نشريه تخصصي مهندسي صنايع، دوره۴۳، شماره ۱، آذر ماه ۱۳۸۸، از صفحه ۲۵ تا ۳۶

حل مساله‌ی مسيريابي وسايل نقليه در حالت چندهدفي، چندقرارگاهي و احتمالي، با استفاده از آنيلينگ شبيه‌سازي شده

حسينعلي حسن‌پور[1]، مسعود مصدق‌خواه[*2] و رضا توكلي‌مقدم[3]
[1] مربي گروه مهندسي صنايع - دانشكده فني و مهندسي - دانشگاه امام حسين(ع)
[2] استاديار گروه مهندسي صنايع - دانشكده فني و مهندسي - دانشگاه امام حسين(ع)
[3] استاد گروه مهندسي صنايع - پرديس دانشكده‌هاي فني - دانشگاه تهران
(تاريخ دريافت ۸۶/۱۰/۱۵، تاريخ تصويب ۸۸/۹/۳۰)

چكيده

در اين مقاله، حل مساله‌ی مسيريابي وسايل نقليه[1] (VRP) در حالت چندهدفي، چندقرارگاهي و احتمالي، بررسي مي‌شود. در دسترس بودن[2] يال[3] (متصل كننده دو گره تقاضا) به‌عنوان جنبه‌اي از VRP در مسائل دنياي واقعي، ملاحظه شده است. در دسترس بودن يال‌ها ممكن است قطعي نباشد و به دلايل مختلف، هر يال با احتمال معيني در دسترس باشد. با ملاحظه‌ی اين جنبه، مدل رياضي مساله و بهينه‌سازي آن، به گونه‌اي عمل مي‌كند كه ضمن كمينه‌سازي هزينه‌ی حمل‌ونقل، تحويل اقلام در مسيرهايي صورت گيرد كه با احتمال بيشتري در دسترس باشند. به دليل پيچيدگي محاسباتي اين مساله، براي حل آن، از الگوريتم فراابتكاري آنيلينگ شبيه‌سازي شده[4] (SA) كه با دو عملگر جستجوي همسايگي تلفيق شده است، استفاده مي‌شود. براي نشان دادن كارآيي الگوريتم، تعدادي مساله در ابعاد مختلف، حل و نتايج محاسباتي با حل‌هاي به دست آمده از يك الگوريتم دقيق و با ملاحظه‌ی حدپائين، مقايسه مي‌شوند.

واژه هاي كليدي: مساله‌ی مسيريابي وسيله‌ی نقليه، چندهدفي، چندقرارگاهي، احتمالي، الگوريتم آنيلينگ شبيه‌سازي شده

مقدمه

"مساله‌ی مسيريابي وسيله‌ی نقليه (VRP) به مجموعه‌اي از مسائل اطلاق مي‌گردد كه در آن، تعدادي خودرو متمركز در يك يا چند قرارگاه، بايد به مجموعه‌اي از مشتريان، مراجعه نموده و خدمتي را ارائه دهند كه هر يك، داراي تقاضاي معيني هستند." VRP در حالت‌هاي متنوعي، قابل بررسي است. اما مسيريابي وسيله‌ی نقليه با محدوديت ظرفيت[5] (CVRP) نمونه‌ی اصلي مساله‌ی مسيريابي وسيله‌ی نقليه است كه در آن، همه‌ی مشتريان، داراي تاريخ تحويل مشابه و تقاضاي معين هستند و امكان شكستن تقاضا وجود ندارد. همچنين، كليه‌ی وسايل نقليه، يكسان بوده و داراي يك قرارگاه مركزي هستند. تنها محدوديت آن، ظرفيت وسايل نقليه است. در اين حالت، هدف، كمينه‌سازي تركيب خطي از تعداد مسيرها، طول آن‌ها يا زمان سفر، جهت خدمت به مشتريان است [۱]. در اين مقاله، حالت توسعه يافته‌اي از CVRP ارائه مي‌شود كه در آن، تحويل اقلام به مشتريان، تحت شرايط زير، انجام مي‌شود:

۱- وسايل نقليه، از چند قرارگاه، حركت مي‌كنند.
۲- هر يال، با احتمال معيني، در دسترس است.
۳- تابع هدف مساله به گونه‌اي تعيين مي‌شود كه ضمن كمينه‌سازي هزينه‌ی حمل‌ونقل، تحويل اقلام در مسيرهايي صورت گيرد كه با احتمال بيشتري در دسترس‌اند.

در تحقيق جاري، سيستم توزيع يک سازمان لجستيكي دفاعي، بررسي مي‌شود. در اين سيستم، تعدادي خودروي متمركز در چند قرارگاه به مجموعه‌اي از مشتريان، مراجعه نموده و اقلام مورد نياز را تحويل مي‌دهند. چالشي كه اين سيستم لجستيكي با آن مواجه است اين است كه به دلايل بحراني، مسيرهايي از ارسال اقلام، تخريب مي‌شود و در مواقعي، امكان عبور خودروها از برخي مسيرها امكان پذير نيست و يا عبور آن‌ها با ريسک، همراه است. در اين حالت، براي عبور خودروها، هر يال (متصل كننده‌ی دو گره تقاضا) با احتمال معيني بين ۰ و ۱، در دسترس است. بهينه سازي اين مسأله بايد طوري

* نويسنده مسئول : تلفن/ فاكس : ۷۷۱۰۴۹۰۲ ، Email: mmosadegh@inu.ac.ir

صورت گيرد که ضمن حداقل‌کردن هزينه‌ی حمل‌ونقل، تحويل اقلام در مسيرهايي انجام شود که با احتمال بيشتري در دسترس باشند. از اين رو، دو نوع تابع هدف يعني هزينه و احتمال، وجود دارد. بنابراين، تحقيق جاري با يک مسأله VRP در حالت چندقرارگاهي، چندهدفي و احتمالي مواجه است؛ به طوري که هر يال متصل‌کننده بين دو گره، با احتمال معيني در دسترس است. اين تحقيق، علاوه بر سازمان هاي لجستيکي دفاعي، در سازمان حمل‌ونقل، سازمان کشتيراني، وزارت راه و ترابري و وزارت بازرگاني کاربرد دارد. به عنوان مثال، در کشتيراني، دسترسي به يال متصل کننده بين دو گره (در مسيرهاي آبي و اقيانوس ها) احتمالي است و کاهش همزمان هزينه‌ی حمل‌ونقل و عبور کشتي‌ها از مسيرهايي که با احتمال بيشتري در دسترس باشند، از اهميت بالايی برخوردار است.

تاکنون، مطالعات زيادي در زمينه VRP چندقرارگاهي و نيز چندهدفي انجام شده است؛ ولي در حالتي که هر يال با احتمال معيني در دسترس باشد، مطالعات کمتري صورت گرفته است. در ادامه، مطالعات مرتبط با مسأله VRP در حالت چندقرارگاهي، چندهدفي و وقتي دسترسي به يال، احتمالي است، مرور مي‌گردد.

تعداد قرارگاه‌ها (تسهيلات/ انبارها) ممکن است تکي يا چندقرارگاهي باشد. در مطالعه‌ی نگي و سالحي [۲] يک مسأله‌ی VRP چندقرارگاهي با مراحل خدمت‌دهي، جمع‌آوري و تحويل[۶]، ارائه گرديد. حل اين مسأله با استفاده از يک الگوريتم ابتکاري بر مبناي برخي رويکردهاي جستجوي همسايگي مانند 2-opt و معاوضه[۷]، بررسي شد. در مطالعه‌ی هو و همکاران [۳] حل يک مسأله‌ی VRP چندقرارگاهي با استفاده از دو نوع الگوريتم ژنتيک[۸] (GA) بررسي شد. در نوع اول، جواب اوليه به طور تصادفي توليد مي‌شود ولي در نوع دوم، جواب اوليه با استفاده از مکانيزم نزديک‌ترين همسايه[۹] و مکانيزم صرفه‌جويي[۱۰] کلارک و رايت[۱۱]، توليد مي‌شود. در مطالعه‌ی کروير و همکاران [۴] يک مسأله‌ی VRP چندقرارگاهي، توسعه يافت که در آن، وسايل نقليه ممکن است در انبارهاي مياني در امتداد مسير، ذخيره‌سازي مجدد[۱۲] نمايند. حل اين مسأله با يک روش ترکيبي حاصل از جستجوي ممنوع[۱۳] (TS) و اصول منطبق بر حافظه[۱۴]، بررسي شد. در مطالعه‌ی دوند و سردا [۵] يک مسأله‌ی VRP چندقرارگاهي با محدوديت پنجره‌ی زماني[۱۵]، در مقياس بزرگ و در حوزه‌ی مديريت زنجيره‌ی تأمين، ارائه شد که حل اين مسأله نيز با استفاده از يک الگوريتم ابتکاري بهبود جستجوي محلي، بررسي شد. هوليس و همکاران [۶] يک مسأله‌ی VRP چندقرارگاهي و زمان‌بندي خدمت کارکنان را در شبکه پستي، ارائه کردند. حل اين مسأله با روش پوشش مجموعه[۱۶] با توليد ستون[۱۷]، بررسي گرديد. در مطالعه‌ی پسينگر و روپکه [۷] حل انواع مسائل مرتبط با VRP ازجمله VRP چندقرارگاهي، با استفاده از جستجوي همسايگي بزرگ بررسي شد. در مطالعه‌ی حسن‌پور و همکاران [۸] مسأله اصلي مکان‌يابي- مسيريابي به دو مسأله‌ی فرعي مکان‌يابي قرارگاه[۱۸] (FLP) و VRP چندقرارگاهي تجزيه شد. ابتدا مساله‌ی FLP با استفاده از رويکرد مساله پوشش مجموعه احتمالي[۱۹] (SSCP) حل شد و سپس، با توجه به نتايج مکان‌يابي قرارگاه‌ها در مرحله قبل، مساله‌ی VRP چندقرارگاهي با استفاده از روش SA که با عملگرهاي 1-opt و 2-opt ترکيب شده‌است، حل شده و نتايج محاسباتي، با نرم‌افزار Lingo مقايسه شد.

تابع هدف، ممکن است هزينه، زمان، احتمال پوشش، احتمال در دسترس بودن، ريسک حمل‌ونقل و يا ترکيبي از آن‌ها باشد. اکثر مسائل VRP، حداقل‌کردن هزينه‌ی حمل‌ونقل را به عنوان تابع هدف در نظر گرفتند. با اين وجود، در مطالعات توکلي‌مقدم و همکاران [۹-۱۱]، سه نوع مختلف از مسأله CVRP در حالت چندهدفي بررسي شد که تابع هدف کل در آن‌ها به ترتيب، ترکيبي از حداقل‌کردن تعداد وسايل نقليه و حداکثرکردن ظرفيت استفاده از وسايل نقليه [۹]، ترکيبي از حداقل‌کردن هزينه‌ی ناوگان و فاصله کل سفر [۱۰] و ترکيبي از حداقل‌کردن مسافت طي شده، تعداد وسايل‌نقليه و ديرکردها است [۱۱]. اين مسائل با استفاده از روش SA که با عملگرهاي 1-opt و 2-opt ترکيب شده است حل شده و نتايج با نرم‌افزار Lingo مقايسه شد.

در مطالعه‌ی العمر و کارا [۱۲] يک مسأله‌ی مکان‌يابي- مسيريابي در حالت چندهدفي ارائه شد که در آن، تابع هدف کل، ترکيبي از هزينه و ريسک حمل‌ونقل است. اين مسأله، با استفاده از نرم افزار CPLEX حل شد. در مطالعه‌ی کابالرو و همکاران [۱۳]، يک مسأله‌ی مکان‌يابي- مسيريابي در حالت چندهدفي ارائه شد که در

آن، تابع هدف کل، ترکيبي از هزينه و ريسک حمل‌ونقل است. اين مسأله، با استفاده از الگوريتم TS حل شد. به دليل مشابه، امکان استفاده از دو مطالعه‌ی اخير در مدل-سازي تحقيق جاري وجود دارد.

در دسترس بودن يال، ممکن است قطعي يا احتمالي باشد. در وضعيت احتمالي، يال متصل‌کننده دو گره تقاضا با احتمال معيني، در دسترس است.

تحقيقات يادشده‌ی بالا به لحاظ برخي جنبه‌هاي مسأله‌ی VRP به مانند چندقرارگاهي، چندهدفي و روش حل، تا حدودي مرتبط با تحقيق جاري است. اين جنبه‌ها در جدول (۱) خلاصه شده است.

جدول ۱: مطالعات مروري مرتبط با تحقيق جاري.

مرجع	جنبه مرتبط با تحقيق جاري	روش حل
۲	VRP چندقرارگاهي	2-opt، معاوضه و ساير روش‌هاي جستجو
۳	VRP چندقرارگاهي	GA
۴	VRP چندقرارگاهي	TS و اصول منطبق بر حافظه
۵	VRP چندقرارگاهي	بهبود جستجوي محلي
۶	VRP چندقرارگاهي	پوشش مجموعه با توليد ستون
۷	VRP چندقرارگاهي	جستجوي همسايگي
۸	VRP چندقرارگاهي (مسأله فرعي مکان‌يابي-مسيريابي)	Lingo، SA ترکيبي با 1-opt و 2-opt
۹	CVRP چندهدفي (ترکيب تعداد وسايل و ظرفيت حمل)	Lingo و SA ترکيبي با 1-opt و 2-opt
۱۰	CVRP چندهدفي (ترکيب هزينه ناوگان و فاصله کل)	Lingo و SA ترکيبي با 1-opt و 2-opt
۱۱	CVRP چندهدفي (ترکيب مسافت، تعداد وسايل و ديرکردها)	Lingo و SA ترکيبي با 1-opt و 2-opt
۱۲	مکان‌يابي- مسيريابي چندهدفي (ترکيب هزينه و ريسک حمل)	نرم‌افزار CPLEX
۱۳	مکان‌يابي- مسيريابي چندهدفي (ترکيب هزينه و ريسک حمل)	TS

در ادامه، با درنظرگرفتن جنبه‌ی احتمالي دسترسي به يال‌ها، مدل رياضي مساله‌ی VRP در حالت چندقرارگاهي، چندهدفي و احتمالي ارائه مي‌شود. از آن‌جا که VRP، يک مساله NP-Hard است [۱۴]، حل آن از طريق برنامه‌ريزي خطي و نرم افزارهاي موجود، امکان پذير نبوده و يا به مدت زمان بالايي نياز دارد؛ لذا براي حل اين نوع مسائل، از روش‌هاي فرا ابتکاري استفاده مي‌شود. در اين تحقيق، از بين روش‌هاي فرا ابتکاري موجود، از الگوريتم SA که با عملگرهاي 1-opt و 2-opt تلفيق شده‌است، استفاده مي‌شود. براي نشان‌دادن عملکرد الگوريتم SA تلفيقي، نتايج محاسباتي با جواب‌هاي حاصل از نرم‌افزار Lingo 8 در مسائل با ابعاد پائين مقايسه مي‌شود. همچنين، الگوريتمSA تلفيقي براي حل تعدادي مساله‌ی نمونه در ابعاد بزرگ به‌کار مي رود و نتايج محاسباتي، با نتايج حد پائين الگوريتم، دقيق مقايسه مي‌شود.

مدل رياضي مساله

در اين مقاله، مدل رياضي VRP چندقرارگاهي، چندهدفي و در حالت احتمالي، ارائه مي‌گردد. بهينه‌سازي مساله به گونه‌اي عمل مي کند که ضمن کمينه‌سازي هزينه‌ی حمل‌ونقل، ارسال اقلام در مسيرهايي صورت گيرد که با احتمال بيشتري در دسترس باشند. مسأله‌ی مسيريابي وسيله‌ی نقليه مي‌تواند به وسيله يک گراف $G(V, A)$ نشان داده شود که در آن، $V=\{1,2,\ldots,i,\ldots,N\}$ مجموعه اي از گره‌ها و $A=\{(i,j): i,j \in V, i \# j\}$ مجموعه اي از يال‌هاي متصل کننده‌ی گره‌ها هستند [۹ و ۱۰]. براي طرح بهتر مدل رياضي، ابتدا مفروضات مدل، علائم و پارامترها و متغير تصميم ارائه مي‌شود و سپس تابع هدف و محدوديت‌هاي آن، بيان مي‌شود.

الف- مفروضات مدل

۱- ارسال اقلام به مشتري، از چند قرارگاه، انجام مي‌شود.
۲- اقلام مورد نياز مشتري، در محل قرارگاه، موجود است.
۳- مقدار تقاضاي هر مشتري، ثابت و معين است.
۴- ناوگان وسايل نقليه، همگن است.
۵- ظرفيت حمل هر وسيله‌ی نقليه، محدود است.
۶- هر يال با احتمال معيني در دسترس است.

ب -علائم و پارامترها

N: تعداد کل گره‌ها در گراف $G(V, A)$

MD: مجموعه گره‌هائي که به‌عنوان قرارگاه، انتخاب مي‌شوند.

NV: تعداد وسيله‌نقليه.

DV: حداکثر ظرفيت وسيله‌ی نقليه.

d_i: تقاضاي مشتري i .

t_i: زمان ارائه‌ی خدمت به مشتري i .

t_{ij}: زمان سفر در يال (i,j).

T: حداكثر زمان خدمت‌دهي و طي مسير.

C_{ij}: هزينه‌ی حمل‌ونقل در يال (i,j).

p_{ij}: احتمال در دسترس بودن/ دسترسي به يال (i,j).

q_{ij}: احتمال عدم دسترسي به يال (i,j) .

S: زير مجموعه‌اي از V.

$r(S)$: حداقل وسايل مورد نياز براي خدمت‌دهي به S .

ج- متغير تصميم گيري

X_{ij}^{v} : اگر وسيله‌ی نقليه v، يال (i,j) را طي كند، متغير تصميم، برابر ۱ است. در غير اين صورت، برابر صفر است.

د- مدل رياضي پيشنهادي

مدل رياضي VRP پيشنهادي، به صورت زير است:

$$Z_1 = Min \sum_{i=1}^{N} \sum_{j=1}^{N} \sum_{v=1}^{NV} C_{ij} X_{ij}^{v} \qquad (۱)$$

and

$$Z_2 = Max \sum_{v=1}^{NV} (\prod_{i=1}^{N} \prod_{j=1}^{N} P_{ij} X_{ij}^{v}) \qquad (۲)$$

s.t:

$$\sum_{i=1}^{N} \sum_{v=1}^{NV} X_{ij}^{v} = 1 \quad , \quad j =\notin MD \qquad (۳)$$

$$\sum_{i=1}^{N} X_{ip}^{v} - \sum_{j=1}^{N} X_{pj}^{v} = 0, \ v = 1,\ldots,NV , \ \ p \notin MD \qquad (۴)$$

$$\sum_{i \in MD} \sum_{j \notin MD} X_{ij}^{v} \le 1 , v = 1,\ldots,NV \qquad (۵)$$

$$\sum_{i \notin MD} d_i (\sum_{j=1}^{N} X_{ji}^{v}) \le DV \qquad , v = 1,\ldots,NV \qquad (۶)$$

$$\sum_{i \notin MD} t_i \sum_{j=1}^{N} X_{ij}^{v} + \sum_{i=1}^{N} \sum_{j=1}^{N} t_{ij} X_{ij}^{v} \le T , v = 1,\ldots,NV \qquad (۷)$$

$$\sum_{v=1}^{V} \sum_{i \in S} \sum_{j \in S} X_{ij}^{v} \le |S| - r(S), \forall S \subseteq A - \{1\}, S \ne \varnothing \qquad (۸)$$

$$X_{ij}^{v} \in \{0,1\} \quad , \quad \forall\, i, j, v \qquad (۹)$$

تابع هدف، از دو جزء تشكيل شده است. رابطه (۱) كه جزء اول تابع هدف را تشكيل مي‌دهد، در راستاي كاهش هزينه‌ی حمل و نقل، تعريف شده است. رابطه (۲) كه جزء دوم تابع هدف را تشكيل مي‌دهد، سعي دارد احتمال تحويل اقلام به مشتريان را حداكثر كند.

رابطه (۳) موجب مي‌شود هرگره تقاضا، فقط از يک وسيله‌ی نقليه، خدمت دريافت كند. روابط (۴) و (۵) متضمن اين هستند كه اگر وسيله‌اي به گره‌اي وارد شود، بايد از آن خارج و به اين ترتيب، پيوستگي بين يال‌ها برقرار شود. رابطه (۶) مربوط به حداكثر ظرفيت وسيله‌ی نقليه است و رابطه (۷) "حداكثر زمان طي مسير و خدمت‌دهي" وسايل نقليه را نشان مي‌دهد.

رابطه (۸) نيز به "محدوديت زير تورها" معروف است. يعني حذف تور يا حلقه‌هاي احتمالي كه فاقد نقطه مبدا هستند. از جمله مشكلات VRP، وجود زير تورها است؛ كه يكي از راه حل‌هاي آن، استفاده از زير مجموعه ها براي گره‌ها است. به اين صورت كه براي مساله اي با N گره، بايد تمام تركيبات دوتايي، سه تايي تا N تايي آن را تشكيل داده و محدوديت‌هاي مربوط به آن‌ها را نوشت. به دليل تعداد بالاي تركيبات فوق، معمولاً ابتدا بدون در نظر گرفتن محدوديت‌هاي فوق، مساله حل مي‌شود و در صورتي كه زيرگردشي تشكيل نشده باشد، جواب حاصل، جواب بهينه‌ی مساله نيز، هست. اما اگر يک يا چند زير گردش تشكيل شود، بايد با اضافه نمودن محدوديت‌هاي شكننده‌ي زير گردش‌هاي تشكيل شده، دوباره، مساله حل شود.

همچنين، رابطه (۹)، دلالت مي كند كه متغيرها از نوع صفر و يک هستند، و به معناي عبور يا عدم عبور وسيله‌ی نقليه v در يال (i,j) است.

تفسير قسمت دوم تابع هدف

در اين بخش، چگونگي تبديل حاصل ضرب، به حاصل جمع و نيز تغيير Max به Min در رابطه (۲) يعني قسمت دوم تابع هدف $Z_2 = Max \sum_{v}^{NV} (\prod_{i}^{N} \prod_{j}^{N} P_{ij} X_{ij}^{v})$، بحث مي‌شود. در رابطه (۲)، مقدار احتمال P_{ij} بين صفر و يک بوده و مقدار X_{ij}^{v} برابر صفر يا يک است. در مرحله‌ی بهينه‌سازي، اگر يكي از X_{ij}^{v}ها برابر صفر باشد، با توجه به حاصل ضرب پارامترها، كل مقدار Z_2 برابر صفر مي‌شود. براي حل اين مشكل، به جاي اين كه $Z_2 = f(x)$ بيشينه شود، مي توان $Z_2' = f(x) + A$ را بيشينه كرد؛ لذا مي‌توان Z_2 را به صورت رابطه (۱۰) در نظر گرفت.

$$Z_2' = Max \sum_{v}^{NV} (\prod_{i}^{N} \prod_{j}^{N} (P_{ij} X_{ij}^{v} + 1 - X_{ij}^{v})) \qquad (۱۰)$$

با اين تغيير، چنان چه يكي از X_{ij}^{v} برابر صفر باشد، Z_2' هيچ وقت، صفر نيست. يعني؛

$$P_{ij} X_{ij}^{v} + 1 - X_{ij}^{v} = \begin{cases} 1 & , X_{ij}^{v} = 0 \\ P_{ij} & , X_{ij}^{v} = 1 \end{cases} \qquad (۱۱)$$

از آن‌جا که بیشینه‌سازي یک تابع مانند $f(y)$ همراستا با بیشینه سازي $\text{Ln}\, f(y)$ است، به جاي بیشینه کردن Z_2' مي‌توان LnZ_2' را بیشینه کرد. لذا ؛

$$Z_2'' = LnZ_2' = Ln(Max\sum_{v}^{NV}(\prod_{i}^{N}\prod_{j}^{N}(P_{ij}X_{ij}^{v}+1-X_{ij}^{v})))$$

یا

$$Z_2'' = Max\sum_{v}^{NV} Ln(\prod_{i}^{N}\prod_{j}^{N}(P_{ij}X_{ij}^{v}+1-X_{ij}^{v})) \qquad (۱۲)$$

از طرفي $Ln(A_1 * A_2 ...) = LnA_1 + LnA_2 + ... = \sum_i LnA_i$ لذا؛

$$Z_2'' = Max\sum_{v}^{NV}(\sum_{i}^{N}\sum_{j}^{N} Ln(P_{ij}X_{ij}^{v}+1-X_{ij}^{v})) \qquad (۱۳)$$

قبلا نیز بیان شد که بیشینه کردن یک تابع مانند $f(y)$ همراستا با بیشینه کردن $\text{Ln}\, f(y)$ است.یعني:

$$Z_2''' = Max\sum_{v}^{NV}\sum_{i}^{N}\sum_{j}^{N}(P_{ij}X_{ij}^{v}+1-X_{ij}^{v}) \qquad (۱۴)$$

از آن‌جا که قسمت اول تابع هدف، کمینه‌سازي و قسمت دوم تابع هدف بیشینه‌سازي است، براي سادگي بهینه‌سازي کل تابع هدف، قسمت دوم تابع هدف نیز به کمینه‌سازي تبدیل مي‌گردد. براي این منظور، رابطه (۱۴) در (۱-) ضرب مي‌شود:

$$Z_2''' = -Min\sum_{v}^{NV}\sum_{i}^{N}\sum_{j}^{N}(P_{ij}X_{ij}^{v}+1-X_{ij}^{v})$$

یا

$$Z_2''' = Min\sum_{v}^{NV}\sum_{i}^{N}\sum_{j}^{N}(-P_{ij}X_{ij}^{v}-1+X_{ij}^{v}) \qquad (۱۵)$$

با جاگذاري $P_{ij} = 1 - q_{ij}$ در رابطه (۱۵)، خواهیم داشت:

$$Z_2''' = Min\sum_{v}^{NV}\sum_{i}^{N}\sum_{j}^{N}(-(1-q_{ij})X_{ij}^{v}-1+X_{ij}^{v}) = Min\sum_{v}^{NV}\sum_{i}^{N}\sum_{j}^{N}(-X_{ij}^{v}+q_{ij}X_{ij}^{v}-1+X_{ij}^{v})$$

یا

$$Z_2''' = Min\sum_{v}^{NV}\sum_{i}^{N}\sum_{j}^{N}(q_{ij}X_{ij}^{v}-1) \qquad (۱۶)$$

حدود i، j و v به ترتیب برابر ۱ تا N، N و NV است. لذا:

$$Z_2''' = Min\sum_{v}^{NV}\sum_{i}^{N}\sum_{j}^{N} q_{ij}X_{ij}^{v} - N^2 NV \qquad (۱۷)$$

با نادیده گرفتن مقدار ثابت، قسمت دوم تابع هدف، چنین به دست مي‌آید:

$$Z_2 = Min\sum_{v}^{NV}\sum_{i}^{N}\sum_{j}^{N} q_{ij}X_{ij}^{v} \qquad (۱۸)$$

بهینه سازي چندهدفي

در این مقاله، یک تابع چند هدفي ارائه شده است لذا یک روش حل چند هدفي نیز مطابق آن باید ارائه شود. براي بهینه‌سازي مسائل چند هدفي، روش‌هاي مختلفي وجود دارد که به پنج دسته، طبقه‌بندي مي‌شوند [۱۵]: روش‌هاي عددي[۲۰]، روش‌هاي تعاملي[۲۱]، روش‌هاي فازي، روش‌هاي فراابتکاري‌ها و روش‌هاي تصمیم یار[۲۲].

همچنان که العمر و کارا [۱۲] و کابالر و همکاران [۱۳] براي سادگي حل مسأله، یک تابع هدف با ترکیب خطي از هزینه، ریسک و غیره به‌کار بردند؛ در این مقاله نیز یک ترکیب خطي محدب از هزینه و احتمال، تعریف مي‌شود. از آنجا که هزینه و احتمال واحدهاي مختلفي دارند، لازم است مقادیر آن‌ها در تابع هدف، عددي، درنظر گرفته شوند. ترکیب خطي محدب آن‌ها، چنین است:

$$\lambda Z_1^{norm} + (1-\lambda)Z_2^{norm} \quad ,0 \le \lambda \le 1 \qquad (۱۹)$$

در این رابطه، Z_2^{narm}, Z_1^{narm} به ترتیب، مقدار نرمال شده‌ی[۲۳] جزء اول و دوم تابع هدف اند.

چنان چه تابع هدف i به صورت کمینه‌سازي باشد، مقدار نرمال شده‌ی آن، چنین به دست مي‌آید [۱۶]:

$$Z_i^{norm} = \frac{Z_i - Z_i^*}{Z_i^{nad} - Z_i^*} \qquad (۲۰)$$

در این رابطه، Z_i مقدار تابع i، Z_i^* مقدار مطلوب[۲۴] تابع هدف i، Z_i^{nad} مقدار حضیض[۲۵] تابع هدف i و Z_i^{norm} مقدار نرمال شده‌ی تابع هدف i است. با توجه به این که هر دو قسمت تابع هدف، به صورت کمینه‌سازي است، رابطه (۲۰) به صورت زیر بیان مي‌شود:

$$Z_i^{norm} = \frac{Z_i - Z_i^{\min}}{Z_i^{\max} - Z_i^{\min}} \qquad (۲۱)$$

در مطالعه‌ی العمر و کارا [۱۲]، تابع هدف، ترکیب خطي محدب از هزینه و ریسک است و هر مقدار تابع، بر بیشینه خود، تقسیم شده است. به عبارت دیگر، مقدار کمینه‌ی تابع هدف هزینه و ریسک، برابر صفر در نظر گرفته شده است. در این مقاله نیز، $Z_1^{\min}$ و $Z_2^{\min}$ به ترتیب، مقدار کمینه‌ی تابع هدف هزینه و مقدار کمینه‌ی تابع هدف احتمال، برابر صفر فرض مي‌شود. بنابراین، مقدار کل تابع هدف، چنین به دست مي‌آید:

$$Z_1^{\min} = 0 \Rightarrow Z_1^{norm} = \frac{z_1}{Z_1^{\max}} \quad , \quad Z_2^{\min} = 0 \Rightarrow Z_2^{norm} = \frac{Z_2}{Z_2^{\max}} \Rightarrow$$

$$Z_{opt} = \lambda(\frac{Z_1}{Z_1^{\max}}) + (1-\lambda)(\frac{Z_2}{Z_2^{\max}}) \qquad (۲۲)$$

در رابطه (۲۲)، Z_1 مقدار تابع هزینه، $Z_1^{\max}$ مقدار بیشینه‌ی تابع هدف هزینه، Z_2 مقدار تابع هدف احتمال"عدم تحویل اقلام" و $Z_2^{\max}$ مقدار بیشینه‌ی احتمال "عدم تحویل اقلام" است. بیشترین مقدار Z_1 و Z_2 در هر تکرار (حلقه دروني و حلقه بیروني) به وسیله‌ی نرم‌افزار، در حافظه نگهداري مي‌شود و در پایان اجراي الگوریتم، حداکثر مقدار آن‌ها یعني $Z_1^{\max}$ و $Z_2^{\max}$ در این رابطه،

لحاظ مي‌شود. همچنين، در اين رابطه، λ عددي بين (۰ و ۱) بوده و Z_{opt} مقدار كل تابع هدف است.

روش حل پيشنهادي

همان طور كه قبلا بيان شد، VRP جزء مسايل NP-hard است و حل آن‌ها در ابعاد بزرگ، از طريق برنامه ريزي خطي و نرم افزارهاي موجود، امكان پذير نبوده و يا به مدت زمان بالايي نياز دارند. براي حل اين گونه مسايل، از روش‌هاي فرا ابتكاري استفاده مي‌شود. الگوريتم فراابتكاري "آنيلينگ شبيه‌سازي شده" (SA)، تقليدي از يک واقعيت فيزيكي به نام آنيلينگ است. واژه‌ی آنيلينگ به معناي "گرم كردن و سپس به تدريج سرد كردن" است. فرآيند فيزيكي سرمايش كه هدف از آن، كاهش دماي ماده به پايين ترين سطح انرژي است، تعادل گرمايي ناميده مي‌شود. در هر دما، جسم، مجاز به رسيدن به تعادل گرمايي است. كاهش دما، شبيه به كاهش مقدار تابع هدف (در مسايل كمينه‌سازي) است كه به وسيله‌ی تغييرات بهبود دهنده، اتفاق مي‌افتد. كاهش دما به خصوص در مراحل اوليه، نبايد خيلي سريع باشد؛ زيرا برخي كاستي ها در ماده به وجود مي آيد و ماده به انرژي كمينه نخواهد رسيد. براي اين كه كاهش دما به آهستگي، صورت گيرد، بايد تغييرات غير بهبود دهنده‌ی تابع هدف، با احتمال معيني پذيرفته شوند؛ به طوري كه وقتي مقدار تابع هدف، كاهش مي‌يابد، اين احتمال نيز كاهش يابد. اين امر، موجب مي‌شود كه الگوريتم، از جواب بهينه‌ی محلي[۲۶] خارج شود.

در شكل(۱)، گام‌هاي اساسي الگوريتم SA ، آمده است. پارامترهاي به‌كار رفته در آن، به اين‌صورت است: T_0 درجه حرارت اوليه، α ضريب سردي، K شمارنده‌ی تغيير درجه‌ی حرارت، K_n تعداد مجاز تغيير درجه‌ی حرارت (معيار خروج از حلقه بيروني يا توقف الگوريتم)، L شمارنده‌ی تكرار همسايگي در هر درجه حرارت، L_n تعداد تكرار همسايگي در هر درجه‌ی حرارت (معيار خروج از حلقه دروني)، Z جواب شدني، F(z) مقدار تابع هدف به ازاي جواب شدني Z و Z_{Best} بهترين جواب شناخته شده، است.

الف- روش توليد جواب اوليه

اولين اقدام در الگوريتم‌هاي فراابتكاري، توليد جواب اوليه است. براي توليد جواب اوليه VRP، الگوريتم SA تلفيقي به ترتيب زير عمل مي‌كند:

گام صفر- انتخاب قرارگاه

از مجموعه $V=\{1,2,\dots,i,\dots,N\}$ يک گره كه تاكنون به عنوان قرارگاه يا مشتري بررسي نشده است، به عنوان قرارگاه i انتخاب شود. ($i \in \{m|m=1,2,\dots,M\}$).

گام يک- تشكيل مسير

خودروي V با حداكثر ظرفيت، از قرارگاه i به يک گره مانند K (از مجموعه گره هاي j) كه تاكنون خدمت دهي نشده است، فرستاده شود ($i,j \in \{1,2,\dots,K,L,\dots,N\}$). در اين صورت، $X_{ik}^{V}=1$ است. يعني خوردوي V از قرارگاه i به گره K فرستاده شده است.

```
K=0, T=T0, ZBest= Ø
Generate  Z0
ZBest= Z0
Do (Outside loop)
L=0
    Do (Inside loop)
    Select a operator (1-Opt or 2-Opt)
    Randomly and run over Zl as:
            Operators
    Zl ──────────► ZNew
    Δf =f(ZNew)-f(ZBest)
    If  Δf <0 Then
    ZBest= ZNew and l=l+1, Zl= ZNew
    Else
    Generate Y→ U(0,1) Randomly
    Set Z= Exp(-Δf / Tk)
    If Y < Z Then l=l+1, ZL= ZNew
    End if
    Loop while (L< Ln)
K=K+1
Tk= Tk-1 – α Tk-1
Loop while(K < Kn  and Tk > 0)
Print  ZBes
```

شكل ۱: گام‌هاي الگوريتم SA پيشنهادي.

گام دو- تعيين گره هاي همسايه

نزديک ترين گره به گره k (مانند گره L) را طوري بيابيد كه اگر خودروي V به گره L خدمت دهد (يعني از K به L برود)، ظرفيت خودرو نقض نگردد (در اين صورت، $X_{kL}^{V}=1$ است). اگر چنين گرهي وجود نداشت خودروي V به قرارگاه i بازگردد (در اين صورت $X_{ki}^{V}=1$ است).

گام سه- تكميل مسير

گام دو آنقدر تكرار شود، تا خودرو V به قرارگاه i بازگردد.

گام چهار- تكميل خدمت

گام صفر تا سه تكرار شود تا همه‌ی گره‌ها خدمت‌دهي

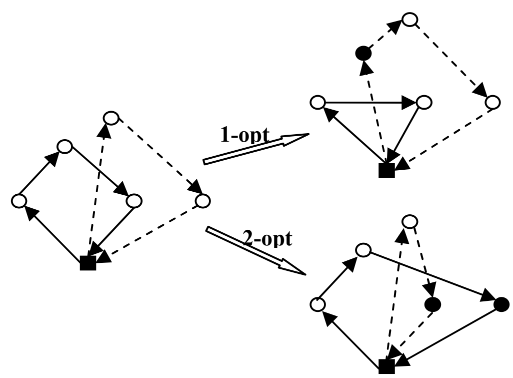
شوند.

ب- توليد جواب هاي همسايه

براي جستجو در فضاي شدني و توليد جواب‌هاي همسايه، از عملگرهاي كاراي 1-opt و 2-opt استفاده مي‌شود [۲، ۸، ۹، ۱۰ و ۱۱]. اين دو عملگر، به ترتيب زير تعريف مي‌شوند:

عملگر 1-opt: به طور تصادفي، دو مسير مربوط به دو وسيله‌ی نقليه (از جواب شدني فعلي) انتخاب مي‌شوند؛ سپس يک گره از يک مسير حذف شده و به مسير ديگر اضافه مي‌شود؛ به شرط آن که محدوديت ظرفيت خودرو، نقض نشود.

عملگر 2-opt: به طور تصادفي، دو مسير مربوط به دو وسيله‌ی نقليه (از جواب شدني فعلي) انتخاب مي‌شوند و سپس دو گره از اين دو مسير، با هم تعويض مي‌شوند؛ به شرط آن که محدوديت ظرفيت خودرو، نقض نشود. در شكل (۲)، عملگرهاي 1-opt و 2-opt نشان داده شده است:



شكل ۲: عملگرهاي 1-opt و 2-opt .

نتايج محاسباتي

مدل رياضي ارائه شده در اين مقاله، با استفاده از الگوريتم SA پيشنهادي، درمحيط Visual Basic برنامه نويسي شده است و در يک كامپيوتر پنتيوم ۴ با ۲/۴ گيگا هرتز سرعت پردازش و ۲۵۶ مگابايت حافظه، اجرا شده است. در اين بخش، ابتدا پارامترهاي ورودي مساله و سنجش اعتبار[۲۷] الگوريتم SA پيشنهادي، بحث شده و در ادامه، كارآيي الگوريتم SA پيشنهادي و موازنه‌ی توابع هدف برحسب ضريب λ در نمودار پارتو بحث مي‌شود.

الف- پارامترهاي ورودي

پارامترهاي ورودي مساله، شامل پارامترهاي عمومي و پارامترهاي كنترلي SA است. پارامترهاي عمومي، در خصوص مشخصات مشتريان، قرارگاه‌ها، وسايل نقليه و ضريب تابع هدف، است. پارامترهاي مربوط به مشتريان، شامل؛ تعداد مشتريان، مقدار تقاضاي مشتريان، زمان و هزينه‌ی سفر بين مشتريان و احتمال در دسترس بودن يال بين مشتريان است. پارامترهاي مربوط به قرارگاه‌ها شامل تعداد قرارگاه، زمان و هزينه‌ی سفر بين هر قرارگاه و مشتريان و احتمال در دسترس بودن يال بين هر قرارگاه و مشتريان است. پارامترهاي مربوط به وسايل نقليه، شامل تعداد وسايل نقليه، مدت زمان خدمت‌دهي وسيله‌ی نقليه به هر مشتري، ظرفيت هر وسيله‌ی نقليه و مدت زمان كـــــــار روزانه‌ی هر وسيله‌ی نقليه است.

جدول۲: داده‌هاي مرتبط با پارامترهاي ورودي و بازه توليد آنها.

موجوديت	پارامتر	مقدار داده/ توزيع
مشتري	تقاضا	يكنواخت بين (۰/۱ و ۱/۱) تن
	هزينه سفر	يكنواخت بين (۱۰۰۰ و ۵۰۰) واحد هزينه
	زمان سفر	يكنواخت بين (۱/۸ و ۰/۳) ساعت
	زمان خدمت دهي	يكنواخت بين (۰/۸ و ۰/۳) ساعت
	دسترسي به يال (i,j)	يكنواخت بين (۱ و ۰)
	تعداد مشتريان	۶، ۷، ۸، ۹ و ۱۰ مشتري براي ابعاد كوچک مساله و ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ مشتري براي ابعاد بزرگ مساله
قرارگاه	هزينه سفر	يكنواخت بين (۱۰۰۰ و ۵۰۰) واحد هزينه
	زمان سفر	يكنواخت بين (۱/۸ و ۰/۳) ساعت
	دسترسي به يال (i,j)	يكنواخت بين (۱ و ۰)
	تعداد قرارگاه	۳ و ۴ قرارگاه براي ابعاد كوچک و ۱۰ و ۲۰ قرارگاه براي ابعاد بزرگ مساله
وسيله نقليه	ظرفيت وسيله نقليه	۲ تن
	مدت كاري	۸ ساعت
	تعداد وسايل نقليه	۳ و ۴ خودرو براي ابعاد كوچک و۲۰، ۳۰ و۴۰ خودرو براي ابعاد بزرگ مساله
برنامه كنترل	تعداد جواب هاي مورد قبول در هر دما	۱۰۰
	تكرارها در هر دما	۱۰۰
	دماي اوليه	۵
	دماي نهائي	۰
	نرخ كاهش دما	۰/۹۵
ضريب تابع هدف	λ	۰/۵ (ولي در منحني موازنه تابع هدف، بين ۰/۱ و ۰/۹ لحاظ مي شود)

از ميان پارامترهاي بالا، فقط پارامتر تعداد مشتريان، تعداد قرارگاه و تعداد وسايل نقليه، به طور دستي وارد برنامه مي‌شود. بقيه، توسط نرم افزار، با توزيع يكنواخت بين بازه‌اي كه در جدول (۲) مشخص شده است، توليد

مي‌شوند. از آنجا که در اين مقاله، يک تابع دو هدفي، ارائه شده است، ضريب تابع هدف (λ) پارامتر ديگري است که بايد تعيين شود. براي حل مسايل مختلف، به طور پيش فرض، ضريب تابع هدف، برابر ۰/۵ انتخاب شده ولي براي مقايسه‌ی جواب‌هاي بهينه در نمودار پارتو، ضريب تابع هدف از ۰/۱ تا ۰/۹ (با افزايش ۰/۲) در نظر گرفته شده‌است. پارامترهاي کنترلي SA، شامل حداکثر تکرار جواب در هر درجه‌ی حرارت، حداکثر دفعات تغيير درجه‌ی حرارت، دماي اوليه، دماي نهايي و ضريب سردي است که در مرور ادبيات، به خصوص مطالعه‌ی حسن‌پور و همکاران [۸] و مطالعات توکلي‌مقدم و همکاران [۹، ۱۰ و ۱۱] محدوده‌ی تغيير هر يك از پارامترها شناسائي شد. سپس مسائل نمونه، به ازاي هر يـــك از اين پارامترها به تعداد ۱۰ بار اجرا شده و در سطح معني‌داري ۹۵ درصد، يك مقدار براي هر پارامتر انتخاب شد. از اين رو، پارامترهاي کنترلي ياد شده‌ی بالا، به ترتيب برابر ۱۰۰، ۱۰۰، ۵، ۰ و ۰/۹۵ انتخاب شدند. داده‌هاي مرتبط با پارامترهاي ورودي و نيز بازه توليد آن‌ها، در جدول (۲) مشخص شده است.

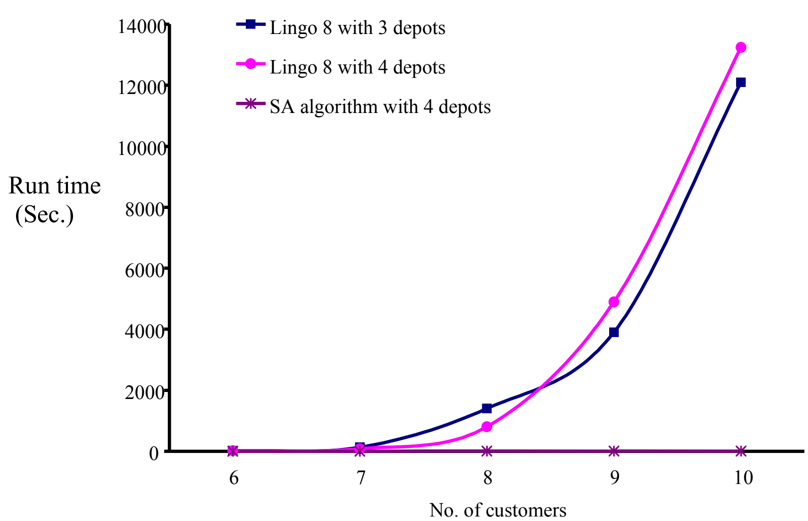
درصد خطاي تابع هدف SA =

((جواب SA -جواب Lingo) / جواب Lingo) ×۱۰۰ (۲۳)

هم چنين در جدول (۳) مشاهده مي‌شود که با افزايش ابعاد مساله، زمان رسيدن به جواب در نرم افزار Lingo 8، به طور نمايي، افزايش مي‌يابد؛ ولي با افزايش ابعاد مساله، زمان رسيدن به جواب در الگوريتم SA پيشنهادي، افزايش کمي دارد. اين مساله، در شکل (۳) نيز نشان داده شده است.

جدول ۳: مقايسه‌ی نتايج الگوريتم SA پيشنهادي با الگوريتم دقيق (در مسائل با ابعاد کوچک).

Problem	No. of depots	No. of vehicles	No. of customers	Hybridized SA		Lingo 8		% Gap
				Objective	Time (sec.)	Objective	Time (sec.)	
MDVRP1	3	3	6	3.78528	1.72	3.71218	14	1.9
MDVRP2	3	3	7	5.25857	1.75	5.17877	125	1.5
MDVRP3	3	4	8	5.76242	2.48	5.66363	1397	1.7
MDVRP4	3	4	9	5.78799	2.55	5.74082	3895	0.8
MDVRP5	3	4	10	6.13446	2.53	6.05391	12092	1.3
MDVRP6	4	3	6	4.00904	2.06	3.97429	14	0.9
MDVRP7	4	3	7	4.60364	1.88	4.56259	81	0.9
MDVRP8	4	4	8	5.20980	3.22	5.14281	805	1.3
MDVRP9	4	4	9	5.78874	2.75	5.69258	4897	1.7
MDVRP10	4	4	10	5.83838	3.06	5.75056	13238	1.5
							Average gap	1.35



شکل ۳: زمان صرف شده در حل مسائل نمونه.

جدول ۴: نتايج محاسباتي در مسائل با ابعاد بزرگ.

Problem name	No. of depots/ customers/ vehicles	I: Lower Bound		II: Hybridized SA		III: SA (without operators)		I & II Gap (%)	II & III Gap (%)
		Combined Obj. Func.	Time (sec.)	Combined Obj. Func..	Time (sec.)	Combined Obj. Func.	Time (sec.)		
MDVRP11	3/ 30/ 4	11.63	1301	14.37	24	-	-	23.5	-
MDVRP12	4/ 20/ 6	7.86	854	9.4	31	-	-	19.6	-
MDVRP13	4/ 25/ 4	10.02	755	11.93	23	-	-	19	-
MDVRP14	5/ 30/ 4	11.00	562	13.86	36	-	-	26	-
MDVRP15	5/ 20/ 10	8.21	4846	9.58	69	-	-	16.7	-
MDVRP16	10/ 50/ 20	-	-	29.47	832	30.65	1267	-	4
MDVRP17	10/ 50/ 30	-	-	30.21	2060	33.99	3392	-	12.5
MDVRP18	10/ 50/ 40	-	-	30.91	2898	37.73	5089	-	22
MDVRP19	10/ 75/ 30	-	-	44.34	2780	47.12	4046	-	6.3
MDVRP20	10/ 75/ 40	-	-	45.30	5554	-	-	-	-
MDVRP21	10/ 100/ 40	-	-	62.99	7008	-	-	-	-
MDVRP22	20/ 50/ 20	-	-	28.10	1592	30.09	2324	-	7
MDVRP23	20/ 50/ 30	-	-	30.16	3949	32.51	7440	-	7.8
MDVRP24	20/ 50/ 40	-	-	29.23	6277	-	-	-	-
MDVRP25	20/ 75/ 30	-	-	45.35	6251	-	-	-	-
MDVRP26	20/ 75/ 40	-	-	45.44	11147	-	-	-	-
MDVRP27	20/ 100/ 40	-	-	61.17	13726	-	-	-	-
							Average gap	21	10

ج- کارآيي الگوريتم SA پيشنهادي

جواب SA تلفيقي با جواب حدپايين در پنج مسألهی نمونه در جدول (۴) مقايسه شده است. جواب حدپايين با حذف محدوديت (۷) و افزايش ظرفيت وسيلهی نقليه به ۱۰ تن، به دست آمده است. نتايج، نشان میدهد كه الگوريتم دقيق، نميتواند جواب حدپايين را در زمان قابل قبول براي مسائل بيشتر از ۵ قرارگاه، ۳۰ مشتري و ۱۰ وسيلهی نقليه به دست آورد. همچنين ۱۲ مسأله در ابعاد بزرگ با ۱۰ و ۲۰ قرارگاه، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ مشتري و ۲۰، ۳۰ و ۴۰ خودرو با استفاده از الگوريتم SAتلفيقي، حل شده است. براي مسائل با ابعاد بزرگ، متوسط درصد اختلاف بين جواب هاي حدپايين و SA تلفيقي، معادل ۲۱ درصد است كه اين، یک نتيجهی قابل قبول است.

همچنان، شش مسالهی نمونه در ابعاد بزرگ با استفاده از الگوريتم SA و با روش توليد تصادفي جوابهاي همسايه (بدون استفاده از عملگرهاي 1-opt و 2-opt) حل شده است.

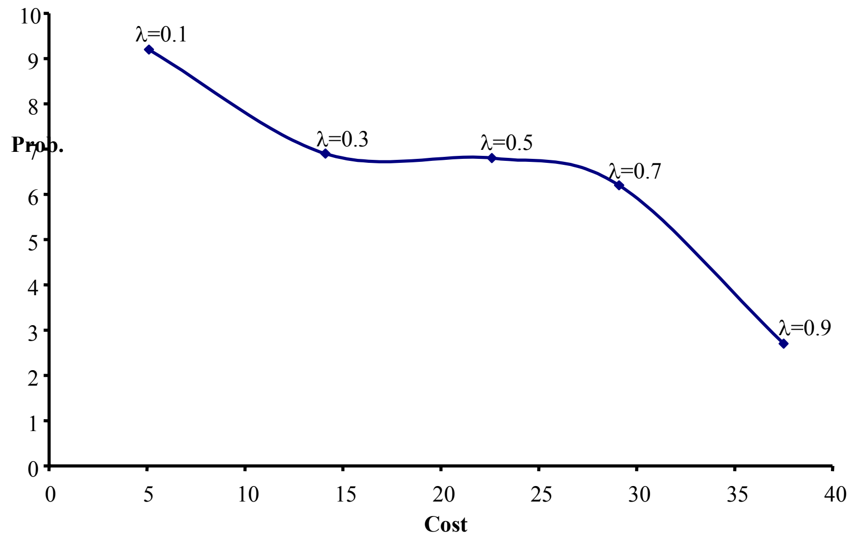
همچنان كه در جدول (۴)، نشان داده شده است، متوسط درصد اختلاف بين جواب هاي SA تلفيقي و SA تصادفي (بدون عملگرها) معادل ۱۰ درصد است كه اين نتيجه، كارآيي عملگرهاي 1-opt و 2-opt را در بهبود كيفيت جواب، اثبات میكند.

د- منحني موازنهی تابع هدف

در اين مقاله، يك مدل بهينهسازي دو هدفي، ارائه شده است كه مقدار تابع هدف، تركيب خطي محدب از هزينه و احتمال است و از آن جا كه اين دو جزء تابع هدف، واحدهاي مختلفي دارند، مقدار نرمال شدهی آن ها (هزينه و احتمال عدم تحويل) براي مسأله MDVRP16 به ازاي λ هاي مختلف (با افزايش ۰/۲) به دست آمده است و نتايج، در جدول (۵)، نشان داده شده است. با توجه به اين نتايج، منحني موازنه بين دو جزء تابع هدف در شكل (۴) رسم شده است. هر نقطه در شكل (۴)، جواب متفاوتي را نشان میدهد. وقتي λ به صفر نزدیک میشود، افزايش شيب در احتمال"عدم تحويل كالا" مشاهده میشود و وقتي λ به یک نزدیک میشود، افزايش شيب در هزينه، مشاهده میشود. اين نتيجه، به معني آن است كه افزايش كمي در احتمال "عدم تحويل كالا"، موجب كاهش زيادي در هزينه میشود و بر عكس. اگر قرار باشد با توجه به هزينه و احتمال "عدم تحويل كالا" تصميمگيري شود، انتظار میرود جوابي انتخاب شود كه با λ بين ۰/۳ و ۰/۷ توليد شده است.

جدول۵: نتايج اجراي MDVRP16 با λ هاي مختلف.

λ	Normalized Cost Obj. Func.	Normalized Probability Obj. Func.
0.1	5.1	9.2
0.3	14.1	6.9
0.5	22.6	6.8
0.7	29.1	6.2
0.9	37.5	2.7



شکل ۴: منحني موازنه‌ی تابع هدف با افزايش ۰/۲ در λ .

نتيجه‌گيري

در اين مقاله، حل يک مسأله‌ی مسيريابي وسيله‌ی نقليه در حالت چندقرارگاهي، چندهدفي و احتمالي، بررسي شده است. جنبه‌ی احتمالي اين مسأله که از مسائل دنياي واقعي يک سازمان لجستيک دفاعي شناسائي شده است، احتمالي‌بودن دسترسي به يال (متصل کننده دو گره تقاضا) است. بهينه سازي مسأله، به گونه اي عمل مي کند که ضمن کمينه سازي هزينه‌ی حمل و نقل، تحويل اقلام در مسيرهايي صورت گيرد که با احتمال بيشتري در دسترس باشند. از آن جا که حل مدل ارائه شده در ابعاد بزرگ، توسط روش‌هاي دقيق با استفاده از امکانات پردازشي موجود، در زمان قابل قبول امکان‌پذير نيست، از رويکرد فرا ابتکاري SA که با عملگرهاي 1-opt و 2-opt تلفيق شده است، استفاده شد. در اين تحقيق، کارآيي اين عملگرها در بهبود کيفيت جواب و کاهش زمان رسيدن به جواب، اثبات شده است.

به منظور نشان دادن عملکرد SA تلفيقي، مقادير تابع هدف و زمان اجراي آن، با نتايج به دست آمده از الگوريتم دقيق در مسائل با ابعاد کوچک، مقايسه شده است. نتايج اين مقايسه، نشان مي‌دهد که ميزان خطاي تابع هدف الگوريتم SA تلفيقي، نسبت به الگوريتم دقيق، کمتر از ۲ درصد است و اين موضوع، به معني قابليت رسيدن به جواب بهينه در الگوريتم SA تلفيقي است. همچنين، با افزايش ابعاد مسأله، زمان رسيدن به جواب در الگوريتم دقيق، به طور نمايي افزايش مي‌يابد؛ ولي اين زمان در الگوريتم SA تلفيقي، روند خطي دارد.

الگوريتم SA تلفيقي براي حل تعدادي مساله VRP چندقرارگاهي در ابعاد بزرگ به کار رفت که با ملاحظه‌ی حدپايين، نتايج قابل قبول به دست آمده است. از آن‌جا که تابع هدف، ترکيب خطي محدب از هزينه و احتمال است، پيداکردن جوابي که با توجه به هر جزء تابع هدف، بهترين باشد مشکل است. لذا براي انتخاب دامنه‌اي از جواب‌ها، منحني موازنه توابع هدف به ازاي λ هايي مختلف، رسم شده‌است. براساس اين منحني، براي تصميم‌گيري با کمترين مقدار هزينه و احتمال، انتظار مي‌رود جوابي انتخاب شود که با λ بين ۰/۳ و ۰/۷ توليد شده است.

براي بهبود جواب‌هاي به دست آمده و انجام تحقيقات آتي، موارد زير پيشنهاد مي گردد: حل مساله با توليد جواب اوليه‌ی متفاوت، استفاده از عملگرهاي بهبود درون مسيري نظير or-opt و λ-opt آزادسازي لاگرانژي ساير محدوديت‌ها به منظور محاسبه‌ی کران پائين مناسب‌تر، استفاده از ديگر روش‌هاي حل فرا ابتکاري، ملاحظه‌ی پارامترها به صورت فازي و احتمالي و در نظر گرفتن ساختار خدمت دهي ترکيبي (جمع آوري و تحويل).

مراجع

1- Toth, P. and Vigo, D. (2002). *The vehicle routing problem*, SIAM, Philadelphia.

2- Nagy, G. and SAlhi, S. (2005). “Heuristic algorithms for single and multiple depot vehicle routing problems with pickups and deliveries.” *European J. of Operational Research*, Vol. 162, PP. 126-141.

3- Ho, W., Ho, G.T.S., Ji, P. and Lau, H.C.W. (2008). “A hybrid genetic algorithm for the multi-depot vehicle routing problem.” *Eng. Applications of Artificial Intelligence*, Vol. 21, PP. 548-557.

4- Crevier, B., Cordeau, J. and Laporte, G. (2007). “The multi-depot vehicle routing problem whit inter-depot routes.” *European J. of Operational Research*, Vol. 176, PP. 756-773.

5- Dondo, R.G. and Cerda, J. (2009). “A hybrid local improvement algorithm for large-scale multi-depot vehicle routing problems whit time windows.” *Computers & Chemical Eng.*, Vol. 33, PP. 513-530.

6- Hollis, B.L., Forbes, M.A. and Douglas, B.E. (2006). “Vehicle routing and crew scheduling for metropolitan mail distribution at Australia Post.” *European J. of Operational Research*, Vol. 173, PP. 133-150.

7- Pisinger, D. and Ropke, S. (2007). “A general heuristic for vehicle routing problems.” *Computers & Operations Research*, Vol. 34, PP. 2403-2435.

8- Hassan-Pour, H.A., Mosadegh-Khah, M. and Tavakkoli-Moghaddam, R. (2009). “Solving a multi-objective multi-depot stochastic location-routing problem by a hybrid simulated annealing algorithm.” *J. of Eng. Manufacture*, Vol. 223, PP. 1045-1054.

9- Tavakkoli-Moghaddam, R., Safaei, N., Kah, M.M.O. and Rabbani, Y. (2007). “A new capacitated vehicle routing problem with split service for minimizing fleet cost by simulated annealing.” *J. of the Franklin Institute*, Vol. 344, PP. 406-425.

10- Tavakkoli-Moghaddam, R., Saffaei, N. and Gholipour, Y. (2006). “A hybrid simulated annealing for capacitated vehicle routing problems with the independent route length.” *Applied Mathematics and Computation*, Vol. 176, PP. 445-454.

11- Tavakkoli-Moghaddam, R., Rabbani, M., Shariat, M.A. and Safaei, N. (2006). “Solving a vehicle routing problem with soft time windows by a hybrid metaheuristic algorithm.” *J. of Faculty of Engineering*, University of Tehran, Vol. 40, No. 4, PP. 469-476 (in Farsi).

12- Alumur, S. and Kara, B.Y. (2007). “A new model for the hazardous waste location-routing problem.” *Computers & Operations Research*, Vol. 34, PP. 1406-1423.

13- Caballero, R., Gonzalez, M., Guerrero, F.M., Molina, J. and Paralera, C. (2007). “Solving a multiobjective location routing problem with a metaheuristic based on tabu search: Application to a real case in Andalusia.” *European J. of Operational Research*, Vol. 176, PP. 1751-1763.

14- Nagy, G. and Salhi, S. (2007). “Location- routing: Issues, models and methods.” *European J. of Operational Research*, Vol. 176, PP. 649-672.

15- Rahimi-Vahed, A.R., Rabbani, M., Tavakkoli-Moghaddam, R., Torabi, S.A. and Jolai, F. (2007). “A multi-objective scatter search for mixed-model assembly line sequencing problem.” *Advanced Eng. Informatics*, Vol. 21, PP. 85-99.

16- Deb, K. (2003). *Multi-objective Optimization Using Evolutionary Algorithms*, John Wiley & Sons, Chichester, Sussex.

واژه‌هاي انگليسي به ترتيب استفاده در متن

1- Vehicle Routing Problem
2- Available
3- Arc/Edge
4- Simulated Annealing
5- Capacitated
6- Pickup and Delivery
7- Exchange
8- Genetic Algorithm
9- Nearest Neighbor
10- Saving
11- Clarke and Wright
12- Replenish
13- Tabu Search
14- Adaptive Memory Principle
15- Time Windows
16 - Set-Covering
17- Column Generation
18- Facility Location Problem
19- Stochastic Set-Covering Problem
20- Scalar
21- Interactive
22- Decision Aid
23- Normalize
24- Ideal
25- Nadir
26- Local Optimum
27- Validity