حل یک مدل ریاضی جدید برای مسأله‌ی مسیریابی وسایل نقلیه با برداشت و تحویل همزمان توسط الگوریتم تکامل تفاضلی چندهدفه

حامد اقبالی*، دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه کردستان، سنندج، ایران
رضا توکلی مقدم، استاد، دانشکده مهندسی صنایع، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران
*پست الکترونیکی نویسنده مسئول:hamed.eghbali@yahoo.com

دریافت: ۹۷/۰٤/۲۰- پذیرش: ۹۷/۰۸/۰۵
صفحه ٦۵-۵۳

چکیده

مدل ارائه شده در این تحقیق، جزو مسائل مسیریابی وسایل نقلیه با حمل در بازگشت می‌باشد که در آن فرآیند برداشت و تحویل بطور همزمان صورت می‌گیرد. مسأله بصورت دوهدفه مدلسازی شده است که اهداف آن عبارتند از: کمینه سازی هزینه کل حمل و نقل شامل هزینه ثابت استفاده از وسیله نقلیه و هزینه متغیر مسافت طی شده و نیز افزایش رضایت‌مندی رانندگان از طریق توازن توزیع کالا میان وسایل نقلیه. به جهت NP_سخت بودن مسائل مسیریابی وسایل نقلیه، جهت حل مسأله‌ی مسیریابی وسایل نقلیه با برداشت و تحویل همزمان الگوریتم فراابتکاری تکامل تفاضلی چندهدفه (MODE) پیشنهاد گردیده است. همچنین جهت بررسی عملکرد الگوریتم پیشنهادی، نتایج حاصل از این روش با روش جستجوی هارمونی چند هدفه[1] (MOHS) مقایسه شده است. یک آزمون محاسباتی بر روی نمونه مسائل موجود در ادبیات موضوع صورت گرفته است. نتایج محاسباتی نشان می‌دهد که الگوریتم پیشنهادی از نظر زمان محاسبات و کیفیت جواب‌های بدست آمده از کارآمدی خوبی برخوردار می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: مسیریابی وسایل نقلیه، برداشت و تحویل همزمان، روش محدودیت اپسیلون، الگوریتم فراابتکاری چندهدفه

۱-مقدمه

امروزه با رشد جمعیت و به تبع آن افزایش تقاضای مصرف، شاهد افزایش زباله‌های تجدیدپذیر همچون بطری‌های پلاستیکی و مواد ضایعاتی می‌باشیم. از این رو موضوع بازیافت زباله‌ها و استفاده مجدد کالاها نقش بسزایی در کاهش آلودگی‌های زیست محیطی دارد. بدین منظور مسائل مربوط به مسیریابی وسایل نقلیه با برداشت و تحویل همزمان می‌تواند کمک بسزایی در کاهش این آلایندگی‌ها داشته باشد. تحقیق حاضر به دسته ای از مسائل مسیریابی وسایل نقلیه تحت عنوان مسأله مسیریابی وسایل نقلیه با برداشت و تحویل همزمان می‌پردازد که بطور کلی جزو مسائل لجستیک معکوس است. مسأله VRPSPD اغلب در کاربردهای تجاری مطرح می‌شود، که در آن انتظار می‌رود که کالاها از محل توزیع به مشتریان حمل و نقل شود، همچنین مواد برداشتی باید بطور معکوس از مشتریان به محل توزیع برگردند. مسأله‌ی VRPSPD به مدل‌سازی سیستم حمل و نقل زیر می‌پردازد: اگر $G = (V,A)$ را به عنوان یک گراف

جهت دار در نظر بگیرید، که در آن $V=\{v_0,v_1...v_n\}$ مجموعه رئوس و $A=\{(v_i,v_j):v_i,v_j\in V,\ i\neq j\}$ مجموعه کمانها می باشد. راس v_0 ، متناظر با انبار است که بعنوان ایستگاه مرکزی برای ناوگان همگنی از وسایل نقلیه با حداکثر بار قابل حمل معادل با Q می‌باشد، در حالیکه رئوس $\{v_0, v_1,\ldots,v_n\}$ نماینده جمعیت مشتریان می باشند. برای هر مشتری مانند i یک d_i مقدار تحویل غیرمنفی و یک P_i مقدار برداشت نامنفی وجود دارد. هزینه سفر مورد نیاز برای طی یک کمان، با C_{ij} نشان داده می‌شود، و می‌تواند زمان، فاصله و یا هزینه واقعی برای انتقال از رأس i به j را نشان دهد. بطور کلی هدف از VRPSPD، تعیین مجموعه‌ای از مسیرها جهت حداقل کردن هزینه حمل و نقل است بطوریکه محدودیتهای زیر را برآورده سازد: هر مسیر از v_0 انبار مرکزی، آغاز می‌شود و به آنجا ختم می‌شود. هر مشتری دقیقا یک بار و توسط دقیقا یک وسیله نقلیه خدمت دهی می‌شود. هر وسیله نقلیه، مقادیر تحویلی از انبار را به مشتریان بازدید شده انتقال داده و مقادیر برداشت شده از مشتریان بازدید شده را به انبار مرکزی، باز می‌گرداند. در هیچ نقطه ای از هر مسیر، مقدار کالای حمل شده بیش از ظرفیت Q یک وسیله نقلیه نخواهد بود. در ادبیات موضوع، ابتدا مین (۱۹۸۹) به این دسته مسائل به عنوان مسائل مسیریابی وسایل نقلیه همراه با نقاط برداشت و تحویل همزمان اشاره کرده است. مین اولین فردی بود که با در نظر گرفتن یک نمونه از ۲۲ مشتری و ۲ وسیله نقلیه به معرفی این مسأله پرداخت. روش طراحی شده با خوشه‌بندی مشتریان به گروه‌ها، آغاز می‌شود. برای هر گروه از مشتریان، مسأله فروشنده دوره گرد (TSP) مربوطه حل می‌شود. برای به دست آوردن یک راه حل نهایی امکان پذیر، مسیرهای با حمل بار بیش از ظرفیت وسایل نقلیه، جریمه می‌شوند. جندراوو و همکاران (۱۹۹۹) حالت وسیله نقلیه منفرد را به عنوان مسأله‌ی فروشنده ی دوره گرد همراه با برداشت و تحویل (TSPPD) تعریف کرده‌اند. آنها یک روش حل دقیق و یک روش ابتکاری جستجوی ممنوع (TS) را برای حل مسأله درنظر گرفتند. نتایج نشان داد که الگوریتم پیشنهادی آنها هم از نظر زمان محاسبات و هم از نظر ارزش جواب کارآمد است. آنجلیلی و مانسینی (۲۰۰۲)، از حالت وسیله نقلیه‌ی چندگانه به عنوان مسأله مسیریابی وسایل نقلیه همراه با برداشت و تحویل همزمان اشاره کرده‌اند. سالهی و ناژی همان مسأله را مسأله مسیریابی وسایل نقلیه همزمان همراه با برداشت و تحویل (SVRPPD) نامیده‌اند. دل‌آمیکو و همکاران (۲۰۰۶) آن را مسأله مسیریابی وسایل نقلیه همراه با توزیع و جمع آوری همزمان (VRPSDC) می‌نامند. ما این دسته مسائل را با عنوان مسأله مسیریابی وسایل نقلیه همراه با برداشت و تحویل همزمان (VRPSPD)تعریف می‌کنیم. دتلف (۲۰۰۱) اهمیت VRPSPD در عملیات لجستیک معکوس را مورد بحث قرار داده است. او به ارائه یک فرمول ریاضی برای این مسأله جهت به حداقل رساندن مجموع مسافت طی شده همراه با حداکثر رساندن ظرفیت وسیله نقلیه پرداخت. او همچنین به توسعه یک روش فراابتکاری پرداخت که چهار معیار مختلف را برای حل مسأله مورد استفاده قرار می دهد. نگی و سالهی (۲۰۰۵) چهار روش ابتکاری الحاقی را برای ایجاد راه حل برای VRPSPD پیشنهاد کردند. گامهای اساسی این روش های ابتکاری ساختن مسیرهای جزئی برای مجموعه ای از مشتریان، و سپس قرار دادن مشتریان باقی مانده در مسیر موجود است. این قوانین ابتکاری به طور عمده توسط معیارهایی برای درج (جاگذاری) و تعداد مشتریان برای هر درج متمایز شدند. نگی و سالهی همچنین به ارائه روش ابتکاری جستجوی محلی با چهار مرحله برای حل VRPSPD پرداختند. پس از یافتن یک راه حل اولیه در مرحله اول، مدل در شرایط حفظ امکان پذیری جواب، به طور مداوم در هر یک از مراحل بعدی، بهبود می یابد. در هر دو مقاله، آنها نه تنها VRPSPD، بلکه موارد ترکیبی (مختلط) از VRP را مورد شناسایی قرار دادند که در آن برخی از مشتریان نیاز به تحویل و مشتریان دیگر نیاز به دریافت داشتند. آنها نشان دادند که VRPSPD، یک حالت کلی از مساله ترکیبی VRPMPD است. علاوه بر این، آنها همچنین این روش را برای حالت چند انباره گسترش دادند. دل آمیکو و همکاران (۲۰۰۶) برای اولین بار مقاله ای در خصوص یک روش دقیق برای حل VRPSPD منتشر کردند. آنها به ارائه یک الگوریتم بهینه سازی بر اساس تولید ستونی، برنامه‌ریزی پویا، و روش شاخه و قیمت پرداختند. با همه اینها، پیچیدگی محاسباتی VRPSPD از نتایج محاسباتی آن آشکار است، بطوریکه در این نوع مسائل، یک ساعت زمان محاسباتی، گاهی اوقات برای حل یک مساله کوچک

تشکیل شده از ٤٠ مشتری، کافی نمی‌باشد. توکلی مقدم و همکاران (۱۳۸۸) مدل برنامه ریزی ریاضی را برای مسیریابی وسایل نقلیه در حالت رقابتی ارائه کردند. سپس توکلی مقدم و همکاران (۱۳۹۴) یک مدل مسیریابی وسایل نقلیه چند انباره را در شرایط بلایای طبیعی ارائه و توسط الگوریتم بهینه سازی ازدحام ذرات حل کردند. در آخرین مطالعات انجام شده در این حوزه، لیو و همکاران (۲۰۱۲) یک مسأله مسیریابی وسایل نقلیه با برداشت و تحویل همزمان و پنجره زمانی را در بخش مراقبتهای پزشکی خانگی مطرح کردند. گکسال و کاراوقلان (۲۰۱۳) یک الگوریتم PS گسسته ترکیبی را برای مسأله مسیریابی وسایل نقلیه با بردا ت و تحویل همزمان در نظر گرفتند که درآن از یک روش جستجوی محلی توسط الگوریتم نزولی همسایگی متغیر بهره گرفته شده است. برهان و همکاران (۲۰۱۳) الگوریتم تکاملی تفاضلی را جهت حل مسأله مسیریابی وسایل نقلیه با برداشت و تحویل همزمان در شرایط احتمالی، ارائه کردند. این مسأله جهت سیستم حمل و نقل عمومی در موسسه خدمات اتوبوسرانی شهر آنبسا در آدیساباباى اتیوپی مدلسازی شده و با داده‌های واقعی گرفته شده از موسسه انجام گردیده است. یافته‌ها نشان می‌دهد که، DE الگوریتمی پایدار بوده و قادر به کاهش اندازه ناوگان به طور قابل توجهی می‌باشد. همچنین این الگوریتم در مقایسه با سایر الگوریتم‌های سنتی و دقیق از عملکرد بهتری برخوردار است. همچنین کالایجی و کایا (۲۰۱٦) یک روش کلونی مورچگان، غنی شده با الگوریتم جستجوی همسایگی را جهت مسأله مسیریابی وسایل نقلیه با برداشت و تحویل همزمان ارائه دادند. در این تحقیق، مدل مسیریابی وسایل نقلیه درشرایط برداشت و تحویل همزمان به گونه‌ای توسعه داده خواهد شد که با توجه به دانش نویسنده تاکنون در تحقیقات مسائل مسیریابی وسایل نقلیه با برداشت و تحویل همزمان مدنظر قرار نگرفته است. برای این منظور توسعه و نوآوری‌هایی که در این تحقیق انجام شده است هم در بخش مدل ریاضی مسأله و هم در بخش روش حل مسأله می‌باشد بطوری که در بخش مدل سازی ریاضی مسأله، در اهداف مسأله علاوه بر کاهش هزینه کل حمل‌ونقل، افزایش رضایت مندی رانندگان نیز درنظر گرفته شده است. به بیان دیگر در این تحقیق سعی شده علاوه بر در نظرگرفتن مسائل اقتصادی و زیست محیطی، از منظر مسائل اجتماعی نیز مسأله مورد بررسی قرار گیرد که این امر از طریق توزیع منصفانه‌ی کالا میان رانندگان وسایل نقلیه و درنتیجه برقراری تعادل در حجم کار رانندگان محقق می‌شود. در بخش روش حل نیز، با توجه به پیچیدگی مدل مسأله و عدم توانایی نرم‌افزارهای موجود همچون Gams برای حل دقیق مسائل در ابعاد بزرگ و در زمان معقول، برای اولین بار جهت حل مسأله‌ی دوهدفه‌ی مسیریابی وسایل‌نقلیه با برداشت‌وتحویل همزمان، از الگوریتم تکامل تفاضلی چندهدفه (MODE) استفاده‌شده و سپس جهت ارزیابی عملکرد روش، این الگوریتم با الگوریتم جستجوی هارمونی چندهدفه مقایسه می‌شود.

۲-تعریف مسأله

در این قسمت مسأله‌ی مسیریابی وسایل نقلیه با برداشت و تحویل همزمان با در نظر گرفتن ناوگان ناهمگن و بصورت مسأله ریاضی دو هدفه مدلسازی شده است. مشتریان دارای هر دو تقاضای برداشت و تحویل می‌باشند که بایستی در یک مرحله بازدید وسیله نقلیه کل تقاضا برآورده گردد. هدف اول مسأله کمینه‌سازی هزینه کل حمل و نقل و هدف دوم افزایش رضایت‌مندی رانندگان از طریق توازن توزیع کالا می‌باشد. هر وسیله نقلیه دارای ظرفیت محدود بوده و بایستی از انبار شروع نموده و در نهایت به انبار بازگردد. برای مسأله تعداد ناوگان نامحدودی در نظر گرفته شده که مدل مسأله بطور خودکار به میزان نیاز از وسایل نقلیه استفاده می‌کند بطوری که میزان اندازه ناوگان متناسب با مسأله را مشخص می‌کند. مسأله بصورت مدل برنامه‌ریزی غیرخطی عددصحیح مختلط فرموله شده است که در ادامه به شرح آن خواهیم پرداخت.

مدل ریاضی پیشنهادی

در این بخش مدل پیشنهادی برای مسأله‌ی مسیریابی وسایل نقلیه با برداشت و تحویل همزمان از طریق توازن توزیع کالا با در نظر گرفتن رضایت رانندگان و کاهش هزینه های مسیریابی بیان می‌شود. به منظور بیان مدل پیشنهادی، پارامترهای تعریف می‌شود.

اندیس‌ها و مجموعه‌های مدل

N: مجموعه‌ی تمام گره‌های تقاضا (مشتریان)

N_0: مجموعه‌ی تمام گره ها شامل انبار

K: مجموعه‌ی تمام وسایل نقلیه‌ی در دسترس

i: اندیس گره تقاضا بطوریکه $i=\{0,1,2\dots n\}$ و انبار در گره $i=0$

j: اندیس گره تقاضا بطوریکه $j=\{1,2\dots n\}$می‌باشد.

k: اندیس وسیله نقلیه نوع Kام

پارامترهای مدل و متغیرهای مسأله

C_k: هزینه‌ی متغیر هر واحد سفر با وسیله نقلیه‌ی نوع kام

G_k: هزینه‌ی ثابت وسیله نقلیه k ام

d_{ij}: فاصله میان دو گره i و j

q_i: تقاضای تحویلی به مشتری i

p_i: تقاضای برداشتی از مشتری i

Cap_k: ظرفیت وسیله نقلیه‌ی kام

X_{ijk}: برابر است با یک، اگر وسیله نقلیه k/م، مسیر بین مشتری i و مشتری j را بپیماید و در غیر این صورت صفر است.

l_{ijk}: میزان بار وسیله نقلیه k ام در طول مسیر مشتری i به j

S_{ik}: متغیر آزاد در علامت

u_k: میزان فروش نرمال شده وسیله نقلیهk/م

ū: میانگین نرمال شده فروش وسایط نقلیه

F_k: برابر است با یک اگر وسیله نقلیه k ام استفاده شده باشد و در غیر اینصورت صفر است.

m: تعداد خودروهای در دسترس

بر این اساس مدل مسأله به شرح زیر می‌باشد:

$$Z_1 = \text{MIN} \sum_{k=1}^{m} G_k F_k + \sum_{i=0}^{n}\sum_{j=1}^{n}\sum_{k=1}^{m} C_k d_{ij} X_{ijk} \quad (۱)$$

$$Z_2 = \text{MIN} \frac{\sum_{k=1}^{m}(u_k - (\bar{u} * F_k))^2}{m-1} \quad (۲)$$

s.t.

$$\sum_{i=0}^{n}\sum_{k=1}^{m} X_{ijk} = 1 \qquad ; \forall j \in N \quad (۳)$$

$$\sum_{j=1}^{n} X_{0jk} \leq 1 \qquad ;\forall k \in K \qquad (٤)$$

$$\sum_{i=0}^{n} X_{ijk} - \sum_{i=0}^{n} X_{jik} = 0 \qquad ;\forall j \in N, k \in K \qquad (٥)$$

$$l_{ijk} \leq Cap_k X_{ijk} \qquad ;\forall i \in N_0, j \in N_0, k \in K \qquad (٦)$$

$$\sum_{j=1}^{n} l_{0jk} = \sum_{i=0}^{n}\sum_{j=1}^{n} q_j X_{ijk} \qquad ;\forall k \in K \qquad (٧)$$

$$\sum_{i=0}^{n} l_{ijk} + (p_j - q_j)\sum_{i=0}^{n} X_{ijk} = \sum_{i=1}^{n+1} l_{jik} \qquad ;\forall j \in N, k \in K \qquad (٨)$$

$$u_k = \frac{\sum_{i=0}^{n}\sum_{j=1}^{n}(q_j + p_j)X_{ijk}}{Cap_k} \qquad ;\forall k \qquad (٩)$$

$$\bar{u} = \frac{\sum_{k=1}^{m} u_k}{m} \qquad (١٠)$$

$$F_k = \sum_{j=1}^{n} X_{0jk} \qquad ;\forall k \qquad (١١)$$

$$m = \sum_{k=1}^{m} F_k \qquad (١٢)$$

$$S_{ik} - S_{jk} + nX_{ijk} \leq n - 1 \qquad ;\forall i, j, k \qquad (١٣)$$

$$F_K, X_{ijk} \in (0,1)$$

$$l_{ijk}, Z_1, Z_2, u_k, \bar{u} \geq 0$$

تابع هدف این مدل پیشنهادی، از دو جزء تشکیل شده که جزء اول تابع هدف به دنبال کمینه سازی مجموع هزینه ثابت استفاده از وسیله نقلیه و هزینه متغیر حمل و نقل می باشد و جزء دوم آن به دنبال بیشینه سازی رضایت توزیع کنندگان از طریق کمینه‌نمودن واریانس اختلاف میانگین فروش وسایل نقلیه می‌باشد. محدودیت (۳) بیان می‌کند که هر گره مشتری برای تأمین تقاضای برداشت و تحویل خود بایستی فقط و فقط یکبار توسط وسیله نقلیه ملاقات شود. محدودیت (٤)، تعیین می‌کند که هر وسیله نقلیه از انبار شروع به حرکت نموده و به انبار بازگردد. محدودیت (۵) بیان می‌کند که اگروسیله نقلیه‌ای به گره‌ای وارد شود بایستی از آن خارج گردد و به این ترتیب پیوستگی مسیرها برقرار می‌گردد. محدودیت (٦) تا (۸) مربوط به محدودیت بار وسیله نقلیه است. محدودیت (٦) بیان می‌کند اگر $x_{ijk} = 1$ باشد آنگاه میزان بار حمل شده به نقطه j از

ظرفیت وسیله نقلیه تجاوز نمی‌کند. محدودیت (۷) بیان می‌کند که بار وسیله نقلیه هنگام ترک انبار برابر با مجموع تقاضای مشتریان بازدید شده خواهد بود. همچنین محدودیت (۸) میزان بار جدید وسیله نقلیه را بعد از بازدید مشتریان محاسبه می‌کند. محدودیت (۹) و (۱۰) به ترتیب بیانگر میزان فروش نرمال شده و میانگین نرمال شده میزان فروش هر یک از وسایل نقلیه است که به دلیل تنوع وسایل نقلیه میزان فروش هر وسیله نقلیه برای بی‌مقیاس شدن بر ظرفیت آن نوع وسیله نقلیه تقسیم شده است. محدودیت (۱۱) وسیله نقلیه‌ی استفاده شده را تعیین می‌کند و محدودیت (۱۲) تعداد وسایل نقلیه‌ی مورد نیاز برای برآوردن تمام تقاضای مشتریان اعم از تحویل و برداشت را تعیین می‌نماید. همچنین محدودیت (۱۳) مربوط به شکننده‌ی زیر تور است که از مدل آقای میلر و همکاران برداشت گردیده است.

برای حل مدل مذکور در ابعاد کوچک در نرم افزار GAMS از روش محدودیت اپسیلون به عنوان یکی از روش‌های بهینه‌سازی توابع چندهدفه استفاده شده است. از آنجاکه ماهیت مسأله پیچیده بوده و در زمره‌ی مسایل NP_سخت قرار می‌گیرد، روش‌های دقیق با بالابردن زمان حل، رویکردهای مناسبی جهت حل این‌گونه مسایل در ابعاد بزرگ نمی‌باشند، بنابراین برای حل مسأله در ابعاد بزرگ از الگوریتم فراابتکاری تکامل تفاضلی چند هدفه استفاده شده و جهت بررسی عملکرد، با روش جستجوی ممنوعه چندهدفه مقایسه گردیده است که در ادامه این روش‌ها تشریح می‌گردند.

۱-۱- روش محدودیت اپسیلون

روش محدودیت اپسیلون یکی از رویکردهای شناخته شده برای مواجه با مسایل چند هدفه می باشد که با انتقال تمامی توابع هدف به جز یکی از آنها در هر مرحله به محدودیت به حل این نوع مسایل می‌پردازد. مرز پارتو می‌تواند با روش قید ε ایجاد گردد.

$$\min \ f_1(x)$$

$$x \in X$$

$$f_2(x) \le \varepsilon_2$$

$$\dots$$

$$f_n(x) \le \varepsilon_n$$

گام‌های روش ε-Constraint به صورت زیر می‌باشد.

۱. یکی از توابع هدف را به عنوان تابع هدف اصلی انتخاب نمایید
۲. هر بار با توجه به یکی از توابع هدف مسأله را حل کنید و مقادیر بهینه و ندیر هر تابع هدف را بدست آورید.
۳. بازه بین دو مقدار بهینه و ندیر توابع هدف فرعی را به تعداد از قبل مشخص تقسیم‌بندی کنید و یک جدول مقادیر برای $\varepsilon_2,\dots,\varepsilon_n$ بدست آورید.
٤. هر بار مسأله را با تابع هدف اصلی با هر یک از مقادیر $\varepsilon_2,\dots,\varepsilon_n$ حل کنید.
۵. جوابهای پارتویی یافته شده را گزارش کنید.

۱-۲- الگوریتم تکامل تفاضلی چند هدفه (MODE)

الگوریتم تکامل تفاضلی[۲] (DE) الگوریتمی تصادفی و مبتنی بر جمعیت می باشد. این الگوریتم قابلیت بسیار بالایی برای حل مسائل بهینه دارد. بر خلاف دیگر الگوریتم ها که اول عملگر تقاطع[۳] و سپس عملگر جهش[٤] نجام می شود در الگوریتم تکامل تفاضلی اول عملگر جهش اعمال شده و سپس عملگر تقاطع اعمال می شود تا بدین وسیله نسل جدید ایجاد گردد. برای اعمال عملگر جهش، طول گام جهش برابر با مقدار از فاصله میان اعضای فعلی تعیین می شود. برای تولید جمعیت اولیه توزیع یکنواخت بکار می‌رود بطوریکه جمعیت بصورت یکسان در فضا پخش شده و در هر مرحله از الگوریتم اعضای آن به یکدیگر نزدیک می شوند تا جایی که این همگرایی منجر به رسیدن به جواب بهینه خواهد شد. یکی از عوامل مهم در این الگوریتم تعیین مقدار مناسب ضریب مقیاس می باشد، به طوریکه که با انتخاب ضریب کوچک، طول گام ها در عملگر

جهش کوچکتر شده و زمان بیشتری برای جستجو صرف می‌گردد. همچنین اگر ضریب مقیاس در الگوریتم تکامل تفاضلی بزرگ در نظر گرفته شود باعث می شود این الگوریتم جواب‌های مناسب رو در نظر نگیرد. از این رو در تعیین ضریب مقیاس دقت زیادی لازم است. بعد از مرحله جهش، در مرحله تقاطع عددی تصادفی بین صفر و یک تولید می‌شود که در صورتی که کمتر از میزان نرخ تقاطع باشد عنصر مورد نظر در آن عضو، از قسمت جهش و در غیر اینصورت از مقدار اولیه عضو برداشته می شود. اینقدر این کار تکرار می گردد تا تمامی اعضای یک عضو یا از قسمت جهش خورده یا از مقادیر اولیه خود انتخاب گردند. سپس ماتریسی که جدید تولید شده با ماتریس اولیه مقایسه می شود و اگر ماتریس جدید دارای هزینه کمتری باشد جایگزین ماتریس اولیه می شود. این کار برای تمامی اعضای جمعیت انجام می شود. سلسله فرآیند الگوریتم تکامل تفاضلی بصورت زیر است:

الف) تولید جمعیت اولیه: جمعیت اولیه‌ای شامل N عضو به صورت تصادفی تولید می‌شود به طوری که هر یک از جواب‌ها در محدوده‌ی فضای جواب مسأله باشند. در یک مسأله با فضای جستجوی m بعدی، ساختار عضو j ام به صورت $X^i = (x_1^i, x_2^i, x_3^i \dots x_m^i)$ می‌باشد.

ب) عمل جهش: برای هر عضو X^i در جمعیت، یک جواب جدید در هر تکرار t براساس معادله‌ی زیر ایجاد می‌شود:

(۱٤)

$$Y^i(t) = X^{r3}(t) + F\left(X^{r1}(t) - X^{r2}(t)\right) \quad i=1,2\dots N$$

که در آن $r1, r2, r3 \in [1, N]$ سه عدد صحیح تصادفی نامساوی هستند. ضریب مقیاس F یک عدد ثابت مثبت و حقیقی است که عموما برابر 0.5 در نظر گرفته می‌شود.

ج) عمل تقاطع: جواب جدید Z^i با ترکیب جواب‌های X^i و Y^i مطابق رابطه‌ی زیر حاصل می‌شود:

(۱۵)

$$Z_i = \begin{cases} y_j(t) & if\ rand \le CR\ or\ j = j\ rand \\ x_j(t) & otherwise \end{cases}$$

که در این رابطه $j\ rand \in [1,2,\dots,m]$ می‌باشد.

د) عمل انتخاب: اگر مقدار برازندگی جواب جدید تولید شده بهتر از جواب قبلی باشد جایگزین آن می‌گردد در غیر اینصورت همان جواب قبلی در تکرار بعد جستجو باقی می‌ماند.

و) توقف: فرآیند جستجو تا زمانی که معیار توقف الگوریتم برآورده شود، ادامه می‌یابد. معمولا معیار توقف الگوریتم می‌تواند برمبنای ثابت ماندن تغییرات برازندگی بهترین جواب یا تکرار الگوریتم تا یک تعداد مشخص انتخاب گردد.

۲-٤- الگوریتم جستجوی هارمونی چند هدفه (MOHS)

الگوریتم جستجوی هارمونی (HS) یک روش فراابتکاری تکاملی است که در آن جهت جستجوی جواب شدنی بهینه، از فرایند نواختن همزمان گروه ارکستر موزیک الهام گرفته شده است. بر اساس اصول این روش، فرآیند بدست آوردن هارمونی در یک فرآیند موسیقی، همانند یافتن جواب بهینه در مسائل بهینه‌سازی می‌باشد. روش جستجوی هارمونی جزو روش‌های بهبود دهنده می‌باشد، بطوری‌که با نسلی از بردارهای حل شروع و برای ایجاد نسلهای جدید از فرایند انتخاب استفاده می‌کند و در آن از همه‌ی بردارهای حل موجود در حافظه برای تولید جواب‌های جدید استفاده می شود. این الگوریتم سه فاز اصلی دارد: نسل اولیه (مقدار دهی اولیه)، بهبود بردار هارمونی جدید (بداهه سرایی)، بروز کردن حافظه الگوریتم. مطابق با مرحله اول، یک نسل اولیه از بردارهای هارمونی به طور تصادفی ایجاد و در حافظه هارمونی ذخیره می‌گردد. در مرحله دوم یک بردار هارمونی جدید (حل جدید) با استفاده از قواعد در نظر گرفتن حافظه، تطبیق گام و دوباره نسل سازی تصادفی از حل‌های موجود در حافظه الگوریتم ایجاد می‌گردد.

۲- نتایج محاسباتی

در این فصل به تجزیه و تحلیل نتایج محاسباتی خواهیم پرداخت. از این رو مسائل نمونه‌ای بر اساس دتلف [۴] ارائه

شده و مسأله در ابعاد کوچک با نرم افزار گمز حل گردیده است. همچنین جهت اعتبار سنجی روش‌های فراابتکاری پیشنهادی، نتایج گمز با نتایج حاصل از دو روش MODE و MOHS مقایسه گردیده است. در ادامه مسأله توسط دو روش پیشنهادی مذکور در ابعاد بزرگ حل شده و نتایج آن گزارش شده است. این مسائل توسط رایانه شخصی با پردازنده Intel core i5 , 2.4GHz و ٤ گیگا بایت حافظه داخلی توسط نرم افزار گمز در ابعاد کوچک و همچنین توسط نرم افزار متلب نسخه ٢٠١٤ در ابعاد بزرگ حل گردیده است.

٢-١- تعیین پارامترها

در این بخش پارامترهای در نظر گرفته شده به ترتیب برای حل مدل با الگوریتم فراابتکاری و روش محدودیت اپسیلون توضیح داده خواهد شد. جهت ارزیابی مدل به روش محدودیت اپسیلون، نمونه داده‌های تصادفی براساس تحقیقات دتلف [۴]، بدست آمده است. بر این اساس، تعداد ۱۲۰ مشتری در مربعی با ابعاد [100 , 0] بطور تصادفی و با توزیع یکنواخت، توزیع شده‌اند. براین اساس ماتریس مسافت بین گره‌های مبداء و مقصد بصورت فاصله پله‌ای (خطی شکسنه) محاسبه شده است. همچنین مقدار تقاضای تحویلی به مشتریان در بازه‌ی [80 , 20] بطور یکنواخت و تصادفی تعیین گردیده است. مقدار تقاضای برداشت نیز با توجه به رابطه‌ی زیر بدست می‌آید:

$$p_j = (0.5 + r_j)\, q_j$$

در این رابطه r_j عددی اعشاری است که بطور تصادفی در بازه‌ی [1 , 0] حاصل می‌شود.

ظرفیت وسایل نقلیه براساس رابطه زیر بدست آمده است:

$$Cap_k = \frac{\Sigma d_j}{\mu} \qquad (١٦)$$

بطوری که برای نمونه مسائل حل شده در ابعاد کوچک، μ برای وسایل نقلیه بزرگ، متوسط و کوچک، به ترتیب ٢، ٤ و ٦ و در ابعاد بزرگ به ترتیب ١٢، ٢٠ و ٣٠ می‌باشد. پارامتر های مدل برای حل مسأله در ابعاد کوچک و در ابعاد بزرگ به ترتیب در جداول ١ و ٢ آمده است:

جدول ١. داده‌های مدل برای نمونه مسائل در ابعاد کوچک

هزینه‌ی ثابت	هزینه‌ی متغیر	ظرفیت وسیله نقلیه	
٧٠٠	١٠	١٢٠	وسیله نقلیه‌ی نوع B (بزرگ)
٦٠٠	٧	٩٠	وسیله نقلیه‌ی نوع M (متوسط)
٥٠٠	٥	٧٠	وسیله نقلیه‌ی نوع S (کوچک)

جدول ٢. داده‌های مدل برای نمونه مسائل در ابعاد بزرگ

هزینه‌ی ثابت	هزینه‌ی متغیر	ظرفیت وسیله نقلیه	
١٢٠٠	١٠	٥٠٠	وسیله نقلیه‌ی نوع B (بزرگ)
٩٠٠	٧	٣٠٠	وسیله نقلیه‌ی نوع M (متوسط)
٧٠٠	٥	٢٠٠	وسیله نقلیه‌ی نوع S (کوچک)

لازم به توضیح است از آنجا که مدل بگونه‌ای طراحی گردیده که تناسب میان میزان تقاضای برداشت و تحویل مشتریان و تعداد وسیله نقلیه موردنیاز جهت خدمت دهی‌به آنان برقرار می‌گردد، لذا برای کلیه حالات، اندازه‌ی ناوگان در

دسترس، شامل ۲۰ دستگاه وسیله نقلیه کوچک، ۱۲ دستگاه وسیله نقلیه‌ی متوسط و ۸ دستگاه وسیله نقلیه‌ی بزرگ می‌باشد که فرض گردیده در انبار مستقر هستند. پارامترهای در نظر گرفته شده برای حل مدل پیشنهادی توسط الگوریتم MODE نیز، در جدول۳ نشان داده شده است.

جدول ۳. پارامترهای الگوریتم MODE

تعداد جمعیت اولیه	عملگر تقاطعی	عملگر جهشی
۵۰	۰/۷	۰/۷

۲-۲- اعتبار سنجی مدل

مسأله برای حل دقیق در ابعاد کوچک در نرم افزار گمز توسط روش محدودیت اپسیلون حل گردید. نتایج حل در جدول ٤ برای نمونه در ابعاد ۳ گره آمده است. توابع هدف اول و دوم بهترتیب کاهش هزینه توزیع و افزایش رضایت رانندگان از طریق توازن توزیع کالا می‌باشند. لازم به توضیح است که با توجه به دو هدفه بودن مسأله، جهت استفاده از روش حل دقیق مسأله توسط نرم افزار GAMS، از روش محدودیت اپسیلون استفاده شده است و به این طریق جواب‌های پارتویی بدست آمده از این روش در ابعاد کوچک با جواب‌های بدست آمده از روشهای پیشنهادی مقایسه گردیده است. جهت حل مسأله‌ی مورد نظر و دستیابی به جواب‌های پارتو در نرم افزار GAMS نسخه‌ی ۲,۲٤، از سولور (حل کننده‌ی) Baron در شرایط مدل غیرخطی عدد صحیح مختلط استفاده شده است.

جدول ٤. روش محدودیت اپسیلون برای ۳ گره

ردیف	مقدار اپسیلون	هدف اول	هدف دوم
۱	۰	–	۰,۰۰۷۸
۲	۰,۰۰۰۵	۳۰۲۰	۰,۰۰۸۳
۳	۰,۰۰۷	۲۳۳٤	۰,۰۱٤۸
٤	۰,۰۲	۲۳۰۰	۰,۰۲۷۸
٥	۰,۰۳	۲۳۰۰	۰,۰۲۷۸

جهت اعتبار سنجی مدل، مسأله در ابعاد کوچک (۳ گره تا ٥ گره) حل گردیده و جواب‌های بدست آمده از نرم افزار GAMS جهت سنجش کارآمدی نتایج الگوریتم‌های پیشنهادی، با جواب‌های بدست آمده از دو روش MODE و MOHS مقایسه گردیده است. این نتایج در جداول ٥ و ٦ نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد که هر دو روش پیشنهادی MODE و MOHS جواب‌های به نسبت مناسبی را تولید می‌کنند. با مقایسه نتایج روش ابتکاری با جواب‌های بدست آمده از نرم افزار GAMS با روش محدودیت اپسیلون، مقدار گپ بدست آمده قابل قبول بوده و نتایج هر دو روش نسبت به جواب بهینه نزدیک می‌باشد.

از آنجا که زمان محاسبات در نرم افزار گمز با بزرگ شدن ابعاد مساله بشدت بالا می‌رود لذا حداکثر تا ٦ گره مشتری را برای حل مسأله با روش محدودیت اپسیلون در نظر گرفتیم و

حل مدل در ابعاد بزرگتر توسط گمز به دلیل NP_سخت بودن مسأله تقریبا غیر ممکن می‌نماید. از این رو در ادامه جهت بدست آوردن جواب‌های نزدیک به بهینه، مدل مسأله در ابعاد بزرگ صرفا توسط روش فراابتکاری MODE حل گردیده و نتایج آن جهت بررسی الگوریتم پیشنهادی، با روش MOHS مقایسه شده است.

جدول ٥. اعتبار سنجی روش MODE برای مسأله‌ی VRPSPD براساس مدل MINLP

شماره نمونه	GAMS			MODE			Gap1 (%)	Gap2 (%)
	هدف اول	هدف دوم	زمان محاسبات	هدف اول	هدف دوم	زمان محاسبات		
GDE3	٢٣٠٠	٠,٠٢٧٨	١٤,٥٦	٢٣٥٣	٠,٠٢٧	٢٢	٠,٠٢	٠,٠٢٨
GDE4	٣٦٥٨	٠,٠٠١٥	٤٦,٧١	٣٦٥٨	٠,٠٠١٥	٣١	٠	٠
GDE5	٤٨٦٨	٠,٠٠٤٨	٦٧,٦٤	٤٨٨٠	٠,٠٠٤٦	٣٧	٠,٠٠٣	٠,٠٤
GDE6	٥٨٤٠	٠,٠٠١٧	١٤٩,٨٩	٥٨٤٠	٠,٠٠١٧	٤١	٠	٠

جدول ٦. اعتبار سنجی روش MOHS برای مسأله‌ی VRPSPD براساس مدل MINLP

شماره نمونه	GAMS			MOHS			%Gap1	%Gap2
	هدف اول	هدف دوم	زمان محاسبات	هدف اول	هدف دوم	زمان محاسبات		
GDE3	٢٣٠٠	٠,٠٢٧٨	١٤,٥٦	٢٣٢٣	٠,٢٧٢	١٦	٠,٠٠١	٠,٠٢
GDE4	٣٦٥٨	٠,٠٠١٥	٤٦,٧١	٣٧٢٠	٠,٠٠١٣	٢١	٠,٠٠٢	٠,١٣
GDE5	٤٨٦٨	٠,٠٠٤٨	٦٧,٦٤	٤٩١٠	٠,٠٠٤٥	٢٤	٠,٠١	٠,٠٦
GDE6	٥٨٤٠	٠,٠٠١٧	١٤٩,٨٩	٥٨٩٠	٠,٠٠١٦	٢٩	٠,٠٠٨	٠,٠٥

٢-٣- بررسی الگوریتم فراابتکاری ارائه شده در ابعاد بزرگ مسأله

جهت ارزیابی کیفیت و پراکندگی الگوریتم فراابتکاری چندهدفه، شاخص‌های مقایسه متعدد و متنوعی وجود دارد که در این تحقیق از سه نوع شاخص تعداد جواب‌های غیر مغلوب یافت شده، فاصله و شاخص گوناگونی استفاده شده است: شاخص تعداد جواب‌های غیر مغلوب یافت شده (NPS): این شاخص تعداد جواب‌های پارتوی بدست آمده توسط هر الگوریتم را نشان می‌دهد. در حقیقت این شاخص به مقایسه‌ی کیفیت جواب‌های پارتوی به دست آمده توسط روش‌های مختلف می‌پردازد که هرچه این مقدار بیشتر باشد الگوریتم از کیفیت بالاتری برخوردار است.

شاخص فاصله (SM): این معیار یکنواختی قانون توزیع جواب‌های غیر مغلوب بدست آمده توسط هر الگوریتم را می یابد که هرچه کمتر باشد، بهتر است و بصورت تعریف می‌گردد:

$$S = \left[\frac{\sum_{i=1}^{n}(\bar{y} - y_i)^2}{n-1}\right]^{1/2}$$

که در آن y_i برابر است با فاصله‌ی اقلیدسی بین دو جواب پارتو کناری در فضای حل و $\bar{y}$ میانگین این فواصل است.

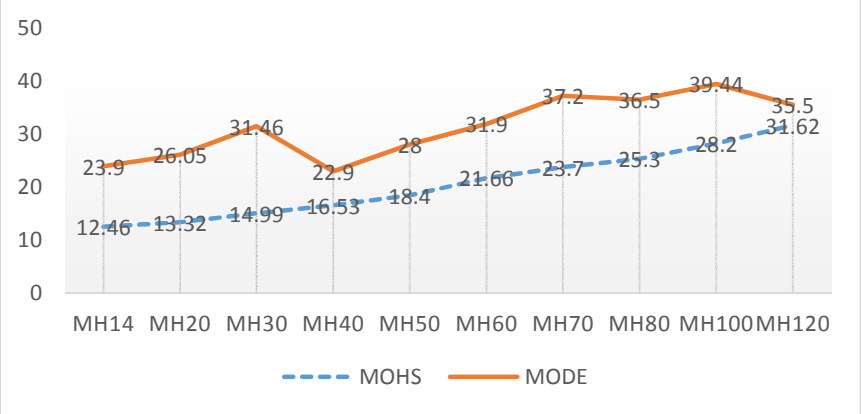
شاخص گوناگونی (DM): این شاخص برای میزان تنوع و تعداد جواب‌های مغلوب یافت شده بر روی مرز بهینه استفاده می‌شود که هرچه بیشتر باشد بهتر است.

به منظور بررسی عملکرد الگوریتم MODE، مدل در ابعاد (۱۲۰،۱۰۰،۸۰،۷۰،۶۰،۵۰،۴۰،۳۰،۲۰،۱۴) گره مشتری حل شده و نتایج آن بر اساس سه شاخص NPS و SM و DM با روش MOHS مقایسه شده است که نتایج این محاسبات در جدول ۷ آمده است.

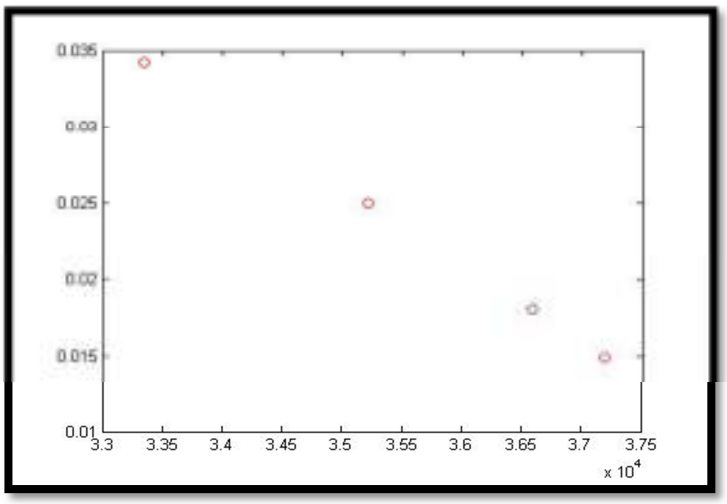
جدول ۷. مقایسه نتایج محاسباتی روش‌های MODE و MOHS برای حل مسأله در ابعاد بزرگ

شماره نمونه	NPS		SM		DM		Time	
	MODE	MOHS	MODE	MOHS	MODE	MOHS	MODE	MOHS
MH14	٤	٣	٠,٠٧	٠,٤	٨٠	٨٨,٣	٢٣,٩	١٢,٤٦
MH20	٤	٥	٠,٨٨	٠,٨٤	١١٤,٦	١١٤,٧	٢٦,٠٥	١٣,٣٢
MH30	٤	٣	١,١٨	١,٥٧	١١٤,٢	٩٠	٣١,٤٦	١٤,٩٩
MH40	٣	٤	١,٧	٠,٦٤	١٠٤	١٣٠,٥٤	٢٢,٩	١٦,٥٣
MH50	٤	٣	٠,٦	٠,٧٤٤	١١٣	١٣٤,٧	٢٨	١٨,٤٠
MH60	٤	٢	١,١	٠	٨٢,٧	١٣٠	٣١,٩	٢١,٦٦
MH70	٦	٢	١,٠٣	٠	١٢٣,٧	٥١	٣٧,٢	٢٣,٧
MH80	٤	٣	٠,٧٩	١,٢	١٠٥	١١٣	٣٦,٥	٢٥,٣
MH100	٥	٤	٠,٩١	١,١	٢٣٨,٦	١٢٦	٣٩,٤٤	٢٨,٢
MH120	٤	٣	١,٢٩	١,٦٤	٨٩,٩	٩٠	٣٥,٥	٣١,٦٢

مشاهده می‌شود که الگوریتم تکامل تفاضلی چندهدفه در ۸۰ درصد موارد در شاخص NPS از الگوریتم جستجوی هارمونی چندهدفه بهتر است و در شاخص SM در حدود ۵۰ درصد موارد بهتر می‌باشد (در شاخص SM هرچه مقادیر کوچکتر باشد بهتر است). همچنین در شاخص DM تقریباً نتایج مشابه است. با وجود آنکه الگوریتم تکامل تفاضلی چندهدفه در کیفیت جواب‌ها و در شاخص‌های مقایسه‌ای بهتر عمل نموده اما در زمان محاسباتی مشاهده می‌گردد که روش جستجوی هارمونی به مراتب بهتر عمل کرده است. نمودار زمان محاسباتی دو روش در شکل ۱ نشان داده شده است. همچنین نمودار پارتو بدست آمده از روش تکامل تفاضلی چندهدفه برای حل مسأله در بعد ۵۰ گره، در شکل ۲ نمایش داده شده است.



شکل ۱. نمودار مقایسه زمان محاسباتی دو روش MODE و MOHS



شکل ۲. نمودار پارتو روش MODE در ابعاد ۵۰ مشتری

۳- نتیجه‌گیری

در این تحقیق، در ابتدا براساس مسائل نمونه دتلف، پارامترهای مسأله تعیین گردید. سپس جهت اعتبارسنجی مدل و روش‌های پیشنهادی، نتایج مسأله در ابعاد کوچک با روش‌های دقیق و ابتکاری ارزیابی شد.

نتایج نشان از کارآمدی روش‌های پیشنهادی و کاهش زمان محاسباتی بطور قابل توجهی داشت. در ادامه دو روش پیشنهادی در ابعاد بزرگ باهم مقایسه گردیدند که نتایج نشان داد روش تکامل تفاضلی چندهدفه در شاخص‌های مقایسه‌ای کیفیت به مراتب مطلوبتری دارد اگرچه با توجه به شکل ۱ مشاهده می‌گردد که روش جستجوی هارمونی چندهدفه به زمان محاسباتی کمتری نیاز خواهد داشت.

دربخش تحقیقات آتی پیشنهاد می‌شود جهت پایدار شدن مسأله و همچنین نزدیک شدن مسأله به شرایط دنیای واقعی، علاوه بر در نظر گرفتن اهداف اقتصادی و اجتماعی شامل کاهش هزینه توزیع و توازن توزیع کالا، هدف کاهش مصرف سوخت نیز به عنوان یک هدف سبز به مدل اضافه گردد.

٤- مراجع

-توکلی مقدم، ر.، علینقیان، م. و سلامت بخش، ع. (۱۳۸۸)، "ارایه و حل مدل برنامه‌ریزی ریاضی جدید برای مسیریابی وسائط نقلیه در حالت رقابتی :یک مطالعه موردی"، پژوهشنامه

حمل و نقل، سال ششم، شماره چهارم، زمستان ۱۳۸۸، ص. ۳۱۱-۳۲۳.

- ساعی، س.، توکلی مقدم، ر. و علینقیان، م. (۱۳۹٤)، "مدلسازی ریاضی جدید برای مسیریابی وسایل نقلیه‌ی چند دپو در شرایط بلایای طبیعی و حل آن با الگوریتم بهینه‌سازی ذرات انبوه"، پژوهشنامه حمل و نقل، سال دوازدهم، شماره اول، ص. ۳۷-۵۱.

-Angelelli E, Mansini R. (2002), The vehicle routing problem with time windows and simultaneous pickup and delivery. In: Klose A., Speranza MG, Van Wassenhove LN (eds.) Quantitative Approaches to Distribution Logistics and Supply Chain Management. Springer, Berlin-Heidelberg, pp.249–267.

–Berhan E, Krömer P, Kitaw D, Abraham A., Snásel V. (2013), "Solving stochastic vehicle routing problem with real simultaneous pickup and delivery using differential evolution. IBICA, pp.187–200.

-Dell'Amico M., Righini G., Salani M., (2006), "A branch-and-price approach to the vehicle routing problem with simultaneous distribution and collection". Transport Sci 40: pp.235–247.

- Dethloff J. (2001), "Vehicle routing and reverse logistics: The vehicle routing problem with simultaneous delivery and pickup". OR Spektrum 23, pp.79–96.

-Gendreau M, Laporte G, Vigo D. (1999), Heuristics for the traveling salesman problem with pickup and delivery. Comput Oper Res 26: pp.699–714.

–Goksal F.P., Karaoglan E, Altiparmak F. (2013), " A hybrid discrete particle swarm optimization for vehicle routing problem with simultaneous pickup and delivery". Computers & Industrial Engineering 65: pp.39–53.

-Kalayci C.B., Kaya, C. (2016), "An ant colony system empowered variable neighborhood search algorithm for the vehicle routing problem with simultaneous pickup and delivery". Expert Systems with Applications 66: pp.163–175.

–Liu R., Xie X., Augusto V., Rodriguez C. (2012), "Heuristic algorithms for a vehicle routing problem with simultaneous delivery and pickup and time windows in home health care". European Journal of Operational Research 230(3): pp.475–486.

-Min, H. (1989), "The multiple vehicle routing problem with simultaneous delivery and pickup points". Transport Res A-Pol 23: pp.377–386.

-Nagy G., Salhi S., (2005), "Heuristic algorithms for single and multiple depot vehicle routing problems with pickups and deliveries". Eur J Oper Res 162: pp.126–141.