

مدل و الگوریتم حل مسئله مکان‌یابی جایگاه‌های سوخت برای خودروهای دوگانه‌سوز به منظور مینیمم کردن انتشار گازهای گلخانه‌ای

مقاله پژوهشی

میثم حسینی*، استادیار، دانشکده علوم پایه و فنی مهندسی بیجار، دانشگاه کردستان، سنندج، ایران

*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: me.hosseini@uok.ac.ir

دریافت: ۹۹/۰۱/۲۲ - پذیرش: ۹۹/۰۶/۰۵

صفحه ۱۴۲-۱۲۱

چکیده

به علت تأثیرات مخرب گازهای گلخانه‌ای که به وسیله سوخت‌های فسیلی منتشر می‌شوند، حرکت به سمت سوخت‌های جایگزین یک امر غیر قابل اجتناب است. سوخت‌های جایگزین نقش بسیار مهمی در عبور به سوی یک سیستم حمل‌ونقل پاک و پایدار بازی می‌کنند. حرکت به سمت ناوگان خودروهای با سوخت جایگزین آسان نیست، بطوریکه در ابتدای دوره گذار کمبود زیرساخت‌ها برای تولید، توزیع و تحویل سوخت جایگزین یکی از مهمترین موانع است. از این جهت، مکان‌یابی جایگاه‌های سوخت جایگزین یک مبحث مهم در تسریع ورود این سوخت به سیستم حمل‌ونقل است. با توجه به کمبود جایگاه‌های سوخت جایگزین این فرض که همه خودروها در سفرهای بین شهری بتوانند با یک نوع سوخت جایگزین تمام مسیرها را بپیمایند یک امر غیر واقعی است. یکی از راه‌کارهای عملی استفاده از خودروهای دوگانه‌سوز است تا در مواقع ضروری برای جلوگیری از توقف خودرو بخاطر اتمام سوخت جایگزین در سفرها، بتوان از سوخت بنزینی استفاده کرد. در این مقاله، یک مدل ریاضی جدید برای مسئله مکان‌یابی جایگاه‌های سوخت جایگزین برای خودروهای دوگانه‌سوز ارائه شده است. هدف مدل مینیمم کردن کل آلودگی منتشر شده توسط خودروها است. به علاوه، یک الگوریتم حل کارا بر اساس روش تجزیه بندرز برای حل شبکه‌های بزرگ ارائه شده است. نتایج بدست آمده نشان می‌دهند که استفاده از خودروهای دوگانه‌سوز می‌تواند منجر به کاهش قابل توجه گازهای گلخانه‌ای شود. همچنین قابلیت الگوریتم پیشنهاد شده بر روی مثال‌های تولید شده نشان می‌دهد که الگوریتم در کاهش زمان حل و به دست آوردن جواب‌های با دقت خوب مفید است.

واژه‌های کلیدی: الگوریتم تجزیه بندرز، انتشار گازهای گلخانه‌ای، جایگاه‌های سوخت جایگزین، خودروهای دوگانه‌سوز، مکان‌یابی

۱-مقدمه

در حال حاضر ۹۴ درصد از سوخت مصرفی در سیستم حمل‌ونقل بر اساس سوخت فسیلی است. براساس سیاست آژانس بین‌المللی انرژی تا سال ۲۰۵۰، باید ۶۰ درصد از گازهای گلخانه‌ای کاهش یابد (Pasaoglu, G., et al., 2012) (Salimifard, K., et al., 2012). به منظور رسیدن به این هدف، توجه به سمت استفاده هر چه بیشتر از سوخت‌های جایگزین مانند هیدروژن، الکتروسیته، گاز نفت

تأثیرات خطرناک انتشار گازهای گلخانه‌ای (GHG)^۱ روی سلامت انسانها و اکوسیستم‌ها یکی از مباحث مهم و جدی در سالهای اخیر بوده است. گازهای گلخانه‌ای توسط فعالیت‌های انسانی از قبیل سوختن سوخت‌های فسیلی در بخش‌های مختلف به وجود آمده است. مطالعات نشان می‌دهد که یک سهم عمده و بزرگ از انتشار CO_2 مربوط به بخش حمل‌ونقل جاده‌ای است (Owen, N. A., et al., 2010).

یا مراکز خرید، از یک دستگاه خودپرداز در بین راه پول بگیرد. در این حالت به جای قرار گرفتن تقاضا در نقاط مدل، تقاضا را بر روی جریان عبوری شبکه در نظر می‌گیرد. در مبحث سوخت‌گیری نیز تقاضا به صورت جریان عبوری خودروها در سفر اتفاق می‌افتد. تقاضای مبتنی بر جریان، اولین بار توسط هاجسون (Hodgson, M. J., 1990) و برمن و همکاران (Berman, O., et al, 1992) برای مسئله مکان‌یابی جایگاه‌ها با وقفه در جریان (FCLM)^۵ مطرح شد. مسئله FCLM اساساً یک مسئله ماکزیمم پوشش مبتنی بر جریان است که یک تعداد مشخص از تسهیلات را برای ماکزیمم کردن جریان پوشش داده شده در یک شبکه مکان‌یابی می‌کند. جریان بر اساس حجم عبوری بر اساس سفرهای مبدأ-مقصد (OD)^۶ تعریف می‌شوند. در مسئله FCLM، یک جریان زمانی سرویس داده می‌شود که حداقل یک مرکز تسهیلات در طول مسیر جریان مکان‌یابی شده باشد. در مکان‌یابی جایگاه‌های سوخت جایگزین، به پایان رساندن سفر بین شهری رفت و برگشت با توقف تنها یک بار در مسیر برای سوخت‌گیری فرض درست و منطقی نیست. خودروهای با سوخت‌های جایگزین با یک باک پر یک فاصله کوتاهتری نسبت به خودروهای فسیلی طی می‌کنند. به همین علت در برخی مسیرهای طولانی باید چندین بار در مسیر رفت و برگشت توقف کرده و سوخت‌گیری کرد تا بتوان مسیر را بدون از دست‌دادن سوخت به پایان رسانید. کابی و لیم (Kuby, M., and Lim, S., 2005) با توجه به دامنه حرکتی خودروها^۷ مسئله مکان‌یابی جایگاه‌ها سوخت جایگزین (FRLM)^۸ را ارائه دادند. هدف مسئله FRLM مکان‌یابی یک تعداد مشخص از جایگاه‌های سوخت است تا کل جریانی که بتوانند با سوخت‌گیری موفقیت‌آمیز، سفر خود را به پایان رسانند ماکزیمم کند. تقاضا در این مدل به صورت جریان ترافیکی عبوری از سفرهای مبدأ-مقصد است. این مدل یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح است که قبل از حل مدل باید تمام ترکیبات معتبر برای هر سفر را در یک مرحله جداگانه به دست آورد. ترکیبات معتبر، ترکیبی از نقاط هستند که با مکان‌یابی جایگاه‌ها در آن نقاط یک سفر رفت و برگشت می‌تواند بدون متوقف شدن به خاطر اتمام سوخت سفر خود را با سوخت‌گیری در این جایگاه‌ها به اتمام برساند. با بزرگتر شدن شبکه بخصوص زمانی که دامنه حرکتی خودرو کم باشد، به دست آوردن این

مایع (LPG)^۹، گاز طبیعی فشرده (CNG)^{۱۰} و غیره در تمام بخش‌های صنعت جذب شده است. این سوخت‌ها نقش بسیار پررنگی در گذار به سمت سیستم حمل‌ونقل پایدار بازی می‌کنند (Kim, G. J., 2010). حرکت به سمت خودروهای با سوخت جایگزین (AFV)^{۱۱} به آسانی امکان‌پذیر نمی‌باشد. یکی از مهمترین گام‌ها به سوی گسترش و ترویج خودروهای با سوخت جایگزین آماده‌کردن زیرساخت‌های سوخت‌گیری این نوع خودروها است. در عمل، کمبود جایگاه‌های سوخت جایگزین و توزیع نامتقارن این نوع جایگاه‌ها یک مانع اساسی در گسترش خودروهای با سوخت جایگزین است (Melaina, M. W. and Bremson, J., 2008). در سفرها (بین شهری) با خودروهای سوخت فسیلی، چون جایگاه‌های سوخت فسیلی در هر مکانی موجود هستند می‌توان فرض کرد که باک این نوع خودروها بی‌نهایت سوخت را در خود دارند. اما در مورد خودروهای سوخت جایگزین به علت کمبود جایگاه‌های سوخت‌گیری این نوع خودروها، اگر خودرو به سوخت‌گیری احتیاج داشته باشد و جایگاه سوخت موجود نباشد ممکن است که خودروها به علت اتمام سوخت متوقف شوند، یا انحراف زیادی از مسیر تعیین شده برای سوخت‌گیری داشته باشند. بنابراین مکان‌یابی جایگاه‌های سوخت جایگزین اهمیت ویژه‌ای دارد و روش‌های کارائی که بتوانند جایگاه‌های سوخت جایگزین را بخصوص در مراحل اولیه حرکت به سمت خودروهای با سوخت جایگزین، به صورت بهینه مکان‌یابی کنند در توسعه این انرژی جدید بسیار ضروری است. از نقطه نظر ریاضی مسئله مکان‌یابی جایگاه‌های سوخت در جاده‌ها یک مسئله واضح مکان‌یابی است ولی مدل‌های سنتی مکان‌یابی در مسئله سوخت‌های جایگزین زیاد مناسب نمی‌باشند.

مدل‌های سنتی مکان‌یابی فرض می‌کنند که تقاضا در نقاط مخصوصی رخ می‌دهند و ارایه تسهیلات به وسیله فاصله نقاط تقاضا تا نزدیکترین مرکز تسهیلات مشخص می‌شود. برای مسائلی که کالاها یا سرویس‌ها در طول یک سفر پدید می‌آیند ایده مکان‌یابی سنتی مناسب نبوده و مدل‌سازی بر پایه تقاضا بر روی جریان می‌تواند مناسب‌تری داشته باشد. برای مثال به جای اینکه یک نفر یک سفر اختصاصی برای رفتن به باجه‌های خودپرداز برای گرفتن پول انجام دهد و سپس به خانه برگردد، این کاملاً معمولی است که یک نفر در سفر رفتن به محل کار

در مکان‌یابی جایگاه‌های شارژ در مناطق شهری را دارد. اکثر مقالات اشاره شده در بالا بر این فرض استوارند که خودروها با یک سوخت جایگزین هستند. زمانی که خودروها تک-سوخت باشند ممکن است منجر به مشکلات متعدد و محدودیت‌هایی در دوره گذار شوند. از جمله اینکه، خودروهای با تنها یک سوخت جایگزین ممکن است مورد اقبال عموم قرار نگیرند. در بسیاری از کشورها بخصوص در اوایل دوره گذار، تعداد بسیار کمی از جایگاه‌های سوخت جایگزین در جاده‌ها موجودند و بنابراین رانندگان ممکن است مجبور به پیمودن مسافت طولانی برای رسیدن به یک جایگاه سوخت شوند. طی کردن مسافت طولانی خود باعث تولید انتشار بیشتر GHG و پرداخت هزینه اضافی می‌شود. از طرفی، در برخی مناطق استقرار جایگاه‌های سوخت جایگزین اقتصادی نیست و رانندگان برای سفر به این مناطق مجبورند از سوخت‌های فسیلی استفاده کنند. بنابراین به منظور جلوگیری از پیمودن مسافت طولانی برای رسیدن به یک جایگاه سوخت جایگزین، و کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای یک استراتژی خوب استفاده از خودروهای دوگانه‌سوز است. یک خودرو دوگانه‌سوز دارای دو سیستم سوخت جداگانه است: اولی بر اساس احتراق داخلی سوخت‌های فسیلی کار می‌کند، و دومی بر اساس یک سوخت جایگزین مثل CNG یا الکتریسته و غیره کار می‌کند. دو سوخت در دو باک جداگانه ذخیره می‌شوند و رانندگان در هر لحظه می‌توانند میزان سوخت باقی‌مانده هر کدام از سوخت‌ها را دیده و در هنگام رانندگی در مواقع ضرور برای جلوگیری از توقف خودرو بخاطر اتمام سوخت نوع سوخت مصرفی را تغییر دهند. سوخت‌های فسیلی که در اینجا آنها را سوخت معمولی گوئیم دارای مزایایی شامل در دسترس بودن، گستردگی جایگاه‌های عرضه آن و دامنه حرکتی طولانی برای هر باک می‌باشند، اما مضرات آن شامل قیمت بالا و تولید بسیار زیاد GHG است. از طرف دیگر سوخت‌های جایگزین GHG کمتری تولید کرده و به علت یارانه‌ای که در مراحل اولیه دولت‌ها برای این نوع سوخت‌ها پرداخت می‌کنند قیمت عرضه آنها نسبت به سوخت‌های فسیلی ارزانتر است. در کنار این مزایا برای سوخت‌های جایگزین، مضراتی مانند کمبود جایگاه‌های سوخت و دامنه حرکتی کم این نوع خودروها

ترکیبات معتبر بسیار سخت و غیر ممکن می‌شود. در چند سال اخیر توسعه‌های گوناگونی روی مسئله FRLM با بکارگیری مفاهیم واقعی ارایه شده‌است. محققان با اصلاح مدل اولیه FRLM چندین مدل خوب را که در آن احتیاج به تولید ترکیبات معتبر قبل از حل مدل نیست ارائه داده‌اند. کاپر و کابی (Capar, I. and Kuby, M., 2012)، میرحسینی و ابرازی (MirHassani, S. A. and Ebrazi, R., 2012) و کاپر و همکاران (Capar, I., et al., 2013) از جمله کسانی هستند که مدل‌هایی را برای بهبود مدل FRLM ارائه داده‌اند. آپچورچ و همکاران (Upchurch, C., et al., 2009) و حسینی و میرحسینی (Hosseini, M. and Hosseini, M., 2015)، مسئله FRLM را برای حالتی که جایگاه‌ها دارای ظرفیت هستند بازنویسی کردند. حسینی و میرحسینی (Hosseini, M. and MirHassani, S. A., 2015) همچنین یک روش حل بر اساس روش لاگرائز اصلاح شده برای مسئله ظرفیت‌دار ارائه دادند، الگوریتم ارائه شده برای حل شبکه‌های با اندازه بزرگ به خوبی عمل می‌کند. کیم و کابی (Kim, G. J. and Kuby, M., 2012) و حسینی و همکاران (Hosseini, M., et al., 2017)، بحث انحراف از مسیر از پیش تعیین شده را در مدل مکان‌یابی جایگاه‌های سوخت جایگزین بررسی کردند. در این مدل‌ها، فرض می‌شود که رانندگان برای سوخت‌گیری می‌توانند برخی انحرافات را از مسیر از پیش تعریف شده انجام دهند.

وانگ (Wang, Y. W., 2011) مدل‌های مکان‌یابی شارژگیری را برای ایستگاه‌های با شارژ کند را بر پایه جفت‌های مبدا-مقصد برای سوخت‌گیری موتورهای الکتریکی ارائه دادند. حسینی و میرحسینی (Hosseini, M. and MirHassani, S. A., 2015) یک مدل جامع را برای مکان‌یابی جایگاه‌های شارژ برای خودروهای الکتریکی بر اساس یک صفت‌بندی ارائه دادند که در آن بحث ظرفیت جایگاه‌ها، مدت زمان سوخت‌گیری و نیز زمان حرکت هر مسافر را لحاظ کرده‌اند. ارسلان و کارسان (Arslan, O. and Karasan, O. E., 2016) یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح را برای زمانی که خودروها هیبریدی الکتریکی هستند ارایه داده‌اند. در مسئله آنها ناوگان خودرو به دو صورت تک سوخت الکتریکی یا هیبرید در نظر گرفته شده‌اند و مدل سعی

بخش پایانی "نتیجه‌گیری"، نتیجه و پیشنهادات کارهای آینده بیان شده‌است.

۲- فرمول‌بندی مسئله

در این بخش مدل مکان‌یابی جایگاه‌های سوخت جایگزین برای خودروهای دوگانه سوز را ارائه می‌دهیم. برای ارائه مدل، ابتدا مفاهیم اولیه‌ای که در شبکه جاده‌ای بین شهری مورد استفاده قرار گرفته‌اند را بیان می‌کنیم. شبکه جاده‌ای را به صورت یک گراف جهت دار $G = (V, A)$ فرض می‌کنیم که V مجموعه همه نقاط داخل شبکه است و این نقاط با اندیس i و j مشخص می‌شوند، این نقاط شامل نقاط مبدا-مقصد و نقاط بالقوه کاندید احداث جایگاه هستند. $q \in Q$ را اندیس سفر در نظر می‌گیریم که از مبدا O_q به مقصد D_q حرکت می‌کند و بالعکس. هاجسون (Hodgson, M. J., 1990) یک ماتریس OD متقارن را برای بیان جریان سفرها در نظر گرفت. به این معنی که جفت‌های OD و DO با هم برابر بوده و در نتیجه می‌توان بجای این دو جفت، فقط OD را در نظر بگیریم. بنابراین اگر n تعداد نقاط مبدا و مقصد باشد، ماکزیمم تعداد سفرهای OD به صورت $n(n-1)/2$ است.

$A = \{(i, j) : i, j \in V, i \neq j\}$ مجموعه همه یالهای موجود بین نقاط شبکه است. هر یال (i, j) دارای فاصله d_{ij} هست. یک مسیر از پیش تعریف شده T_q (معمولا کوتاهترین مسیر بین مبدا و مقصد) را برای سفر q انتخاب می‌کنیم. A^q را به عنوان مجموعه یالهای موجود در مسیر T_q تعریف می‌کنیم. هر باک سوخت جایگزین در خودرو دارای ظرفیت C_m می‌باشد (که می‌توان به عنوان دامنه حرکتی خودرو نیز تعریف کرد). به علت گستردگی وجود جایگاه‌های سوخت فسیلی ظرفیت باک سوخت معمولی را در هر خودرو نامحدود در نظر می‌گیریم. فرض می‌کنیم که میزان مصرف سوخت یک رابطه خطی نسبت به فاصله پیموده شده دارد. پارامترهای E_m و E_R به ترتیب مشخص کننده نرخ آلودگی برای سوخت‌های سبز و فسیلی است. توجه کنید که پارامترهای E_m و E_R بر اساس کیلوگرم بر کیلومتر بیان می‌شود و مشخص کننده میزان انتشار GHG در پیمودن ۱ کیلومتر

است. بنابراین استفاده از خودروهای دوگانه‌سوز یک نیاز و ایده کاربردی در دوره گذار به سمت سوخت‌های پاک است. این استراتژی در برخی از کشورها مانند ایران با موفقیت به اجرا در آمده‌است. در این مقاله، مسئله مکان‌یابی جایگاه‌های سوخت جایگزین را برای خودروهای دوگانه‌سوز در سفرهای بین‌شهری را بررسی کرده و برای آن یک مدل جدید بر اساس برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط ارائه داده‌ایم. همچنین، با ارائه مثال‌هایی نشان داده شده که مدل پیشنهادی می‌تواند نتایج خوبی در کاهش تولید GHG در مقایسه با مدل FRLM که خودروها در آن تنها با سوخت جایگزین حرکت می‌کنند داشته باشد. چون مدل یک مدل سخت بوده، با افزایش اندازه مسئله حل آن مشکل می‌شود. با توجه به ساختار مناسب مدل ارائه شده یک روش حل ابتکاری کارا بر پایه تجزیه بندرز ارائه کرده‌ایم. روش ابتکاری از دو بخش تشکیل شده‌است: در بخش اول با توجه به جواب‌های مسئله آزاد شده مجموعه‌های مرکزی برای کاهش اندازه مدل تعریف می‌شود. بعد از به دست آوردن مسئله محدود شده، با توجه به چند روش اصلاح شده بندرز، مسئله را حل می‌کنیم. نوآوری این مقاله در ارائه مدل جدیدی است که در آن بحث خودروهای دوگانه‌سوز و نیز کاهش میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای را در نظر گرفته است می‌باشد. بطور کلی سهم این مقاله را در ادبیات می‌توان به صورت زیر بیان کرد: (۱) ارائه یک مدل کارا برای مکان‌یابی جایگاه‌های سوخت جایگزین برای خودروهای دوگانه‌سوز در سفرهای بین شهری. (۲) مینیمم کردن میزان آلودگی تولید شده توسط خودروها. (۳) ارائه یک روش حل کارا بر اساس روش تجزیه بندرز برای حل شبکه‌های بزرگ. ادامه این مقاله به صورت زیر تنظیم شده‌است. در بخش بعدی "فرمول‌بندی مسئله" با جزییات آن آورده شده‌است. در بخش "الگوریتم حل تجزیه بندرز" روش کارایی برای حل مدل ارائه شده‌است. بخش "نتایج محاسباتی" مثالهایی درباره لزوم و فواید استفاده از خودروهای دوگانه‌سوز ارائه شده‌است که باعث کاهش تولید GHG است. در این بخش برای مثالهای با اندازه بزرگ نشان داده شده که با استفاده از الگوریتم ارائه شده، جواب‌هایی با تقریب خوب در یک زمان مناسب به دست آورده می‌شود. در

مسافت هنگامی که از سوخت جایگزین یا فسیلی استفاده می‌شود. مجموعه‌ها، اندیس‌ها، متغیرها و پارامترهایی که در مدل مورد استفاده قرار می‌گیرد در جدول ۱ آورده شده‌است. مدل ارایه شده برای خودروهای دوگانه سوز، مکان بهینه تعداد ثابتی از جایگاه‌های سوخت جایگزین را مشخص می‌کند. همچنین این مدل بر اساس مکان‌های مشخص شده برای جایگاه‌های سوخت، برای تمامی سفرها مشخص می‌کند که خودرو در چه جایگاه‌هایی سوخت‌گیری کند و در کدام قسمت از مسیر از سوخت فسیلی یا سوخت جایگزین استفاده کنند تا اولاً به علت کمبود سوخت خودرو در جاده‌ها متوقف نشوند و دوماً میزان انتشار آلودگی در کمترین حالت ممکن باشد. فرضیات اضافی زیر براساس مطالب بالا و مفهوم مسئله در مدل ارائه شده در نظر می‌گیریم:

- دو قانون مهم در مصرف سوخت و توقف در جایگاه‌های سوخت جایگزین در نظر می‌گیریم: اولاً سوخت جایگزین نسبت به سوخت فسیلی ارجحیت دارد. یعنی سوخت فسیلی تنها زمانی مصرف می‌شود که سوخت سبز به اتمام رسیده باشد یا از یک حد معینی کمتر باشد. دوم، خودرو زمانی می‌تواند

سوخت جایگزین در جایگاه‌ها سوخت‌گیری کند که سطح سوخت سبز آن کمتر یا مساوی یک مقدار مشخص باشد. جریان ترافیک بین یک جفت مبدا-مقصد تنها از یک مسیر منحصر به فرد (معمولاً کوتاهترین مسیر) عبور می‌کند و حجم جریان ترافیک مبدا-مقصد مقداری مشخص و ثابت است.

- همه جایگاه‌های سوخت دارای ظرفیت نامتناهی هستند. و هنگام سوخت‌گیری در جایگاه‌های سوخت جایگزین، باک خودرو پر می‌شود.
- تنها نقاط در شبکه می‌توانند به عنوان جایگاه‌های سوخت در نظر گرفته شوند. و هیچ محدودیتی بر روی تعداد توقف خودروها در جایگاه‌ها نمی‌باشد.

جدول ۱. مجموعه‌ها، اندیس‌ها و بقیه موارد استفاده در مدل

مجموعه و اندیس	
$V = \{1, 2, \dots, n\}$	مجموعه تمام نقاط بالقوه برای مکان‌یابی جایگاه سوخت
$i, j, k \in V$	اندیس نقاط روی شبکه
$A = \{(i, j) : i, j \in V, i \neq j\}$	مجموعه تمام یال‌های روی شبکه جاده‌ای
$Q = \{1, 2, \dots, Q \}$	مجموعه تمام سفرها
$q \in Q$	اندیس سفرها
O_q	مبدا سفر q
D_q	مقصد سفر q
T_q	مسیر منحصر به فرد برای سفر q (معمولاً کوتاهترین مسیر بین مبدا مقصد)
A_q	مجموعه یال‌های موجود روی مسیر سفر q
a_{ij}	یال جهت دار که از i شروع و در j خاتمه می‌یابد
$ord_q(i)$	ترتیب شماره نقطه i در روی مسیر T_q برای سفر
پارامترها	

E_m	نرخ انتشار GHG برای سوخت جایگزین، کیلوگرم بر کیلومتر
E_R	نرخ انتشار GHG برای سوخت فسیلی، کیلوگرم بر کیلومتر
d_{ij}	فاصله بین گره i و j
r	نرخ مصرف سوخت جایگزین، که به صورت لیتر بر کیلومتر است
C_m	ظرفیت باک خودرو برای سوخت جایگزین (دامنه حرکتی)
P	تعداد جایگاه سوخت جایگزین برای مکان‌یابی
f_q	حجم ترافیک جریان روی سفر q
C_i	هزینه ساخت جایگاه سوخت جایگزین در نقطه i
L_q	حداقل میزان سوخت جایگزین در هر سفر q
متغیرها	
z_i	متغیر دودویی: ۱ اگر جایگاه سوخت جایگزین در نقطه i مکان‌یابی شود و ۰ در غیر این صورت
x_{ij}^q	متغیر پیوسته: کسری از یال $i \rightarrow j$ که با سوخت جایگزین در سفر q پیموده شود
u_{ij}^q	متغیر پیوسته: کسری از یال $i \rightarrow j$ که با سوخت فسیلی در سفر q پیموده شود
y_i^q	مقدار سوخت جایگزین باقی مانده در نقطه i برای سفر q

- همه خودروها با سوخت جایگزین یکسان دارای دامنه حرکتی مشابه (R) هستند.
- مقصد (در جهت رفت) و از مقصد به مبدأ (در جهت برگشت) سفرها رفت و برگشت بوده و یک دنباله از گره‌ها از مبدأ به روی مسیر قرار دارند.

$$\begin{aligned}
 (F) \quad & \min Z = \sum_{q \in Q} \sum_{(i,j) \in A_q} f_q E_m d_{ij} x_{ij}^q + \sum_{q \in Q} \sum_{(i,j) \in A_q} f_q E_R d_{ij} u_{ij}^q + \sum_{i \in V} C_i z_i & 1 \\
 \text{s.t.} \quad & y_{o_q}^q = y_{o_q} & 2 \\
 & y_i^q - r d_{ij} x_{ij}^q \leq y_j^q + M z_i \quad \forall q \in Q, \forall (i,j) \in A_q & 3 \\
 & y_i^q - r d_{ij} x_{ij}^q \geq y_j^q - M z_i \quad \forall q \in Q, \forall (i,j) \in A_q & 4 \\
 & y_i^q \geq C_m z_i \quad \forall q \in Q, \forall i \in T_q & 5 \\
 & y_i^q \leq C_m \quad \forall q \in Q, \forall i \in T_q & 6 \\
 & x_{ij}^q + u_{ij}^q = 1 \quad \forall q \in Q, \forall (i,j) \in A_q & 7 \\
 & \sum_{i \in V} z_i = P & 8 \\
 & y_i^q, x_{ij}^q, u_{ij}^q \geq 0 \quad z_i \in \{0,1\} \quad \forall q \in Q, \forall (i,j) \in A_q, \forall i \in V & 9
 \end{aligned}$$

۳- الگوریتم حل تجزیه بندرز

در این بخش یک الگوریتم حل بر اساس روش تجزیه بندرز (Benders, J.F., 1962) برای مکان‌یابی جایگاه‌های سوخت برای خودروهایی دوگانه سوز ارائه می‌دهیم. روش حل بندرز، یک روش حل بر اساس تجزیه مدل است. این روش بر روی مدل‌هایی بکار برده می‌شود که دارای دو نوع متغیر سخت و ساده در مدل خود می‌باشند. بر اساس این روش، مدل به دو زیرمدل جداگانه تجزیه می‌شود. یک زیرمدل که به عنوان زیرمسئله شناخته می‌شود تنها بر اساس متغیرهای ساده است. در زیر مسئله، قیودی که تنها شامل متغیرهای ساده و قیودی که همزمان شامل متغیرهای ساده و سخت هستند باقی می‌مانند و متغیرهای سخت در آنها به صورت ثابت فرض می‌شود. زیر مسائل معمولاً به صورت مدل‌های خطی پیوسته ساده تبدیل می‌شوند که می‌توانند به راحتی حل شوند. زیرمدل دوم بدست آمده در تجزیه بندرز یک مدل براساس متغیرهای سخت و قیودی که تنها شامل این متغیرها است می‌باشد، این زیرمدل را به نام مدل اصلی بندرز می‌نامند. در هر تکرار با توجه به دوگان قیودی که از جواب مدل زیرمسئله به دست می‌آید یک قید برش به مسئله اصلی بندرز اضافه می‌شود. جواب مسئله اصلی بندرز در صورت شدنی بودن تقریبی از جواب مسئله مورد نظر را به دست می‌دهد. در ادبیات چندین مورد موفق از بکارگیری روش تجزیه بندرز در حل مدل‌های گوناگون وجود دارد (Costa, A.M., 2005) (Froyland, G., et al., 2013) (Khatami, M., et al., 2015) (Wheatley, D., et al., 2015). با بررسی مدل ارائه شده متوجه می‌شویم که این مدل یک مورد مناسب برای استفاده از الگوریتم حل تجزیه بندرز است. این مدل در حالت کلی تنها دارای یک مجموعه از متغیرهای دودویی یعنی متغیرهای تصمیم مکان‌یابی است (Z) و زمانی که این متغیرها ثابت فرض شوند مدل به یک مدل خطی ساده تبدیل می‌شود. الگوریتم حل ارائه شده در این بخش بر پایه دو گام اساسی طراحی شده‌است، در گام اول با توجه به جواب به دست آمده از حل مدل آزاد شده دو مجموعه مرکزی^۹ تعریف کرده که با استفاده از این دو مجموعه اندازه مدل اصلی (F) را کاهش می‌دهیم. در گام دوم، به وسیله

مدل ریاضی مکان‌یابی جایگاه‌های سوخت جایگزین برای خودروهایی دوگانه‌سوز که در آن تعداد معینی جایگاه با توجه به مینیمم کردن انتشار GHG و هزینه احداث، مکان‌یابی می‌شوند به صورت مدل (F) است. قید ۱ کل GHG تولیدی و هزینه احداث جایگاه‌ها را مینیمم می‌کند. قید ۲، سطح اولیه سوخت جایگزین در مبدا حرکت هر سفر را نشان می‌دهد. قیود ۳ و ۴ سطح سوخت جایگزین (سبز) در هر گره از سفر Q نشان می‌دهد. قیود ۵ و ۶ همزمان بیان می‌کنند که اگر در یک مکان جایگاه سوخت جایگزین احداث شود باک سوخت سبز خودرو در هر سفر Q باید به اندازه کل باک پر شود. می‌توان قید ۵ را طوری بیان کرد که اگر در یک نقطه جایگاه زده نشود میزان سوخت سبز خودرو از یک مقدار مثبت نباید کمتر شود که به صورت:

$$y_i^q \geq C_m z_i + L_i (1 - z_i) \quad \forall q \in Q, \forall i \in T_q$$

می‌شود.

قید ۶ همچنین بیان می‌کند که میزان سوخت جایگزین نباید از ظرفیت باک خودرو بیشتر باشد. قید ۷ بیان کننده نسبت مصرف سوخت سبز و سوخت فسیلی در هر یال عبوری برای سفر Q را نشان می‌دهد. قید ۸ تعداد جایگاه‌های سوخت جایگزین که باید مکان‌یابی شوند را نشان می‌دهد. قید ۹ قیود علامت متغیرها می‌باشد. با تغییرات کوچک روی مدل می‌توان آنرا به صورتی تبدیل کرد که چند نوع سوخت در مدل باشد و یا فقط از یک نوع سوخت (مثلاً فقط بنزین یا فقط بر اساس سوخت جایگزین) خودرو استفاده کند. برای این کار فقط کافی است یک اندیس بر روی تمام متغیرها و پارامترهایی که بر اساس سوخت تعریف می‌شوند اضافه کرد و انواع سوخت را به مدل اضافه کرد. به روشنی واضح است که حل مدل (F) برای نمونه‌های بزرگ سخت می‌شود، مسئله (F) مسئله بزرگتری از FRLM است و چون مسئله FRLM یک مسئله سخت است بنابراین مسئله (F) نیز مسئله سخت است. بنابراین باید یک روش حل کارا برای آن ارائه شود. در ادامه یک روش حل بر پایه روش تجزیه بندرز ارائه گردیده‌است.

در مسائل خیلی بزرگ چشمگیر است. جدول ۲ نشان دهنده سودمندی جواب مسئله LP آزاد شده در انتخاب مجموعه‌های مرکزی برای کاهش اندازه مسئله است. نتایج محاسباتی نشان می‌دهد که مجموعه M و مجموعه جواب بهینه مکان‌یابی در مسئله (F) بیش از ۹۹ درصد هم‌پوشانی^۱ دارند. در تمامی مثالهای حل شده به جز یک مورد جواب بهینه جایگاه‌های مکان‌یابی شده در مسائل محدود شده با جواب بهینه مدل اصلی یکسان بوده‌است.

هرمثال در جدول ۲ از ترکیب ۵ مثال تصادفی تولید شده با بعد و ساختار یکسان بدست آمده‌است. مثالا بر طبق روش شرح داده شده در زیر بخش ۴-۲ تولید شده و $\gamma = 0.1$ در نظر گرفته‌ایم. ستون‌های جدول به صورت زیر است.

Avg. r_n % : میانگین درصد نقاط باقی‌مانده در مساله محدود شده (Average $\{ \frac{|m|}{|n|} * 100 \}$)

$|Q^*|$: میانگین تعداد سفر در مجموعه مرکزی.

در ادامه، الگوریتم اصلاح شده بندرز که بر مسئله محدود شده اعمال می‌شود را شرح می‌دهیم. در اینجا از برخی نماد گذاری‌های مقاله اوستر و کوچارونوانگ (Uster, H. and Kewcharoenwong, P., 2011) استفاده شده‌است.

مفهوم روش بندرز، جواب‌های مسئله (F) را روی مدل محدود شده به دست می‌آوریم. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که روش حل ارائه شده بخصوص در شبکه‌های بزرگ بسیار کارا است.

۳-۱- مسئله محدود شده

برپایه جواب مدل LP آزاد شده مسئله (F) یک زیر مجموعه از نقاط بالقوه بنام مجموعه مرکزی نقاط تعریف می‌کنیم. اگر \hat{z}_i مقدار متغیر z_i در مسئله LP آزاد شده بگیریم، و γ یک کران تعریف شده باشد آنگاه مجموعه نقاط مرکزی به این صورت تعریف می‌شود: $M = \{i \in V \mid \hat{z}_i > \gamma\}$. همچنین می‌توانیم یک مجموعه مرکزی از سفرها را بر اساس مجموعه M به صورت $Q^* = \{q \in Q \mid T_q \cap M \neq \emptyset\}$ تعریف کنیم. مجموعه Q^* ، مجموعه‌ای است که سفرهای آن می‌توانند از سوخت جایگزین نیز در سفرشان استفاده کنند. بنابراین اگر سفری در مجموعه Q^* قرار نگیرد تمامی مسیر خود را با سوخت فسیلی می‌پیماید و لزومی ندارد در مدل ارایه شده که هدف آن کاهش انتشار آلودگی به وسیله سوخت‌های جایگزین است مورد بررسی قرار گیرد. با تعریف نقاط بالقوه برای مکان‌یابی و سفرها بر طبق M و Q^* اندازه مسئله به صورت قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد. این کاهش بخصوص

جدول ۲. مقایسه اندازه مسئله اصلی و مسئله محدود شده

(O , N)	Q	P	R=12, Restricted model		R=8, Restricted model	
			%Avg. r_n	Q*	%Avg. r_n	Q*
(۵۰, ۱۰۰)	۱۲۲۵	۵	۹/۱۰	۱۸۳	۸/۱۴	۱۷۵
		۱۰	۱۵/۲۳	۳۳۹	۱۶/۴۹	۳۴۱
		۱۵	۲۶/۴۸	۴۵۱	۲۸/۷۶	۴۵۳
		۲۰	۳۹/۵۵	۶۲۹	۴۱/۴۶	۶۳۱
		۲۵	۵۱/۲۴	۸۲۱	۴۶/۵۲	۸۱۸
(۵۰, ۱۵۰)	۱۲۲۵	۵	۸/۶۵	۲۵۱	۶/۴۹	۲۶۵
		۱۰	۱۳/۷۴	۳۶۲	۱۳/۶۵	۳۶۴
		۱۵	۲۲/۹۷	۵۳۱	۲۰/۷۱	۵۱۹
		۲۰	۳۲/۹۱	۷۵۴	۲۹/۲۲	۷۴۰
		۲۵	۴۰/۷۵	۸۳۷	۳۶/۲۶	۸۲۳
		۵	۴/۴۱	۳۱۹	۴/۰۷	۳۱۷
		۱۰	۹/۸۰	۷۴۱	۹/۱۸	۷۳۶

(۱۰۰۰ و ۲۰۰)	۴۹۵۰	۱۵	۱۴/۷۲	۱۲۱۲	۱۵/۲۱	۱۳۲۲
		۲۰	۲۳/۰۶	۱۶۹۴	۲۲/۴۳	۱۶۷۳
		۲۵	۳۰/۴۷	۲۵۵۱	۳۱/۴۹	۲۶۲۵
(۱۰۰ و ۲۵۰)	۴۹۵۰	۵	۳/۱۱	۳۱۹	۳/۰۲	۳۱۷
		۱۰	۷/۵۴	۷۵۷	۶/۷۹	۷۵۱
		۱۵	۱۱/۱۴	۱۲۹۴	۱۱/۱۶	۱۳۰۲
		۲۰	۱۸/۹۶	۱۹۱۰	۲۰/۱۵	۱۹۵۴
		۲۵	۲۸/۱۸	۲۷۵۱	۲۷/۸۴	۲۶۱۷

۳-۲- زیرمسئله بندرز

برای یک $\hat{z} \in \{0,1\}^{|M|}$ داده شده، زیر مسئله دوگانه‌سوز

(F) که به صورت مسئله $SP(y, x, u | \hat{z})$ ارجاع داده

می‌شود به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$SP(y, x, u | \hat{z}) \quad \min \quad Z = \sum_{q \in Q^*} \sum_{(i,j) \in A_q} f_q E_m d_{ij} x_{ij}^q + \sum_{q \in Q^*} \sum_{(i,j) \in A_q} f_q E_R d_{ij} u_{ij}^q \quad 10$$

$$s.t. \quad y_{o_q}^q = y_{o_q} \quad \forall q \in Q^* \quad 11$$

$$y_i^q - r d_{ij} x_{ij}^q \leq y_j^q + M \hat{z}_i \quad \forall q \in Q^*, \forall (i,j) \in A_q \quad 12$$

$$y_i^q - r d_{ij} x_{ij}^q \geq y_j^q - M \hat{z}_i \quad \forall q \in Q^*, \forall (i,j) \in A_q \quad 13$$

$$y_i^q \geq C_m \hat{z}_i \quad \forall q \in Q^*, \forall i \in \{T_q \cap M\} \quad 14$$

$$y_i^q \leq C_m \quad \forall q \in Q^*, \forall i \in T_q \quad 15$$

$$x_{ij}^q + u_{ij}^q = 1 \quad \forall q \in Q^*, \forall (i,j) \in A_q \quad 16$$

$$y_i^q, x_{ij}^q, u_{ij}^q \geq 0 \quad \forall q \in Q^*, \forall (i,j) \in A_q, \forall i \in M \quad 17$$

زیرمسئله خطی تجزیه نمود و حل کرد. فرض کنیم

$\theta_{ij}^q, \eta_i^q, \lambda_i^q, \delta_{ij}^q, \beta_{ij}^q, \alpha_q$ به ترتیب متغیرهای دوگان قیود

۱۱-۱۶ باشد. بنابراین دوگان زیر مسئله بندرز که با

$SPD(\alpha, \beta, \delta, \lambda, \eta, \theta | \hat{z})$ نمایش می‌دهیم به صورت

زیراست:

$$SPD(\alpha, \beta, \delta, \lambda, \eta, \theta | \hat{z}) \quad \max \quad \sum_{q \in Q^*} \alpha_q y_{o_q} + \sum_{q \in Q^*} \sum_{(i,j) \in A_q} \beta_{ij}^q (M \hat{z}_i) - \sum_{q \in Q^*} \sum_{(i,j) \in A_q} \delta_{ij}^q (M \hat{z}_i) \quad 18$$

$$+ \sum_{q \in Q^*} \sum_{i \in \{T_q \cap M\}} \lambda_i^q C_m \hat{z}_i + \sum_{q \in Q^*} \sum_{i \in T_q} \eta_i^q C_m + \sum_{q \in Q^*} \sum_{i \in T_q} \sum_{j \in T_q} \theta_{ij}^q$$

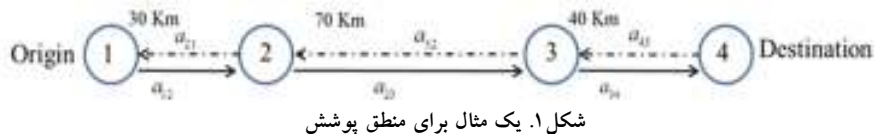
$$s.t. \quad (\alpha, \beta, \delta, \lambda, \eta, \theta) \in \Delta \quad 19$$

برای یک یال جهت دار a_{ij} روی مسیر q ، دو مجموعه از نقاط بالقوه K_{ij}^{1q} و K_{ij}^{2q} تعریف می‌کنیم. K_{ij}^{1q} مجموعه‌ای شامل نقاطی که قبل از نقطه انتهایی یال a_{ij} است و فاصله آن نقاط تا j کمتر از دامنه حرکتی سوخت جایگزین R باشد برای مثال، در شکل ۱، مجموعه نقاط بالقوه K_{34}^{1q} برای یال جهت دار a_{34} با $R=100$ برابر با $\{2, 3\}$ است. برای یال جهت دار a_{ij} ، اگر فاصله نقطه انتهایی یال از یکی از جایگاه‌های احداث شده سوخت جایگزین، کمتر از دامنه حرکتی باشد می‌توان کل آن یال را در سفر مربوطه با سوخت جایگزین پیمود و برای این یال $x_{ij}^q = 1$ است. مجموعه $A_1^q = \{a_{ij} \in A^q \mid |K_{ij}^{1q} \cap K^*(\hat{z})| \geq 1\}$ را قبل از حل زیر مسئله بندرز تعریف نموده آنگاه به ازای هر $a_{ij} \in A_1^q$ در مدل قرار می‌دهیم $x_{ij}^q = 1$.

که در قید ۱۹ مجموعه Δ چند وجهی به وجود آمده از فضای جواب مسئله دوگان است. جواب مسئله $SPD(\alpha, \beta, \delta, \eta, \theta | \hat{z})$ می‌تواند برای به دست آوردن قید برش، که قید بهینگی است در مسئله اصلی بندرز مورد استفاده قرار گیرد.

۳-۳- حل زیرمسئله بندرز

ساختار مفهومی زیرمسئله بندرز به صورتی است که با توجه به این فرض که اولویت در استفاده از سوخت جایگزین است می‌توان جواب برخی از متغیرها را قبل از حل مدل مشخص کرد. مجموعه $K^*(\hat{z}) = \{i \in M \mid \hat{z}_i = 1\}$ را به عنوان مجموعه اندیس تمام نقاطی می‌گیریم که جایگاه در آن احداث شده‌است. این مجموعه نقاط، در هر تکرار بندرز ممکن است متفاوت باشد. وقتی $\hat{z}_i = 1$ با توجه به برقراری همزمان قیود ۱۴ و ۱۵ برای نقاطی که جایگاه سوخت احداث شده‌است مقدار سوخت جایگزین در آن نقاط برابر ظرفیت باک خودرو است. بنابراین می‌توان در مدل به ازای هر $i \in K^*(\hat{z})$ قرار دهیم $y_i^q = C_m$.



جوابها در زیرمسئله، مدل آن خیلی راحت‌تر از قبل حل می‌شود.

مجموعه K_{ij}^{2q} را شامل نقاطی که فاصله آن نقاط تا نقطه ابتدایی یال a_{ij} کمتر از دامنه حرکتی سوخت جایگزین R باشد، قرار می‌دهیم:

۳-۴- مسئله اصلی بندرز

مجموعه $D(SPD)$ را به عنوان نقاط گوشه‌ای مسئله دوگان $SPD(\alpha, \beta, \delta, \lambda, \eta, \theta | \hat{z})$ در نظر می‌گیریم. می‌توان مسئله اصلی بندرز را که با MP نمایش می‌دهیم به صورت زیر نوشت:

$K_{ij}^{2q} = \{k \in M \mid ord_q(k) < ord_q(i) \text{ and } d(k, i) \leq R\}$
 اگر فاصله نقطه ابتدایی یال a_{ij} از جایگاه‌های احداث شده بیشتر از دامنه حرکتی باشد، آن یال با سوخت فسیلی پیموده می‌شود. مجموعه $A_2^q = \{a_{ij} \in A^q \mid |K_{ij}^{2q} \cap K^*(\hat{z})| = 0\}$ را قبل از حل زیر مسئله بندرز تعریف کرده، سپس به ازای هر $a_{ij} \in A_2^q$ در مدل قرار می‌دهیم $u_{ij}^q = 1$. با قرار دادن این

$$MP \quad \min \quad \sum_{i \in M} C_i z_i + \pi$$

$$s.t. \sum_{q \in Q^*} \alpha_q \gamma_{oq} + \sum_{q \in Q^*} \sum_{(i,j) \in A_q} Mz_i (\beta_{ij}^q - \delta_{ij}^q) + \quad 21$$

$$\sum_{q \in Q^*} \sum_{i \in \{T_q, M\}} \lambda_i^q C_m z_i + \sum_{q \in Q^*} \sum_{i \in T_q} \eta_i^q C_m + \sum_{q \in Q^*} \sum_{i \in T_q} \sum_{j \in T_q} \theta_{ij}^q \leq \pi \quad \forall (\alpha, \beta, \delta, \lambda, \eta, \theta) \in D(\text{SPD})$$

$$\sum_{i \in M} z_i = P \quad 8$$

$$z_i \in \{0, 1\} \quad \forall i \in M \quad 22$$

اضافه می‌شود. در روش سوم یک قید برش بهینه-پارتو تولید می‌شود.

۳-۵-۱- روش ۱: تولید یک قید برش در هر تکرار

برای یک \hat{z} داده شده می‌توانیم جواب‌های زیر مسئله اولیه را برای متغیرهای (x, u, y) به دست آوریم. جواب متغیرهای دوگان وابسته به جواب بدست آمده از زیر مسئله می‌تواند در ساخت یک قید برش برای اضافه شدن در مسئله MP در هر تکرار بر اساس قید ۲۱ استفاده شوند و به مدل اضافه شوند.

۳-۵-۲- روش ۲: تولید چند قید برش

بایرگ و لووکس (Birge, J. R. and Louveaux, F.V., 1988) اضافه کردن چندین قید برش در یک تکرار در مفهوم برنامه‌ریزی خطی تصادفی دو-مرحله ای را بررسی کردند. چندین نسخه از تجزیه بندرز که با موفقیت اجرای اضافه کردن چند قید برش را در کاربردهای مختلف نشان داده‌اند وجود دارد (Trukhanov, S., et al., 2010; Lei, C., et al., 2014; You, F. and Grossmann, I.E., 2013).

برای اجرای نسخه چندین قید برش، احتیاج داریم که مسئله اصلی بندرز خود را بازنویسی کنیم. به جای تولید یک زیر مسئله از مدل اولیه چندین زیرمسئله به تعداد سفرها تولید کرده و آنها را حل می‌کنیم. با حل هر زیرمسئله، جواب دوگان قیود آن زیرمسائل را در تولید قید برش مربوط به آن زیر مسئله استفاده کرده و به مسئله اصلی بندرز اضافه می‌کنیم. مسئله MP به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$MP(q) \quad \min \sum_{i \in M} C_i z_i + \sum_{q \in Q} \gamma_q \quad 23$$

مسئله دوگانه‌سوز اکنون به یک مسئله با $|M|$ متغیر باینری (z_i) و یک متغیر پیوسته (π) تبدیل شده است. با استفاده از مقادیر دوگان به دست آمده از زیرمسئله بندرز، در هر تکرار یک قید برش به صورت قید ۲۱، به مسئله اصلی بندرز اضافه می‌شود. توجه کنید که چون زیرمسئله اولیه همیشه شدنی و کراندار است، بنابراین قضیه دوگان قوی، دوگان نیز شدنی و کراندار است. بنابراین، قید اضافه شده در هر تکرار یک قید برش بهینگی است و تنها جواب‌های غیر بهینه را حذف می‌کند. برای بررسی قیود اضافه شده به مدل MP که بر اساس نقاط گوشه‌ای مجموعه $D(\text{SPD})$ است، ایده شاخه و برش پیشنهاد می‌گردد. در اجرای کلاسیک روش بندرز، مسئله MP را قبل از حل زیر مسئله بندرز تا بهینگی حل می‌کند. این به معنای این است که در مسئله MP جواب‌های مشابه بصورت غیر ضروری دوباره ملاقات می‌شوند. بنابراین، مسئله را در یک درخت شاخه و کران مانند (Codato, G. and Fischetti, M., 2006) حل کرده‌ایم. در هر حل لازم بالقوه در درخت جستجو، زیر مسئله را حل کرده و قید برش بهینگی را در صورت لزوم اضافه می‌کنیم.

۳-۵-۳- قید برش بندرز

سه روش مختلف را برای تولید قیود برش در هر تکرار در این مقاله بررسی کرده‌ایم. در روش اول در هر تکرار تنها یک قید برش تولید و به مدل MP اضافه می‌شود. در روش دوم در هر تکرار چندین قید برش در هر تکرار تولید و به مدل MP

$$s.t. \sum_{q \in Q^*} \alpha_q y_{Oq} + \sum_{q \in Q^*} \sum_{(i,j) \in A_q} Mz_i (\beta_{ij}^q - \delta_{ij}^q) + \sum_{q \in Q^*} \sum_{i \in \{T_q, C\}} \lambda_i^q C_m z_i \quad 24$$

$$+ \sum_{q \in Q^*} \sum_{i \in E_q} \eta_i^q C_m + \sum_{q \in Q^*} \sum_{i \in E_q} \sum_{j \in E_q} \theta_{ij}^q \leq \gamma_q \quad \forall q \in Q, (\alpha, \beta, \delta, \lambda, \eta, \theta) \in D(\text{SPD}_q)$$

$$\sum_{i \in M} z_i = P \quad 8$$

$$z_i \in \{0, 1\} \quad \forall i \in M \quad 22$$

شدنی از مسئله اصلی بندرز باشد (یعنی $Z = \{z \in \{0, 1\}^{|N|} : \sum_{i \in N} z_i = p\}$). $opt(P)$ را جواب بهینه مسئله P در نظر می‌گیریم، و تابع $C(z, \alpha, \beta, \delta, \lambda, \eta, \theta)$ را به صورت زیر تعریف می‌کنیم:

$$C(z, \alpha, \beta, \delta, \lambda, \eta, \theta) = \sum_{q \in Q^*} \alpha_q y_{Oq} + \sum_{q \in Q^*} \sum_{(i,j) \in A_q} Mz_i (\beta_{ij}^q - \delta_{ij}^q) + \sum_{q \in Q^*} \sum_{i \in \{T_q, C\}} \lambda_i^q C_m z_i + \sum_{q \in Q^*} \sum_{i \in E_q} \eta_i^q C_m + \sum_{q \in Q^*} \sum_{i \in E_q} \sum_{j \in E_q} \theta_{ij}^q$$

مگنانتی و وانگ در مقاله اولیه خود، مفهوم برش غالب در چارچوب تجزیه بندرز را ارائه دادند. برش تولید شده به وسیله جواب دوگان $(\hat{\alpha}, \hat{\beta}, \hat{\delta}, \hat{\lambda}, \hat{\eta}, \hat{\theta})$ را غالب بر برش تولید شده توسط جواب دوگان $(\bar{\alpha}, \bar{\beta}, \bar{\delta}, \bar{\lambda}, \bar{\eta}, \bar{\theta})$ گویند، اگر و تنها اگر داشته باشیم.

$$C(z, \hat{\alpha}, \hat{\beta}, \hat{\delta}, \hat{\lambda}, \hat{\eta}, \hat{\theta}) \leq C(z, \bar{\alpha}, \bar{\beta}, \bar{\delta}, \bar{\lambda}, \bar{\eta}, \bar{\theta}) \quad \forall z \in Z$$

و نامساوی حداقل در یک نقطه به صورت اکید باشد. یک برش را بهینه-پارتو گویند، اگر هیچ برش غالب‌تر از آن موجود نباشد. برای بدست آوردن برش بهینه-پارتو استخراج شده از Z باید مسئله برنامه‌ریزی زیر را حل کنیم:

$$\max C(\bar{z}, \alpha, \beta, \delta, \lambda, \eta, \theta) \quad 25$$

$$s.t. (\alpha, \beta, \delta, \lambda, \eta, \theta) \in \Delta \quad 19$$

$$C(\hat{z}, \alpha, \beta, \delta, \lambda, \eta, \theta) = opt(\text{SPD}(\alpha, \beta, \delta, \lambda, \eta, \theta | \hat{z})) \quad 26$$

با اندازه $|N|$ است و تمام مقادیر مولفه‌های آنرا برابر با $\frac{P}{|N|}$ قرار می‌دهیم. در تکرارهای روش بندرز زیر، از میانگین نقطه اصلی فعلی و جواب فعال مسئله MP استفاده کرده‌ایم (Papadakos, N., 2008). توجه کنید که قید ۲۵ و ضرایب

برای یک \hat{z} داده شده، چندین نقطه راسی برای هر زیر مسئله تولید می‌شود. با اصلاح مسئله اصلی بندرز، اکنون می‌توانیم از اطلاعاتی که برای هر زیر مسئله در دسترس است استفاده کنیم و یک قید برش مربوط به هر نقطه راسی را اضافه کنیم. در این روش، یک مجموعه از قیود برش در هر تکرار جمع آوری می‌شود.

۳-۵-۳- روش ۳: برش بهینه پارتو

کاهش تعداد تکرارهای روش بندرز، ارزش زیادی را در سرعت بخشیدن به اجرای روش بندرز دارد. به هر حال، همانطور که در بالا ارائه شد با یک \hat{z} داده شده می‌توان یک یا چندین قید برش را در هر تکرار تولید کرد. یک روش دیگر در اصلاح روش بندرز انتخاب یک برش قوی است که ممکن است در کاهش تعداد تکرارها کمک کند. در این بخش، یک روش تولید برش بهینه-پارتو که در مقاله مگنانتی و وانگ (Magnanti, T. L. and Wong, R. T., 1981) آورده شده است ارائه می‌دهیم. فرض کنیم مجموعه Z یک مجموعه

که در آن Δ چند وجهی به وجود آمده از فضای جواب مسئله دوگان برای مسئله SPD است. همچنین $\bar{z} \in ri(Z^c)$ ، یک نقطه درونی از مجموعه محدب^{۱۱} بدنه Z است، که به عنوان یک نقطه مرکزی^{۱۲} نامگذاری می‌کنیم. این مدل LP را با عنوان $MW(\alpha, \beta, \delta, \lambda, \eta, \theta | \bar{z}, \bar{z})$ ارجاع می‌دهیم. نقطه مرکزی اولیه برای مدل ارائه شده در این مقاله یک بردار

همانند مقالات در ادبیات برابر با نصف پاک سوخت جایگزین (یا برابر با نصف دامنه حرکتی خودرو) در نظر گرفته‌ایم. نرخ مصرف سوخت جایگزین را متناسب با فاصله قرار می‌دهیم $I=1$. هزینه ساخت جایگاه سوخت جایگزین در تمام نقاط برابر 200000 واحد پولی قرار داده‌ایم. میزان آلودگی تولید شده توسط سوخت‌های جایگزین و فسیلی به ترتیب به صورت $E_m = 0.15$ (kg/km) و $E_R = 0.20$ (kg/km) قرار

می‌دهیم (Abdoli, B., et al., 2017). جواب‌های بدست آمده از شبکه ۲۵-نقطه‌ای را در دو بخش مجزا مورد بررسی قرار می‌دهیم. ابتدا سودمندی مدل دوگانه‌سوز ارایه شده را بررسی می‌کنیم. به این منظور جواب‌های مدل دوگانه‌سوز را از نقطه نظر مکان قرارگیری جایگاه‌های سوخت، میزان آلودگی انتشار یافته توسط خودروها و میزان پوشش سفرهای بین شهری بوسیله سوخت جایگزین با جواب مدل FRLM مقایسه می‌کنیم. مدل FRLM یک مدل مکان‌یابی جایگاه‌های سوخت جایگزین است که در آن خودروها تنها با سوخت جایگزین در حال حرکت هستند. در این بخش برای اجرا مدل FRLM از مدل بدون ظرفیت ارایه شده توسط کاپر و کابی (Capar, I., et al., 2013) استفاده کرده‌ایم. در بخش دوم عملکرد روش‌های حل ارایه شده را بر روی شبکه ۲۵-نقطه‌ای بررسی می‌کنیم. برای مقایسه مدل دوگانه‌سوز و مدل FRLM از لحاظ تفاوت مکان جایگاه‌ها، میزان پوشش جریان سفرها با سوخت جایگزین و میزان انتشار آلودگی فرضیات زیر را در نظر گرفته‌ایم. در مورد میزان جریان پوشش داده شده بین شهری توسط سوخت جایگزین، همانند مفهوم مدل FRLM تنها جریاناتی را به عنوان پوشش داده شده در نظر می‌گیریم که کل سفر رفت و برگشت خود را با سوخت جایگزین به اتمام رسانده باشند. به این منظور ابتدا مدل‌های FRLM و دوگانه‌سوز را حل کرده تا مکان جایگاه‌ها مشخص شود. مدل FRLM مستقیماً میزان جریان پوشش داده شده را به دست می‌آورد. برای مدل دوگانه‌سوز، جواب جایگاه‌های مکان‌یابی شده در مدل دوگانه‌سوز را در مدل FRLM گذاشته و با این جایگاه‌ها مدل FRLM را حل کرده تا میزان جریان پوشش داده شده توسط این جایگاه‌ها برای حالتی که تنها سوخت جایگزین داریم به دست آوریم.

در مورد میزان آلاینده‌گی منتشر شده، جواب مدل دوگانه‌سوز میزان انتشار آلودگی را برای خودروهای دوگانه‌سوز را به صورت مستقیم ارایه می‌دهد. برای میزان انتشار آلودگی هنگامی که مکان جایگاه‌ها با توجه به مفهوم مدل FRLM به دست آمده‌باشند، جواب جایگاه‌های مکان‌یابی شده توسط مدل FRLM را در مدل دوگانه‌سوز می‌گذاریم و میزان آلاینده‌گی مدل دوگانه‌سوز را بر اساس این جایگاه‌ها به دست می‌آوریم. نتایج به دست آمده در جدول ۳ نشان داده شده‌است. در این

کسری \bar{z} ممکن است از رسیدن به یک جواب بهینه-دوگان کارآمد جلوگیری کند (Contreras, I., et al., 2011).

۴-نتایج محاسباتی

در این بخش آنالیز اجرای مدل دوگانه‌سوز و الگوریتم‌های حل ارایه شده را بررسی می‌کنیم. برای این منظور، محاسبات را بر روی دو نوع داده اجرا کرده‌ایم. اول: یک شبکه ۲۵-نقطه‌ای است که در ادبیات (Kuby, M. and Lim, S., 2005) (Capar, I. and Kuby, M., 2012) (A. and Ebrazi, R., 2012) مورد استفاده واقع شده‌است. از این شبکه برای ارزیابی کیفیت و نوع جواب تولید شده توسط مدل دوگانه‌سوز و روش‌های حل استفاده کرده‌ایم. مجموعه داده‌های دوم شبکه‌های تولید شده می‌باشد که از آنها برای نشان دادن کیفیت جواب‌های بدست آمده از روش‌های حل ارایه شده بندرز در مقایسه با جواب روش دقیق برای مدل دوگانه‌سوز استفاده می‌شوند. همه مثالها در این بخش با استفاده از نرم افزار ایمز (AIMMS4.2) و بسته حل سیپلکس (CPLEX 12.6) روی یک سیستم با مشخصات (Intel (R), Core(TM) 2, CPU 2.40 GHz and 3.00 GB RAM در زمان ۶ ساعت اجرا شده‌اند.

۴-۱-مثال ۲۵ نقطه‌ای

در این بخش، مدل دوگانه‌سوز ارایه شده را بر روی شبکه ساده ۲۵ نقطه‌ای اجرا کرده و نتایج آنرا بدست آورده‌ایم. این شبکه به علت اینکه یک شبکه کوچک است می‌توان جواب بهینه آنرا در Pهای مختلف به دست آورد. جواب بهینه بدست آمده از مدل دوگانه‌سوز، برای ارزیابی کاهش میزان آلودگی تولید شده استفاده شده‌است. همچنین موثر بودن روش‌های حل پیشنهاد شده نیز مورد بررسی قرار می‌گیرد. در شبکه جاده‌ای ۲۵-نقطه‌ای همه نقاط شبکه به عنوان نقاط مبدأ - مقصد و نیز کاندید جایگذاری جایگاه‌ها انتخاب شده‌اند. در این مثال ۳۰۰ سفر OD منحصر به فرد داریم. جریان ترافیک خودرو هر سفر مبدأ-مقصد با مدل گرانشی به دست می‌آید (فرمول گرانشی $f_q = \frac{P_o.P_d}{(d(O,D))^2}$). ظرفیت پاک سوخت جایگزین در هر خودرو را برابر با دامنه حرکتی خودرو قرار داده‌ایم. میزان سوخت جایگزین در مبدأ حرکت را

GHG تولید شده زمانی که تنها از سوخت فسیلی استفاده شود تقسیم می‌کنیم. مقدار به دست آمده را از ۱ کم کرده و در ۱۰۰ ضرب می‌کنیم.

Diff.Sta: تعداد مکان متفاوت جایگاه‌های سوخت بین مدل دوگانه‌سوز با مدل FRLM است.

جا دو دامنه حرکتی متفاوت ۸ و ۱۲ را در نظر گرفته و نتایج را بر اساس آنها به دست آورده‌ایم. اجراها برای $p=1$ تا ۲۵ با افزایش ۵ واحدی گزارش شده‌اند. در جدول ۳، ستون اول زمان کل حل (شامل مجموع کل زمان برای تولید مجموعه‌ها و پارامترهای مورد نیاز مدل و زمان حل مدل) آورده شده‌است.

Covers (%): برابر با درصد جریان سفرهای پوشش داده شده توسط سوخت جایگزین است که از تقسیم مجموع جریان پوشش داده شده تقسیم بر کل جریان سفرها ضربدر ۱۰۰ به دست آمده‌است. در این جا همانند هدف مسئله FRLM تنها سفرهایی در نظر گرفته شده‌است که کل مسیر رفت و برگشت خود را از سوخت جایگزین استفاده کرده‌اند.

Emiss (%): این ستون مشخص کننده میزان درصد کاهش انتشار GHG توسط هر مدل، زمانی که از سوخت جایگزین بجای بنزین استفاده شده نشان می‌دهد. در اینجا میزان GHG را که از تابع هدف مدل دوگانه‌سوز به دست آمده را بر میزان

جدول ۳. نتایج مسئله FRLM و دوگانه‌سوز در شبکه ۲۵ نقطه ای

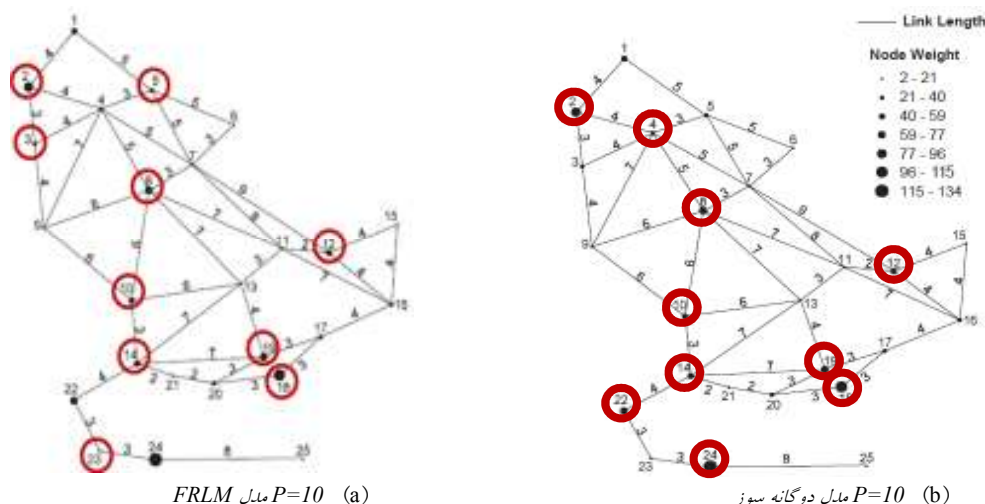
p	R=۸, FRLM			دوگانه‌سوز (F), R=۸				R=۱۲, FRLM			دوگانه‌سوز (F), R=۱۲			
	Time	Covers (%)	Emiss (%)	Time	Covers (%)	Emiss (%)	Diff.Sta.	Time	Covers (%)	Emiss (%)	Time	Covers (%)	Emiss (%)	Diff.Sta.
۱	۰/۲۸	۱۴/۰۰	۴/۵۹	۱/۳۵	۱۴/۰۰	۴/۵۹	۰	۰/۳۰	۱۴/۷۰	۵/۷۷	۱/۱۵	۱۴/۷۰	۵/۷۷	۰
۵	۰/۲۷	۵۷/۸۵	۱۱/۱۹	۰/۶۴	۵۵/۸۶	۱۳/۱۵	۱	۰/۳۳	۶۱/۲۳	۱۳/۲۲	۰/۷۴	۵۹/۱۹	۱۴/۸۰	۲
۱۰	۰/۲۸	۸۱/۸۷	۱۷/۹۱	۰/۳۲	۸۱/۴۵	۱۹/۲۵	۳	۰/۶۴	۹۱/۸۴	۲۰/۳۸	۰/۴۲	۸۷/۷۵	۲۱/۱۳	۳
۱۵	۰/۲۷	۹۶/۰۲	۲۱/۸۵	۰/۲۷	۹۵/۷۱	۲۲/۴۲	۵	۰/۲۸	۹۹/۸۰	۲۳/۸۲	۰/۳۲	۹۷/۱۲	۲۴/۲۸	۳
۲۰	۰/۲۷	۹۷/۹۶	۲۳/۱۸	۰/۳۰	۹۶/۹۲	۲۳/۹۹	۲	۰/۲۷	۱۰۰	۲۵/۰۰	۰/۲۸	۱۰۰	۲۵/۰۰	۰
۲۵	۰/۲۷	۹۷/۹۸	۲۴/۱۲	۰/۳۲	۹۷/۹۸	۲۴/۱۲	۰	۰/۲۶	۱۰۰	۲۵/۰۰	۰/۲۶	۱۰۰	۲۵/۰۰	۰

در مسیرهای شلوغ و در نزدیک شهرهای با جمعیت زیاد مکان‌یابی کنند. بنابراین در ابتدا و با p های کوچک مکان استقرار جایگاه‌های سوخت جایگزین در هر دو مدل تقریباً یکسان است. با افزایش تعداد جایگاه‌ها و وقتی مسیرهای شلوغ پوشش داده‌شد، مدل دوگانه‌سوز بجز جمعیت جریان ترافیک بین شهری، فاصله بین نقاط را نیز لحاظ کرده و جایگاه‌ها را در مکان‌هایی که فاصله بین شهرها ممکن است زیاد باشد نیز مکان‌یابی می‌کند تا از مصرف سوخت فسیلی در فاصله طولانی جلوگیری کند. این عامل باعث تفاوت در مکان جایگاه‌های سوخت جایگزین در دو مدل می‌شود، این تفاوت همانطور که از نتایج مشخص است در برخی موارد تا ۵ جایگاه نیز می‌رسد. در شکل ۲ تفاوت جایگاه‌های مکان‌یابی شده در حالت $p=10$ و $R=12$ برای دو مدل را در شبکه ۲۵-نقطه ای نشان داده

نتایج جدول ۳ بخوبی مشخص می‌کند که مدل ارائه‌شده برای خودروهایی دوگانه‌سوز میزان آلودگی منتشر شده را بخوبی مینیمم می‌کند بخصوص زمانی که دامنه حرکتی خودروها کم است. در این حالت میزان آلودگی تولیدشده توسط مدل دوگانه‌سوز خیلی کمتر از میزان آلودگی تولیدشده توسط مدل FRLM است. زیرا چون در سفرهای بین شهری نمی‌توان برخی از مسیرها را با یک باک پر از سوخت جایگزین پیمود در مدل دوگانه‌سوز می‌توان قسمتی از مسیر را با سوخت جایگزین پیمود و بقیه را با سوخت بنزینی با اتمام رساند. نتایج نشان می‌دهد که اگر همه سفرها در کل مسیر خود از سوخت جایگزین استفاده کنند، میزان آلودگی ۲۵ درصد کاهش را خواهد داشت. طبق نتایج به‌دست آمده، مدل FRLM و مدل دوگانه‌سوز ترجیح می‌دهند که در مراحل ابتدایی جایگاه‌ها را

آورده شده است.

شده است. نتایج شکل ۲ (a) از مقاله حسینی و میرحسینی (Hosseini, M. and MirHassani, S. A., 2015)



شکل ۲. تفاوت مکان جایگاه‌ها در مدل‌های دوگانه سوز و FRLM

مقایسه با روشهای دیگر دارد. در روش چندین قید برش، تعداد قیود برش اضافه شده به مسئله اصلی بندرز خیلی بیشتر از روشهای دیگر است. بنابراین مدل اصلی بندرز این روش در مقایسه با دو روش دیگر زمان اجرای بیشتری را دارد. در روش قید بهینه پارتو تعداد بیشتری زیرمسئله نسبت به روش چند قید برش حل می‌شود ولی قید اضافه شده قید بهتری است و باعث کاهش تعداد کل تکرارها می‌شود. در مجموع روش قید بهینه پارتو مسائل را زودتر از دو روش دیگر حل می‌کند. همانطور که در ادامه نیز خواهیم داد همین نتایج را می‌توان در شبکه‌های بزرگتر نیز مشاهده کرد. در این شبکه کوچک تمامی روش‌ها توانسته‌اند به جواب بهینه دست یابند. شایان ذکر است چون مسئله یک شبکه کوچک است در برخی از حالت‌ها زمان حل روش بندرز از زمان حل مدل توسط روش دقیق بیشتر است که یک نتیجه طبیعی است. ولی با افزایش اندازه مسئله روش دقیق نمی‌تواند به جواب بهینه برسد و مجبور به استفاده از روش‌های حل ابتکاری هستیم.

۴-۲- شبکه‌های تولیدشده

برای ارزیابی بهتر اجرای روش‌های حل ارائه شده، الگوریتم‌های ارائه شده را روی مجموعه‌ای از مثالهایی که به صورت زیر تولید شده‌اند اجرا کرده‌ایم. برای به دست آوردن مثالهای تولیدشده برای یک شبکه با اندازه $|N|$ ابتدا $|N|$

با افزایش اندازه مسئله زمان حل مدل افزایش می‌یابد، بنابراین مجبور به استفاده از روشهای حل ابتکاری برای به دست آوردن جواب‌های بهینه یا نزدیک به بهینه هستیم. روش‌های حل ارائه شده بر اساس روش بندرز را بر روی مدل ۲۵-نقطه‌ای اجرا کرده و با جواب دقیق مقایسه کرده‌ایم. نتایج این مقایسه را می‌توان در جدول ۴ مشاهده کرد. این نتایج برای حالت $R=12$ روی شبکه ۲۵-نقطه‌ای به دست آمده است. حداکثر تعداد تکرارهای روش بندرز را در این مثال ۱۰۰ تکرار قرار داده و اگر بعد از ۳ تکرار جواب به دست آمده بهبود نیابد الگوریتم متوقف می‌گردد. ستون دوم و سوم جدول ۴ به ترتیب زمان حل روش دقیق CPLEX و میزان آلاینده‌گی جواب‌های مسئله دوگانه سوز را نشان می‌دهد. برای هر روش حل (بندرز با یک قید برش، با چند قید برش و بندرز با قید بهینه پارتو) ۳ ستون در جدول مشخص شده است. که در هر یک از آنها موارد زیر نشان داده شده‌اند. Num. Sub: نشان دهنده تعداد زیر مسائل حل شده در هر روش است. Num. Cut: تعداد کلی قیدهای برش اضافه شده را در روش‌های مختلف است. Total.Time: زمان کلی اجرا که شامل مجموع همه زمان‌های پیش حل، زمان کلی حل زیرمسائل و زمان حل مسائل اصلی بندرز است. با توجه به جواب‌های به دست آمده نتایج زیر به روشنی قابل مشاهده است. روش بندرز با یک قید برش معمولاً تعداد تکرارهای بیشتر و زیرمسائل بیشتری را در

فرد OD استفاده می‌کنیم. از این کوتاهترین مسیرها برای مسیر رفت و برگشت سفر جفت OD استفاده می‌کنیم. برای هر مبدأ، یک وزن که در فاصله پیوسته $[0, 100]$ تولید شده است اختصاص می‌دهیم. حجم جریان ترافیک با استفاده از مدل گرانشی به دست می‌آوریم (MirHassani, S. A. and Ebrazi, R., 2012).

نقطه را در یک مربع $[0, 100] \times [0, 100]$ ، با توجه به توزیع یکنواخت پیوسته تولید می‌کنیم. ماتریس فاصله اقلیدسی بین این نقاط محاسبه و مینیمم درخت پوشا^{۱۳} مشخص می‌شود. در پایان، m یال اضافی به وسیله اتصال هر نقطه به m نزدیکترین نقطه به مینیمم درخت پوشا اضافه می‌گردد. طول هر یال به وسیله فاصله اقلیدسی ابتدا و انتها یال محاسبه می‌گردد. تعداد جفت‌های OD، که $|O|$ تعداد مبدأها و مقصدها هستند، به صورت تصادفی از مجموعه نقاط N انتخاب می‌شوند. شبکه بدون جهت نتیجه شده را برای پیدا کردن کوتاهترین مسیر برای $\frac{|O|(|O|-1)}{2}$ جفت منحصر به

جدول ۴. نتایج روش‌های ابتکاری بر روی شبکه ۲۵ نقطه‌ای

P	مدل دوگانه‌سوز		یک قید برش			چند قید برش			قید برش بهینه پارتو		
	Time	Emiss (%)	Num. Sub	Num. Cut	Total. Time	Num. Sub	Num. Cut	Total. Time	Num. Sub	Num. Cut	Total. Time
۱	۱/۱۵	۵/۷۷	۳	۲	۰/۲۷	۲	۵۸	۰/۳۷	۳	۲	۰/۲۸
۲	۰/۶۰	۸/۱۵	۱۰	۹	۰/۸۵	۴	۲۷۸	۰/۵۶	۹	۷	۰/۵۲
۳	۰/۷۹	۱۰/۱۸	۳۴	۳۰	۰/۴۶	۶	۴۳۶	۰/۸۳	۱۵	۱۱	۰/۶۰
۴	۰/۵۷	۱۲/۶۴	۴۲	۳۷	۰/۷۳	۴	۴۵۷	۰/۶۳	۱۶	۱۳	۰/۶۴
۵	۰/۷۴	۱۴/۸۰	۵۱	۴۷	۰/۷۹	۴	۵۱۸	۰/۶۵	۱۵	۱۱	۰/۶۲
۶	۰/۶۶	۱۶/۶۰	۵۶	۵۲	۱/۲۰	۴	۵۲۵	۰/۷۱	۱۱	۹	۰/۸۹
۷	۰/۴۷	۱۷/۸۳	۸۵	۸۰	۱/۲۵	۵	۵۳۸	۰/۸۸	۱۷	۱۴	۰/۶۹
۸	۰/۴۱	۱۸/۹۷	۱۲۵	۱۱۸	۱/۷۶	۷	۶۳۱	۱/۰۱	۱۵	۱۳	۰/۵۹
۹	۰/۳۸	۲۰/۰۵	۱۳۸	۱۳۲	۱/۹۲	۶	۶۴۱	۰/۹۶	۱۳	۹	۰/۵۹
۱۰	۰/۴۲	۲۱/۱۹	۱۰۵	۹۹	۱/۷۳	۵	۶۸۳	۰/۸۴	۹	۶	۰/۴۷
۱۱	۰/۴۰	۲۱/۸۹	۱۰۳	۹۵	۱/۲۹	۹	۶۹۱	۱/۳۰	۱۸	۱۲	۰/۷۶
۱۲	۰/۳۱	۲۲/۵۴	۱۱۲	۱۰۳	۲/۱۰	۷	۷۱۴	۱/۰۸	۱۳	۱۱	۰/۶۲
۱۳	۰/۳۵	۲۳/۲۰	۹۵	۸۹	۱/۷۲	۷	۷۳۹	۱/۰۳	۱۶	۱۲	۰/۶۶
۱۴	۰/۲۹	۲۳/۷۸	۶۳	۵۸	۱/۱۱	۸	۷۵۶	۰/۹۳	۱۲	۹	۰/۶۰
۱۵	۰/۳۲	۲۴/۲۸	۴۵	۳۵	۰/۸۳	۶	۷۹۰	۰/۹۲	۹	۸	۰/۴۸
۱۶	۰/۲۶	۲۴/۶۸	۲۷	۲۱	۰/۷۲	۴	۷۹۷	۰/۹۴	۷	۶	۰/۴۵
۱۷	۰/۲۲	۲۴/۹۰	۲۶	۲۱	۰/۶۳	۵	۸۰۵	۰/۶۲	۸	۶	۰/۵۲
۱۸	۰/۲۹	۲۵/۰۰	۲۲	۱۷	۰/۳۷	۴	۸۲۹	۰/۶۶	۴	۳	۰/۳۷
۱۹	۰/۲۲	۲۵/۰۰	۶	۴	۰/۲۶	۴	۸۴۵	۰/۵۹	۴	۳	۰/۳۷
۲۰	۰/۲۸	۲۵/۰۰	۳	۲	۰/۳۱	۴	۸۶۳	۰/۵۲	۳	۳	۰/۳۷
۲۱	۰/۲۲	۲۵/۰۰	۳	۲	۰/۳۱	۳	۸۷۱	۰/۵۰	۳	۲	۰/۳۲
۲۲	۰/۲۵	۲۵/۰۰	۳	۲	۰/۳۳	۳	۸۸۴	۰/۵۲	۳	۲	۰/۳۲
۲۳	۰/۲۷	۲۵/۰۰	۳	۲	۰/۲۹	۳	۸۹۵	۰/۵۹	۳	۲	۰/۳۱
۲۴	۰/۲۷	۲۵/۰۰	۲	۲	۰/۲۸	۲	۶۰۰	۰/۴۷	۳	۲	۰/۲۹
۲۵	۰/۲۹	۲۵/۰۰	۲	۱	۰/۱۸	۲	۶۰۰	۰/۵۱	۲	۱	۰/۲۲

می‌آورد. این نکته بخصوص در روش بندرز با کات بهینه پارتو قابل مشاهده است که در بیش از ۹۹ درصد مثالها به جواب بهینه دست پیدا کرده‌ایم. وقتی $p \geq 20$ در همه مثالهای بزرگ، الگوریتم‌های پیشنهادی بندرز با قید برش بهینه پارتو و بندرز با چندین قید برش قابلیت تولید جواب‌های بهتری نسبت به جواب به دست آمده از CPLEX دارند. در حالت کلی به طور میانگین جواب‌های بدست آمده از روش بندرز با چند قید برش و روش بندرز با کات بهینه پارتو به ترتیب ۰/۱۵ و ۰/۲۵ درصد از جواب‌های به دست آمده از روش CPLEX بهتر هستند. برای روش بندرز با یک قید برش نیز میانگین فاصله جوابیهای بدست آمده از جواب بهینه کمتر از ۰/۰۵ درصد است. این مثال‌ها نشان می‌دهد که با استفاده از مجموعه‌های مرکزی، اندازه مدل دوگانه سوز به طور چشمگیری کاهش پیدا می‌کند بطوری که با استفاده از این مجموعه‌ها تنها از حدود ۱۹ درصد نقاط استفاده می‌شود. همانطور که از جدول ۵ دیده می‌شود، با افزایش اندازه مسئله، بخصوص وقتی تعداد جایگاه‌ها افزایش می‌یابد روش CPLEX نمی‌تواند جواب بهینه را به دست آورد در حالی که روش‌های بندرز با چند قید برش و روش بندرز با کات بهینه پارتو می‌توانند به یک جواب شدنی خوب برسند. در این دسته از مثالها، میانگین زمان حل الگوریتم‌های پیشنهادی بسیار کمتر از میانگین زمان حل الگوریتم CPLEX است. میانگین زمان حل CPLEX به ترتیب در حدود ۲۰ و ۱۰ برابر بزرگتر از زمان الگوریتم بندرز با کات بهینه پارتو و روش بندرز با چندین کات است. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که روش بندرز با کات بهینه پارتو در مجموع یک روش برتر و خوب با زمان کمتر برای اجراها و دقت بهتر برای جواب‌های بدست آمده بوده‌است.

۵- نتیجه‌گیری

مشکلات فراوانی که در امر محیط زیست از طریق استفاده سوخت‌های فسیلی در بخش‌های مختلف صنعت و جامعه بوجود آمده‌است تصمیم‌گیرندگان در حوزه سلامت را به این امر وا داشته است که سوخت‌های جایگزین را به جای سوخت‌های فسیلی بکار ببرند. یکی از مهم‌ترین بخش‌هایی که می‌توان در آن سوخت جایگزین را به کار برد بخش حمل‌ونقل است. بیش از ۹۴ درصد خودروهای موجود در سیستم حمل‌ونقل از سوخت‌های فسیلی در موتور خود استفاده می‌کنند. که این لزوم نیاز به بازنگری در نوع سوخت خودروهای موجود در شبکه حمل‌ونقل را می‌طلبد. خودروهای با سوخت جایگزین می‌توانند گزینه‌های مناسبی برای این هدف باشند. منافع بالقوه زیست محیطی خودروهای با سوخت

مثالهای تولید شده به وسیله روش دقیق CPLEX حل شده‌اند. جواب به دست آمده از آن، برای ارزیابی کیفیت جواب شدنی الگوریتم‌های حل ارائه شده، مورد استفاده قرار می‌گیرد. برای مقایسه بین جواب‌های به دست آمده از روشهای ابتکاری و CPLEX، ابتدا ۶ مسئله تصادفی با تعداد نقاط $(|N|)$ ، ۱۰۰، ۱۵۰ و ۲۵۰ و $|O|$ متفاوت تولید شده‌است. مثالها با اندازه‌های کوچک شروع شده و در ادامه مثالهایی با اندازه‌های بزرگ نیز حل شده‌اند. برخی از این مثالها کوچک هستند و روش CPLEX می‌تواند جواب بهینه آنها را در طول ۶ ساعت اجرا به دست آورد. بنابراین، جواب‌های به دست آمده از روشهای حل ارایه شده می‌توانند با جواب‌های بهینه مقایسه شوند. برای هر مثال، ۷ نمونه تولید شده و الگوریتم حل روی آنها اجرا شده‌است. توجه کنید که در این مثالها بهترین جواب به دست آمده از CPLEX در زمان اجرای ۶ ساعته به صورت گزارش شده‌است. جدول ۵، نتایج به دست آمده از الگوریتم‌های حل و روش CPLEX را مشخص می‌کند. این نتایج برای حالت $R=12$ اجرا شده‌است. ستون‌های جدول ۵ بصورت زیر هستند:

$(N, |O|)$: اندازه مثالها

T_C : میانگین زمان مورد نیاز برای CPLEX (ثانیه).

$Avg. g_C$: میانگین $(CPLEX) gap$

T_{1cut} ، T_{Mcut} و T_{Pcut} : به ترتیب میانگین زمان مورد نیاز برای الگوریتم‌های حل پیشنهادی یک قید برش، چند قید برش و قید برش بهینه پارتو است (ثانیه).

$\#Num.opt$: تعداد مثالهایی است که جواب بدست آمده برای آنها با روش ابتکاری برابر با جواب بهینه CPLEX است.

$Avg. g_{C\&L}$: میانگین درصد فاصله بین جواب CPLEX (V_C) و جواب روشهای ابتکاری (L^*) $\left\{ \left(\frac{L^* - V_C}{V_C} \right) \times 100 \right\}$ (Average {

$Max. g_{C\&L}$: ماکزیمم درصد فاصله بین V_C و L^* در بین ۷ نمونه تولید شده.

نتایج جدول ۵ مشخص می‌کند که الگوریتم‌های پیشنهادی توانایی تولید جواب‌های با کیفیت خوب در یک زمان معقول را دارند. در این دسته از مثالها، جواب بدست آمده از روشهای ابتکاری جواب بهینه را در بیش از ۸۹ درصد مثالها بدست

ارایه شده را بر روی دو مجموعه از داده‌ها تحت شرایط مختلف اجرا کردیم. نتایج به دست آمده نشان داد که مدل دوگانه‌سوز به خوبی می‌تواند مکان جایگاه‌های سوخت را برای کاهش میزان آلودگی مشخص کند. زمانی که دامنه حرکتی خودروها کم است چون با خودروهای با سوخت جایگزین نمی‌توان برخی از مسیرها را با یک باک پر به اتمام رساند با استفاده از مدل دوگانه‌سوز می‌توان قسمتی از مسیر را با سوخت جایگزین پیمود و بقیه را با سوخت بنزینی پیمود. در این حالت میزان آلودگی تولید شده خیلی کمتر از میزان آلودگی تولید شده توسط مدل تک سوخت است، بطوریکه در برخی موارد کاهش انتشار GHG چشمگیر بوده و تا ۲ درصد کمتر از مدل FRLM است. در مورد الگوریتم‌های حل ارائه شده، این الگوریتم‌ها روی مسائل تولید شده با اندازه‌های مختلف اجرا شدند و کارایی بسیار خوب این روش‌ها برای حل مسائل مشخص شد. همانطور که در مثالهای گوناگون نشان داده شد با استفاده از مجموعه‌های مرکزی، اندازه مسأله تا ۸۱ درصد می‌تواند کاهش پیدا می‌کند. الگوریتم حل با موفقیت نمونه‌های با اندازه بزرگ با ۲۵۰ نقطه را به خوبی حل کرد که نشان دهنده این است که الگوریتم بندرز توانایی حل نمونه‌های شبکه جاده‌ای با اندازه واقعی را دارد. نتایج نشان دادند که روش بندرز کات بهینه-پارتو به طور موثری زمان حل را در مسایل مختلف کاهش می‌دهد و جواب دقیق‌تری را نسبت به روش‌های دیگر تولید می‌کند. برای کارهای آینده می‌توان به بررسی ظرفیت در ایستگاه‌ها پرداخت. همانطور که با افزایش تعداد خودروها و میزان جریان خودروها سوخت‌رسانی به آنها دچار مشکل می‌شود ظرفیت ایستگاه‌ها نیز به عنوان یک عامل بحرانی باعث ناکارآمدی مدل می‌شود. بنابراین برای کار آینده می‌توان بحث ظرفیت جایگاه‌ها را نیز در مدل لحاظ کرد.

جایگزین و همچنین موانع گسترش این نوع خودروها به طور گسترده در ادبیات مورد بحث واقع شده‌است. موانع متعددی از جمله کمبود جایگاه‌های سوخت، دامنه حرکتی کم خودروها با سوخت جایگزین و نیز عوامل دیگر باعث شده تا گسترش این نوع خودروها به سرعت انجام نپذیرد. برای این منظور و تا رسیدن به نقطه‌ای که بتوان همه مسیرها را با خودرو با سوخت جایگزین پیمود می‌توان از خودروهای دوگانه‌سوز استفاده کرد. خودروهای دوگانه‌سوز، خودروهایی هستند که همزمان می‌توانند از دو سوخت مختلف (سوخت‌های فسیلی و جایگزین) در احتراق موتور خود استفاده کنند.

یکی از مهم‌ترین مشکلات در نهادینه کردن سوخت‌های جایگزین کمبود زیر ساخت‌های سوخت‌گیری در جاده‌ها است. روش‌های کارایی که به بهینه کردن مکان‌یابی این جایگاه‌ها کمک کند می‌تواند در تسریع استفاده از این خودروها کمک شایانی نماید. اکثر مدل‌های ارایه شده بر روی مکان‌یابی جایگاه‌ها، خودرو را با تنها یک نوع سوخت جایگزین در نظر گرفته‌اند و بحث میزان آلودگی گازهای گلخانه‌ای در اکثر این مدلها مورد بررسی واقع نشده‌است. به این منظور مدل جدیدی برای مکان‌یابی جایگاه‌های سوخت جایگزین برای خودروها دوگانه‌سوز را در این مقاله ارایه کردیم که در آن نوع خودرو می‌تواند تک-سوخت یا دو-سوخت بوده و جایگاه‌های سوخت جایگزین بر اساس کمترین آلودگی منتشر شده خودروها مکان‌یابی می‌شوند.

مدل ارایه شده با افزایش اندازه مسئله حل بهینه آن با توجه به روش‌های مستقیم دچار مشکل می‌شود. با استفاده از ساختار خاص فرمول‌بندی ارایه شده قادر به طراحی یک الگوریتم حل بر اساس روش تجزیه بندرز و کاهش زمان حل مسئله هستیم. در این الگوریتم، ابتدا اندازه مدل با توجه به مجموعه‌های مرکزی کاهش یافته و سپس، با استفاده از یک روش اصلاح شده بندرز جواب‌های شدنی برای مسئله به دست می‌آوریم. در الگوریتم پیشنهاد شده، روش بندرز را به وسیله روش‌های تولید همزمان چند کات و انتخاب کات بهینه پارتو بهبود داده‌ایم. برای ارزیابی مؤثر، مدل دوگانه‌سوز و روش‌های حل

جدول ۵. مقایسه الگوریتم‌های حل ارائه شده و روش دقیق برای مسائل تولید شده

P	(O _i , N _i)	%Avg . r _n	Q*	T _C	Avg. g _C	یک قید برش				چند قید برش			قید برش بهینه پارتو				
						Num #opt	T _{cut}	%Avg g _{C & L_i}	Max. g _{C & L_i}	Num #opt	T _{cut}	%Av. g _{C & L_u}	Max. g _{C & L_u}	Num opt	T _{cut}	%Avg. g _{C & L_p}	Max. g _{C & L_p}
۱	(۲۵ و ۱۰۰)	۴/۵۳	۵۹	۲۷/۱۰	۰	۷	۳۲/۴۳	۰	۰	۷	۴۱/۲۵	۰	۰	۷	۴۲/۶۷	۰	۰
	(۵۰ و ۱۰۰)	۴/۲۵	۸۷	۲۶/۴۸	۰	۷	۲۹/۴۵	۰	۰	۷	۴۶/۲۳	۰	۰	۷	۳۸/۷۶	۰	۰
	(۲۵ و ۱۵۰)	۳/۸۴	۶۲	۳۲/۴۶	۰	۷	۳۷/۴۵	۰	۰	۷	۳۹/۴۵	۰	۰	۷	۳۹/۳۴	۰	۰
	(۵۰ و ۱۵۰)	۴/۱۲	۹۳	۳۷/۵۶	۰	۷	۴۱/۲۵	۰	۰	۷	۵۲/۰۳	۰	۰	۷	۴۱/۱۳	۰	۰

	(۱۰۰و۲۵۰)	۳/۸۹	۱۹۸	۴۰/۸۴	۰	۷	۷۸/۶	۰	۰	۷	۶۸/۵۵	۰	۰	۷	۶۱/۲	۰	۰
	(۱۵۰و۲۵۰)	۳/۴۶	۲۴۷	۵۱/۲۴	۰	۷	۷۹/۵۶	۰	۰	۷	۸۲/۰۱	۰	۰	۷	۸۶/۷۶	۰	۰
۵	(۲۵و۱۰۰)	۸/۴۰	۱۲۹	۲۴/۲	۰	۷	۵۴/۶	۰	۰	۷	۵۲/۱۱	۰	۰	۷	۵۶/۱	۰	۰
	(۵۰و۱۰۰)	۹/۸۰	۱۸۷	۳۹/۳	۰	۷	۷۶/۱	۰	۰	۷	۶۸/۲	۰	۰	۷	۵۸/۹	۰	۰
	(۲۵و۱۵۰)	۶/۳۸	۱۲۵	۴۵/۱	۰	۷	۶۵/۳	۰	۰	۷	۶۱/۳۵	۰	۰	۷	۶۲/۳	۰	۰
	(۵۰و۱۵۰)	۷/۱۷	۱۹۱	۸۳/۳	۰	۷	۸۲/۴	۰	۰	۷	۷۵/۴	۰	۰	۷	۶۱/۱	۰	۰
	(۱۰۰و۲۵۰)	۸/۶۴	۳۵۶	۷۳/۶۳	۰	۷	۱۴۴/۴	۰	۰	۷	۱۱۸/۱	۰	۰	۷	۸۵/۸	۰	۰
	(۱۵۰و۲۵۰)	۷/۶۹	۶۱۹	۱۲۴/۱۲	۰	۷	۱۹۶/۱	۰	۰	۷	۱۷۴/۹	۰	۰	۷	۹۱/۴	۰	۰
۱۰	(۲۵و۱۰۰)	۱۶/۴	۱۹۸	۱۰۲/۳	۰	۷	۱۰۲/۵	۰	۰	۷	۹۸/۴	۰	۰	۷	۷۹/۶	۰	۰
	(۵۰و۱۰۰)	۱۶/۸	۳۴۳	۲۷۸/۴	۰	۷	۲۶۵/۷	۰	۰	۷	۱۷۸/۴	۰	۰	۷	۸۳/۹	۰	۰
	(۲۵و۱۵۰)	۱۱/۳۲	۲۱۲	۲۲۶/۲	۰	۷	۱۲۷/۳	۰	۰	۷	۸۷/۴	۰	۰	۷	۹۰/۲	۰	۰
	(۵۰و۱۵۰)	۱۲/۸۳	۳۵۸	۴۴۶/۵	۰	۷	۳۱۶/۶	۰	۰	۷	۲۳۹/۷	۰	۰	۷	۹۷/۱	۰	۰
	(۱۰۰و۲۵۰)	۶/۶۴	۷۴۶	۱۱۳۶/۲	۰	۶	۵۲۳/۳	۰/۱۵	۱/۰۴	۷	۳۷۵/۴	۰	۰	۷	۱۲۷/۵	۰	۰
	(۱۵۰و۲۵۰)	۷/۷۶	۱۴۸۳	۴۴۷۴/۶	۰	۶	۷۱۳/۲	۰/۲۰	۱/۳۷	۷	۵۳۴/۸	۰	۰	۷	۱۴۴/۹	۰	۰
۱۵	(۲۵و۱۰۰)	۲۴/۲	۲۹۱	۴۹۱/۵	۰	۶	۲۹۴/۷	۰/۰۲	۰/۱۱	۷	۱۷۶/۴	۰	۰	۷	۷۹/۴	۰	۰
	(۵۰و۱۰۰)	۲۸/۶	۴۵۵	۸۶۳/۲	۰	۶	۴۱۵/۳	۰/۰۳	۰/۲۳	۷	۲۶۴/۷	۰	۰	۷	۸۱/۴	۰	۰
	(۲۵و۱۵۰)	۱۷/۴	۲۸۱	۷۹۷/۳	۰	۶	۳۸۵/۳	۰/۰۶	۰/۴۴	۷	۲۱۸/۴	۰	۰	۷	۹۷/۳	۰	۰
	(۵۰و۱۵۰)	۱۹/۱	۴۹۲	۱۰۷۷/۳	۰	۵	۵۲۱/۹	۰/۱۷	۰/۵۳	۷	۲۴۳/۵	۰	۰	۷	۱۰۵/۵	۰	۰
	(۱۰۰و۲۵۰)	۱۱/۲	۱۳۲۶	۶۵۹۱/۷	۰	۵	۱۰۵۷/۶	۰/۴۱	۰/۸۴	۷	۶۵۱/۹	۰	۰	۷	۱۹۷/۴	۰	۰
	(۱۵۰و۲۵۰)	۱۲/۵	۳۱۸۶	۱۴۹۳۴	۰	۵	۱۸۴۷/۲	۰/۴۳	۰/۹۲	۷	۷۴۱/۴	۰	۰	۷	۲۵۸/۱	۰	۰
۲۰	(۲۵و۱۰۰)	۳۹/۲	۳۰۰	۱۲۵۰/۱	۰	۵	۳۹۶/۸	۰/۵۷	۰/۶۴	۷	۱۷۳/۵	۰	۰	۷	۹۷/۱	۰	۰
	(۵۰و۱۰۰)	۴۲/۸	۶۲۲	۲۳۴۸/۴	۰	۵	۷۱۴/۳	۰/۱۸	۰/۳۷	۷	۲۸۹/۶	۰	۰	۷	۱۰۲/۷	۰	۰
	(۲۵و۱۵۰)	۲۷/۸	۳۰۰	۲۱۸۶/۲	۰	۴	۴۹۳/۸	۰/۲۱	۰/۵۱	۷	۲۴۵/۳	۰	۰	۷	۱۳۸/۹	۰	۰
	(۵۰و۱۵۰)	۳۰/۳	۷۱۱	۲۹۴۸/۲	۰	۵	۸۳۴/۱	۰/۱۹	۰/۴۸	۷	۴۴۸/۳	۰	۰	۷	۱۸۵/۲	۰	۰
	(۱۰۰و۲۵۰)	۱۸/۶	۱۹۳۷	۱۹۴۷۶	۰/۳۳	-	۳۲۴۷/۴	-۰/۰۲	۰/۱۵	-	۶۴۷/۴	-۰/۱۱	۰/۱۳	-	۲۴۱/۴	-۱/۴۶	-۰/۴۶
	(۱۵۰و۲۵۰)	۲۱/۹	۴۵۷۶	۲۱۶۰۰	۱/۷۴	-	۴۳۴۱/۶	-۰/۲۹	-۰/۱۲	-	۹۴۱/۶	-۱/۰۱	-۰/۸۱	-	۴۲۶/۲	-۱/۶۳	-۰/۹۸
۲۵	(۲۵و۱۰۰)	۴۵/۶	۳۰۰	۲۴۵۸/۵	۰	۶	۶۱۳/۳	۰/۰۹	۰/۶۱	۷	۳۳۴/۳	۰	۰	۷	۲۱۳/۳	۰	۰
	(۵۰و۱۰۰)	۵۴/۴	۸۰۳	۳۲۲۴/۱	۰	۵	۱۰۴۴/۵	۰/۱۲	۰/۴۶	۶	۵۸۳	۰/۰۱	۰/۰۵	۷	۳۴۱/۵	۰	۰
	(۲۵و۱۵۰)	۳۷/۸	۳۰۰	۳۸۵۲/۳	۰	۶	۷۹۳/۵	۰/۱۱	۰/۶۷	۶	۴۹۳/۵	۰/۰۱	۰/۰۴	۷	۲۹۲/۱	۰	۰
	(۵۰و۱۵۰)	۳۹/۲	۸۴۷	۵۶۳۷/۲	۰	۵	۱۲۴۴/۷	۰/۱۶	۰/۵۱	۶	۵۹۲/۶	۰/۰۰۱	۰/۰۳	۷	۴۷۲/۵	۰	۰
	(۱۰۰و۲۵۰)	۲۹/۷	۲۸۹۱	۲۱۶۰۰	۲/۵۱	-	۳۵۷۶/۵	-۰/۱۶	-۰/۰۵	-	۱۰۴۱	-۱/۹۱	-۱/۳۵	-	۶۹۱/۴	-۲/۳۵	-۱/۷۲
	(۱۵۰و۲۵۰)	۳۵/۲	۷۱۳۴	۲۱۶۰۰	۵/۵۷	-	۵۲۲۹/۴	-۰/۶۲	-۰/۲۸	-	۲۰۱۹	-۲/۴۱	-۱/۸۴	۰	۹۲۸/۷	-۳/۸۹	-۲/۴۷
Average		۱۸/۸		۳۸۹۳/۹	۰/۲۹	۶/۱۸	۸۲۱/۸	۰/۰۵	۰/۲۸	۶/۹	۳۴۸/۸	-۰/۱۵	-۰/۱۱	۶/۹۴	۱۷۶/۸	-۰/۲۵	-۰/۱۷

۶- پی نوشت ها

8. Flow Refuelling Location Model
9. Core set
10. Overlap
11. Convex Hull
12. Core Point
13. Spanning tree

1. GreenHouse Gas
2. Liquefied petroleum gas
3. Compressed Natural Gas
4. Alternative Fuel Vehicles
5. Flow Capturing Location Model
6. Origin-Destination
7. Driving Range

- Costa, A.M., (2005), "A survey on benders decomposition applied to fixed-charge network design problems", *Computers & Operations Research*, Vol. 32, pp. 1429-1450.
- Froyland, G., Maher, S.J. and Wu, C.L., (2013), "The recoverable robust tail assignment problem", *Transportation Science*, Vol. 48, pp. 351-372.
- Hodgson, M. J., (1990), "A flow-capturing location-allocation model", *Geographical Analysis*, Vol. 22, pp. 270-279.
- Hosseini, M. and MirHassani, S. A., (2015), "Selecting Optimal Location for Electric Recharging Stations with Queue", *KSCE Journal of Civil Engineering*, Vol. 19, No. 7, pp. 2271-2280.
- Hosseini, M. and MirHassani, S. A., (2015), "A heuristic algorithm for optimal location of flow-refueling capacitated stations", *International Transactions in Operational Research*, Vol. 24, pp. 1377-1403.
- Hosseini, M., MirHassani, S.A. and Hooshmand. F., (2017), "Deviation-flow refueling location problem with capacitated facilities: Model and algorithm", *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, Vol. 54, pp. 269-281.
- ILOG CPLEX 12.6 User's Manual ILOG Inc., CPLEX Division, Mountain View, USA.
- Khatami, M., Mahootchi, M. and Farahani, R.Z., (2015), "Benders decomposition for concurrent redesign of forward and closed-loop supply chain network with demand and return uncertainties", *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, Vol. 79, pp. 1 - 21.
- Kim, G. J., (2010), "Location of Refueling Stations for Alternative Fuel Vehicles Considering Driver Deviation Behavior and Uneven Consumer Demand: Model, Heuristics, and GIS ". PhD dissertation. Supervisor: Kuby, M, School of Geographical Sciences and Urban Planning, Arizona State University, United States.
- Abdoli, B., MirHassani, S. A. and Hoshmand, F., (2017), "Model and algorithm for bi-fuel vehicle routing problem to reduce GHG emissions", *Environ Sci Pollut Res*, Vol. 24, No. 27, pp. 21610-21624.
- AIMMS 4.2 Paragon Decision Technology B.V., Netherlands. [Online]. <http://www.AIMMS.com>.
- Arslan, O. and Karasan, O. E., (2016), "A Benders Decomposition Approach for the Hybrid Charging Station Location Problem", *Transportation Research Part B: Methodological*, Vol. 93, pp. 670-695.
- Benders, J.F., (1962), "Partitioning procedures for solving mixed-variables programming problems", *Numerische mathematik*, Vol. 4, pp. 238-252.
- Berman, O., Larson, R. C. and Fouska, N., (1992), "Optimal location of discretionary service facilities", *Transp Science*, Vol. 26, pp. 201-211.
- Birge, J. R. and Louveaux, F.V., (1988), "A multicut algorithm for two-stage stochastic linear programs", *European Journal of Operational Research*, Vol. 34, pp. 384 - 392.
- Capar, I. and Kuby, M., (2012), "An Efficient Formulation of the Flow Refueling Location Model for Alternative-Fuel Stations", *IIE Transactions*, Vol. 44, No. 8, pp. 622-636.
- Capar, I., Kuby, M., Leon, V. J. and Tsai, Y. J., (2013), "An arc cover-path-cover formulation and strategic analysis of alternative-fuel station locations", *European Journal of Operational Research*, Vol. 227, pp. 142-151.
- Codato, G. and Fischetti, M., (2006), "Combinatorial benders' cuts for mixed-integer linear programming", *Operations Research*, Vol. 54, pp. 756-766.
- Contreras, I., Cordeau, J. F. and Laporte, G., (2011), "Benders decomposition for large-scale uncapacitated hub location", *Operations Research*, Vol. 59, pp. 1477-1490.

- Pasaoglu, G., Honselaar, M. and Thiel, C., (2012), "Potential vehicle fleet CO2 reductions and cost implications for various vehicle technology deployment scenarios in Europe", *Energy Policy*, Vol.40, pp. 404–421.
- Salimifard, K., Shahbandarzaden, H., and Raeesi, R., (2012), "Green transportation and the role of operation research". International conference on traffic and transportation engineering. Singapore: 17-18 February.
- Trukhanov, S., Ntaimo, L. and Schaefer, A., (2010), "Adaptive multicut aggregation for two-stage stochastic linear programs with recourse", *European Journal of Operational Research*, Vol. 206, pp. 395 - 406.
- Upchurch, C., Kuby, M. and Lim, S., (2009), "A capacitated model for location of alternative-fuel stations", *Geog Anal*, Vol. 41, pp. 127–148.
- Uster, H. and Kewcharoenwong, P., (2011), "Strategic design and analysis of a relay network in truckload transportation", *Transportation Science*, Vol. 45, pp. 505-523.
- Wang, Y. W., (2011), "Locating flow-recharging stations at tourist destinations to serve recreational travelers", *International Journal of Sustainable Transportation*, Vol. 5, pp. 153-171.
- Wheatley, D., Gzara, F. and Jewkes, E., (2015), "Logic-based benders decomposition for an inventorylocation problem with service constraints", *Omega*, Vol. 55, pp. 10 - 23.
- You, F. and Grossmann, I.E., (2013), "Multicut benders decomposition algorithm for process supply chain planning under uncertainty", *Annals of Operations Research*, Vol. 210, pp.191-211.
- Kim, G. J. and Kuby, M., (2012), "The deviation-flow refueling location model for optimizing a network of refueling stations", *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol.37, No. 6, pp. 5406–5420.
- Kuby, M. and Lim, S., (2005), "The flow-refueling location problem for alternative-fuel vehicles", *Socio Economic Planning Sciences*, Vol. 39, pp. 125–145.
- Lei, C., Lin, W. H. and Miao, L., (2014), "A multicut l-shaped based algorithm to solve a stochastic programming model for the mobile facility routing and scheduling problem", *European Journal of Operational Research*, Vol. 238, pp. 699 - 710.
- Melaina, M. W. and Bremson, J., (2008), "Refueling availability for alternative fuel vehicle markets: sufficient urban station coverage", *Energy Policy*, Vol.36, No. 8, pp. 3223–3231.
- MirHassani, S. A. and Ebrazi, R., (2012), "A Flexible Reformulation of the Refueling-station Location Problem", *Transportation Science*, Vol. 47, No. 4, pp. 617-628.
- Magnanti, T. L. and Wong, R. T., (1981), "Accelerating benders decomposition: Algorithmic enhancement and model selection criteria. *Operations research*, Vol. 29, pp. 464-484.
- Owen, N. A., Inderwildi, O. and King, D., (2010), "The status of conventional world oil reserves—Hype or cause for concern?", *Energy Policy*, Vol.38, pp. 4743-4749.
- Papadacos, N., (2008), "Practical enhancements to the magnanti-wong method", *Operations Research Letters*, Vol. 36, pp. 444-449.

Formulation and Solution Algorithm of Flow-Refueling Location Problem for bi-fuel Vehicles to Minimize GHG Emissions

Meysam Hosseini, Assistant Professor, Department of Mathematics, Campus of Bijar, University of Kurdistan, Sanandaj, Kurdistan, Iran.

E-mail: me.hosseini@uok.ac.ir

Received: March 2020-Accepted: September 2020

ABSTRACT

Because of the destructive effects of greenhouse gas emitted by fossil fuels, moving to alternative fuels is an unavoidable. Alternative fuels play a very important role in the transition to a sustainable and clean the transportation sector. The adoption of alternative fuel vehicle fleets is not easy and, particularly at the beginning of the transition period, the lack of infrastructure for producing, distributing and delivering the alternative fuel is one of the most important obstacles. Therefore, the location of alternative fuel stations is an important topic in accelerating the entry of this fuel into the transportation system. Due to the lack of refueling stations, the assumption that all vehicles on intercity trips can travel all paths with only one alternative fuel is unrealistic. One of the practical ways is utilize of bi-fuel vehicles, to use gasoline in an emergency for avoid to stopping the vehicle on the journey by run out of alternative fuel. In this paper, we present a new model to location of alternative fuel station for bi-fuel vehicles. The model's goal is to minimize total emissions from vehicles. Also, we propose an efficient solution algorithm based on Benders decomposition to solve large network. The results show that the use of bi-fuel vehicles can lead to a significant reduce in greenhouse emissions. Moreover, implementation of proposed algorithm on randomly generated examples illustrate that the algorithm is useful in reducing the solving time and obtaining acceptable solution.

Keyword: Benders Decomposition Algorithm, Greenhouse Gas Emission, Alternative Fuel Station, Bi-Fuel Vehicles, Location