مطالعه رفتار سوختگیری و تمایلات رانندگان به منظور طراحی زیرساخت جایگاه های سوختگیری هیدروژن

(مطالعه موردی: شهر مشهد)

احسان لطفی (نویسنده مسئول)

کارشناسی ارشد دانشگاه صنعتی شاهرود

lotfi@shahroodut.ac.ir

دکتر رضا شیخ

دانشیار دانشگاه صنعتی شاهرود

resheikh@shahroodut.ac.ir

بزرگمهر اشرفی

دانشیار دانشگاه صنعتی شاهرود

ashrafi@shahroodut.ac.ir

چکیده

هدف از این مقاله ارائه یک مدل بهینه سازی برای برنامه ریزی راهبردی مختص ایستگاه‌های سوختگیری هیدروژن در یک شهر (شهر مشهد) در شرایط در دست نداشتن داده های مبدأ و مقصد (OD) است. مدل ما این مدل دو شرط را در نظر می گیرد: حداکثر کردن ترافیک (مسیرهای رفت و آمد) تحت پوشش ایستگاه‌های سوختگیری منتخب و به حداقل رساندن متوسط فاصله ساکنان تا نزدیکترین ایستگاه سوختگیری هیدروژن. چون فرض می شود که داده های OD را در اختیار نداریم، از تجمع ایستگاه ها در مناطق دارای بالاترین ترافیک شهر با قید جدیدی ممانعت به عمل می‌آید که اطلاعات توزیع ایستگاه های سوختگیری فعلی را مد نظر قرار می‌دهد. این مدل برای شهر مشهد با مساحتی در حدود 3 هزار کیلومترمربع و جمعیت 3 میلیون نفری به کار گرفته شد. در این کار از نتایج نظرسنجی از بیش از 200 راننده مشهدی (غیر تاکسیران) در مورد ترجیحات سوختگیری فعلی شان، تمایلشان به استفاده از وسایل نقلیه با سوخت هیدروژن و حداقل نیازشان (با توجه به حداکثر فاصله تا پمپ و تعداد ایستگاه های موجود در شهر) برای ایجاد شبکه ای از ایستگاه های سوختگیری جایگزین استفاده شده است.

کلید واژه:
خودروهای با سوخت جایگزین، بهینه سازی، توسعه زیرساخت، ایستگاه های سوختگیری هیدروژن، ترجیحات سوختگیری رانندگان

مقدمه

تا کنون سیستم انرژی حمل و نقل عمدتا مبتنی بر استفاده از سوخت های فسیلی بوده است. با این حال، فشار مشکلات زیست محیطی مرتبط با تولید، حمل و نقل و استفاده از این سوخت ها، افزایش تقاضای انرژی، و نیاز کشورها برای بهبود امنیت انرژی و کاهش وابستگی به منابع انرژی خارجی، کشورها را به سمت ترویج استفاده از سوخت های جایگزین در بخش حمل و نقل سوق می دهد (برای مثال، کمیسیون اروپا، 2011).

برخی از این سوخت های جایگزین از منابع تجدید پذیر به دست می‌آیند. در بیشتر موارد، از سوخت های فسیلی آلایندگی کمتری دارند. با وجود این مزایا، رسوخ در بازار وسایل نقلیه طراحی شده با سوخت هیدروژن کند است؛ به دلیل آنکه عملکرد آن (از نظر سرعت، دامنه حرکتی، زمان سوختگیری، شتاب، و غیره) در سطح جهانی پایین تر از وسایل نقلیه با سوخت های فسیلی بود و به این دلیل که هزینه های آن (قیمت وسیله نقلیه و هزینه های سوخت آن) معمولا بسیار بالاتر است (بری و همکاران، 2007).

با این حال، فاصله تکنولوژی و تفاوت های هزینه ای به طور فزاینده ای در حال کم شدن است، و تنها انتظار می رود که وسایل نقلیه با سوخت جایگزین (AFVها) به زودی رقبای جدی خودروهای معمولی شوند. یک مثال خوب تویوتا FCV میرای (تویوتا، 2014) است، تولید شده در سری سوخت پیل، که در سال 2014 توسط تویوتا عرضه شد. عملکرد آن همتراز وسایل نقلیه با سوخت فسیلی است: بیش از 650 کیلومتر حرکت اتومات، 175 کیلومتر/ ساعت حداکثر سرعت و سوختگیری مخزن در حالت پر در کمتر از 3 دقیقه. می توان آن را با کمتر از 500 دلار در ماه اجاره به شرط خرید (لیزینگ)

کرد، که قیمت آن در محدوده قیمت خودروهای سواری معمولی است و قیمت هیدروژن در هر کیلومتر تقریبا معادل سوخت های معمول است.

با این حال، هنوز هم عوامل دیگری وجود دارند که مانع استفاده از AFVهایند. یکی از مهم ترین آنها در دسترس بودن سوخت است (اسپرلینگ و کیتامورا، 1986). خریداران بالقوه اگر احساس کنند با ریسک نسبتا بالایی نسبت به اتمام سوخت در فاصله از یک ایستگاه سوختگیری مواجه اند، تمایلی به خرید این ماشین ها نخواهند داشت (اکتنیک و همکاران 2012). این تنها موضوع تعداد ایستگاه های سوختگیری نیست. موقعیت جغرافیایی شان نیز بسیار مهم است، به خصوص اگر هزینه های بالای مرتبط با استقرار زیرساخت های سوخت های جایگزین به حداقل برسد.

هر دو عامل کلیدی در طراحی یک شبکه ایستگاه سوختگیری جایگزین (تعداد و محل ایستگاه های سوختگیری) راکمتر یا بیشتر، با توجه به دلخواه رانندگان باید در نظر گرفت. رانندگان باید در مورد تعداد ایستگاه های سوختگیری در دسترس احساس راحتی کنند. طراحی شبکه باید به رفتار سوختگیری پذیرندگان بالقوه سیستم در اولین مرحله از استقرار زیرساخت های جایگزین پاسخ دهد، و همگرا با رفتار عمومی سوختگیری رانندگان در مراحل نهایی باشد.

تحقیقات انجام شده روی انتخاب های رانندگان خودروهای AFV نسبت به مکان های سوختگیری نسبتا محدود است. بسیاری از این مقالات بر وسایل نقلیه برقی متمرکز اند؛ با این حال، زمان بیشتر مورد نیاز برای سوختگیری توسط این تکنولوژی، تعمیم این مطالعات به بقیه موارد (سوخت های جایگزین) با زمان سوختگیری مشابه با خودروهای معمولی را دشوار می سازد (کلی و کوبی 2013). این مقاله خودروهای سوخت سلولی (یک تکنولوژی سوختگیری سریع هیدروژنی) را مطالعه می کند، گرچه نتایج به دست آمده در این مقاله را می توان به راحتی به هر فن آوری دیگر سوختگیری سریع با عملکرد مشابه تعمیم داد.

اسپرلینگ و کیتامورا (1986) و کیتامورا و اسپرلینگ (1987) دو تحقیق در مورد این سؤالات در کالیفرنیا انجام دادند: یک تحقیق بزرگتر روی 1528 راننده وسایل نقلیه بنزینی و یک مطالعه کوچکتر از 107 راننده وسایل نقلیه دیزلی، که به عنوان نماینده ای از رانندگان بالقوه AFV مورد بررسی قرار گرفت. آنها دریافتند که راحتی دسترسی در تردد به محل کار، خانه و مدرسه دلیل اصلی انتخاب یک ایستگاه سوختگیری در 56 درصد از موارد برای رانندگان وسایل نقلیه دیزلی بود، در مقایسه با 29٪ برای رانندگان وسایل نقلیه بنزینی. به هر حال، نزدیک بودن برای نمونه بزرگتر نیز مهم بود، چون در این نمونه آنها دریافتند که 72٪ از مکان های سوختگیری کمتر از 5 دقیقه از مبدأ و یا مقصدشان فاصله دارند، در حالی که حدود 60٪ از سفرهای به منظور سوختگیری حدود 15 دقیقه یا بیشتر به طول می انجامد. از آنجا که در نمونه آنها بسیاری از سفرها شامل سوختگیری اولیه یا نهایی در خانه و یا محل کار است، این نویسندگان اعلام کردند: تعجب آور نیست که محل انتخاب سوختگیری به نزدیک بودن به خانه یا محل کار متمایل باشد. علاوه بر این، این نویسندگان اشاره می کنند که یک شبکه دیزلی با 10٪ اندازه شبکه بنزینی می تواند بیش از اندازه هم کافی باشد.

در عوض، نیکلاس (2010) نشان داد که حجم سوخت توزیعی در منطقه ای از کالیفرنیا بیشتر با عامل خودرو - کیلومتر-سفر (VKT) تا جمعیت در ارتباط است. کلی و کوبی (2013)، با استفاده از یک بررسی ترجیحات آشکار 259 راننده وسیله نقلیه با سوخت گاز طبیعی فشرده (CNG) در پنج ایستگاه CNG در جنوب کالیفرنیا، به این نتیجه رسیدند که زیرساخت های اولیه بایستی در مسیرهای رفت و آمد با حجم بالای ترافیک متمرکز شود، صرف نظر از نزدیک بودن به موقعیت منزل.

همه این تحقیقات قبلی عمدتا بر ایالات متحده متمرکز اند. با این حال، رفتار سوختگیری رانندگان در کشورها متفاوت است زیرا به عوامل بسیاری از جمله اندازه کشور، توزیع جمعیت، زیرساخت های جاده، زمینه های فرهنگی و عوامل اجتماعی و اقتصادی بستگی دارد. در هلند، بونزک و همکاران (2010) یک نظرسنجی با 12 سؤال از 2970 پاسخ دهنده انجام دادند. در بررسی آنها، تقریبا 75 درصد از رانندگان اظهار داشتند که آنها درست بعد از خروج از خانه در راه مقصد خود یا بالعکس سوختگیری می‌کنند (یعنی، در مدت کوتاهی

پس از خروج از نقطه عزیمت)، تقریبا 20 درصد برای سوختگیری راه کوتاه اضافی طی می کنند، و 58 درصد از رانندگان خودرو خود را در عرض 5 دقیقه حرکت از مبدأ سوختگیری می‌کنند. در مجموع بررسی شان نشان می دهد که سوختگیری در نیمه راه غیرمعمول است.

این رفتارهای سوختگیری متفاوت را می توان با استفاده از مدل های مختلف (کلی و کوبی 2013) مدل کرد. مدل های مبتنی بر نقطه (برای مثال لین و همکاران، 2008) فاصله تا نقاط گره را لحاظ می کند. این مدل ها وقتی مناسب تر خواهند بود که رانندگان AFV به سوختگیری نزدیک به مبدأ و یا مقصدشان (خانه، محل کار، و غیره) به جای سوختگیری در بین راه تمایل نشان دهند. در مقابل، مدل مبتنی بر جریان ترافیک (برای مثال هاجسون ، 1990؛ ریمان و همکاران، 2015) جریان ترافیک در مسیرهای شبکه را در نظر می گیرد. این مدل ها به طور معمول از داده های مبدأ-مقصد (OD) بهره می برند. این ها نسبت به مدل هایی که در آن رانندگان به اقدام به سوختگیری در فاصله بین مبدأ و مقصد صرف نظر از نزدیکی به مبدأ و یا مقصد می کنند مناسب تر اند. هاجسون و روسینگ (1992) هر دو روش (نزدیکی به خانه و جریان ترافیک) را در یک مدل واحد با اختصاص وزن و با فرض ماتریس OD ترکیب کرده اند.

هدف این مقاله تکمله ای بر مقالات در حیطه استقرار زیرساخت های AFV و تمایلات رانندگان است. این مقاله به شرح زیر سازماندهی شده است. بخش 2 مدل ارائه شده برای قرارگیری ایستگاه های سوختگیری AFV در شهر بر اساس مدل هاجسون و روسینگ است، اما سازگار با مواردی است که در آن داده های OD در دسترس نیست. شهر مشهد به عنوان مطالعه موردی در این مقاله در نظر گرفته شده است. این مقاله خودروهای سلول سوختی (FCV) را نیز در نظر می گیرد، چون، همانطور که قبلا ذکر شد، این فن آوری انتظار می رود به یک رقیب جدی وسایل نقلیه معمولی در یک زمان عادی تبدیل شود. با این حال، این مدل می تواند به طور مشابه برای هر AFV با ویژگی های مشابه به کار گرفته شود.

در بخش 3، مدل ارائه شده برای مشهد، یکی از شهرهای پر جمعیت ایران اعمال می شود. این نرم افزار از یک بررسی با هدف به دست آوردن اطلاعات در مورد رفتار سوختگیری ساکنان مشهد و ترجیحشان همراه با برخی عوامل کلیدی در طراحی یک زیرساخت AFV استفاده می کند. بخش 4 به نتایج و بحث در مورد آن می پردازد. در نهایت، بخش 5 نتیجه گیری است.

1. مدل مفهومی

هدف از این مدل تعیین موقعیت و تعداد ایستگاه های سوختگیری هیدروژن (HRS) در مناطق شهری، به منظور تسهیل در سوق دادن مردم از وسایل نقلیه با سوخت های فسیلی به سمت FCVهاست. این مدل همچنین به شناسایی تعداد کمینه HRSهای مورد نیاز در یک سطح پوشش قابل قبول برای خریداران بالقوه FCV (در مقایسه با سطح فعلی پوشش) کمک خواهد کرد.

ایستگاه های فعلی سوخت (CNG) به عنوان مکان های نامزد برای HRSها در نظر گرفته شده است. این مطابق با مطالعاتی است که بیان می‌کنند جلب تمایل مردم به خودروهای هیدروژنی ابتدا با نصب پمپ های هیدروژن در محل ایستگاه های سوختگیری فعلی میسّر خواهد شد. با توجه به اینکه CNG هم به نوعی سوخت جایگزین بنزین محسوب می شود، از این رو به جای ایستگاه های بنزین بهتر دیدیم از پمپ های گاز استفاده کنیم.

این فرض این واقعیت را در نظر می گیرد که تعداد و محل ایستگاه های گاز فعلی در نتیجه ی یک روند طولانی توسعه و بررسی سیستم انرژی فعلی (بنزین) بوده است. این فرضیه تأثیر بسیاری از عوامل اداری، جغرافیایی، اجتماعی و اقتصادی که شبکه فعلی ایستگاه های سوختگیری در یک شهر را مدیریت می‌کند، در نظر می‌گیرد.

مطابق این فرض، در بلوغ کامل سیستم سوخت هیدروژنی، تعداد و توزیع HRS طبق وضع فعلی خواهد بود؛ زیرا وسایل با سوخت هیدروژنی و سوخت های فسیلی سطح عملکرد مشابهی دارند. با این حال، در مراحل اولیه، مسأله انتخاب یکی از مکان های مناسب برای تعدادی معین از HRSها از میان مکان های فعلی ایستگاه های سوختگیری است.

معیار اول برای انتخاب مکان در مراحل اولیه، ارائه یک سطح معین دسترسی در کل منطقه شهری است. این سطح از دسترسی به عنوان فاصله منازل مردم تا نزدیکترین ایستگاه سوختگیری (مدل P-Median) قابل اندازه گیری است. به این ترتیب به طور ضمنی فرض شده است که خریداران FCV همگن (بر اساس درصد) در داخل محدوده شهری پخش شده اند، هر چند وزن هایی را می‌توان در مدل معرفی

کرد تا ارتباط بیشتری با برخی مناطق که تمرکز افراد با ویژگی های خریداران FCV دارد را تعریف کنیم. هرچه میانگین فاصله کوتاه تر، سطح دسترسی بالاتر. منطقه شهری به مناطق کوچتری بر اساس تقسیمات مرکز ترافیک شهر مشهد تقسیم شده، و در هر زیرمنطقه i تعداد Pi نفر در آن زندگی می‌کنند و dij فاصله تا ایستگاه سوختگیری j است. این تابع هدف P-Median با f1 نشان داده شده و اینگونه نوشته می‌شود:

$$\text{Min } f_1 = \text{Min } \sum_{i=1}^{I} P_i \sum_{j=1}^{J} d_{ij}\, x_{ij} \qquad (1)$$

که در آن xij یک متغیر باینری (دودویی) است که اگر ایستگاه سوختگیری j زیرمنطقه i را تأمین کند مقدار 1 را می‌گیرد و در غیر این صورت 0 ؛ I کل تعداد زیرمنطقه ها، و J تعداد کل مناطق نامزدشده است.

معیار دوم برای تعیین موقعیت HRSها در نظر گرفتن کیلومترهای سفر هر خودرو (VKT) در محدوده هر محل j منتخب (VKTj) است. VKT برای هرکدام از محل های منتخب با محاسبه کیلومترهای خیابان های تحت پوشش هر ایستگاه و ضرب کردن این کیلومترها در متوسط سالانه ترافیک (رفت و آمد) روزانه (AADT) به‌دست می‌آید. برای نشان دادن این واقعیت که وسایل نقلیه به احتمال زیاد در ایستگاهی سوختگیری می‌کنند که به آن نزدیک ترند، معیاری به منظور اختصاص اوزان مختلف به VKT بر اساس فاصله با ایستگاه سوختگیری تبیین شده است. هدف از این معیار دادن اهمیت بیشتر به مکان های منتخب دارای VKT بالاتر است. این تابع هدف شدت ترافیک با f2 نشان داده می‌شود:

$$\text{Max } f_2 = \text{Max} \sum_{j=1}^{J} VKT_j\, y_j \qquad (2)$$

که در آن yj یک متغیر باینری است که مقدار 1 را می گیرد، اگر ایستگاه سوختگیری (محل نامزد) j برای تأمین هیدروژن انتخاب شود و در غیر این صورت مقدار0 را می‌گیرد.

این دو هدف را می توان در یک تابع با وزن دهی به هر تابع هدف با یک عامل وزن نرمال α و 1-α، مطابق کار هاجسون و روسینگ (1992) ترکیب کرد. با این حال، این نویسندگان از f2 برای جریان ترافیک پویا بهره می‌برند (هاجسون، 1990)، در حالی که در مدل ارائه شده در این بخش f2 تنها به بهینه سازی مناطق نامزدشده واقع در مناطق با جریان ترافیک بالا کمک می‌کند و از مناطق با جریان ترافیک پایین صرف نظر می‌کند. مدل های دارای فرض جریان پویا نیازمند دسترسی به داده های OD است. با این حال، این اطلاعات برای همه شهرها در دسترس نیست و کمتر در مقیاس های ملی یا منطقه ای موجود است (گودچایلد و نورونیا، 1987)؛ و اگرچه ماتریس OD را می‌توان برآورد کرد، هستند نویسندگانی (نیکلاس و همکاران، 2004) که هنوز در مورد فن آوری های در حال ظهور (مانند FCV) تردید دارند. به همین دلیل، این مقاله مدلی را ارائه می‌دهد که اطلاعات داده های OD را به عنوان ورودی نیاز ندارد، اما تنها نیازمند داده های شمارنده ترافیک است که به طور گسترده تر در دسترس قرار دارند.

از آنجا که هر دو هدف از لحاظ بُعد متفاوت هستند (f1 نفر-مسافت و f2 تعداد وسیله نقلیه-مسافت بر واحد زمان است) روش نرمال سازی حد بالا-پایین برای هر تابع هدف اعمال می‌شود:

$$\text{Min } f_1 = \text{Min } \alpha \frac{f_1 - f_{1,min}}{f_{1,max} - f_{1,min}} - (1-\alpha) \frac{f_2 - f_{2,min}}{f_{2,max} - f_{2,min}} \qquad (3)$$

که در آن fmin و fmax به ترتیب، مقادیر حداقل و حداکثر دسترسی در هر تابع هدف اند. این مدل با اهداف دوگانه را می‌توان برای تجزیه و تحلیل روابط بین دو تابع هدف مورد استفاده قرار داد.

این بهینه سازی دارای برخی محدودیت و قیدهاست. معادله (4) یک P-Median نرمال است که استانداردهای تقاضا در هرکدام از زیربخش های i را به طور کامل با برخی از HRSj های اختصاص داده شده محدود و مقید می سازد.

$$\sum_{j=1}^{J} x_{ij} = 1 \quad \forall i \tag{4}$$

معادله (5) یکی دیگر از محدودیت های P-Median استاندارد است که اجازه می‌دهد تقاضا از یک زیرمنطقه i به یک محل نامزد j منتقل شود.

$$x_{ij} \leq y_{ij} \quad \forall i,j \tag{5}$$

معادله (6) تعداد کل HRSها برای محل یابی را تعیین می‌کند (مشخص شده توسط P):

$$\sum_{j=1}^{J} y_j = P \tag{6}$$

در نهایت، معادله (7) برای نشان دادن این واقعیت است که ما می‌توانیم محل های مختلفی را نامزد کنیم که بالقوه تقاضاهای متداخل را پوشش می‌دهند. معادله (7) اینگونه نوشته می‌شود:

$$\sum_{j \in P_K} y_j \leq \frac{P}{J} (|P_K| - 1) + 1 \quad \forall k \tag{7}$$

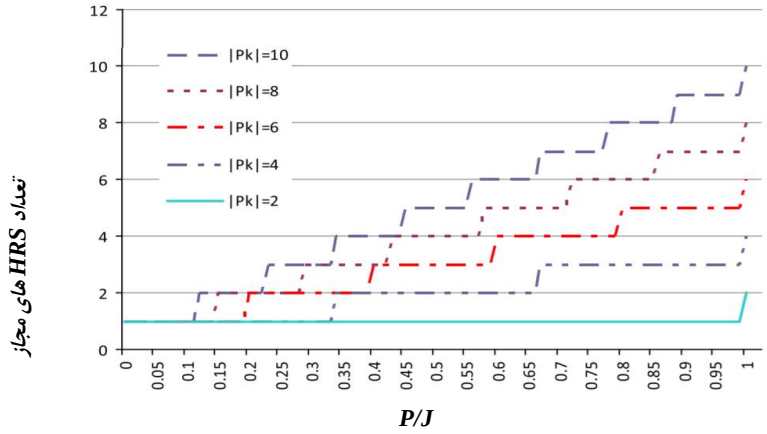
که در آن Pk نشان دهنده مجموعه ای از سایر مناطق نامزد است که بالقوه مناطق دارای تداخل تقاضا با محل نامزد k را پوشش می‌دهد و |PK| کاردینالیتی (تعداد اعضاء) آن مجموعه است.

معادله (7) کران بالایی برای تعداد HRSهاست که می‌توانند در این کمان قرار گیرند (به عبارت دیگر، این محدودیت مانع از هم پوشانی ایستگاه ها توسط ایستگاه های دارای تداخل تقاضاست)، کرانی که مرتبط با تعداد محل های نامزد، تعداد HRS های نیازمند جایگذاری، و تعداد ایستگاه های سوختگیری هیدروژن فعلی در قوس K است.

این قید، توزیع فعلی ایستگاه های سوختگیری را برای تعیین یک کران بالا برای تعداد ایستگاه های سوختگیری در نظر می‌گیرد که در آن قوس K تابعی از P و |PK| است. اینگونه اطلاعات حاصل از توزیع فعلی ایستگاه های سوختگیری با تعداد ایستگاه های سوختگیری موجود در کمان، در انطباق با فرض تداخل (هم پوشانی) است که در مدل نیز گنجانده شده است.

توجه داشته باشید، زمانی که مقدار P (مرحله اول انتقال به FCV) کم است، این قید منجر به انتخاب تنها یک ایستگاه در این کمان می‌شود. با این حال، زمانی که مقدار P بالاست (تقاضای بالا برای وسایل نقلیه هیدروژنی)، موقعیت بیش از یک HRS در آن کمان ممکن خواهد بود، زیرا ریسک هم پوشانی کمتر خواهد بود؛ و این به خاطر این واقعیت است که توزیع فعلی ایستگاه های سوختگیری اطلاعاتی را در مورد تعداد ایستگاه های سوختگیری که می توانند در قوس K علیرغم هم پوشانی قرار گیرند را در اختیار می گذارد. به طور مشابه، اگر مقدار |PK| و جریان ترافیک در قوس K بالا باشد، وجود بیش از یک HRS در این کمان ممکن خواهد بود. این موضوع یک مطالعه موردی خواهد بود؛ برای مثال شهری دارای فقط یک خیابان اصلی.

شکل1 حداکثر تعداد HRSهای مجاز برای مقادیر مختلف P/J را وقتی در کاردینالیتی HRSها تقاضای تداخلی وجود دارد را نشان می‌دهد. بدیهی است انواع دیگر توابع برای تعداد HRSهای بیشینه مجاز، هنگامی که تقاضای تداخلی وجود دارد را می‌توان در معادله (7) لحاظ کرد.



شکل(1) بیشینه تعداد HRSهای مجاز برای |Pk| ایستگاه با تقاضای تداخلی بوسیله معادله (7) برای مقادیر مختلف P/j.

در نهایت، مشابه با کار هاجسون و روسینگ (1992)، اشاره می کنیم که با ترکیب دو تابع هدف با عامل وزن آلفا، مدل ما این امکان را فراهم می‌کند تا دو مفهوم مرتبط با استقرار زیرساخت های سوختگیری هیدروژن برای حمل و نقل را بهینه کرد: دسترسی برای مصرف کنندگان و حجم هیدروژن فروخته شده.

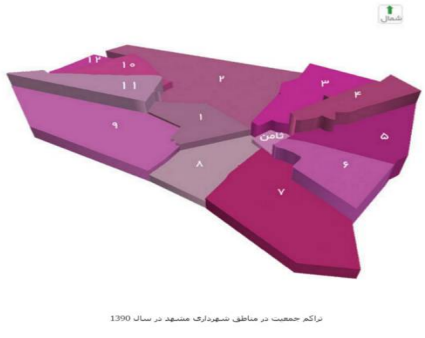
2-1.کاربرد عملی مدل مفهومی

مدل ارائه شده را برای شهر مشهد اعمال می‌کنیم. مشهد مرکز استان خراسان رضوی و دومین شهر پرجمعیت ایران با جمعیت و مساحتی در حدود 3 میلیون نفر و 3000 کیلومترمربع است (قسمت مرکزی شهر داخل کمربندی که در تصاویر نشان داده شده است).

برای محاسبه f1 (معادله (1) را ببینید)، مشهد با استفاده از مناطق و نواحی ترافیکی به زیرمنطقه هایی تقسیم شد. در مرحله بعد، فاصله از واحد زیرمنطقه (یا به عبارت دقیق تر، مراکز) تا ایستگاه های سوخت CNG که در سال 1391 برای مشهد وجود داشت محاسبه شد.(شکل 2 را ببینید) همانطور که قبلا بیان شد، این ایستگاه ها به عنوان مناطق نامزد بالقوه در نظر گرفته شد.

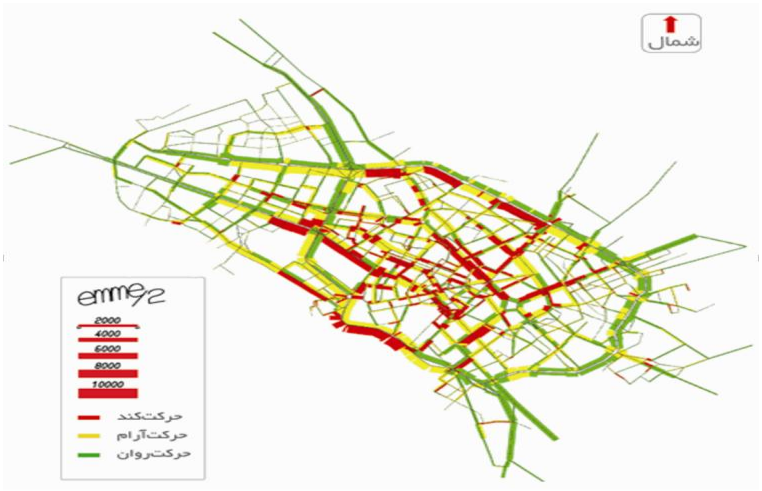
برای محاسبه f2 (معادله (2) را ببینید)، VKT برای هر محل منتخب با تعریف دوایر متحد المرکزی با شعاع 500 و 1000 متر اطراف هر ایستگاه و طبق فرایندهای به تفصیل تشریح شده در بخش 2 محاسبه شد. به VKT در دایره درونی وزن 1 داده شد، در حالی که برای VKT در منطقه بین دایره بیرونی و دایره داخلی وزن 0/5 اعمال شد. داده های سالانه ی متوسط ترافیک روزانه (AADT) در مشهد برای سال 1387 از مرکز مدیریت ترافیک مشهد به دست آمد (شکل 3 را ببینید).

آ)



ب)

شکل(2) آ- تقسیمات مناطق ترافیکی مشهد و ب- تراکم جمعیت منطقه های شهری مشهد در سال 90 (رنگ تیره تر به منزله تراکم جمعیتی بالاتر است)



شکل(3) کیلومترهایی که هر وسیله نقلیه در محدوده هر منطقه j منتخب سفر کرده (VKTj)

2.2. استخراج تمایلات رانندگان مشهدی

استفاده از مدل نیازمند اطلاعاتی در مورد رفتار سوختگیری رانندگان و تمایلاتشان با توجه به زیرساخت های سوختگیری هیدروژن است. برای به دست آوردن این اطلاعات، پژوهشی در زمستان 95 انجام شد. یک نمونه تصادفی از 230 راننده مشهدی انتخاب شد که تصمیم گیری شان در مورد سوختگیری از طریق تلفن همراه به تدریج مورد بررسی قرار گرفت. دسته بندی اولیه بر اساس جنس و سن بود.

پرسشنامه کوتاه بود، شامل تنها دوازده سؤال، پنج تا از آنها اجتماعی و جمعیت شناختی بود. سؤال اول (Q1) در مورد تمایل آشکار راننده برای شناسایی عوامل اصلی مؤثر بر انتخاب راننده در مورد محل سوختگیری بود. هدف از آن به دست آوردن مقدار آلفا بود (معادله (3) را ببینید). رفتار دیده شده از سوی رانندگان وسایل نقلیه گازسوز (با یک شبکه توسعه یافته مناسب از ایستگاه های سوختگیری) ممکن است با رفتار آینده استفاده کنندگان اولیه AFVها متقاوت باشد (با یک شبکه پراکنده)؛ (به عنوان مثال، کلی و کوبی 2013). با این حال، با توجه به توسعه بسیار ضعیف بازار AFV در غرب آسیا، ما این رفتار فعلی را نماینده رفتار آتی خریداران اولیه AFV در نظر می‌گیریم.

چندین پیش آزمون برای تدوین و فرموله کردن این پرسش ها لازم بود، چون بسیاری از عوامل با وزن و/یا روابط مختلف تابع و متبوع ممکن است بر انتخاب محل سوختگیری اثرگذار باشد. به همین دلیل است که گزینه های متعدد در Q1 آورده شده، از جمله "سایر موارد، لطفا مشخص کنید" پاسخ باز، و برخی سؤالات برای پیگیری در برخی گزینه ها گنجانده شد. با پاسخ به این سؤال، ما پاسخ دهندگان را

به رانندگان سوختگیری کننده در یک ایستگاه سوختگیری نزدیک به خانه و یا یک مقصد معمول، در بین راه به سمت یک مقصد، یک سفر کوتاه مختص سوختگیری، و یا ترکیبی ازدسته های قبلی تقسیم کردیم. جدول 1 گروه بندی نهایی حاصل از پاسخ به Q1 را نشان می-دهد.

جدول(1) عوامل اصلی اثرگذار بر انتخاب رانندگان در مورد محل سوختگیری

	فراوانی	درصد
نزدیکی	109	47/39
نزدیکی و خصوصیات ایستگاه سوختگیری	21	9/13
در مسیر	7	3/04
در مسیر بودن و خصوصیات ایستگاه سوختگیری	58	25/22
خصوصیات ایستگاه سوختگیری (به همراه سفر کوتاه)	33	14/35
سایر موارد	2	0/87

این جدول نشان می‌دهد که هیچ فردی عوامل "نزدیکی"و "در مسیر بودن" را با هم انتخاب نمی‌کند، گرچه همانطور که قبلا ذکر شد، انتخاب این ترکیب اجازه داده شده است. همچنین شایان ذکر است که ویژگی‌های خاص ایستگاه‌های سوختگیری (مانند کیفیت خدمات، مجهز بودن به دستگاه کارتخوان، وجود سرویس های اضافی یا خلوت بودن صف پمپ) به شدت توسط برخی رانندگان در انتخاب محل سوختگیری در نظر گرفته شده است. در واقع 14/35 درصد از اعضای نمونه اظهار داشتند که آنها سفری کوتاه مختص سوختگیری به یک ایستگاه سوختگیری خاص با توجه به ویژگی های آن انجام می‌دهند. با این حال، این عامل با استقرار ایستگاه های سوختگیری ارتباط ندارد اما با خود ایستگاه مرتبط است (البته خلوت بودن صف جایگاه به موقعیت آن نیز ارتباط پیدا می‌کند که از آن صرف نظر می کنیم چون با افزایش میزان پمپ ها تا حدودی قابل برطرف شدن است).

پس از حذف 2 مقدار صفر، دسته بندی های نشان داده شده در جدول 1 را می‌توان در سه دسته طبقه بندی کرد: کسانی که سوختگیری را نزدیک به مبدأ و یا مقصد انجام می دهند (57/02٪)، کسانی که سوختگیری را در مسیر انجام می‌دهند (28/51٪)، و کسانی که سفری کوتاه برای سوختگیری دارند (14/47٪). رانندگان گروه اول (نزدیکی) را میتوان با توجه به پاسخشان به نزدیکی به خانه (74/65٪) و نزدیکی به مقصد معمول (25/35٪) تقسیم کرد.

در نتیجه، پاسخ ها به Q1 نشان می‌دهد که در برنامه ریزی به منظور استقرار زیرساخت AFV برای شهر مشهد، نزدیکی به خانه باید شدّت وزنی بیشتری نسبت به سوختگیری در مسیر داشته باشد. برآورد مقدار آلفا می‌تواند 195/130 باشد، یعنی 0/67 .

بخش دوم پژوهش از شش پرسش درباره ترجیحات ابراز شده در مورد استفاده از سوخت های جایگزین و زیرساخت AFV تشکیل شده است. سؤالات اول و دوم این بخش (Q2 و Q3) برای شناسایی آن دسته از افرادی طراحی شده بود که تمایل به خرید AFV ها داشتند. از افراد پرسش شده بود، آیا آنها مایل به خرید یک AFV با عملکرد مشابه با خودروی معمولی گازسوز و بنزینی اما غیر آلاینده هستند (Q2). بنابراین، AFVها به عنوان یک جایگزین برجسته خودروهای معمولی در نظر گرفته شدند. با وجود آن، 19 پاسخ دهنده خرید AFV را نپذیرفته یا این سؤال را پاسخ ندادند. این افراد از پاسخ به سؤال بعدی معاف شدند. این افراد در پاسخ به سؤال بعدی (Q3) در اکثر موارد این توضیح را بیان کردند که در مورد استفاده از سوخت های جایگزین مطمئن نبوده و از عملکرد خودروهای معمولی راضی اند.

چهار پرسش آخر (Q4-Q7) بر عوامل "نزدیکی ایستگاه سوختگیری جایگزین (ARS) به خانه" و "تعداد ایستگاه های سوختگیری جایگزین (ARSها) در شهر" تمرکز داشت. برای هر عامل، هر راننده می بایست اهمیت آن را در مقیاس لیکرت 7 تایی مشخص می کرد (Q4 و Q6) که در آن 1 یعنی مهم نیست و 7 به مفهوم بسیار مهم می باشد که به ترتیب حداکثر و حداقل مقدار مطلوبیت این عوامل برای خرید یک AFV را اعلام کردند (Q5 و Q7). توجه داشته باشید که Q7 باید محتاطانه از رانندگان پرسیده می شد؛ زیرا رانندگان به احتمال زیاد با تعداد فعلی ایستگاه های موجود سوختگیری در شهر آشنایی کامل ندارند، و یک پیش زمینه ذهنی معتبر و مرجعی برای تعیین حداقل جایگاه مورد نیاز نداشته باشند (انحراف معیار بسیار بالای پاسخ ها مؤید این مطلب است). با این حال، این پاسخ ها نشانه ای است از اعدادی که رانندگان در ذهن خود دارند برای حرکت به سمت AFV ها.

جدول(2) خلاصه آماری پرسش های ۴،۵،۶،۷

		تعداد پاسخ	میانگین	میانه	انحراف معیار	انحراف چارکی	مقدارP- نمره z برای چولگی	مقدارP- تست شاپیرو ویلک
نزدیکی ARS به منزل	سؤال4- اهمیت (مقیاس 1-7)	211	6/379	7	1/195	1	0/00	0/00
	سؤال5- بیشینه مقدار مورد نیاز (دقیقه)	209	9/699	10	5/0566	5	0/00	0/00
تعداد ARSها در شهر	سؤال6- اهمیت (مقیاس 1-7)	211	6/275	7	1/401	1	0/00	0/00
	سؤال7- کمینه مقدار مورد نیاز	173	21/353	10	45/329	17/5	0/00	0/00

ستون 4 تا 7 در جدول 2 برخی شاخص‌های مرکزی و پراکندگی برای این چهار متغیر را نشان می دهد. ستون 8 و 9 مقدار P را برای نمره Z چولگی و آزمون های تعیین نرمال Shapiro-Wilk گزارش می‌دهد. مجموعه داده ها نشان دهنده چولگی پاسخ ها (در سطح معناداری 1٪) با برخی داده های پرت است. در این موارد، میانه و میانگین چارکی (IQR) اغلب به ترتیب به عنوان شاخص‌های مرکزی و پراکندگی استفاده می‌شود، چون آنها در برابر داده های غیر معمول و دور اثرپذیری کمتری دارند. به این دلیل، میانه در بخش های بعد به عنوان معیار مرکزی داده ها در مورد تمایلات استفاده خواهد شد.

پاسخ به سوالات Q4 و Q6 نشان می‌دهد که تفاوت بین اهمیت دو عامل در نظر گرفته شده از نظر آماری قابل توجه نیست. رانندگان مشهدی نزدیکی ایستگاه سوخت به خانه را به اندازه تعداد پمپ های موجود در شهر مهم می‌دانند، و البته هر دو عامل برای رانندگان بسیار مهم است.

در نهایت بخش سوم پرسش‌ها شامل 5 سؤال اجتماعی و جمعیت شناختی است.

3.2 محاسبات مدل مفهومی

مدل برای مقادیر مختلف P و آلفا بهینه سازی شد. طیف مقادیر P از 2 (حداقل مقدار ARSها برای تضمین در دسترس بودن سوخت در شهر با یک ایستگاه پشتیبان) تا 10 (مقدار میانه ی اعداد ارائه شده توسط رانندگان در این نظرسنجی) است. (جدول 2 را مشاهده کنید). در مورد آلفا، 9 حالت در نظر گرفته شد؛ از 0 (بیشترین اهمیت به شدت ترافیک)، تا 1 (اهمیت بیشتر به نزدیکی به خانه): صفر، 0/1، 0/25، 0/33، 0/5، 0/67، 0/75، 0/9 و یک.

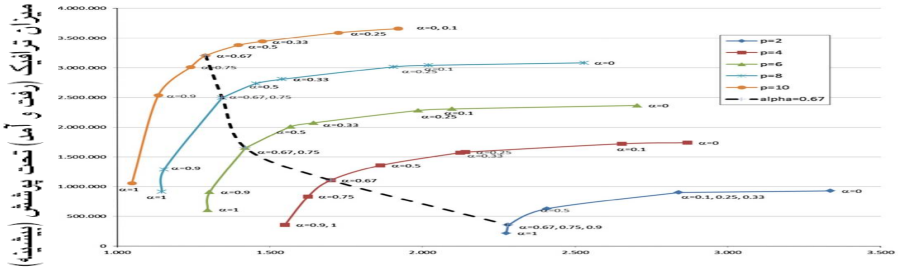
برای مقادیر کوچکP (2و4)، مسأله بهینه سازی انجام نشد، زیرا حدس ما و پیش بینی با توجه به عملکرد پمپ های گاز این است که گستردگی شهر در ابتدای امر نیز نیازمند بیش از 4 ایستگاه باشد. (حالت آلفای صفر و یک هم به دلیل در نظر نگرفتن مطلق حالت دیگر کنار گذاشته شد و 7 حالت آلفا بررسی شد.)

جدول(3) ایستگاه های منتخب سوخت‌گیری به عنوان تابعی از آلفا و پی

ایستگاه های سوختگیری انتخابی ▽	f_2	f_1 الف	α	P
29-19-17-11-6-1	23,066,781	20,976	0/1	6
28-26-18-12-4-1	22,452,502	19,896	0/25	6
25-19-17-13-6-2	22,351,230	16,436	0/33	6
29-19-18-11-6-1	22,339,420	15,685	0/5	6
29-26-19-15-6-2	16,506,237	14,307	0/67	6
26-23-19-12-6-3	15,908,485	14,208	0/75	6
29-22-15-10-5-1	12,421,700	13,038	0/9	6
29-27-22-19-16-11-4-1	31,320,325	20,205	0/1	8
29-27-23-19-16-11-3-1	30,355,469	19,147	0/25	8
29-27-22-19-16-11-5-2	28,112,215	15,408	0/33	8
29-26-22-19-16-11-4-2	25,109,897	14,454	0/5	8
29-27-22-20-18-11-7-3	24,895,263	13,449	0/67	8
29-27-22-20-18-11-4-1	24,340,891	13,449	0/75	8
29-27-22-20-16-10-4-2	23,778,895	11,558	0/9	8
29-26-22-17-15-12-9-7-3-1	30,524,859	19,204	0/1	10
29-26-22-18-14-12-9-7-4-1	28,856,892	17,257	0/25	10
29-26-22-18-15-12-10-6-3-1	27,359,456	14,771	0/33	10
29-25-23-18-15-12-9-7-3-1	25,389,698	13,979	0/5	10
29-27-22-18-16-12-9-5-3-1	25,256,895	12,903	0/67	10
29-26-22-18-16-12-9-7-3-1	25,203,159	12,403	0/75	10
29-26-22-18-15-12-9-6-3-1	24,105,782	11,349	0/9	10

الف- متوسط فاصله (به متر)

ب- شکل 6 را ببینید (30 ایستگاه CNG در سال 91)



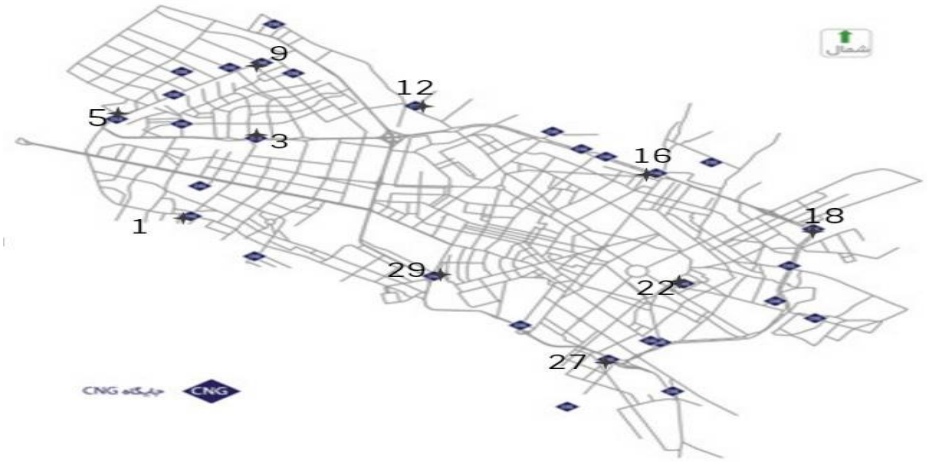
شکل(4) منحنی های بهینه پارتو برای مقادیر مختلف P. نمادها برگزفته از مدل بهینه سازی است، خطوط ترسیمی برای سهولت تعقیب روند است.

برای P=6 و مقادیر بیشتر، تعداد ترکیبات بیشتر از 20 میلیون است، که محاسبه تمام ترکیبات مشکل است. در این موارد، مشکل بهینه سازی با مدل قالبگیری شبیه سازی شده حل شد (پرس و همکاران،2007). قالبگیری شبیه سازی شده1 یک روش فرا ابتکاری است. قابلیت کلیدی روش قالبگیری شبیه سازی شده آن است که اجازه می‌دهد تا از اکسترمم های نسبی با مراحلی به سمت یافتن اکسترمم مطلق رهنمون می‌شود (هندرسون، 2003). ممکن است از یک بهینه نسبی در انتظار پیدا کردن اکسترمم مطلق صرف نظر کرد.

روش قالبگیری شبیه سازی شده برای P از 6 تا 10 بررسی شد. به این منظور، همه ترکیبات را برای هر مورد ایجاد کرده و موردی که تابع هدف را کمینه می‌کرد، انتخاب کردیم. نتایج یکسانی به دست آمد، که نشان می‌دهد مدل قالبگیری شبیه سازی شده، اکسترمم مطلق را در تمام موارد یافته است. برای پیاده سازی آن، PK (معادله 7 را ببینید) با مناطق ترافیکی همگن تعریف شده توسط مرکز کنترل ترافیک مشهد (1390) تعریف شد.

اطلاعات مربوط به رفتار سوختگیری و ترجیحات مصرف کنندگان بالقوه، داده های ورودی اصلی برای طراحی یک شبکه کارآمد HRS است. این اطلاعات وابسته به منطقه ای است که در آن زیرساخت سوختگیری هیدروژن مستقر خواهد شد. بررسی انجام شده در مشهد نشان داد که نزدیکی به خانه عامل اصلی مؤثر بر رفتار فعلی سوختگیری رانندگان مشهدی (غیر تاکسیران) است.

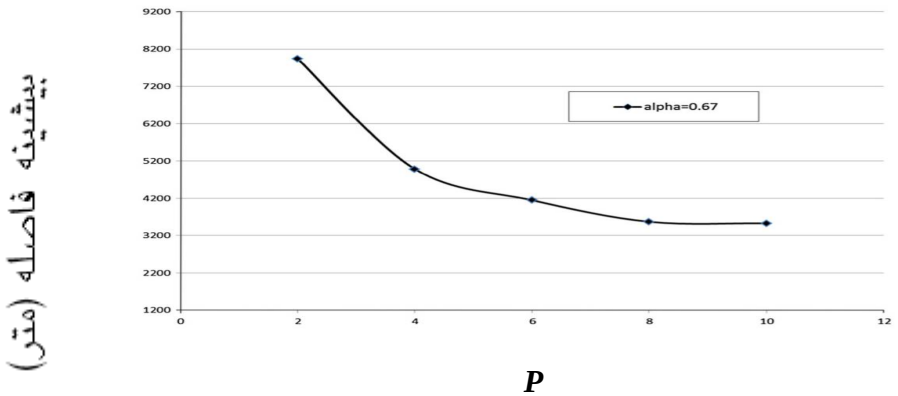
علاوه بر این، رانندگان مشهدی اظهار داشتند که تعداد HRSها در شهر و نزدیکی آنها به خانه هایشان دو عاملی هستند که آنها در تصمیم گیری هایشان برای تغییر خودرو خود به خودروهای با سوخت سلولی و یا هر AFV دیگر مورد توجه قرار می دهند. مقدار متوسط (میانه آماری) مجاورت مورد نیاز 10 دقیقه رانندگی است. با توجه به تعداد ARSها، پاسخ دهندگان مقدار متوسط (میانه) 10 را گزارش کردند، البته پاسخ به این سؤال برای آنها تقریبا دشوار بود (پاسخ به Q7 را در جدول 2 ببینید). همانطور که قبلا ذکر شد، پاسخ به این سؤال آخر را نباید به عنوان برآورد حداقل تعداد HRS مورد نیاز در مناطق مشهد در نظر گرفت، امّا می‌توان آن را به عنوان ذهنیت رانندگان قلمداد کرد.



شکل(5) ایستگاه‌های سوختگیری منتخب (P=10 و α=0/67)

جدول 3 نتایج حاصل برای مقادیر مختلف متناظر P و آلفا را نشان می‌دهد. مطابق انتظار، هرچه P بالاتر، متوسط فاصله (f1) پایین تر و VKT یا (f2) بالاتر. علاوه بر این، برای مقادیر مختلف P زمانی که آلفا ثابت نگه داشته شود، بین هر دو هدف نیز ارتباطی وجود دارد. این رفتار را همچنین در شکل 4 می‌توان دید. این شکل منحنی های مختلف بهینه سازی-پارتو را برای مقادیر مختلف P نشان می‌دهد. هر منحنی با استفاده از نقاط به دست آمده از مقادیر آلفا رسم شده است.

همانطور که در شکل 5 از روی نتایج حاصل از جدول 3 نشان داده شده است، مکان های منتخب، طرحی دارای تداخل را نشان نمی دهد و از هم پوشانی تقاضا جلوگیری می‌کند. این امر به ویژه برای مواردی که در آن مقدار آلفا نزدیک صفر است چشمگیرتر می‌شود که به لطف وارد ساختن معادله 7 در مدل است.



شکل(6) بیشینه فاصله (متر) به عنو ان تابعی از P. خطوط ترسیمی برای تعقیب مسیر و رصد چشمی روند تغییرات است.

اطلاعات به دست آمده از این نظرسنجی در حال حاضر برای تجزیه و تحلیل نقاط خاص استفاده می شود. خط چین شکل 4 مجموعه ای از نقاط غیر برجسته با آلفای 0/67 است، مقدار آلفای برآورد شده از پژوهش میدانی حاصل شده است. این خط یک منحنی مقعّر با شیب نزولی است که در آن تغییر در مقدار f1 وقتی که P افزایش می‌یابد، در سمت چپ منحنی کمتر از سمت راست منحنی است.

شکل4 همچنین نشان می‌دهد که هر چه مقدار P بالاتر باشد، مقدار f2 بیشتر بهبود پیدا می کند و زمانی می توان به بهترین جواب آن رسید که اهمیت بیشتری (بین 1 تا 0/67) به هدف f2 تخصیص داده شده باشد؛ یعنی نقطه به قعر نزدیک تر باشد.

در نهایت، بر اساس نتایج این تحقیق در پرسش های Q1 و Q5، می توان انتخاب P = 10، آلفا = 0/67 را برگزید. شکل 5 محل و موقعیت ایستگاه های سوختگیری انتخابی را برای P = 10 و آلفا = 0/67 نشان می‌دهد.

این پژوهش همچنین اطلاعاتی در مورد حداکثر فاصله از خانه تا نزدیکترین ایستگاه (زمان رانندگی به دقیقه) را نیز از سوی پاسخ دهندگان (Q5) ارائه می‌کند. ما می‌توانیم این اطلاعات را برای انجام یک تجزیه و تحلیل پس از بهینه سازی (ارزیابی) استفاده کنیم. فرض کنید برای مثال نقطه P = 10 و آلفا= 0/67 باشد؛ برای این نقطه حداکثر فاصله از هر منطقه i به نزدیکترین ایستگاه آن تقریبا 6 کیلومتر است. با این حال، پس از حذف نقاط دور افتاده، که دربرگیرنده فقط نیم درصد از کل جمعیت مشهد است، آن فاصله تقریبا 4 کیلومتر می‌شود. مقدار میانه (و میانگین) پاسخ Q5 حدود 10 دقیقه است. حداقل سرعت متوسط مورد نیاز در یک شهر برای پوشش این فاصله در 10 دقیقه حدود 20 کیلومتر بر ساعت است، که کمتر از سرعت متوسط برآورد شده 21/78 برای مشهد است که توسط مرکز مدیریت ترافیک2 ارائه شده است. بنابراین، راه حل پیشنهادی می‌تواند محدودیت فاصله اعلام شده توسط پاسخ دهندگان را برآورده سازد. در غیر این صورت، حداقل مقدار P (با شرط P> 10) با قید فاصله (با توجه به سرعت متوسط در شهر) با آلفا 0/67 باید انتخاب شود. شکل 6 حداکثر فاصله برای مقادیر مختلف P مفروض در این کار، پس از حذف منطقه های دور افتاده را نشان می دهد. توجه داشته باشید که این کار با مسأله هم پوشانی معادل نیست. مدل ارائه شده شامل یک تابع هدف P-Median است، که به حداکثر کردن هم پوشانی نمی-انجامد. مطابق کار هاجسون و روسینگ (1992)، ما فرض می کنیم که مدل P-Median به بهترین وجه نشانگر خدمات مطلوب به رانندگان در سفر از خانه است، به خصوص اگر آنها پیشگامان استفاده از AFVها باشند.

نتیجه‌گیری

هدف از این مقاله ارائه یک مدل بهینه سازی برای برنامه ریزی راهبردی استقرار HRSها در یک شهر در صورت موجود نبودن یا عدم دسترسی به اطلاعات OD است. این مدل دو تابع هدف با وزن های متغیر را در نظر میگیرد: حداکثر کردن ترافیک (تردد) تحت پوشش ایستگاه های سوخت انتخابی و به حداقل رساندن متوسط فاصله ساکنان این شهر به نزدیکترین HRS. چون داده های OD اغلب ناشناخته بوده و یا در دسترس نیستند، مدل پیشنهادی از تجمع ایستگاه ها در مناطق دارای بالاترین ترافیک با اعمال قیودی خاص جلوگیری می‌کند. این قید تعداد HRSهایی که باید در یک محل قرار گیرند را به عنوان تابع به تعداد کل ایستگاه هایی که باید در شهر ایجاد شوند و تعداد ایستگاه های فعلی در مناطق شهر مقید می‌سازد.

این مدل برای شهر مشهد استفاده شد. این کار حاصل نظرسنجی از بیش از 200 راننده مشهدی (غیر تاکسیران) در مورد رفتار سوختگیری فعلی و ترجیحاتشان درباره طراحی یک شبکه سوختگیری جایگزین از نقطه نظر حداکثر فاصله لازم از خانه تا جایگاه برای سوختگیری و تعداد ایستگاه های موجود و لازم در شهر است. البته، نتایج بررسی مختص شهر مشهد بوده و باید با احتیاط برای سایر شهرها استفاده شود، اما می‌توان برای شهرهای دیگر با ملاحظهٔ دقیق تر گرایشات و تمایلات سوختگیری رانندگان در آن شهر به شکل بهتری نیز برآورد شود. همچنین شایان ذکر است که مدل، بسیاری از رفتارهای سوختگیری مختلف را که ممکن است با طراحی شبکه تحت تأثیر قرار گیرد را در نظر می گیرد.

منابع

پورتال مرکز مدیریت ترافیک شهر مشهد: https://traffic.mashhad.ir

Achtnicht, M., Bühler, G., Hermeling, C., ۲۰۱۲. The impact of fuel availability on demand for alternative-fuel vehicles. Transport. Res. Part D ۱۷ (۳), ۲۶۲–۲۶۹.

Brey, J.J., Contreras, I., Carazo, A.F., Brey, R., Hernández-Díaz, A.G., Castro, A., ۲۰۰۷. Evaluation of automobiles with alternative fuels utilizing multicriteria techniques. J. Power Sources ۶۹, ۲۱۳–۲۱۹.

Bunzeck, I., Backhaus, J., Hoevenaars, B., ۲۰۱۰. Building a hydrogen refuelling infrastructure in the Netherlands: influencing factors from the car drivers' perspective. In: ۱۸th World Hydrogen Energy Conference.

European Commission, ۲۰۱۱. Road map to a single European transport area – towards a competitive and resource efficient transport system. White Paper, European Commission, Brussels.

Goodchild, M., Noronha, V., ۱۹۸۷. Location–allocation and impulsive shopping in the case of gasoline retailing. In: Ghosh, A., Rushton, G. (Eds.), Spatial Analysis and Location-Allocation Models. van Nostrand Reinhold, New York, pp. ۱۲۱–۱۳۶.

Hodgson, M.J., ۱۹۹۰. A flow capturing location–allocation model. Geograph. Anal. ۲۲, ۲۷۰–۲۷۹.

Hodgson, M.J., Rosing, K.E., ۱۹۹۲. A network location-allocation model trading off flow capturing and p-median objectives. Ann. Oper. Res. ٤۰, ۲٤۷–۲٦۰.

Kelley, S., Kuby, M., ۲۰۱۳. On the way or around the corner? Observed refueling choices of alternative-fuel drivers in Southern California. J. Transport Geogr. ۳۲, ۲٥۸–۲٦۷.

Kitamura, R., Sperling, D., ۱۹۸۷. Refueling behavior of automobile drivers. Transport. Res. Part A ۲۱ (۲), ۲۳٥–۲٤٥

Lin, Z., Ogden, J., Fan, Y., Chen, C., ۲۰۰۸. The fuel-travel-back approach to hydrogen station siting. Int. J. Hydrogen Energy ۳۳, ۳۰۹٦–۳۱۰۱.

Nicholas, M., ۲۰۱۰. Driving demand: what can gasoline refueling patterns tell us about planning an alternative fuel network? J. Transport Geogr. ۱۸, ۷۳۸– ۷٤۹.

Nicholas, M.A., Handy, S.L., Sperling, D., ۲۰۰٤. Using geographic information systems to evaluate siting and networks of hydrogen stations. Transport. Res. Rec. ۱۸۸۰, ۱۲٦–۱۳٤.

Riemann, R., Wangb, D.Z.W., Busch, F., ۲۰۱٥. Optimal location of wireless charging facilities for electric vehicles: flow-capturing location model with stochastic user equilibrium. Transport. Res. Part C ٥۸, ۱–۱۲.

Sperling, D., Kitamura, R., ۱۹۸٦. Refueling and new fuels: an exploratory analysis. Transport. Res. Part A ۲۰ (۱), ۱٥–۲۳.

Toyota, ۲۰۱٤. http://toyota.com/fuelcell/fcv.html (November ۲۰۱٤)