مسئله عرضه تعادلی گندم در کشور و حل ابتکاری آن

بابک فرهنگ مقدم | Farhang@imps.ac.ir
استادیار موسسه عالی آموزش و پژوهش مدیریت و برنامه‌ریزی، تهران

دریافت: ۱۳۹۶/۰۹/۰۸ | پذیرش: ۱۳۹۷/۱۲/۱۴

چکیده: گندم یک کالای راهبردی محسوب می‌شود و مکانیزم توزیع آن همواره یکی از مسایل مهم پیشاروی کشورها است. هزینه‌های توزیع و انبار گندم و تفاوت مواد مغذی موجود در گندم‌های مختلف کشت‌شده، باعث شده تا مسئله پیچیده‌ای در مکانیزم عرضه گندم ظاهر شود. این مهم می‌تواند علاوه بر کنترل هزینه‌های توزیع، با استفاده از اختلاط گندم مناطق مختلف، سطح کیفیت گندم را متعادل کند. در این پژوهش، سعی می‌شود با استفاده از یک مدل بهینه‌سازی عدد صحیح مختلط، مسئله مورد نظر بیان شود. مسئله اشاره‌شده از لحاظ پیچیدگی، مسئلهٔ سخت محسوب می‌شود و به همین دلیل، از الگوریتم ابتکاری جستجوی همسایگی بزرگ تطبیقی استفاده می‌شود. تحلیل پاسخ‌های مسئله که در اندازه کوچک با الگوریتم دقیق حل شده‌اند، بیانگر این است که همزمانی مسئله ترکیب و مسیریابی باعث می‌شوند که نقطه بهینه کلی بهبود یابد. همچنین، برای بررسی کیفیت پاسخ‌های الگوریتم ابتکاری ارائه‌شده، پاسخ‌های این الگوریتم با پاسخ‌های الگوریتم دقیق مقایسه شده است و نتیجه آن، کارایی مناسب الگوریتم پیشنهادی ارائه‌شده است.

کلیدواژه‌ها: مسئله ترکیبی مسیریابی- اختلاط، برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط، الگوریتم جستجوی همسایگی بزرگ تطبیقی، عرضه گندم، مکانیزم توزیع و ترکیب گندم، تعدیل مواد مغذی گندم.

طبقه‌بندی JEL: C18, C02, C61.

فصلنامه علمی - پژوهشی برنامه‌ریزی و بودجه | شاپا (چاپی) ۲۲۵۱-۹۰۹۲ | نمایه در ISC
سال بیست و سوم | شماره ۲ | تابستان ۱۳۹۷ | ص‌ص ۴۵-۳۱

مقدمه

مسیریابی وسیله حمل‌ونقل[1] یک مسئله بهینه‌سازی قدیمی و شناخته‌شده برای بسیاری از پژوهش‌های موردی در دنیای واقعی است (Laporte, 1992). این مسئله انواع مختلفی دارد که هر یک از آن‌ها به اقتضای فضای کارکردی به‌وجودآمده، مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است. در این پژوهش، مسئله مسیریابی وسیله نقلیه با مسئله ترکیب مواد مد نظر قرار گرفته است که تاکنون در ادبیات موضوع به آن پرداخته نشده است. ترکیب مواد نیز یک مسئله بهینه‌سازی است که با ترکیب/اختلاط برخی از مواد اولیه برای تولید محصول با پایین‌ترین هزینه یا بیش‌ترین مطلوبیت حل می‌شود (Shih & Frey, 1995). این پژوهش، یک مدل ریاضی مرتبط با مسائل مسیریابی و اختلاط را بر اساس سناریو ترکیب گندم از سیلوهای مختلف ارائه می‌دهد تا ارزش غذایی قابل‌قبول گندم را به‌دست آورد. تمرکز اصلی این پژوهش بر کاهش هزینه حمل‌ونقل است. این مدل را می‌توان جذاب دانست زیرا تمام سیلوها به‌طور همزمان می‌توانند به عنوان مشتری یا انبار ایفای نقش کنند. کیفیت گندم (ارزش غذایی) در سیلوهای مختلف متفاوت است و در بیش‌تر اوقات هر سیلو برای تعدیل (بهبود) ارزش غذایی گندمی که دارد، باید از انواع دیگر، گندم دریافت نماید تا ارزش غذایی گندم ترکیبی به حد قابل‌قبولی از نظر استانداردهای تغذیه برسد (Hayta & Çakmakli, 2001). در این صورت، سیلو نقش یک مشتری را بازی می‌کند. از سوی دیگر، هنگامی که سیلوهای دیگر از این سیلو درخواست گندم می‌کنند، سیلو، نقشِ انبار می‌گیرد. اهمیت ترکیب گندم برای دستیابی به مواد مغذی مناسب اولین بار توسط فرانکل[2] (۱۹۳۹) ارائه گردید و تا به حال مدل‌های بهینه‌سازی بسیاری در این موضوع توسعه یافته‌اند (Steffan, 2012). این در حالی است که هیچ‌گونه مدلی برای ترکیب بهینه گندم همزمان با توزیع آن در ادبیات وجود ندارد. بنابراین، مدل ارائه‌شده باید پاسخ این پرسش را دهد که هر سیلو باید چقدر گندم را از چه مسیرهایی با سایر سیلوها ارسال نماید تا ارزش غذایی گندم‌های مخلوط در هر سیلو متناسب با نیاز منطقه باشد و در عین حال، کم‌ترین هزینه حمل در مکانیزم عرضه رخ دهد.

در بسیاری از مسائل لجستیک دنیای واقعی، ما باید از مدل‌های ریاضی برای به کمینه رساندن اجزای مختلف هزینه مانند هزینه‌های حمل‌ونقل، نصب، و الخ استفاده کنیم (Lawler *et al*.,1993). در پژوهش حاضر، با سناریویی مواجه هستیم که می‌تواند با ترکیبی از دو مسئله مشهور یعنی «مسیریابی

1. Vehicle Routing
2. Frankel

وسیله حمل‌ونقل» و «ترکیب»[1] به صورت زیر طراحی شوند: سیلوهای مختلف در مکان‌های مختلف جغرافیایی وجود دارند و هر کدام از آن‌ها مقدار معینی از نوع شناخته‌شده‌ای گندم در خود ذخیره دارد که درصد معینی از مواد مغذی را داراست. برای مثال، گندم نوع ۱ شامل ۳۰ درصد پروتئین است، در حالی که درصد پروتئین نوع ۲ تنها ۲۵ درصد است. در حالت ایده‌آل، برای استفاده از گندم، باید مواد مغذی گندم متناسب با هر منطقه طراحی و مشخص شود. پس از تعیین درصد مناسب هر یک از مواد مغذی تشکیل‌دهنده گندم، برای تبدیل گندم موجود در منطقه به گندم ایده‌آل، لازم است گندم را بین سیلوهای مختلف جابه‌جا کنیم تا بتوانیم ترکیب مورد نظر را در هر یک از سیلوها به‌دست آوریم. این مهم باید به صورتی انجام شود که هزینه‌های حمل‌ونقل بین سیلوها به کمینه برسد و در عین حال، محدودیت‌های ارزش غذایی مورد نیاز هر مکان علاوه بر محدودیت‌های دیگر مانند ظرفیت وسایل نقلیه، مقدار گندم ذخیره‌شده در هر سیلو و الخ در نظر گرفته شوند.

سهم اصلی این پژوهش، مدلسازی این مسئله خاص است؛ به صورتی که در نظرگرفتن همزمان هر یک از نودها به عنوان مشتری و انبار، مسئله اصلی مسیریابی را دچار تغییرهای زیادی در مدلسازی می‌کند. همچنین، محدودیت‌های دیگری که برای در نظرگرفتن موجودی مورد نیاز هر سیلو باید لحاظ شوند باعث می‌شوند که ساختار مدل ریاضی به صورت کلی تغییر یابد. مسئله مسیریابی برای اولین بار توسط دانتزیگ و رامسر[2] (۱۹۵۹) معرفی شد که هنوز اساس و چارچوب بسیاری از پژوهش‌ها و پروژه‌های کاربردی را ارائه می‌دهد. این مسئله، با توجه به پیچیدگی و زمان حل آن، به مجموعه مسائل سخت تعلق دارد (Lenstra & Kan, 1981). لاپورت (۱۹۹۲) روش‌های مختلفی را برای حل مسئله مسیریابی ارائه کرده است. به‌تازگی، بسیاری از الگوریتم‌های حل این مسئله به صورت ابتکاری یا فراابتکاری ارائه می‌شوند که به یک حل بهینه یا نزدیک به بهینه منجر می‌گردند (Augerat *et al*., 1998; Laporte *et al*., 2000; Cordeau *et al*., 2005; Baños *et al*., 2013). مسئله مسیریابی بسته به این‌که چه سناریویی دارد، شامل اشکال مختلفی است که در آن یک نکته خاص با توجه به وضعیت واقعی، مورد بررسی قرار می‌گیرد (Gendreau *et al*., 1995).

مسئله ترکیب بهینه نیز به عنوان یکی از اولین مدل‌های بهینه‌سازی ریاضی در بسیاری از پژوهش‌ها مورد استفاده قرار گرفته است (Shih & Frey, 1995). بیش‌تر آنها در زمینه شیمی، نفت، و گاز هستند (Clark & Scarf, 1960; Song *et al*., 2012). همان‌طور که در بسیاری از پژوهش‌های

1.Blending
2. Dantzig & Ramser

پیشین بیان شده است، مشتقات مسئله مسیریابی بسیار زیاد است و هر روزه بر اساس مسائلی که در دنیای واقعی با آن‌ها برخورد داریم، حالت‌های خاص و جدیدی از چنین مسائلی پیشارو خواهیم داشت (Braekers *et al*., 2016). یکی از این حالت‌های خاص، مسئله‌ای است که این پژوهش به آن می‌پردازد و تاکنون هیچ پژوهش علمی وجود ندارد که مسئله مسیریابی وسیله نقلیه را با در نظرگرفتن همزمان بهینه‌سازی ترکیب مواد بررسی کرده باشد.

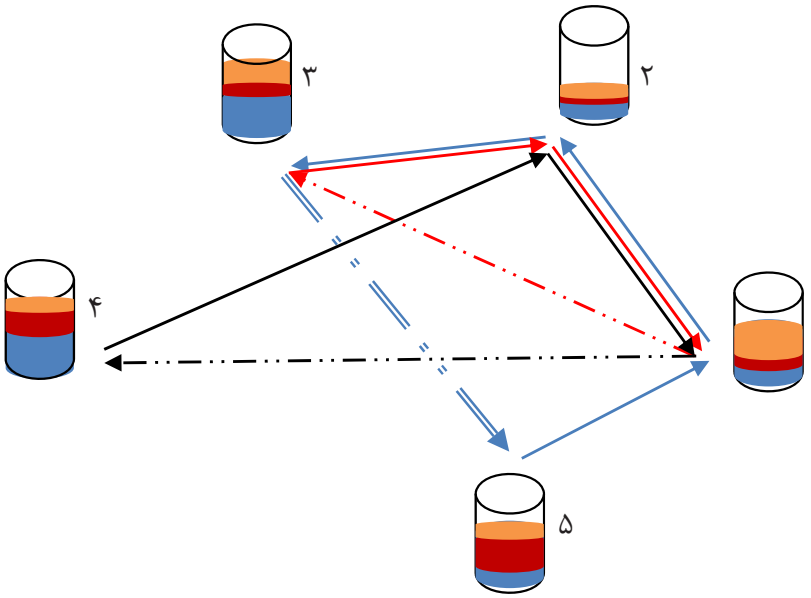
این پژوهش با ارائه کامل مدل ریاضی پیشنهادی در بخش ۲، ارائه روش حل ابتکاری در بخش ۳، استفاده از مدل برای یک منطقه کوچک محدود، با استفاده از مثال عددی و آزمون الگوریتم ابتکاری با ابعاد بزرگ‌تر در بخش ۴ و در نهایت، نتیجه‌گیری و پیشنهاد برای پژوهش‌های آینده در بخش آخر ادامه خواهد یافت.

روش‌شناسی پژوهش

ارائه مدل ریاضی

ابتدا سناریوی مسئله را به‌طور کامل و روشن تشریح می‌کنیم. سپس پارامترهای مدل را تعریف می‌نماییم و در نهایت، مدل ریاضی را ارائه می‌دهیم. همان‌طور که در شکل (۱) مشخص شده است، تعدادی سیلوی گندم را در نظر می‌گیریم که از نظر میزان موجودی و نوع گندم با یکدیگر متفاوت هستند. بر اساس میزان تقاضای منطقه‌ای که هر سیلو در آن واقع شده است، باید میزان موجودی و ترکیب مواد مغذی آن سیلو تعدیل گردد. در این مدل، هر سیلو می‌تواند به عنوان یک دپو برای سایر سیلوها (مشتریان) نقش‌آفرینی کند که این نقش، زمانی که سیلوهای دیگر نقش دپو را دارند، برعکس می‌شود. همچنین، ممکن است در یک تور، یک سیلو هر دو نقشِ دهنده و گیرنده را بازی کند (تور آبی رنگ از سیلوی ۵ آغاز و به آن ختم می‌شود. در این تور، سیلوهای ۵ و ۳ همزمان دهنده و گیرنده هستند).

در شکل (۱) سیلوهای ۱و ۲ هیچ‌گونه گندمی را به سیلوهای دیگر ارسال نمی‌کنند و سیلوی ۵ ضمن ارسال مقداری گندم به سیلوهای ۱، ۲، و ۳ در راه بازگشت مقداری گندم از سیلوی ۳ به سیلوی خود، برای تعدیل ترکیب مواد مغذی وارد می‌کند. سیلوهای ۳ و ۴ نیز تنها سیلوهای دهنده هستند و کامیون آن‌ها هنگام بازگشت به سیلوی مبدا خالی است.



شکل ۱: گردش گندم بر اساس مسئله مسیریابی و اختلاط

فرض کنید که سیلوها در مکان‌های مختلف جغرافیایی وجود دارند و هر کدام فقط یک مقدار مشخص از نوع گندم k دارند. گندم حاوی ۳ نوع اصلی مواد مغذی یعنی P، H، و G است که درصد این مواد مغذی برای انواع مختلف گندم متفاوت است. هر موقعیت جغرافیایی، به دلایل خاص، نیازمند گندم با مواد مغذی معین است. بنابراین، گندم‌ها باید بین سیلوهای مختلف جابه‌جا شوند، به‌طوری که با ترکیب مناسب، گندمی که نیازهای یک منطقه را برآورده می‌کند، به‌دست می‌آید. هر سیلو دارای تعدادی وسیله نقلیه[1] است که گندم را به سیلوهای دیگر انتقال می‌دهد و در نهایت، به مبدا

۱. در این پژوهش، تعداد وسیله حمل‌ونقل برای ساده شدن مسئله، بدون این‌که به کلیت خدشه‌ای وارد شود؛ ۱ در نظر گرفته می‌شود.

(سیلوی اولیه) بازگشت می‌کند. پارامترهای مدل و مدل ریاضی به شرح زیر هستند:

Xil	مقدار گندمی که سیلوی l ام از سیلوی l ام دریافت می‌کند
Zil	برابر با یک است اگر سیلوی i ام از سیلوی l ام گندم دریافت کند و در غیر این صورت در غیر این صورت برابر با صفر است.
Yijl	برابر یک است اگر وسیله‌ای که از سیلوی l ام گسیل شده، مسیر بین سیلوی i و سیلوی j را بپیماید و در غیر این صورت برابر با صفر است.
Cij	هزینه حمل‌ونقل بین سیلوی i و سیلوی j برای هر واحد گندم
Gl	درصد کربوهیدرات موجود در گندم ذخیره‌شده در سیلوی l ام
Pl	درصد پروتئین موجود در گندم ذخیره‌شده در سیلوی l ام
Hl	درصد چربی موجود در گندم ذخیره‌شده در سیلوی l ام
Il	موجودی اولیه گندم در سیلوی l ام
gl	درصد کربوهیدرات مناسب برای گندم ذخیره‌شده در سیلوی l ام
pl	درصد پروتئین مناسب برای گندم ذخیره‌شده در سیلوی l ام
hl	درصد چربی مناسب برای گندم ذخیره‌شده در سیلوی l ام
IGl	مقدار کربوهیدرات دریافت‌شده در سیلوی l ام
IPl	مقدار پروتئین دریافت‌شده در سیلوی l ام
IHl	مقدار چربی دریافت‌شده در سیلوی l ام
Fl	مقدار گندم ذخیره‌شده در انتهای برنامه جابه‌جایی
Q	ظرفیت وسیله حمل‌ونقل

$$\min \sum_{l\in N}\sum_{i\in N}\sum_{j\in N} c_{ij}\, y_{ijl} \quad (1)$$

$$IG_i = \sum_{l\in N} x_{il}.G_l \qquad \forall i \quad (2)$$

$$IP_i = \sum_{l\in N} x_{il}.P_l \qquad \forall i \quad (3)$$

$$IH_i = \sum_{l\in N} x_{il}.H_l \qquad \forall i \quad (4)$$

$$\sum_{i\in N} x_{il} \le Q \qquad \forall l \quad (5)$$

$$\sum_{i\in N} x_{il} \le I_l \qquad \forall l \quad (6)$$

$$F_l = I_l - \sum_{i\in N} x_{il} + \sum_{k\in N} x_{lk} \qquad \forall l \quad (7)$$

$$(I_l - \sum_{i\in N} x_{il}).G_l + IG_l \ge F_l.g_l \qquad \forall l \quad (8)$$

$$(I_l - \sum_{i\in N} x_{il}).H_l + IH_l \ge F_l.h_l \qquad \forall l \quad (9)$$

$$(I_l - \sum_{i\in N} x_{il}).P_l + IP_l \ge F_l.p_l \qquad \forall l \quad (10)$$

$$X_{il} \le Z_{il}.Q \qquad \forall l, \forall i \quad (11)$$

$$\sum_{J\in N} y_{ijl} = Z_{il} \qquad \forall l, \forall i \quad (12)$$

$$\sum_{J\in N} y_{hjl} = \sum_{i\in N} y_{ihl} \qquad \forall l \quad (13)$$

$$\sum_{i\in N} y_{ill} = 1 \qquad \forall l \quad (14)$$

$$\sum_{J\in N} y_{ljl} = 1 \qquad \forall l \quad (15)$$

$$F_{jl} - F_{il} + Q(1 - y_{ijl}) \ge X_{il} \qquad \forall i, \forall j, \forall l \quad (16)$$

$$X_{il} \le F_{il} \le Q \qquad \forall i, \forall l \quad (17)$$

$$y_{ijl} \in \{0,1\} \quad Z_{il} \in \{0,1\}$$

در این مدل، عبارت (۱) تابع هدف است که نشان‌دهنده هزینه انتقال گندم است. عبارات (۲) تا (۴) حجم مواد غذایی را نشان می‌دهد که به هر سیلو وارد شده است. عبارات (۵) و (۶) نشان می‌دهند که بیش‌ترین گندم خروجی از هر سیلو نمی‌تواند بیش‌تر از مقدار ذخیره‌شده گندم (موجودی اولیه) یا ظرفیت وسیله نقلیه باشد. عبارت (۷) موجودی گندم را در پایان هر دوره نشان می‌دهد. عبارت‌های (۸) تا (۱۰) محدودیت‌های مربوط به مواد مغذی مورد نیاز هر منطقه را بیان می‌کنند. عبارت (۱۱) باعث می‌شود که زمانی مقدار X بزرگ‌تر از صفر شود که متغیر باینری Z اجازه انتقال گندم را از سیلوی l به سیلوی i داده باشد. (۱۲) بیان می‌کند که اگر قرار است سیلوی i ام از سیلوی l ام گندم دریافت کند، در توری که مبدا آن سیلوی l ام است تنها و تنها یک کمان به سیلوی i ام ختم می‌شود.

عبارت (۱۳) نشان می‌دهد که وقتی وسیله نقلیه به یک سیلو می‌رود، باید مسیر خود را از همان سیلو ادامه دهد. عبارت‌های (۱۴) و (۱۵) نشان می‌دهند که یک وسیله نقلیه مسیر خود را از یک سیلو شروع می‌کند و در نهایت به همان می‌رسد. عبارت‌های (۱۶) و (۱۷) تغییرها را در میزان بار وسیله نقیله در طول مسیر و محدودیت‌های مربوط به آن نشان می‌دهند.

الگوریتم حل

مدل ریاضی ارائه‌شده در بخش قبل، به دلیل داشتن مسیریابی در دسته مسائل سخت (NP-Hard) قرار می‌گیرد، به‌طوری که حل آن در زمان معقول، برای مثال‌هایی با ابعاد بالا و واقعی امکانپذیر نیست. از این‌رو، یک روش حل ابتکاری برای حل این مسائل پیشنهاد می‌شود که در ادامه، به توضیح کاملی از این روش حل پرداخته می‌شود.

الگوریتم جستجوی همسایگی بزرگ تطبیقی

الگوریتم جستجوی همسایگی بزرگ تطبیقی[1] (ALNS) ابتدا از یک پاسخ اولیه شروع می‌کند و سپس در یک حلقه تکرار به جستجوی پاسخ‌های همسایه می‌پردازد. فاز جستجو در الگوریتم ALNS به چند بخش تقسیم می‌شود که در هر تکرار از هر بخش، یک عملگر از میان چندین عملگر برای حرکت به پاسخ همسایه انتخاب می‌شود. انتخاب عملگر توسط چرخ رولت و بر اساس وزن عملگرها صورت می‌پذیرد (در بخش اول وزن تمام عملگرها، یک هستند). سه حالت در بکارگیری عملگرها اتفاق می‌افتد:

۱. عملگر، بهترین پاسخ را به‌دست می‌آورد. در این حالت، دامنه عملگر به اندازه σ_1 افزایش می‌یابد (در ابتدا دامنه تمام عملگرها صفر هستند).

۲. عملگر، پاسخ بهتری از جواب فعلی به‌دست می‌آورد. در این حالت دامنه به اندازه σ_2 افزایش می‌یابد.

۳. پاسخ به‌دست‌آمده توسط عملگر بهبود پیدا نکرده است که بسته به این‌که پاسخ با توجه معیار پذیرش موزون، قبول یا رد شود به ترتیب دامنه عملگر به اندازه σ_3 افزایش یافته یا تغییری نمی‌کند.

به‌طوری که $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3 \geq 0$ مکانیزم معیار پذیرش مورد استفاده به این صورت است که یک عدد تصادفی بین صفر و یک ایجاد می‌شود. اگر عدد تولیدشده از عبارت ΔS (۱۸) کوچک‌تر شود، پاسخ جدید پذیرفته می‌شود، در غیر این صورت رد می‌گردد.S_n در این رابطه بیانگر مقدار تابع هدف

1. Adaptive Large Neighborhood Search (ALNS)

پاسخ جدید و S_f بیانگر مقدار تابع هدف پاسخ قبلی است. در واقع، در تکرارهای اولیه که دما بسیار بالا است، احتمال بیش‌تری برای پذیرش پاسخ‌های بدتر وجود دارد. با کاهش تدریجی دما، در تکرارهای پایانی احتمال کم‌تری برای پذیرش پاسخ‌های بدتر وجود خواهد داشت. هر بخش نیز لازم است دامنه عملگرها به صفر تنظیم شود و وزن عملگرها با استفاده از رابطه (۱۹) محاسبه گردد.

$$S=100*(S_n - S_f)/S_f \Delta \quad (۱۸)$$

$$w_i = \begin{cases} w_i, & \text{if } o_{ij} = 0 \\ (1-\eta)w_i + \frac{\eta \pi_i}{v_i o_{ij}}, & \text{if } o_{ij} \neq 0 \end{cases} \quad (۱۹)$$

که در آن W_i وزن عملگر i، o_{ij} تعداد دفعات استفاده‌شده ازعملگر i در آخرین بخش j، $\eta \in [0,1]$ شاخص واکنش و $v_i \geq 1$ شاخص نرمال‌سازی (این شاخص بستگی به زمان محاسباتی عملگر دارد) است. π_i مجموع دامنه عملگر i در آخرین بخش است. ساختار الگوریتم ALNS در شکل (۲) نشان داده شده است. شایان اشاره است که در این پژوهش از معیار پذیرش موزون استفاده می‌شود. ایده معیار پذیرش به این صورت است که پارامتری با عنوان دما در نظر گرفته می‌شود. ابتدا در تکرارهای اولیه، دما بسیار بالا قرار داده می‌شود تا احتمال بیش‌تری برای پذیرش پاسخ‌های بدتر وجود داشته باشد. با کاهش تدریجی دما، در تکرارهای پایانی احتمال کم‌تری برای پذیرش پاسخ‌های بدتر وجود خواهد داشت.

لیست عملگرها

۱. ρ تا حذف تصادفی: این عملگر یک دوره و یک سیلو ملاقات‌شده از آن را به صورت تصادفی انتخاب و حذف می‌کند. این عملگر ρ دفعه اجرا می‌شود.

۲. ρ تا درج تصادفی: این عملگر یک دوره و یک سیلوی ملاقات‌نشده از آن را به صورت تصادفی انتخاب می‌کند و در بهترین مکان در دوره انتخاب‌شده، درج می‌کند. این عملگر ρ دفعه اجرا می‌شود.

۳. ρ تا درج بهترین سیلو: این عملگر تمام سیلوهای ملاقات‌نشده را در تمام دوره‌ها در نظر می‌گیرد و سیلویی را درج می‌کند که کم‌ترین هزینه کل را نسبت به درج سایر سیلوها دارد. این عملگر ρ دفعه اجرا می‌شود.

۴. ρ تا حذف بدترین سیلو: این عملگر بدترین سیلو ملاقات‌شده را با توجه به هزینه کل حذف می‌کند. این عملگر و عملگر قبلی به دلیل ساختار حریصانه، از عملگرهای زمان‌بر محسوب می‌گردند. این عملگر ρ دفعه اجرا می‌شود.

۵. حذف شاو: این عملگر به صورت تصادفی، یک دوره و یک سیلو ملاقات‌شده از آن را انتخاب می‌کند، کوتاه‌ترین فاصله (d_{min}) به سیلو انتخاب‌شده را محاسبه می‌کند و تمام سیلوهایی را که در فاصله $2dmin$ از سیلوی انتخاب‌شده قرار دارند، از مسیر حذف می‌کند. ایده عملگر حذف سیلوها نزدیک به‌هم است تا در دوره دیگری ملاقات شوند.

۶. درج شاو: این عملگر یک دوره و یک سیلو ملاقات‌نشده از آن را به صورت تصادفی انتخاب می‌کند، کوتاه‌ترین فاصله (d_{min}) از آن سیلوی انتخاب‌شده را حساب می‌کند، و تمام سیلوهای ملاقات‌نشده در فاصله $2dmin$ را از سیلوی انتخاب‌شده در مسیر درج (در بهترین مکان ممکن) می‌کند.

۷. حذف ρ سیلو: این عملگر یک سیلو را به صورت تصادفی انتخاب می‌کند و آن را از تمام مسیرهایی که ظاهر شده‌اند، حذف می‌کند. این عملگر ρ دفعه اجرا می‌شود.

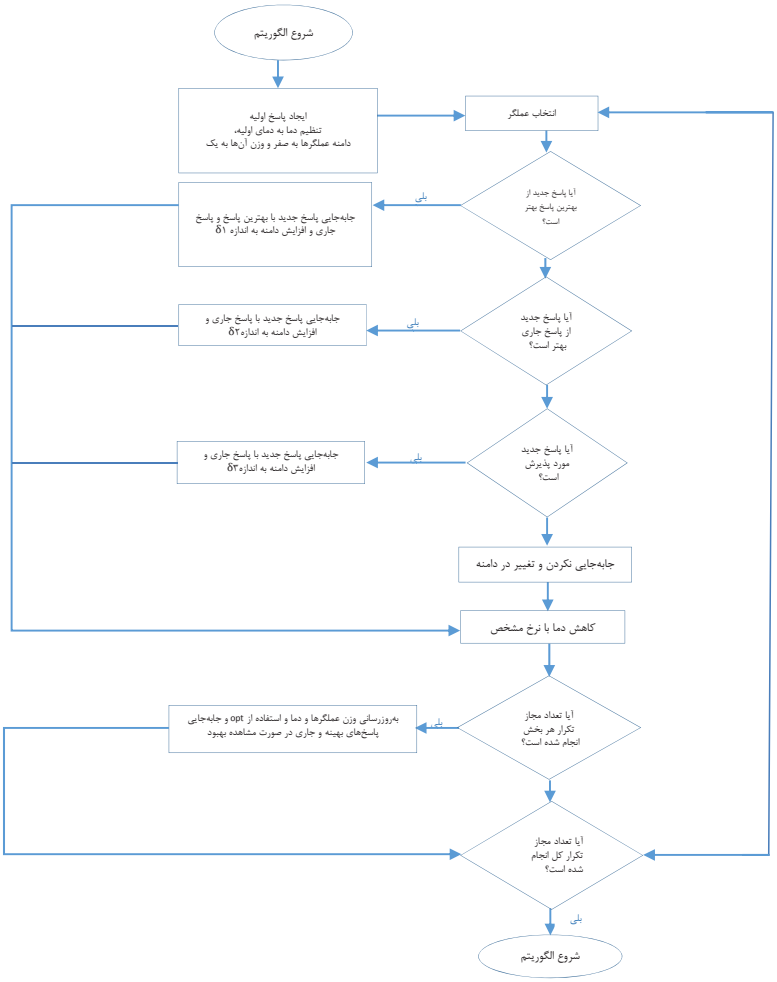
۸. درج ρ سیلو: این عملگر سیلویی را که در هیچ دوره‌ای ملاقات نشده است به صورت تصادفی انتخاب، و در یک دوره تصادفی (در بهترین مکان ممکن) درج می‌کند. این عملگر ρ دفعه اجرا می‌شود.

۹. خالی کردن یک دوره: این عملگر یک دوره را به صورت تصادفی انتخاب و تمام سیلوهای ملاقات‌شده را در آن دوره حذف می‌کند.

۱۰. جابه‌جایی دو دوره: این عملگر دو دوره را به صورت تصادفی انتخاب، و مسیرهای این دو دوره را باهم جابه‌جا می‌کند.

۱۱. ρ تا حرکت تصادفی: این عملگر به صورت تصادفی، یک دوره و یک سیلو ملاقات‌شده از آن را انتخاب و حذف می‌کند. آن‌گاه این سیلو را در یک دوره تصادفی دیگر درج (در بهترین مکان ممکن) می‌کند.

نیاز به اشاره است که در انتهای هر بخش از جستجوی الگوریتم، روش بهبود ۲-opt برای بهبود مسیرهای پاسخ جاری استفاده می‌شود. همچنین، معیار پذیرش موزون برای پذیرش پاسخ‌های بهبودنیافته مورد استفاده قرار گرفته است.



شکل ۲: چارچوب الگوریتم جستجوی همسایگی بزرگ تطبیقی

تحلیل مدل

در این‌جا برای تفهیم مدل از یک مثال عددی با اندازه کوچک استفاده شده است. فرض کنید هشت سیلو با مکان‌های مختلف جغرافیایی وجود دارند. جدول (۱) داده‌های مورد نیاز مدل را نشان می‌دهد. ظرفیت وسایل نقلیه ۱۰ واحد است.

جدول ۱: داده‌های مورد نیاز مثال عددی

شماره سیلوها	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷
مختصات جغرافیایی	۸۲	۹۹	۷۰	۸۰	۵۸	۹۳	۶۲
	۹۰	۵۱	۸۵	۲۰	۶۰	۶۰	۴۵
موجودی اولیه	۴۶	۴۶	۴۴	۳۲	۱۰	۳۴	۴۵
G%	۸۰	۷۵	۷۵	۷۰	۷۵	۸۵	۸۵
P%	۱۵	۱۵	۵	۱۰	۱۲	۱۰	۱۰
H%	۵	۱۰	۲۰	۲۰	۱۳	۵	۵
کم‌ترین G% مورد نیاز	۸۰	۸۰	۷۵	۷۵	۷۵	۸۰	۸۰
کم‌ترین P% مورد نیاز	۱۲	۱۲	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	۵
کم‌ترین H% مورد نیاز	۵	۷	۵	۵	۵	۵	۱۰

این مدل با کمک نرم‌افزار GAMS و الگوریتم شاخه و کران حل شده است و نتایج آن نشان می‌دهد که با هزینه‌ای ۳۸۹۷۶ واحد می‌توان گندم بین این سیلوها را به‌گونه‌ای تغییر داد که ارزش غذای مورد نیاز به‌دست آید. خروجی مسئله در جدول (۲) نشان داده شده است. این جدول نشان می‌دهد که هر سیلو چقدر گندم را به سیلوهای دیگر ارسال می‌کند. برای مثال، توری که از سیلوی ۴ آغاز می‌شود سیلوهای ۷، ۵، و ۶ را به‌ترتیب ملاقات کرده و به هر کدام به‌ترتیب ۹/۵، ۷/۵، و ۳ واحد گندم تحویل می‌دهد. در این مثال، ترتیب سرویس‌دهی تنها در سیلوهای ۴، ۶، و ۷ اهمیت دارد که مدل آن‌ها را مشخص نموده است. در مثال‌هایی با ابعاد بزرگ، ترتیب‌بندی سیلوها زمان حل را به صورت نمایی افزایش می‌دهند که انگیزه اصلی برای استفاده از الگوریتم ابتکاری است.

جدول ۲: نتایج تحلیل مثال عددی

شماره سیلو	مشتری اول	مقدار گندم تحویلی به مشتری ۱	مشتری دوم	مقدار گندم تحویلی به مشتری ۲	مشتری سوم	مقدار گندم تحویلی به مشتری ۳	مشتری چهارم	مقدار گندم تحویلی به مشتری ۴
۱	۳	۱۸	۵	۱/۲	-	-	-	-
۲	۳	۱۳	-	-	-	-	-	-
۳	۵	۴	۷	۸	-	-	-	-
۴	۷	۹/۵	۵	۷/۵	۶	۳	-	-
۵	۳	۳	-	-	-	-	-	-
۶	۲	۱۸	۴	۴	۷	۱	۵	۲/۵
۷	۵	۱	۲	۱۵	۴	۳	-	-

در ادامه و برای آزمون الگوریتم ALNS، هفت مسئله با تعداد سیلوهای متفاوت تولید شدند. تعداد سیلوها از ۱۰ تا ۷۰ در نظرگرفته شدند و الگوریتم ALNS با الگوریتم دقیق مورد مقایسه قرار گرفت. همان‌طور که در جدول (۳) ملاحظه می‌شود، زمان حل توسط حل دقیق بسیار بالاست و در مسئله ۴۰ سیلو به بالا، باعث توقف الگوریتم حل گردیده است. شکاف حل نیز از مسئله ۳۰ سیلو به بالا به نفع الگوریتم پیشنهادی است.

جدول ۳: مقایسه روش‌های حل

تعداد سیلوها	الگوریتم شاخه و کران				الگوریتم ALNS		
	حد بالا	حد پایین	شکاف	زمان (ثانیه)	پاسخ	زمان (ثانیه)	شکاف
۱۰	۲۶۲۳۶۷۲۲	۲۵۸۳۸۱۲۲	۱/۵۴	۱۶۲۰/۶	۲۶۸۱۸۰۲۰	۱۰۶/۷۱	۳/۶۷
۲۰	۵۰۳۹۳۷۶۲	۴۸۵۳۳۱۸۳	۳/۸۳	۱۶۴۲/۹	۵۰۵۰۱۰۵۰	۱۸۷/۲	۴/۰۵
۳۰	۸۶۳۰۳۸۴۹	۷۱۷۲۱۵۰۱	۲۰/۳۳	۱۸۰۰	۷۴۴۸۸۸۵۰	۳۰۵/۴	۳/۸۶
۴۰	۱۱۶۷۲۶۴۳۲	۸۹۷۶۹۰۶۵	۳۰/۰۳	۳۶۰۰	۹۲۳۲۶۸۲۰	۵۲۳/۰۳	۲/۹۱
۵۰	۳۵۳۶۷۶۹۸۶	۱۰۰۸۱۳۲۰۶	۲۵۰/۸۲	۳۶۰۰	۱۰۴۶۸۷۱۰۰	۱۲۳۱/۴۶	۴/۱۱
۶۰	۴۴۱۸۴۱۲۰۶	۱۱۳۳۱۰۹۹۵	۲۸۹/۹۴	۳۶۰۰	۱۱۶۹۹۸۸۰۰	۲۲۳۵/۳۳	۳/۳۲
۷۰	۵۳۴۵۱۹۷۴۷	۱۲۶۸۵۸۷۲۵	۳۲۱/۳۵	۳۶۰۰	۱۳۰۹۷۷۷۰۰	۲۰۱۰/۶۶	۳/۱۷

بحث و نتیجه‌گیری

در این پژوهش، سعی شده است ترکیب مدل اختلاط و مسیریابی ارائه شود که در سیستم‌های توزیع، ترکیب، و ذخیره‌سازی گندم مفید و کارامد هستند. بر اساس نوع سناریوی اتخاذشده در این پژوهش، هر سیلو می‌تواند به صورت همزمان دو نقش انبار و مشتری را ایفا نماید. این مسئله اصلی‌ترین تفاوت را در مدلسازی مسئله با مدلسازی مسیر وسیله نقلیه کلاسیک به‌وجود می‌آورد. گنجاندن مفهوم اختلاط مواد در مسئله نیز سهم دیگر این پژوهش است که در ادبیات وجود ندارد. برای حل مدل ارائه‌شده، ابتدا برای تعداد محدودی از سیلوها، مدل با استفاده از حل دقیق بررسی

شده است تا پارامترها و اصول کارکردی مدل تشریح شوند. سپس برای مسائل بزرگ و آزمون الگوریتم پیشنهادی جستجوی همسایگی بزرگ تطبیقی، مدل با مثال‌هایی شامل ۱۰ تا ۷۰ سیلو حل گردیده، که نتایج حاکی از موفقیت الگوریتم ابتکاری پیشنهاد شده است. نتایج نشان‌دهنده این مطلب هستند که با استفاده از این مدل می‌توان در توزیع گندم برخلاف کمینه‌سازی هزینه‌های لجستیکی، ترکیب مناسبی از گندم را در هر منطقه جغرافیایی ذخیره نمود تا بر اساس استانداردها، آرد مصرفی حاوی مواد مغذی مناسب باشد.

مدل ارائه‌شده در پژوهش حاضر، محدودیت‌هایی دارد که می‌تواند در پژوهش‌های آینده مورد توجه قرار گیرند. نخستین محدودیت در این مدل این است که وسایل نقلیه فقط در سیلوی ابتدایی بارگیری می‌شوند و نمی‌توانند در امتداد مسیر بارگیری کنند و گندم را از سیلوهایی که در آن متوقف می‌شوند، بپذیرند. هنگامی که گندم به صورت فله است، این یک نقطه ضعف نیست و به صورت عملیاتی این فرض رعایت می‌شود اما وقتی که گندم به صورت کیسه‌ای باشد، بارگیری و تخلیه باید باهم توسط مدل انجام شوند که این موضوع می‌تواند در توسعه مدل مورد توجه پژوهشگران آتی قرار گیرد. محدودیت دوم این است که مدل، سیلوها را به صورت ایستا و تنها در یک دوره زمانی مورد بررسی قرار می‌دهد و ورودی‌های اصلی سیلوها را که همان مزارع هستند، در نظر نمی‌گیرد. این مدل می‌تواند پویا باشد و میزان گندم ورودی به سیلوها را که به صورت واردات یا تولید انجام می‌شوند، مورد توجه قرار دهد.

منابع

الف) انگلیسی

Augerat, P., Belenguer, J. M., Benavent, E., Corberán, A., Naddef, D., & Rinaldi, G. (1998). Computational Results *with a Branch-and-Cut Code for the Capacitated Vehicle Routing Problem*. Research Report RR 949-M, University Joseph Fourier.

BañOs, R., Ortega, J., Gil, C., MáRquez, A. L., & De Toro, F. (2013). A Hybrid Meta-Heuristic for Multi-Objective Vehicle Routing Problems with Time Windows. *Computers & Industrial Engineering, 65*(2), 286-296.

Braekers, K., Ramaekers, K., & Van Nieuwenhuyse, I. (2016). The Vehicle Routing Problem: State of the Art Classification and Review. *Computers & Industrial Engineering, 99*(1), 300-313.

Clark, A. J., & Scarf, H. (1960). Optimal Policies for a Multi-Echelon Inventory Problem. *Management Science, 6*(4), 475-490.

Cordeau, J.-F., Gendreau, M., Hertz, A., Laporte, G., & Sormany, J.-S. (2005). New Heuristics for the Vehicle Routing Problem. *Logistics Systems: Design and Optimization* (pp. 279-297): Springer.

Dantzig, G. B., & Ramser, J. H. (1959). The Truck Dispatching Problem. *Management Science, 6*(1), 80–91.

Frankel, O. H. (1939). Analytical Yield Investigations on New Zealand Wheat: IV. Blending Varieties of Wheat. *The Journal of Agricultural Science, 29*(2), 249-261.

Gendreau, M., Laporte, G., & Séguin, R. (1995). An Exact Algorithm for the Vehicle Routing Problem with Stochastic Demands and Customers. *Transportation Science, 29*(2), 143-155.

Lawler, E., Lenstra, J., Kan, A. R., & Shmoys, D. (1993). *Sequencing and Scheduling: Algorithms and Complexity*. SC Graves, PH Zipkin, AHG Rinnooy Kan (eds.). Logistics of Production and Inventory Handbooks in Operations Research and Management Science, Vol. 4: North-Holland, Amsterdam.

Hayta, M., & Çakmakli, Ü. (2001). Optimization of Wheat Blending to Produce Breadmaking Flour. *Journal of Food Process Engineering, 24*(3), 179-192.

Laporte, G., Gendreau, M., Potvin, J. Y., & Semet, F. (2000). Classical and Modern Heuristics for the Vehicle Routing Problem. *International Transactions in Operational Research, 7*(4-5), 285-300.

Laporte, G. (1992). The Vehicle Routing Problem: An Overview of Exact and Approximate Algorithms. European *Journal of Operational Research, 59*(3), 345-358.

Shih, J. S., & Frey, H. C. (1995). Coal Blending Optimization under Uncertainty. European *Journal of Operational Research, 83*(3), 452-465.

Lenstra, J. K., & Kan, A. R. (1981). Complexity of Vehicle Routing and Scheduling Problems. *Networks, 11*(2), 221-227.

Song, C.-y., Hu, K.-l., & Li, P. (2012). Modeling and Scheduling Optimization for Bulk Ore Blending Process. *Journal of Iron and Steel Research International, 19*(9), 20-28.

Steffan, P. (2012). *An Optimization Model: Minimizing Flour Millers' Costs of Production by Blending Wheat and Additives*. (For the Degree Master of Agribusiness), Kansas State University.

The Journal of PLANNING & BUDGETING
Indexed In ISC | Vol. 23 | No. 2 | Summer 2018 | PP 31-45 | ISSN: 2251-9092

The Balanced Wheat Supply Problem and a Heuristic Algorithm

Babak Farhang Moghaddam[1] | farhang@imps.ac.ir

Abstract Wheat is a strategic commodity, and so its distribution system is always one of the major issues facing countries. The cost of wheat distribution and storage and the differences in the nutrient content of different wheats, have caused complicated problems in the wheat supply chain. In addition to controlling distribution costs, it could enhance the quality of wheat through blending different kinds of wheat in several areas. This research attempts to describe this problem by using a complex integer optimization model. This problem, in terms of complexity, is considered as a NP-hard problem, and for this reason, an Adaptive Large Neighborhood Search is proposed to solve it. The analysis of the solutions shows that the synchronization of the blending and routing problems will improve the overall optimal point. Also, to evaluate the quality of the proposed algorithm's solutions, the algorithm's results are compared with the exact algorithm's answers; the results indicate the proper performance of the proposed algorithm.

Keywords: Blending-routing Problem, Mixed Integer Programming, Adaptive Large Neighborhood Search, Wheat Supply, Wheat Blending and zdistribution System, Wheat Nutrients Balancing.

JEL Classification: C18, C02, C61.

1. Associate Professor Institute for Management and Planning Studies(IMPS), Tehran, Iran.