$ می دهیم.

تعریف ۲- فرض کنید بردار $x \in R^n$ باشد، گفته میشود با درجه α قابل قبول است اگر $\min \{ \mu_M(\tilde{A}x, \tilde{B}) \} = \alpha$ که میتوان آن را با $\tilde{A}x \geq_{\alpha} \tilde{B}$ نشان داد. می توان رابطه (۳۱) را بصورت زیر بازنویسی کرد:

$$\frac{E_2^{Ax} - E_1^B}{E_2^{Ax} - E_1^{Ax} + E_2^B - E_1^B} \geq \alpha \quad (34)$$

$$[(1-\alpha)E_2^A + \alpha E_1^A]x \geq \alpha E_2^B + (1-\alpha)E_1^B$$

بنابراین با توجه به تعاریف بالا میتوانیم مدل فازی را به مدل قطعی و دقیق نظیرش تبدیل کنیم. بصورت زیر:

$$MinEV(\tilde{C})x$$

$$s.t : \quad (35)$$

$$x \in \{x \in R^n \mid \tilde{A}x \geq_{\alpha} \tilde{B}, x \geq 0\}$$

حال با توجه به تعاریف بالا و با استفاده از روش یاد شده، مدل برنامه ریزی فازی ارائه شده را به مدل قطعی نظیرش تبدیل می کنیم:

۳-۶- شکل قطعی توابع هدف

$$\begin{aligned} z1 &= \sum_{-}(f = 1)^{(N_f)} f_f \times z_f + \sum_{-}(d = 1)^{(N_d)} f_d \times z_d + \sum_{-}(k \\ &= 1)^{K} f_k \times z_k + \sum_{-}(k = 1)^{K} \sum_{-}(d = 1)^{(N_d)} \sum_{-}(i \\ &= 1)^{N} \sum_{-}(j \\ &= 1)^{N} [(C_k d_{ij} x_{ij}^{kd} + c]_{-0} \times d_{ij} ((\rho_0^L \\ &+ 2\rho_0^M + \rho_0^U)/2 + (\alpha^L + 2\alpha^M \\ &+ \alpha^U)/2 [w_{ij}^{k} x]_{-ij}^{kd}) \end{aligned} \quad (36)$$

$$z2 = \sum_{-}(i = 1)^n ([PL]_{-i}^L + 2 [PL]_{-i}^M + [PL]_{-i}^U)/2 [YI]_{-i} \quad (37)$$

شکل قطعی محدودیتهای (۷) و (۸) با برش β :

$$\sum_{-}(j = 1)^N \sum_{-}(d = 1)^{(N_d)} \sum_{-}(k = 1)^K x_{ji}^{kd} y_{ji}^{kd} - \sum_{-}(j = 1)^N \sum_{-}(d \\ = 1)^{(N_d)} \sum_{-}(k = 1)^K x_{ij}^{kd} y_{ij}^{kd} \quad (38)$$

$$= (1 - \beta) (d_i^L + d_i^M)/2 + \beta (d_i^M + d_i^U)/2 \quad \forall i \in N_c$$

$$\sum_{-}(j = 1)^N \sum_{-}(d = 1)^{(N_d)} \sum_{-}(k = 1)^K x_{ij}^{kd} z_{ij}^{kd} - \sum_{-}(j = 1)^n \sum_{-}(d \\ = 1)^{(N_d)} \sum_{-}(k = 1)^K x_{ji}^{kd} z_{ji}^{kd} \quad (39)$$

$$= (1 - \beta) (p_i^L + p_i^M)/2 + \beta (p_i^M + p_i^U)/2 \quad \forall i \in N_c$$

شکل قطعی محدودیت (۱۰) با برش β :

$$w_{ij}^k \leq [(1 - \beta) \frac{cap_k^L + cap_k^M}{2} + \beta \frac{cap_k^M + cap_k^U}{2}] \times x_{ij}^{kd} \quad \forall i, j \in N, d \in N_d, k \in K \quad (40)$$

شکل قطعی محدودیتهای (۱۱)، (۱۲)، (۱۳) و (۱۴) با برش β :

$$d_{ij}((1 - \beta) \frac{\rho_0^L + \rho_0^M}{2} + \beta \frac{\rho_0^M + \rho_0^U}{2} + [(1 - \beta) \frac{\alpha^L + \alpha^M}{2} + \beta \frac{\alpha^M + \alpha^U}{2}] w_{ij}^k) x_{ij}^{kd} \\ - [(1 - \beta) \frac{Q^L + Q^M}{2} + \beta \frac{Q^M + Q^U}{2}] (1 - x_{ij}^{kd}) \leq y_{ik} - y_{jk} \quad \forall i \in N_c, j \\ \in N_c, d \in N_d, k \in K \quad (41)$$

$$y_{ik} - y_{jk} \leq d_{ij}((1 - \beta) \frac{\rho_0^L + \rho_0^M}{2} + \beta \frac{\rho_0^M + \rho_0^U}{2} + [(1 - \beta) \frac{\alpha^L + \alpha^M}{2} + \beta \frac{\alpha^M + \alpha^U}{2}] w_{ij}^k) x_{ij}^{kd} \\ + [(1 - \beta) \frac{Q^L + Q^M}{2} + \beta \frac{Q^M + Q^U}{2}] (1 - x_{ij}^{kd}) \quad \forall i \in N_c, j \in N_c, d \in N_d, k \\ \in K \quad (42)$$

$$d_{ij}((1-\beta)\frac{\rho_0^L + \rho_0^M}{2} + \beta\frac{\rho_0^M + \rho_0^U}{2} + [(1-\beta)\frac{\alpha^L + \alpha^M}{2} + \beta\frac{\alpha^M + \alpha^U}{2}]w_{ij}^k)x_{ij}^{kd} - [(1-\beta)\frac{Q^L + Q^M}{2} + \beta\frac{Q^M + Q^U}{2}](1-x_{ij}^{kd}) \leq y_{ik} - y_{jk} \quad (43)$$

$$\forall i \in N_c, j \in N_f, d \in N_d, k \in K$$

$$y_{ik} - y_{jk} \leq d_{ij}((1-\beta)\frac{\rho_0^L + \rho_0^M}{2} + \beta\frac{\rho_0^M + \rho_0^U}{2} + [(1-\beta)\frac{\alpha^L + \alpha^M}{2} + \beta\frac{\alpha^M + \alpha^U}{2}]w_{ij}^k)x_{ij}^{kd} + [(1-\beta)\frac{Q^L + Q^M}{2} + \beta\frac{Q^M + Q^U}{2}](1-x_{ij}^{kd}) \quad (44)$$

$$\forall i \in N_c, j \in N_f, d \in N_d, k \in K$$

شکل قطعی محدودیت (۱۵) با برش β

$$y_{ik} \geq d_{ij}((1-\beta)\frac{\rho_0^L + \rho_0^M}{2} + \beta\frac{\rho_0^M + \rho_0^U}{2} + [(1-\beta)\frac{\alpha^L + \alpha^M}{2} + \beta\frac{\alpha^M + \alpha^U}{2}]w_{ij}^k)x_{ij}^{kd} \quad \forall i \in N_c, d \in N_d, k \in K \quad (45)$$

شکل قطعی محدودیت (۱۶) با برش β :

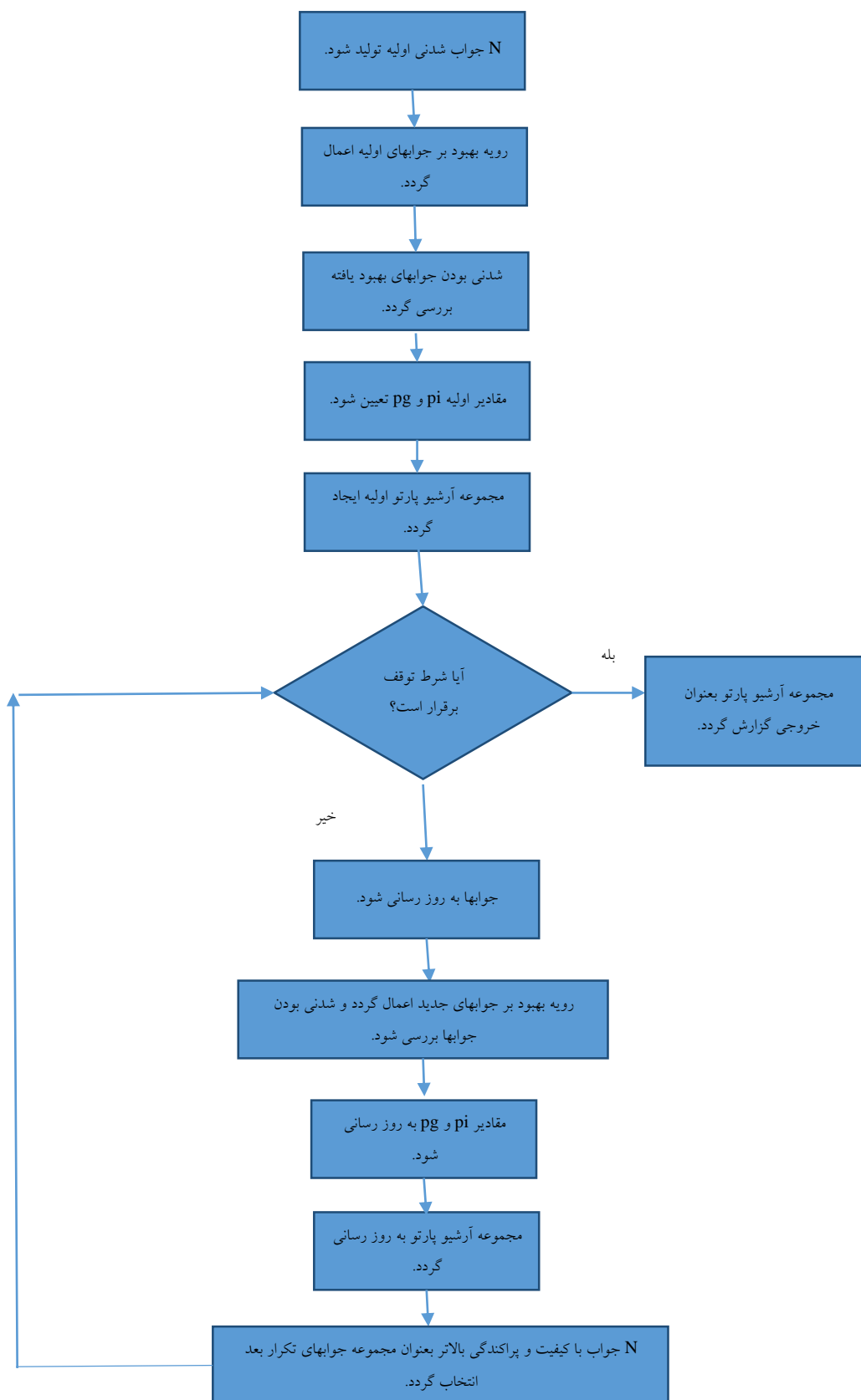
$$y_{ik} = (1-\beta)\frac{Q^L + Q^M}{2} + \beta\frac{Q^M + Q^U}{2} \quad \forall i \in N_d \cup N_f, \forall k \in K \quad (46)$$

۴- روش حل

همانطور که گفته شد در مقاله به مدلسازی و حل مسئله مکانیابی- مسیریابی و مسائل نقلیه الکتریکی چند دپویی با در نظر گرفتن دریافت و تحویل همزمان و پنجره زمانی پرداخته شده و جهت حل مدل الگوریتم انبوه ذرات چند هدفه بر پایه آرشیو پارتو پیشنهاد شده است.

در ادامه، ساختار پیشنهادی روش PSO چندهدفه تلفیقی برای بهینه کردن همزمان ۲ تابع هدف در نظر گرفته شده در مدل ارایه می گردد. هدف از طراحی روش فوق، دستیابی هر چه بیشتر به جوابهای بهینه سراسری یا پارتو است. برای ارزیابی این الگوریتم، خروجی آن با الگوریتم NSGA-II مقایسه شده اند.

PSO اولین بار توسط یک روانشناس اجتماعی با نام جیمز کندی و یک مهندس الکترونیک با نام راسل ابرهارت (۱۹۹۵) با استفاده از تجربیات قبلی در رابطه با مدل کردن رفتارهای دسته جمعی که در بسیاری از انواع پرندگان قابل مشاهده است توسعه داده شد. ساختار کلی طراحی شده برای روش PSO تلفیقی چند هدفه در ادامه آمده است.



شکل ۲- فلوجارت گامهای الگوریتم انبوه ذرات چندهدفه بر پایه آرشیو پارتو

۴-۱- نحوه نمایش جواب

در این تحقیق برای نمایش هر جواب از چندین ماتریس استفاده می گردد که هر کدام از ماتریسها منطبق بر یک متغیر تعریف شده در مدل می باشد. بعنوان مثال، جهت نمایش متغیر Z_f از یک ماتریس تک بعدی با N_f (تعداد ایستگاههای شارژ)، جهت نمایش متغیر Z_d از یک ماتریس تک بعدی با N_d (تعداد دپو)، جهت نمایش متغیر Z_k از یک ماتریس تک بعدی با N_k (تعداد وسائل نقلیه) استفاده شده است.

۴-۲- تولید جوابهای اولیه

در این مقاله جهت تولید جوابهای اولیه^۱ از یک رویکرد تصادفی استفاده شده است. جهت تولید جوابهای اولیه ابتدا بطور تصادفی ماتریسهای Z_d, Z_f و Z_k تولید شده و سپس بقیه ماتریسهای جواب (متغیرهای مدل) با توجه محدودیتهای مدل بصورت شدنی مقاداردهی می گردند. فرض کنید که اندازه جمعیت برابر با N باشد، هر دفعه که یک جواب بصورت شرح داده شده تولید شد در صورت تکراری نبودن به جمعیت جوابها اضافه می گردد. این رویه تا زمانی که تعداد جوابهای موجود در جمعیت به $\alpha \times N$ برسد ادامه خواهد داشت که در آن α یک عدد بزرگتر از ۱ است.

روش تولید جوابها پس از $\alpha \times N$ تکرار متوقف می گردد. از طرفی تعداد جوابها در هر تکرار الگوریتم، برابر با N است. بنابراین باید از بین $\alpha \times N$ جواب موجود، N جواب به عنوان توالیهای تولید اولیه انتخاب گردند. در این تحقیق، انتخاب جمعیت اولیه جوابها، بر اساس یک روش سریع مرتب کردن جوابهای غیرمغلوب که توسط دب و همکاران (۲۰۰۲) [۱۷] شرح داده شده است صورت میگیرد. این روش به این صورت عمل میکند که $\alpha \times N$ جواب موجود که با الگوریتمی مذکور طراحی شده است مرتب شده و سطح بندی می شوند. شماره هر سطح، کیفیت جوابهای موجود در آن را نشان می دهد بعنوان مثال کیفیت جوابهایی که در سطح یک قرار دارند بالاتر از جوابهای موجود در سطح دوم میباشد. سپس برای جوابهای موجود در هر سطح، یک مقیاس به نام فاصله ازدحام^۲، متناسب با همان سطح محاسبه می شود. مقیاس مذکور برای جوابهای هر سطح نشان دهنده پراکندگی جوابهای همان سطح می باشد. در این مقاله، برای انتخاب جوابهای اولیه، معیاری بنام C_s تعریف شده است که با رابطه زیر بدست می آید [۱۸]:

$$C_s = \frac{\text{rank}}{\text{crowding_dis}} \quad (47)$$

معیار بالا برای هر کدام از جوابهای موجود محاسبه می شود.

Rank: شماره سطحی که جواب در آن قرار دارد را نشان می دهد.

Crowding_dis: فاصله ازدحام هر جواب که متناسب با رتبه آن جواب است می باشد.

پس از محاسبه معیار بالا برای همه جوابها، جوابها به ترتیب صعودی C_s ، مرتب شده و N جواب اول که C_s کمتری دارند بعنوان جوابهای اولیه الگوریتم انتخاب می شوند. استفاده از معیار C_s بر پایه این منطقی استوار است که جوابهای با کیفیت و پراکندگی بالاتر بعنوان جمعیت اولیه انتخاب گردند.

جوابهای تولید شده با استفاده از رویه بهبود تا جایی که امکان دارد بهبود داده می شوند. نحوه عملکرد رویه بهبود در بخش بعد شرح داده شده است.

۴-۳- رویه بهبود

در این مقاله یک رویه بهبود طراحی شده است که بر روی جوابها (ذرات) اعمال شده و تا جایی که امکان دارد آن جوابها (ذرات) را بهبود می بخشد. رویه بهبود طراحی شده در این تحقیق بر اساس جستجوی همسایگی متغیر^۳ است. در این رویه سه عملگر جستجوی همسایگی (NSS) طراحی شده است که با ساختار VNS باهم ترکیب شده اند. این ترکیب بصورت زیر است [۱۸]:

¹ Solution Initialization Method

² Crowding distance

³ Variable Neighborhood Search (VNS)

```

{For each input solution s
  K=1
  While the stopping criterion is met do
  S1=Apply NSS type k
  S=Acceptance methode (S,S1)
  If s is improved then
    K=1
  Else
  K=k+1
  If k=4 then
  K=1
  Endif
End while}

```

همانطور که در ساختار بالا مشاهده می شود پس از اعمال ساختار همسایگی بر روی جواب، رویه پذیرش بر روی جواب حاصله و جواب قبلی اعمال شده و یکی از دو جواب بعنوان جواب تکرار بعدی VNS انتخاب می شود. رویه پذیرش به اینصورت عمل می کند که از بین دو جواب، با استفاده از روابط non-dominated جواب غالب را مشخص و انتخاب می کند. ساختار جستجوی همسایگی اول: در این ساختار اندیس ۱f و ۲f در بازه یکنواخت [Nf, ۱] بطور تصادفی تولید شده و مقادیر خانه های متناظر با اندیس های تولید شده در ماتریس مربوط به متغیر Zf با یکدیگر تعویض می گردد. ساختار جستجوی همسایگی دوم: در این ساختار اندیس ۱d و ۲d در بازه یکنواخت [Nd, ۱] بطور تصادفی تولید شده و مقادیر خانه های متناظر با اندیس های تولید شده در ماتریس مربوط به متغیر Zd با یکدیگر تعویض می گردد. ساختار جستجوی همسایگی سوم: در این ساختار اندیس ۱k و ۲k در بازه یکنواخت [K, ۱] بطور تصادفی تولید شده و مقادیر خانه های متناظر با اندیس های تولید شده در ماتریس مربوط به متغیر Zk با یکدیگر تعویض می گردد.

۴-۴- به روز رسانی ذرات

در اینجا برای به روز رسانی ذرات از عملگرهای الگوریتم ژنتیک استفاده شده است [۱۸]. نحوه به روز رسانی ذرات مطابق رابطه زیر است:

$$x_i^{t+1} = (x_i^t - p_i^t) + (x_i^t - p_g^t) + \overline{x_i^t} \quad (48)$$

در رابطه بالا:

x_i^{t+1} : ذره i ام در تکرار (نسل) $t+1$ ام

x_i^t : ذره i ام در تکرار t ام.

P_i^t : بهترین جوابی که ذره i ام تا به حال (تا این نسل) به آن رسیده.

P_g^t : بهترین جوابی که تا به حال پیدا شده.

$\overline{x_i^t}$: یک همسایگی از x_i^t که با عملگر جهش (mutation) تولید شده.

‘-‘: این علامت نشانه عملگر تقاطع (crossover) است.

‘+‘: نشانه انتخاب است. در واقع برای بدست آوردن جواب i ام در تکرار $t+1$ ام ۵ جواب تولید می شود: دو تا حاصل عملگر تقاطع

بین x_i^t و P_i^t ، دو تا حاصل عملگر تقاطع بر روی x_i^t و P_g^t و یکی حاصل اعمال عملگر جهش بر روی x_i^t است. در نهایت از

بین این ۵ جواب آنکه کیفیت و پراکندگی بالاتری دارد بعنوان x_i^{t+1} انتخاب می شود. در واقع در این فرمول P_i^t و P_g^t بعنوان راهنما برای رسیدن به جوابهای تکرار بعدی استفاده می شود.

• عملگر تقاطع:

عملگر تقاطع طراحی شده در این الگوریتم، یک عملگر تقاطع تک نقطه ای می باشد که بر متغیرهای Z_k و Z_d, Z_f اعمال می شود. پس از اینکه دو والد بعنوان ورودی به عملگر تقاطع داده شدند ابتدا برای هر متغیر یک اندیس در بازه یکنواخت بطور تصادفی تولید می گردد و سپس دو فرزند از تقاطع دو والد تشکیل می شوند. عملگر جهش: عملگر جهش استفاده شده در فرمول بالا جهت به روز رسانی ذرات، همان جستجوی همسایگی متغیر می باشد که در بخش قبل بطور کامل شرح داده شده است.

۴-۵- به روز رسانی P_i^t و P_g^t

برای هر ذره i ام، از بین همسایگی های پیدا شده برای این جواب اگر همسایگی بهتر از P_i موجود باشد، P_i با آن جایگزین شده و در غیر اینصورت بدون تغییر باقی می ماند. از بین تمام جوابهایی که تا به حال پیدا شده اند اگر بهترین جواب از P_g بهتر باشد P_g با آن جایگزین شده و در غیر اینصورت بدون تغییر باقی می ماند.

۴-۶- به روز رسانی آرشیو پارتو

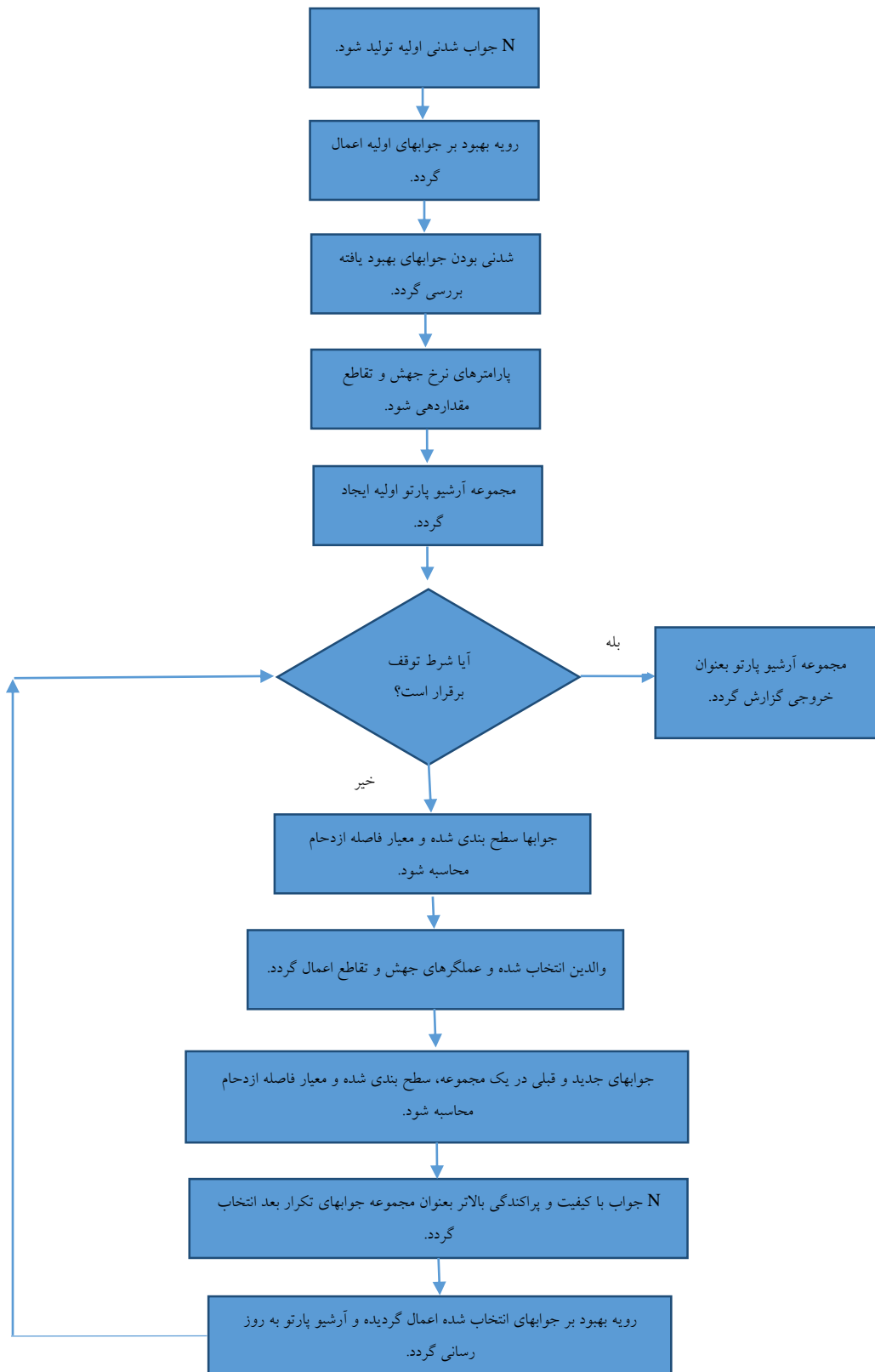
همانطور که قبلاً گفته شد روش حل استفاده شده در این تحقیق بر پایه آرشیو پارتو است. در الگوریتم پیشنهادی یک مجموعه به نام آرشیو پارتو در نظر گرفته شده است که جوابهای غیر مغلوب (non-dominated) را که توسط الگوریتم تولید می شوند را در خود نگه می دارد. این مجموعه در هر تکرار الگوریتم بروز رسانی خواهد شد. نحوه بروز رسانی به این صورت است که جوابهای تولید شده در آن تکرار و جوابهای موجود در آرشیو پارتو در یک استخر جواب ریخته شده و با هم سطح بندی می شوند، سپس از بین این جوابها، جوابهای موجود در سطح اول یا همان جوابهای غیر مغلوب انتخاب شده و بعنوان آرشیو پارتو جدید در نظر گرفته می شوند.

۴-۷- انتخاب جوابهای نسل (تکرار) بعد

در هر تکرار، الگوریتم به جمعیتی از جوابها نیاز دارد. در این مقاله برای انتخاب جمعیت تکرار بعد، جوابهای موجود در جمعیت آن تکرار و جوابهای جدید تولید شده توسط الگوریتم با هم در یک استخر جواب ریخته شده و پس از سطح بندی و محاسبه معیار ازدحام (crowding distance) برای هر جواب با توجه به سطح آن جواب، با استفاده از قاعده دب (۲۰۰۲) N جواب که دارای بالاترین کیفیت و بالاترین پراکندگی هستند، بعنوان جمعیت تکرار بعد الگوریتم انتخاب می شوند.

۴-۸- الگوریتم NSGA-II

در این تحقیق به منظور حل مدل علاوه بر الگوریتم انبوه ذرات چندهدفه، از الگوریتم NSGA-II بر پایه آرشیو پارتو نیز استفاده می شود. فلوچارت ساختار پیشنهادی الگوریتم NSGA-II به صورت زیر است.



شکل ۳- فلوجارت گامهای الگوریتم NSGA-II

نحوه تولید جوابهای اولیه در این الگوریتم بصورت تصادفی است. در واقع بطور تصادفی N جواب شدنی بعنوان جمعیت تکرار اول الگوریتم تولید خواهند شد.

جهت اعمال عملگر تقاطع، ابتدا باید، والدین جهت تقاطع انتخاب گردند که در تحقیق حاضر، جهت انتخاب والدین، با استفاده از روابط non-dominated و روش تورنمنت دو تایی، دو جواب با کیفیت بالاتر انتخاب می گردند.

الگوریتم NSGA-II دارای دو عملگر جهش و عملگر تقاطع می باشد که عملگر جهش و تقاطع استفاده شده در این تحقیق، جهت پیاده سازی این الگوریتم، همان عملگرهای جهش و تقاطع استفاده شده در بروز رسانی ذرات در الگوریتم انبوه ذرات می باشد. دلیل این شباهت این است که مقایسه دو الگوریتم منصفانه باشد. در واقع دو الگوریتم انبوه ذرات و NSGA-II در شرایط یکسان با یکدیگر مقایسه گردند.

۴-۹- ارتباط غالب^۱

در این تحقیق به علت وجود تضاد بین توابع هدف در نظر گرفته شده، استفاده از رویکرد بهینه سازی چند معیاره برای حل مسئله مورد نظر مناسب تر از روشهای بهینه سازی تک معیاره می باشد. بنابراین، در ادامه، توضیحاتی در مورد اصول و مبانی بهینه سازی چند معیاره ارائه خواهد شد. تفاوت اساسی بین مسائل بهینه سازی چند معیاره و تک معیاره در وجود توابع هدف گوناگون و متضاد در مسائل چند معیاره است. وجود چنین اهدافی، دستیابی به جواب (جوابهای) بهینه را از طریق بکارگیری الگوریتمهای متداول مسائل بهینه سازی تک معیاره غیر ممکن می سازد. برای آشنایی بیشتر با ماهیت مسائل بهینه سازی چند معیاره، تعریفهای کلیدی زیر ارائه می گردند (در تمامی تعریفها، مدل کمینه سازی زیر با p متغیر تصمیم گیری و q تابع هدف در نظر گرفته شده است).

$$\text{Min } y=f(x)=(f_1(x), f_2(x), \dots, f_q(x)) \quad x, y \in R^p, q \geq 1$$

تعریف ۱- ارتباط غالب: در مسائل بهینه سازی چند معیاره، گوئیم بردار \bar{x}_1 بر بردار \bar{x}_2 غلبه می نماید، هر گاه دو شرط زیر برقرار باشد:

$$f_i(\bar{x}_1) \leq f_i(\bar{x}_2) \quad i = 1, \dots, g \quad (49)$$

$$i = 1, \dots, g \quad \exists \quad f_i(\bar{x}_2) < f_i(\bar{x}_1) \quad (50)$$

بنابراین هدف اصلی در اینگونه مسائل، پیدا کردن مجموعه‌ای از نقاط است که بر نقاط دیگر غالب باشند.

۴-۱۰- مرتب سازی و سطح بندی جوابها

الگوریتم NSGA-II براساس روابط non-dominated به سطح بندی (مرتب سازی) جوابهای موجود در جمعیت می پردازد. جهت مرتب سازی و سطح بندی جوابها از روابط تعریف شده در بخش (۹.۴) استفاده می گردد، بدین صورت که ابتدا کلیه جوابها با استفاده از روابط مذکور با یکدیگر مقایسه شده و جوابهایی که هیچ جوابی بر آنها غلبه نکند بعنوان جوابهای سطح اول در نظر گرفته شده و سپس همین رویه برای مجموعه جوابهای تعیین تکلیف نشده تکرار شده و سطوح بعدی نیز مشخص می شوند. با توجه به اینکه هر چه شماره سطح یک جواب کمتر باشد، آن جواب با کیفیت تر است، جهت انتخاب جوابها ابتدا از سطوح با شماره کمتر استفاده می گردد. در صورتی که بین دو جواب که در یک سطح قرار دارند، امکان انتخاب وجود داشته باشد، از معیار فاصله ازدحام استفاده می گردد، هر چه مقدار این معیار برای جوابهای موجود در یک سطح بیشتر باشد، اولویت آن جواب جهت انتخاب بالاتر است.

۵- نتایج محاسباتی

در این مقاله ابتدا جهت بررسی اعتبار مدل و الگوریتم، مدل برای یک مسئله نمونه با اندازه کوچک توسط نرم افزار گمز و الگوریتم انبوه ذرات چندهدفه حل گردیده و نتایج حل گمز و الگوریتم پیشنهادی با یکدیگر مقایسه شده اند. پس از اعتبارسنجی مدل و الگوریتم، به منظور آزمودن کارایی الگوریتمهای MOPSO و NSGA-II، آنها را در محیط نرم افزار MATLAB پیاده سازی کرده و نتایج حاصل از اجرای آن در مسائل آزمایشی تولید شده توسط آنها با توجه به شاخصهای مقایسه‌ای کیفیت، یکنواختی،

¹ Domination Relation

پراکندگی و زمان حل، با یکدیگر مقایسه شده اند. لازم به ذکر است کلیه محاسبات به کمک رایانه i7 7500U -12GB -1TB R5 M335 -4GB Core انجام گرفته است.

۵-۱- شاخصهای مقایسه ای

برای ارزیابی کیفیت و پراکندگی الگوریتمهای فراابتکاری چندهدفه، شاخصهای متعدد و متنوعی وجود دارند. در این مقاله، برای انجام مقایسه، سه شاخص کیفیت، یکنواختی و پراکندگی [۱۸] که در ادامه شرح داده می شوند، مورد توجه قرار خواهند گرفت. شاخص کیفیت: این شاخص به مقایسه کیفیت جوابهای پارتوی بدست آمده توسط هر روش می پردازد. در واقع همه جوابهای پارتوی بدست آمده توسط هر دو الگوریتم زنبور عسل و ژنتیک را با هم سطح بندی کرده و مشخص می کند که چند درصد جوابهای سطح یک متعلق به هر روش می باشد. هر چه این درصد بالاتر باشد الگوریتم از کیفیت بالاتری برخوردار است. شاخص یکنواختی: این معیار، یکنواختی توزیع جوابهای پارتوی بدست آمده را در مرز جوابها مورد آزمایش قرار می دهد. این شاخص بصورت زیر تعریف می شود:

$$s = \frac{\sum_{i=1}^{N-1} |d_{mean} - d_i|}{(N-1) \times d_{mean}} \quad (51)$$

در رابطه فوق، d_i نشان دهنده فاصله اقلیدسی بین دو جواب غیرمغلوب یافت شده مجاور بوده و d_{mean} معرف میانگین مقادیر d_i می باشد.

شاخص پراکندگی: این شاخص برای تعیین میزان جوابهای غیرمغلوب یافت شده بر روی مرز بهینه استفاده می گردد. تعریف شاخص پراکندگی بصورت زیر است:

$$D = \sqrt{\sum_{i=1}^N (\|x_t^i - y_t^i\|)} \quad (52)$$

در رابطه فوق، $\|x_t^i - y_t^i\|$ نشان دهنده فاصله اقلیدسی بین دو جواب مجاور x_t^i و y_t^i بر روی مرز بهینه است.

۵-۲- مسائل آزمایشی

در این مقاله، چندین مسئله آزمایشی از بین داده های بنچمارک مسئله مسیریابی و مسائل نقلیه الکتریکی انتخاب شده است. از آنجایی که مسائل نمونه بنچمارک مطابق مدل ارائه شده در این تحقیق نیستند برخی پارامترها براساس داده های موجود و تحقیقات پیشین تنظیم شده اند. در تحقیق حاضر ابتدا جهت بررسی اعتبار مدل سه مسئله با اندازه کوچک براساس مسئله C101 از مسائل نمونه EVRPTW طراحی شده و با استفاده از نرم افزار گمز و الگوریتم پیشنهادی حل گردیده اند. نحوه طراحی مسائل به اینصورت است که از مسئله C101، تعدادی از ایستگاهها بعنوان دپو و تعدادی بعنوان ایستگاه در نظر گرفته شده اند که برای هر مسئله با اندازه کوچک، تعداد دپوها، تعداد ایستگاهها و تعداد مشتریان، متفاوت می باشند.

جدول ۲- مسائل با اندازه کوچک

شماره مسئله	تعداد دپو	تعداد ایستگاه	تعداد مشتریان
1	3	3	5
2	3	3	10
3	3	3	15

پس از ارزیابی اعتبار مدل و الگوریتم حل، سایر مسائل موجود در بنچمارک EVRPTW، با تعداد ۱۰۰ مشتری، انتخاب شده و توسط دو الگوریتم انبوه ذرات چندهدفه و NSGA-II حل گردیده و عملکرد دو الگوریتم براساس شاخصهای شرح داده شده، مقایسه گردیده اند.

۵-۳- تنظیم پارامترها

پارامترهای الگوریتم بصورت زیر تنظیم شده اند:

در الگوریتم انبوه ذرات چندهدفه، اندازه جمعیت برابر با 500، تعداد تکرار در الگوریتم VNS برابر با ۱۰ و تعداد تکرار الگوریتم برابر با ۵۰۰ در نظر گرفته می شود.

- در الگوریتم ژنتیک، نرخ 0.8 برای تقاطع و 0.1 برای جهش در نظر گرفته شده و اندازه جمعیت برابر با ۵۰۰ و تعداد تکرار الگوریتم برابر با ۵۰۰ انتخاب شده است.
- جهت تنظیم پارامترهای مدل، از پارامترهای موجود در بنچمارک EVRPTW استفاده شده و سایر پارامترهای موجود در مدل به شرح زیر تنظیم گردیده اند:
- جهت تولید اعداد مثلثی مربوط به هر کدام از پارامترهای فازی (m_1, m_2, m_3) ، ابتدا m_2 انتخاب شده سپس عدد تصادفی r در بازه $(0, 1)$ تولید شده، m_1 با استفاده از رابطه $m_2 * (1-r)$ و m_3 نیز با استفاده از رابطه $m_2 * (1+r)$ تولید خواهند شد. جهت مقداردهی پارامترهای فازی m_2 با توجه به داده های موجود در صورت وجود (تعیین شده و دو مقدار m_1 و m_3 با استفاده از نرم افزار MATLAB تعیین می شوند. به همین دلیل در بخش تنظیم این پارامترها فقط به ذکر مقدار m_2 اکتفا می کنیم. در تولید مسائل نمونه مقادیر زیر در نظر گرفته شده است.
- در هر دوره برای میزان تقاضای دریافت و تحویل مشتری، m_2 ، براساس داده های موجود در بنچمارک EVRPTW برابر با هم و برابر با تقاضای موجود در نظر گرفته شده است.
- ظرفیت شارژ، ظرفیت بار و وسایل نقلیه، فاصله بین ندها، نرخ مصرف شارژ براساس داده های موجود در بنچمارک EVRPTW در نظر گرفته شده است. همچنین از بین پارامترهای مذکور، ظرفیت بار، نرخ مصرف شارژ و ظرفیت شارژ بصورتی که توضیح داده شد، فازی هستند.
- زمان سفر بین ندها متناسب با فاصله آنها و در بازه یکنواخت $[1 \dots 20]$ در نظر گرفته شده است.
- پنجره زمانی نرم و سخت براساس داده های مقادیر زمان آماده بودن ۱ و مقادیر موعد تحویل ۲ در بنچمارک EVRPTW تعیین گردیده اند. زمان آماده بودن برابر با حد پایین پنجره زمانی نرم، موعد تحویل، بعنوان حد بالای پنجره زمانی سخت در نظر گرفته شده است.
- وزن محصول برابر با ۵ در نظر گرفته شده است.
- هزینه های تاسیس دپو و ایستگاه شارژ در بازه یکنواخت $[10000000 \dots 100000000]$ تولید شده و هزینه ثابت و متغیر استفاده از وسیله نقلیه به ترتیب برابر ۲۰۰۰۰۰۰ و ۱۰۰ در نظر گرفته شده است.
- در نهایت جریمه دیرکرد با عدد فازی (m_1, m_2, m_3) است که $2m$ در بازه یکنواخت $[100 \dots 500]$ تولید شده است.
- مقدار β برای رتبه بندی اعداد فازی برابر با 0.8 در نظر گرفته شده است.

۴-۵- نتایج اعتبارسنجی مدل

جهت بررسی اعتبار مدل، ابتدا مدل دو هدفه با استفاده از روش ال پی متریک، به یک مدل تک هدفه تبدیل شده و سپس مدل تک هدفه حاصل در محیط نرم افزار گمز برای مسائل با اندازه کوچک حل گردیده است. در این تحقیق روش ال پی متریک که یکی از روشهای معروف در ادبیات مسایل چند هدفه می باشد استفاده شده است. همواره ما به دنبال کمینه سازی انحرافات توابع هدف از مقدار بهینه شان هستیم. در این روش ابتدا جوابهای انفرادی برای بهینگی هر یک از توابع هدف محاسبه شده سپس تابع هدف زیر کمینه می شود:

$$z = [w * (f_1(x) - f_1(x^*)) / f_1(x^*)] + [(1 - w) * (f_2(x) - f_2(x^*)) / f_2(x^*)] \quad (53)$$

¹ Ready time

² Due date

در رابطه بالا، $f_1(x^*)$ مقدار بهینه حاصل از حل مدل با در نظر گرفتن تابع هدف اول؛ $f_2(x)$ مقدار تابع هدف دوم براساس جواب بهینه حل مدل با تنها تابع هدف اول؛ $f_2(x^*)$ مقدار بهینه حاصل از حل مدل با در نظر گرفتن تابع هدف دوم؛ $f_1(x)$ مقدار تابع هدف اول براساس جواب بهینه حل مدل با تنها تابع هدف دوم می باشد. همچنین W^* وزن توابع هدف است.

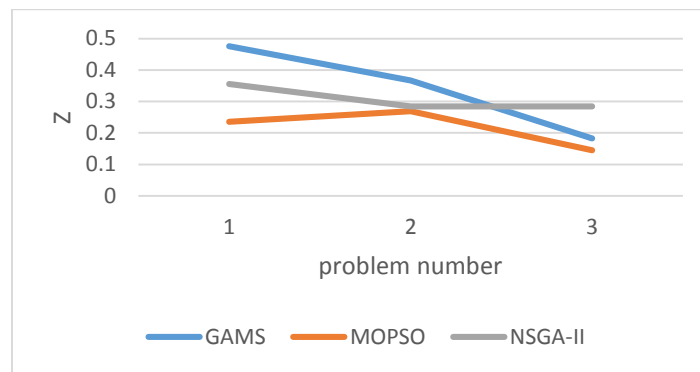
مدل ارایه شده توسط نرم افزار GAMS کدنویسی و توسط حل کننده ی BARON حل شده است. در این روش مقدار P ۱ در نظر گرفته شده است و وزن اهداف یکسان و برابر ۰.۵ در نظر گرفته شده است.

مسائل با اندازه کوچک، توسط الگوریتم MOPSO و نرم افزار گمز با هدف بهینه سازی روش ال پی متریک حل شده اند. نتایج حاصل از گمز براساس مقادیر متغیرها و برقرار بودن محدودیتها بررسی گردید. نتایج این بررسی حاکی از شدنی بودن و اعتبار مدل میباشد. نتایج حل مدل توسط الگوریتم پیشنهادی و نرم افزار گمز در جدول (۳) نشان داده شده است.

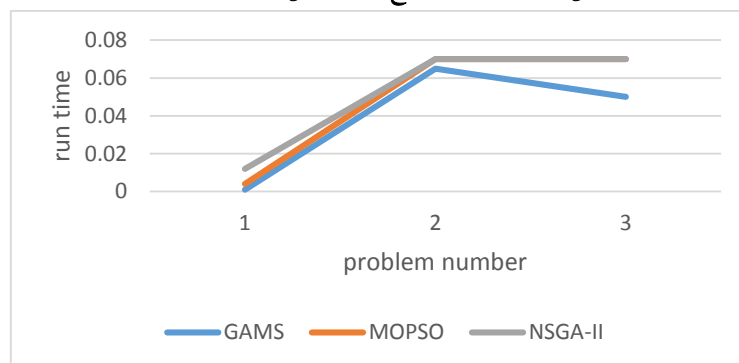
جدول ۳- نتایج حل مسائل نمونه با اندازه کوچک

NSGA-II				MOPSO				GAMS				شماره مسئله
زمان	z	$f_2(x^*)$	$f_1(x^*)$	زمان	z	$f_2(x^*)$	$f_1(x^*)$	زمان	Z	$f_2(x^*)$	$f_1(x^*)$	
0.05	0.183	7243.2	124440.5	0.065	0.367	8031.9	116300.6	0.001	0.476	3380.5	478213.3	1
0.07	0.145	8397.9	187342.1	0.07	0.269	8263.5	194291.1	0.004	0.236	3876.4	480561.7	2
0.07	0.284	8149.5	272664.7	0.07	0.284	8149.5	272664.7	0.012	0.356	4069.1	532906.1	3

همانطور که در جدول (۳) مشاهده می شود براساس مقادیر توابع هدف، برای هر کدام از مسائل، جوابهای خروجی نسبت به هم غیرمغلوب بوده و در برخی از مسائل مقادیر تابع هدف حاصل از الگوریتم ژنتیک و انبوه ذرات دقیقاً بر یکدیگر منطبق می باشد. از طرفی مقایسه مقدار تابع هدف روش ال پی متریک نشان می دهد که در برخی موارد نرم افزار گمز بهتر از دو الگوریتم عمل کرده و در برخی موارد عملکرد دو الگوریتم حل بهتر بوده است. با توجه به اینکه نتایج گمز نسبت به دو الگوریتم انبوه ذرات و ژنتیک غیر مغلوب است و همچنین جوابهای دو الگوریتم نیز نسبت به یکدیگر غیرمغلوب است می توان گفت کیفیت نتایج حاصل برای سه روش در یک سطح میباشد. لذا می توان نتیجه گرفت که الگوریتم حل، قادر به حل مدل بصورت کارا بوده و به سمت جواب بهینه همگرا می باشند.



شکل ۴- مقایسه مقادیر توابع هدف مسائل با اندازه کوچک



شکل ۵- مقایسه زمان اجرا مسائل با اندازه کوچک

۵-۵- نتایج اجرایی

در این بخش از بین مسائل آزمایشی موجود در بنچمارک EVRPTW، ۳۰ مسئله انتخاب گردیده و با استفاده از دو الگوریتم MOPSO و NSGA-II حل گردیده و نتایج حاصل از اجرای دو الگوریتم با توجه به شاخصهای مقایسه‌ای، در جداول زیر نشان داده شده اند.

جدول ۴ الف- نتایج حل مسائل نمونه EVRPTW

prob	MOPSO					NSGA-II				
	Quality metric	Spacing metric	Diversity metric	CPU TIME	تعداد جوابهای آرشیو پارتو	Quality metric	Spacing metric	Diversity metric	CPU TIME	تعداد جوابهای آرشیو پارتو
C101	94.3	1.12	2686.4	220.7	87	5.7	0.61	1511.2	80.7	60
C102	97.1	0.94	2385.6	230.1	67	2.9	0.70	1741.2	135.4	59
C103	72.9	0.71	2923.6	247.1	77	27.1	0.44	2441.3	119.4	78
C104	100	0.85	2256.7	223.1	85	0	0.60	1437.9	147.9	88
C105	88.6	0.76	2854.1	284.4	93	11.4	0.33	1607.5	141.5	94
C106	100	0.92	2250.2	219.5	95	0	0.57	1349.4	160.4	62
C107	77.6	0.69	2472.2	222.6	79	22.4	0.38	2035.1	159.1	80
C108	85.9	0.86	2780.7	217.1	63	14.1	0.54	2152.1	103.4	76
C109	98.7	0.80	2966.3	222.8	63	1.3	0.57	1708.5	139.9	57
C201	100	0.75	2127.4	243.6	67	0	0.54	1696.5	89.8	70

جدول ۴ ب- نتایج حل مسائل نمونه EVRPTW

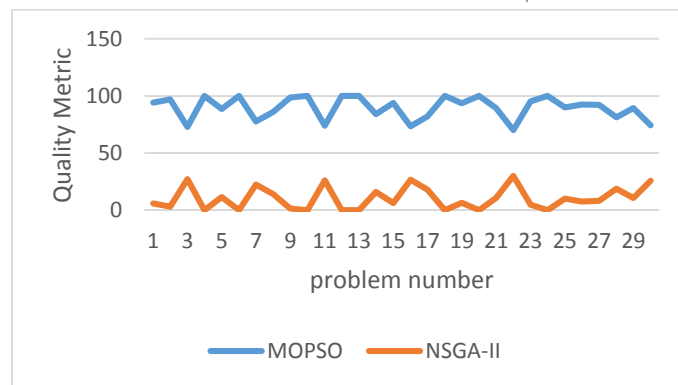
prob	MOPSO					NSGA-II				
	Quality metric	Spacing metric	Diversity metric	CPU TIME	تعداد جوابهای آرشیو پارتو	Quality metric	Spacing metric	Diversity metric	CPU TIME	تعداد جوابهای آرشیو پارتو
r101	73.8	0.78	3145.3	231.1	91	26.2	0.58	1652.9	133.7	63
r102	100	1.2	2960.9	292.3	67	0	0.45	2110.8	144.4	89
r103	100	0.79	2614.1	243.1	90	0	0.41	2077.5	120.1	69
r104	84.1	0.68	2553.1	218.5	67	15.9	0.56	1701.1	117.9	78
r105	93.8	0.93	2566.1	290.5	94	6.2	0.61	1035.6	160.5	64
r106	73.4	0.81	2397.6	297.9	71	26.6	0.73	1211.3	130.9	81
r107	82.1	1.1	2640.2	243.9	65	17.9	0.64	1282.9	131.8	68
r108	100	0.90	2642.9	211.1	67	0	0.67	1914.2	155.9	83
r109	93.6	0.88	3011.2	225.8	82	6.4	0.52	1877.7	150.5	85
r110	100	0.94	2983.8	240.9	76	0	0.56	1684.4	127.7	87

جدول ۴ ج- نتایج حل مسائل نمونه EVRPTW

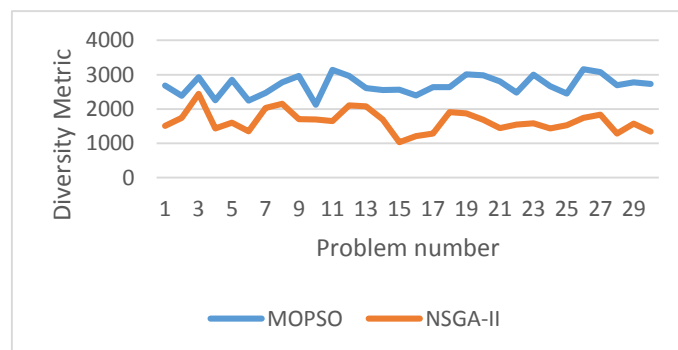
prob	MOPSO					NSGA-II				
	Quality metric	Spacing metric	Diversity metric	CPU TIME	تعداد جوابهای آرشیو پارتو	Quality metric	Spacing metric	Diversity metric	CPU TIME	تعداد جوابهای آرشیو پارتو
rc101	89.3	0.52	2803.2	259.5	71	10.7	0.46	1449.2	88.4	75
rc102	70.1	1.22	2484.3	226.2	90	29.9	0.34	1550.7	93.9	60
rc103	95.3	0.67	3003.9	260.3	80	4.7	0.43	1587.3	158.7	66
rc104	100	1.06	2669.4	271.1	79	0	0.64	1435.1	72.9	94

rc105	90.1	1.1	2450.8	222.2	94	9.9	0.49	1528.3	118.9	63
rc106	92.5	1.1	3156.8	211.7	68	7.5	0.49	1740.4	86.7	90
rc107	92.1	0.56	3081.1	229.7	87	7.9	0.44	1835.9	167.8	79
rc201	81.1	0.76	2690.2	231.9	87	18.9	0.62	1283.6	141.2	97
rc202	89.3	0.64	2776.9	242.4	72	10.7	0.45	1577.5	120.4	60
rc203	74.3	1.3	2734.4	250.8	80	25.6	0.66	1337.6	117.1	75

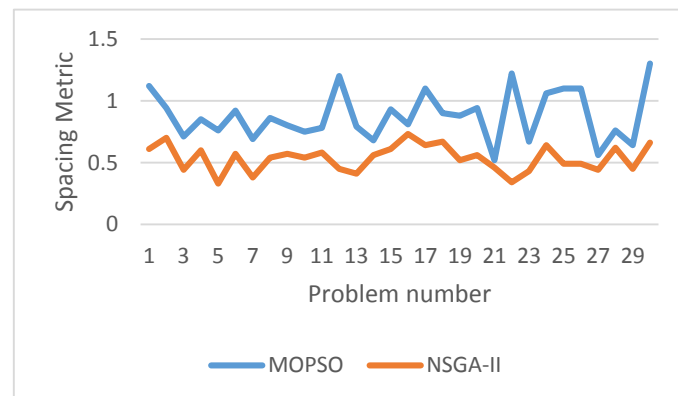
همانطور که در جداول بالا مشاهده می شود، در حل مسئله مکانیابی- مسیریابی وسایل نقلیه الکتریکی با در نظر گرفتن چندین دپو، پنجره زمانی و دریافت و تحویل همزمان، الگوریتم MOPSO در همه موارد توانایی بالاتری برای تولید جوابهای با کیفیت تر نسبت به الگوریتم NSGA-II دارد. الگوریتم MOPSO قادر به تولید جوابهای با پراکنده گی بالاتری نسبت به الگوریتم NSGA-II دارد. یا به عبارتی الگوریتم MOPSO توانایی بیشتری برای اکتشاف و استخراج ناحیه شدنی جواب نسبت به الگوریتم NSGA-II دارد. همانطور که از جداول فوق مشاهده می شود، الگوریتم NSGA-II جوابهایی با یکنواختی بالاتری نسبت به الگوریتم MOPSO تولید می کند، یا به عبارتی، الگوریتم NSGA-II ناحیه جواب را با یکنواختی بیشتری جستجو می کند.



شکل ۶- مقایسه شاخص کیفیت دو الگوریتم

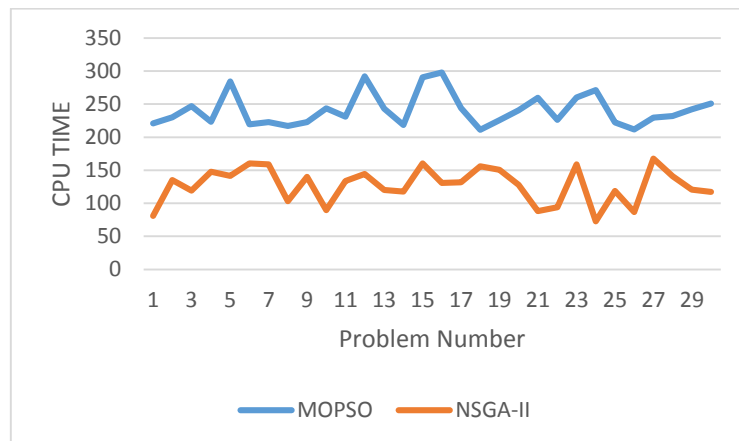


شکل ۷- مقایسه شاخص پراکنده گی دو الگوریتم



شکل ۸- مقایسه شاخص یکنواختی دو الگوریتم

همچنین، مقایسه زمان اجرای دو الگوریتم برای حل مسائل آزمایشی در شکل (۹) نشان داده شده است. در شکل ۹ مشاهده می شود که زمان حل مسائل توسط الگوریتم MOPSO در مقابل الگوریتم NSGA-II در همه موارد بیشتر بوده و این بدین معناست که الگوریتم MOPSO جهت حل این مسائل به زمان بیشتری نیاز دارد.



شکل ۹- مقایسه زمان اجرا (واحد زمان ثانیه است)

۵-۶- تحلیل آماری مقایسه دو الگوریتم

همانطور که مشاهده گردید، در این تحقیق جهت حل مدل ارائه شده از دو الگوریتم انبوه ذرات چندهدفه و الگوریتم NSGA-II استفاده شده است. نتایج حل مسائل نمونه توسط دو الگوریتم براساس شاخصهای مقایسه‌های کیفیت، پراکندگی و یکنواختی صورت گرفت. در این بخش با تدوین فرضیه های مناسب به بررسی تفاوت بین نتایج دو الگوریتم بر اساس تحلیل آماری پرداخته شده است. فرضیه اول: بین شاخص کیفیت دو الگوریتم MOPSO و NSGA-II تفاوت معناداری وجود دارد.

جدول ۵- نتایج آزمون فرضیه اول

نمونه	حجم نمونه	میانگین	انحراف معیار	میانگین خطا
MOPSO	30	89.7	9.8	1.8
NSGA-II	30	10.3	9.8	1.8

	t	درجه آزادی	سطح معناداری	اختلاف میانگین	فاصله اطمینان ۹۵ درصد	
					Lower	Upper
MOPSO	49.749	29	.000	89.61765	85.9334	93.3019
NSGA-II	5.708	29	.000	10.28235	6.5981	13.9666

با توجه به نتایج موجود در جدول (۵)، مشاهده می شود که میانگین دو گروه با یکدیگر بسیار اختلاف داشته و همچنین در جدول نیز مشاهده می شود، مقدار آماره خارج از فاصله اطمینان است و در نتیجه فرض H_0 رد شده و فرض H_1 پذیرفته می شود. این بدین معناست که بین شاخص کیفیت دو الگوریتم MOPSO و الگوریتم NSGA-II تفاوت معناداری وجود دارد. فرضیه دوم: بین شاخص یکنواختی دو الگوریتم MOPSO و NSGA-II تفاوت معناداری وجود دارد.

جدول ۶- نتایج آزمون فرضیه دوم

نمونه	حجم نمونه	میانگین	انحراف معیار	میانگین خطا
MOPSO	30	0.87	0.199	0.036
NSGA-II	30	0.53	0.105	0.019

	t	درجه آزادی	سطح معناداری	اختلاف میانگین	فاصله اطمینان ۹۵ درصد	
					Lower	Upper
MOPSO	22.712	29	.000	.82800	.7534	.9026
NSGA-II	25.147	29	.000	.48433	.4449	.5237

با توجه به نتایج موجود در جدول (۶)، مشاهده می شود که میانگین دو گروه با یکدیگر بسیار اختلاف داشته و همچنین در جدول نیز مشاهده می شود، مقدار آماره خارج از فاصله اطمینان است و در نتیجه فرض H_0 رد شده و فرض H_1 پذیرفته می شود. این بدین معناست که بین شاخص یکنواختی دو الگوریتم MOPSO و الگوریتم NSGA-II تفاوت معناداری وجود دارد. فرضیه سوم: بین شاخص پراکندگی دو الگوریتم MOPSO و NSGA-II تفاوت معناداری وجود دارد.

جدول ۷- نتایج آزمون فرضیه سوم

نمونه	حجم نمونه	میانگین	انحراف معیار	میانگین خطا
MOPSO	30	2702.3	274.8	50.2
NSGA-II	30	1651.8	311.7	56.9

	t	درجه آزادی	سطح معناداری	اختلاف میانگین	فاصله اطمینان ۹۵ درصد	
					Lower	Upper
MOPSO	53.845	29	.000	2702.26333	2599.6211	2804.9056
NSGA-II	29.028	29	.000	1651.77333	1535.3946	1768.1521

با توجه به نتایج موجود در جدول (۷)، مشاهده می شود که میانگین دو گروه با یکدیگر بسیار اختلاف داشته و همچنین در جدول نیز مشاهده می شود، مقدار آماره خارج از فاصله اطمینان است و در نتیجه فرض H_0 رد شده و فرض H_1 پذیرفته می شود. این بدین معناست که بین شاخص پراکندگی دو الگوریتم MOPSO و الگوریتم NSGA-II تفاوت معناداری وجود دارد. فرضیه چهارم: بین زمان اجرای دو الگوریتم MOPSO و NSGA-II تفاوت معناداری وجود دارد.

جدول ۸- نتایج آزمون فرضیه چهارم

نمونه	حجم نمونه	میانگین	انحراف معیار	میانگین خطا
MOPSO	30	241.1	24.8	4.5
NSGA-II	30	127.2	26.5	4.9

	t	درجه آزادی	سطح معناداری	اختلاف میانگین	فاصله اطمینان ۹۵ درصد	
					Lower	Upper
MOPSO	53.128	29	.000	241.01333	231.7353	250.2914
NSGA-II	26.256	29	.000	127.18000	117.2734	137.0866

با توجه به نتایج موجود در جدول (۸)، مشاهده می شود که میانگین دو گروه با یکدیگر بسیار اختلاف داشته و همچنین در جدول نیز مشاهده می شود، مقدار آماره خارج از فاصله اطمینان است و در نتیجه فرض H_0 رد شده و فرض H_1 پذیرفته می شود. این بدین معناست که بین زمان اجرای دو الگوریتم MOPSO و الگوریتم NSGA-II تفاوت معناداری وجود دارد.

۶- جمع بندی

در این تحقیق یک مدل ریاضی برای مسئله مکانیابی- مسیریابی وسائلی نقلیه الکتریکی با در نظر گرفتن پنجره زمانی سخت و نرم و همچنین در نظر گرفتن چندین دپو ارائه شده است. در مسئله مورد بررسی، ظرفیت وسائلی نقلیه محدود بوده و میزان مصرف شارژ

وابسته به بار وسایل نقلیه است. همچنین، شارژ وسایل نقلیه در ایستگاههای شارژ از نوع کامل در نظر گرفته شده است. در این مقاله ابتدا یک مدل برنامه ریزی عدد صحیح مختلط فازی ارائه شده و از روش رتبه بندی جیمز جهت تبدیل مدل فازی به مدل قطعی استفاده شده است. همچنین، مدل ریاضی دارای دو هدف کمینه سازی هزینه ها و کمینه سازی جریمه دیرکرد ارائه کالا یا سرویس به مشتریان می باشد. پس از طراحی مدل، جهت حل مدل ارائه شده، الگوریتم ترکیبی انبوه ذرات چندهدفه و الگوریتم NSGA-II پیشنهاد شده است. جهت بررسی اعتبار مدل و الگوریتم، مدل ارائه شده در محیط نرم افزار دقیق گمز برای مسائل با اندازه کوچک، پیاده سازی و حل گردیده و نتایج حاصل با نتایج الگوریتمهای حل مقایسه شده اند. سپس نتایج حل مسائل توسط الگوریتم پیشنهادی با نتایج حل همین مسائل با الگوریتم NSGA-II براساس شاخصهای مقایسه ای کیفیت، پراکندگی و یکنواختی مقایسه گردیده اند.

بطور کلی نتایج حل مدل نشان داد:

- نتایج بررسی اعتبار مدل و الگوریتمهای حل نشان داد، مدل معتبر بوده و داری ناحیه شدنی می باشد و الگوریتمهای حل، قادر به حل مدل بصورت کارا بوده و به سمت جواب بهینه همگرا می باشند.
 - نتایج مقایسه ای نشان می دهند که الگوریتم MOPSO در همه موارد توانایی بالاتری برای تولید جوابهای باکیفیت تر و پراکنده تر نسبت به الگوریتم NSGA-II دارد و الگوریتم NSGA-II جوابهایی با یکنواختی بالاتری نسبت به الگوریتم MOPSO تولید می کند. همچنین نتایج مقایسه زمان اجرا نشان می دهد که مدت زمان اجرای الگوریتم PSO چندهدفه نسبت به الگوریتم NSGA-II بیشتر است.
 - بین شاخص کیفیت دو الگوریتم MOPSO و NSGA-II تفاوت معناداری وجود دارد.
 - بین شاخص یکنواختی دو الگوریتم MOPSO و NSGA-II تفاوت معناداری وجود دارد.
 - بین شاخص پراکندگی دو الگوریتم MOPSO و NSGA-II تفاوت معناداری وجود دارد.
 - بین زمان اجرای دو الگوریتم MOPSO و NSGA-II تفاوت معناداری وجود دارد.
- همچنین جهت انجام تحقیقات آتی، پیشنهاد می شود:
- مدل را در حالت شارژ کامل و شارژ نیمه طراحی کرد.
 - وسایل نقلیه با موتورهای ترکیبی احتراقی و الکتریکی در نظر گرفته شوند.
 - جهت اعمال عدم قطعیت، پارامترهای احتمالی و فازی با هم در نظر گرفته شوند.
 - جهت حل مدل از الگوریتمهای دیگر مانند نهنگ، رقابت استعماری و ... استفاده گردد.

۷- مراجع

1. Juan, A.A., J. Goentzel, and T. Bektaş. 2014. "Routing fleets with multiple driving ranges: Is it possible to use greener fleet configurations?" *Applied Soft Computing* 21:84-94.
2. Touati-Moungla, N., & Jost, V. (2012). Combinatorial optimization for electric vehicles management. *Journal of Energy and Power Engineering*, 6(5).
3. Zhang, Shuzhu, et al. "Design and development of a hybrid artificial bee colony algorithm for the environmental vehicle routing problem." *Transportation Research Part D: Transport and Environment* 31, pp. 8599, 2014.
4. Elhedhli, Samir, and Ryan Merrick. "Green supply chain network design to reduce carbon emissions." *Transportation Research Part D: Transport and Environment* 17.5 , pp. 370-379, 2012.
5. Erdoğan, Sevgi, and Elise Miller-Hooks. "A green vehicle routing problem." *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review* 48.1 ,pp. 100-114,2012.
6. Schneider, Michael, Andreas Stenger, and Dominik Goetze. "The electric vehicle-routing problem with time windows and recharging stations." *Transportation Science* 48.4 .pp 500-520, 2014.
7. Felipe, Ángel, et al. "A heuristic approach for the green vehicle routing problem with multiple technologies and partial recharges." *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review* 71,pp 111-128, 2014.

8. Goeke, Dominik, and Michael Schneider. "Routing a mixed fleet of electric and conventional vehicles." *European Journal of Operational Research* 245.1, pp 81-99, 2015.
9. Koç, Çağrı, and Ismail Karaoglan. "The green vehicle routing problem: A heuristic based exact solution approach." *Applied Soft Computing* 39 , pp 154-164, 2016.
10. Keskin, Merve, and Bülent Çatay. "Partial recharge strategies for the electric vehicle routing problem with time windows." *Transportation Research Part C: Emerging Technologies* 65 ,pp 111-127, 2016.
11. Roberti, Roberto, and Min Wen. "The Electric Traveling Salesman Problem with Time Windows." *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review* 89 ,pp 32-52, 2016.
12. Hiermann, Gerhard, et al. "The electric fleet size and mix vehicle routing problem with time windows and recharging stations." *European Journal of Operational Research* 252.3 ,pp 995-1018, 2016.
13. Doppstadt, C., A. Koberstein, and D. Vigo. "The Hybrid Electric Vehicle–Traveling Salesman Problem." *European Journal of Operational Research* 253.3 ,pp 825-842, 2016.
14. Schiffer, M., Walther, G. "The electric location routing problem with time windows and partial recharging ". *European Journal Of Operational Research*, 260 (2017) 995-1013.
15. Camilo Paza, J., Granada-Echeverria, M., Willmer Escobar, J. "The multi-depot electric vehicle location routing problem with time windows". *International Journal of Industrial Engineering Computations* 9 (2018) 123–136.
16. Jiménez, M., et al., "Linear programming with fuzzy parameters: an interactive method resolution." *European Journal of Operational Research*, 2007. 177(3): p. 1599-1609.
17. Deb, K., et al., "A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II." *IEEE transactions on evolutionary computation*, 2002. 6(2): p. 182-197.
18. Tavakkoli-Moghaddam, R., M. Azarkish, and A. Sadeghnejad-Barkousaraie, "A new hybrid multi-objective Pareto archive PSO algorithm for a bi-objective job shop scheduling problem." *Expert Systems with Applications*, 2011. 38(9): p. 10812-10821.
19. Rohmer, S. U. K., van Lemmen-Gerdessen, J. C., & Claassen, G. D. H. (2019). A Location-Routing Problem with Delivery Options and Time-Windows for the Last Mile Delivery of Fresh Products. Abstract from Workshop of the EURO Working Group on Vehicle Routing and Logistics optimization (VeRoLog), Sevilla, Spain.
20. Almouhanna, Abdullah & Quintero-Araujo, Carlos & Panadero, Javier & Juan, Angel & Khosravi, Banafsheh & Ouelhadj, Djamilia. (2019). The Location Routing Problem using Electric Vehicles with Constrained Distance. *Computers & Operations Research*. 115. 10.1016/j.cor.2019.104864.
21. Zheng, Zilai & Morimoto, Takehiro & Murayama, Yuji. (2020). Optimal Location Analysis of Delivery Parcel-Pickup Points Using AHP and Network Huff Model: A Case Study of Shiweitang Sub-District in Guangzhou City, China. *ISPRS International Journal of Geo-Information*. 9. 193. 10.3390/ijgi9040193.
22. Ghobadi, A., Tavakkoli Moghadam, R., Fallah, M., Kazemipoor, H. (2021). Multi-depot electric vehicle routing problem with fuzzy time windows and pickup/delivery constraints. *Journal of Applied Research on Industrial Engineering*, 8(1), 1-18. doi: 10.22105/jarie.2021.231764.1165