فصلنامه مدیریت راهبردی در سیستم های صنعتی (مدیریت صنعتی سابق)
دانشگاه آزاد اسلامی واحد سنندج
سال بیستم/ شماره ۷۱ / بهار ۱۴۰۴

ارائه مدل ریاضی برای مکان‌یابی ایستگاه‌های دوچرخه سواری تحت شرایط عدم قطعیت

مهدی یوسف نژاد عطاری (نویسنده مسئول)
گروه مهندسی صنایع، واحد بناب،دانشگاه آزاد اسلامی، بناب، ایران
E-mail: mahdi_108108@yahoo.com
شهرام بنایی
گروه ریاضی، واحد بناب، دانشگاه آزاد اسلامی، بناب ، ایران
فاطمه احمد
گروه مهندسی صنایع، موسسه غیر انتفاعی سراج، تبریز، ایران
زهره خلیل پور شیراز
گروه مهندسی صنایع، واحد بناب، دانشگاه آزاد اسلامی، بناب، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۱/۲۱ ❋ تاریخ پذیرش ۱۴۰۳/۰۷/۱۵

چکیده

با توجه به ضرورت توسعه پایدار و اهمیت روزافزون آن در مسائل شهری، امروزه در شهرهای مختلف دنیا، دوچرخه به عنوان وسیله نقلیه اصلی در کنار پیاده‌روی روز به روز مورد توجه بیشتری قرار گرفته است. در این پژوهش یک مسئله مکان‌یابی تحت شرایط عدم قطعیت ارائه شده است. برای نزدیک شدن به شرایط دنیای واقعی، تقاضای مشتریان و هزینه‌های متغیر به صورت غیر قطعی در نظر گرفته شده‌اند. در برخورد با عدم قطعیت پارامترهای مسئله از رویکرد p–استوار استفاده شده است. نوآوری این پژوهش افزودن عدم قطعیت p–استوار به مسئله مکان‌یابی ایستگاه‌های دوچرخه‌سواری می‌باشد. مدل ریاضی مسئله با بهره‌گیری از سناریوهای مختلف، توسط مثال‌های عددی و نرم‌افزار گمز حل و اعتبارسنجی شده است. نتایج حاصل از حل مسئله نمونه و تحلیل حساسیت روی مقادیر مختلف ضریب تأسف، نشان می‌دهد با اندک افزایش مقدار ضریب تأسف، هزینه‌های ساخت کاهش یافته و به جواب بهینه نزدیک می‌شود.

کلمات کلیدی: ایستگاه‌های اشتراک دوچرخه سواری، رویکرد p–استوار، مکان‌یابی، عدم قطعیت.

۱-مقدمه

در سال‌های اخیر، برنامه‌ریزان حمل و نقل شهری بیشتر برروی سیاست‌های استفاده از دوچرخه به‌عنوان یک جایگزین برای استفاده فشرده از ماشین تمرکزکرده‌اند. در غالب مدل‌های مطرح در حوزه مکان‌یابی ایستگاه‌های دوچرخه سواری، نقاط تقاضا و هزینه از قبل مشخص و تعریف شده است. در حالی که در بسیاری از مسائل دنیای واقعی، ممکن است چنین موضوعی قابل قبول نباشد. مدلسازی دنیای واقعی، معمولا متأثر از پارامترهای مختلفی است که در اغلب اوقات یافتن مقادیر دقیق آن‌ها، عملاً امکان پذیر نبوده و در نظرگیری عدم قطعیت پارامترها بسیار حائز اهمیت است.

تقاضا، انواع هزینه‌ها، ظرفیت‌ها و ... مواردی هستند که در طی زمان در مسائل مکان‌یابی ایستگاه‌های دوچرخه سواری تغییر می‌نمایند. در نتیجه بررسی و توسعه مدل مکان‌یابی ایستگاه‌های دوچرخه سواری در حالت عدم قطعیت، یکی از شکاف‌های تحقیقاتی موجود در این زمینه تلقی می‌شود که در این پژوهش سعی شده است این خلاء مورد بررسی قرار گیرد.

حمل و نقل یک عامل مهم و تعیین کننده در تمامی جنبه‌های حیات شهری است. از سوی دیگر با افزایش آلودگی هوا به علت تردد بیش از حد وسائل نقلیه موتوری، ترافیک سنگین در خیابان‌های شهر و پراکندگی مطلوب ایستگاه‌های دوچرخه و دسترسی راحت به آن‌ها می‌تواند باعث افزایش استفاده از این وسیله نقلیه شود؛ لذا هدف این پژوهش کمینه کردن هزینه‌های ساخت ایستگاه‌های دوچرخه عمومی با استفاده از مدلسازی ریاضی و نرم افزار گمز می‌باشد، که با توجه به احتمالی بودن داده‌های ورودی، این مسئله به وسیله بهینه‌سازی استوار حل شده است.

در این پژوهش سعی شده است با توجه به اهمیت مکان‌یابی ایستگاه‌های دوچرخه در حمل و نقل و ترافیک شهرها، به ارائه مدل برنامه‌ریزی ریاضی برای مکان‌یابی آن‌ها پرداخته شود. در مدلسازی مکان‌یابی ایستگاه‌های دوچرخه، ناحیه منطقه‌بندی شده است، همچنین تقاضا برای هر منطقه مشخص نبوده و غیر قطعی بوده و حداقل ظرفیت، حداکثر ظرفیت و میزان موجودی اولیه دوچرخه‌ها در هر ایستگاه، معلوم می‌باشد. کاربران به اطلاعات دوچرخه در ایستگاه‌ها آگاهی دارند. (برای مثال، کاربران می‌توانند از برنامه‌های تلفن همراه برای کسب آگاهی در مورد تعداد دوچرخه‌ها بدون درنگ در هر ایستگاه، استفاده کنند). برای حل این مسئله یک مدل ریاضی با هدف کمینه کردن هزینه کل ساخت ایستگاه‌های دوچرخه سواری ارائه می‌شود که با توجه به مفروضات ذکر شده و برای نزدیک شدن به شرایط دنیای واقعی از شرایط عدم قطعیت و بهینه‌سازی استوار بهره برده که برای حل این مدل از نرم افزار گمز استفاده می‌شود.

دوچرخه وسیله نقلیه‌ای است سبک و دارای دو چرخ که به کمک نیروی عضلات پا حرکت می‌کند و دارای انواع مختلفی است. این وسیله نقش غیر قابل انکاری در توسعه فعالیت‌های گردشگری، افزایش ارزش زمین و اشغال کمتر فضای شهری، افزایش اشتغال و تجارت محلی ایفا می‌کند (Paydar et al., 2021). به عبارت دیگر می‌توان گفت دوچرخه، ماشین ساده‌ای است که تقریباً هرکس می‌تواند سازوکار، طرز کار و سوار شدن آن را به راحتی فرا گیرد. به علاوه به علت ارزان بودن نسبی آن، غالب افراد جامعه قادرند آن را تهیه کنند و استفاده از هیچ وسیله نقلیه دیگری به سادگی دوچرخه نیست و برای گروه‌های خاصی از جامعه نظیر نوجوانان یا افراد کم درآمد، دوچرخه شاید تنها وسیله‌ای باشد که بتواند به کار رود. دوچرخه از نظر مصرف انرژی با صرفه‌ترین وسیله نقلیه است و انرژی که انسان برای راندن آن طی مسافتی تقریباً معادل شش‌صد کیلومتر صرف می‌کند فقط برابر با انرژی یک لیتر بنزین می‌باشد. تجربه نشان داده است که برای پیمودن مسافت‌های کوتاه در شهرها تا شش کیلومتر بهترین وسیله می‌باشد (Roess, 2004). دوچرخه تقریباً هیچ گونه اثر نامطلوبی بر محیط زیست ندارد و استفاده از آن به سلامت افراد نیز کمک می‌کند. متأسفانه با وجود همه مزایایی که این وسیله دارد استفاده از آن به عنوان یک وسیله مؤثر در حمل و نقل شهری فراموش شده است و در غالب شهرها میزان استفاده از آن سیر نزولی دارد.

الف) ادبیات موضوعی

سابقه تاریخی استفاده از دوچرخه در جهان پس از اختراع دوچرخه در سال ۱۸۳۰ نخست این وسیله نقلیه به عنوان وسیله تفریحی مورد توجه همگان قرار گرفت ولی با تکامل تدریجی آن، کم‌کم از وسیله تفریحی- ورزشی به وسیله نقلیه‌ای که سرعت جابه‌جایی فردی را به چندین برابر سرعت حرکت پیاده رسانده بود، برای رفت و آمد در سطح شهرها مبدل شد. با آغاز قرن بیستم و پیدایش اتومبیل به عنوان رقیبی برای دوچرخه، تردد با دوچرخه کاهش یافت. گسترش شهرها و تغییر نظام کاربری‌ها،

مطابق با نگرش‌های نوگرایانه، رکورد استفاده از آن را تشدید کرد. سرانجام در دهـه۱۹۳۰، مسـئله بحـران سـوخت و انـرژی در جهان به ویژه در اروپا از یک سو و توجه به مسائل زیست محیطی از طرف دیگر موجب گرایش مجدد به استفاده از ایـن وسـیله نقلیه در سطح شهرها شد. موضوعاتی از قبیل ایجاد شهر سالم و توسعه پایدار در دهـه ۱۹۸۰ بـه تعـدیل در اسـتفاده از اتومبیـل شخصی منجر شد و تردد با دوچرخه را به منزله بخشی از سیستم حمل و نقل درون شهری، رسمیت بخشید (Litman et al., 2015). در بسیاری از شهرهای جهان، دوچرخه به عنوان وسیله‌ای مفید در گذران اوقات فراغت، گردشگری، خرید، کار، ورزش، تحصیل و .. مورد استفاده قرار می‌گیرد. سابقه تاریخی استفاده از دوچرخه در ایران و ورود دوچرخه بـه ایـران بـه قبـل از جنـگ جهانی دوم برمی‌گردد. ولی به لحاظ محدود بودن تعداد آن، وسیله گران قیمتی بود که تنها عـده‌ای محـدود مـی‌توانسـتند از آن استفاده کنند. بعد از جنگ جهانی دوم واردات دوچرخه افزایش یافت و قیمت آن نیـز کـاهش یافـت. حتـی در برخـی از شـهرها، مسیرهای ویژه دوچرخه هم در خیابان‌ها احداث گردید. بنابراین، در ایران دوچرخه به جز مقطعی کوتاه آن هـم در بـدو ورود، بـه عنوان وسیله‌ای تجملی و تفریحی مفهومی نداشت. با رشد سریع افزایش تعداد اتومبیل و نبود ایمنی لازم برای دوچرخه سواران و کم توجهی مسئولان در سطوح مختلف برنامه‌ریزی، موجب کاهش اهمیت آن گردید (Yiannakis, 1989). علی رغم این که در بسیاری از شهرهای مهم جهان مسیرهای ویژه دوچرخه و پیاده پیش‌بینی شده است، ولی در اکثر خیابان‌ها در شهرهای ایران، گسترش تعداد اتومبیل‌ها، افزایش سرعت تردد شهری، عدم توجه به نقش فضاهای تعاملی و فضاهای انسان‌گرا موجـب کـاهش شدید استفاده از این وسیله نقلیه پاک شده است. این در حالی است که در سال‌های اخیر با افزایش قیمت سوخت و رشد فزاینـده آلودگی‌های زیست محیطی، فعالیت‌های پراکنده‌ای در این زمینه در برخی از شهرها انجام شده است.

۱. مسیرهای انحصاری: این مسیرها، مستقل و مجزا از مسیر سایر وسائل نقلیه موتوری می‌باشند و صـرفاً بـرای تـردد دوچرخـه ایجاد می‌شوند. این مسیرها در پارک‌ها، مناطق تفریحی، مناطق خارج از شهر و شهرهای جدید که محدودیت مکانی وجود نـدارد و امکان جداسازی ترددها فراهم است، احداث می‌شود.

۲. مسیرهای نیمه انحصاری: در شرایطی که حجم تردد دوچرخه کم و ایجاد مسیرهای انحصـاری بـا محـدودیت مکـانی مواجـه باشد، از مسیرهای نیمه انحصاری استفاده می‌شود. این نوع مسیرها در مجاورت و به موازات نوار سواره رو احداث شـده و توسـط موانع فیزیکی مانند اختلاف ارتفاع دوچرخه رو و سواره رو، جدول گذاری و ایجاد دیواره، نرده یا حاشـیه از مسـیر سـواره رو جـدا می‌شود.

۳. مسیرهای مختلط: این نوع مسیر به صورت مختلط برای تردد مشترک دوچرخه و وسایل نقلیـه موتـوری مـورد اسـتفاده قـرار می‌گیرد و مسیر حرکت به وسیله علائم در کف‌سازی و تابلوهایی مشخص می‌شود.

۴. مسیرهای مشترک پیاده و دوچرخه: استفاده مشترک عابران پیاده و دوچرخه سواران از فضـای مشـترک، زمـانی امکـان‌پـذیر خواهد بود که حجم تردد آن دو نسبت به فضای تخصیص یافته کافی باشد. در مواردی‌که حجم تردد سواره نسـبت بـه ظرفیـت عملی خیابان زیاد باشد، یا عرض نوار سواره رو، اجازه ندهد تا یک نوار اضافی برای تردد دوچرخه در جوار سواره رو احداث شـود، یا اینکه کاهش عرض نوارهای عبوری سواره رو مقدور نباشد، یا به علت سرعت وسیله‌های نقلیه موتوری، ایمنی تـردد دوچرخـه به مخاطره افتد، استفاده از مسیرهای مشترک پیاده و دوچرخه مجاز است (Matin & Moghadasnejad, 2015).

اولین سیستم‌ها توسط انجمن‌های مردمی یا گروه‌های خیریه جهت خدمات به مردم بی‌بضاعت یا کاهش آلودگی هـوا و حفاظـت محیط زیست اجرا شده‌اند؛ که در ادامه نگاه تجاری و کسب درآمد از طریق اجاره دوچرخه‌ها نیز مطرح می‌شود.

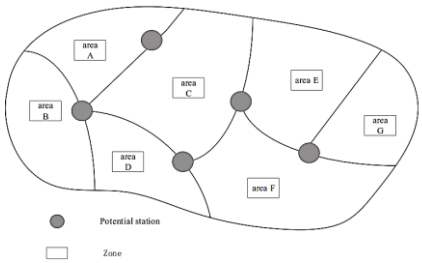
اولـین مسـتندات مبتنـی بـر اسـتفاده دوچرخـه اشـتراکی بـه سـال ۱۹۶۵ بـر مـی‌گـردد (Fitton & Symons, 2018) (Hillgärtner, 2021). زمانی که گروه موسوم به پروو، نقاشی پنجاه دوچرخه سفید را برای اسـتفاده رایگـان عمـوم بـر روی دیوار نقاشی کردند. در سال ۱۹۹۵ یک طرح با ۳۰۰ دوچرخه که با انداختن سکه کار می‌کردنـد در گپنهـاگ دانمـارک راه‌انـدازی شد. این ایده پس از آنکه دوچرخه دو نفر از اهالی این شهر دزدیده شد به ذهنشان رسید (Marshall, 2018).

دوچرخه اشتراکی در طول این دو دهه به شدت رشد کرده است. ۱۵ شرکت بزرگ در دنیا این سیستم را ارائه می‌دهند که ۱۳ تای آن‌ها چینی هستند (Van Mead, 2017). در ضمن موضوع مکان‌یابی برای تسهیلات مختلف مانند دوچرخه که قابلیت حمل انسان و بار را دارد مورد توجه محققین قرار گرفته است (Tahanisaz & others, 2020) (Cid López et al., 2022). در اکثر مقالات اشاره شده، پارامترهای تأثیرگذار قطعی فرض شده‌اند و امکان تطبیق شرایط واقعی همراه با عدم قطعیت وجود ندارد. لذا در این پژوهش سعی شده است این موضوع مورد توجه قرار گیرد.

۲- روش شناسی پژوهش

در این مطالعه، حوزه تحقیق به چند منطقه تقسیم می‌شود. تقاضای پویا برای اجاره و برگرداندن دوچرخه‌ها در هر منطقه در نظر گرفته می‌شود. از ایستگاه‌های کاندید، مکان و مقیاس ایستگاه بهینه تعیین می‌شود. که هدف آن، کمینه کردن هزینه ساخت ایستگاه تحت محدودیت‌های پاسخ به تقاضای کاربر است.

هدف به حداقل رساندن هزینه‌های ثابت ساخت و هزینه‌های متغیر عملیاتی ایستگاه‌های دوچرخه عمومی می‌باشد. دو مسئله تصمیم بحرانی در مورد ساخت و گرداندن یک ایستگاه دوچرخه‌سواری عمومی وجود دارد و این مسائل عملکرد، سطح خدمات و اقتصاد سیستم را تعیین می‌کنند. اولین مسئله، مسئله مکان‌یابی ایستگاه است که یک تصمیم استراتژیک است. این تصمیم، مکان ایستگاه‌های دوچرخه‌سواری عمومی را تعیین می‌کند و در صورت لزوم، تعداد قفل کننده‌ها در هر ایستگاه را نیز مشخص می‌کند. دیگری، مسئله تعادل مجدد (تنظیم و توزیع مجدد) دوچرخه است که تعداد دوچرخه‌هایی را مشخص می‌کند که باید در میان ایستگاه‌ها دوره به دوره مجدداً تعادل پیدا کنند. شکل شماره (۱) طرح طبقه‌بندی یک منطقه و ایستگاه‌های کاندید را نشان می‌دهد.



شکل شماره (۱): مکان ایستگاه‌های دوچرخه‌سواری عمومی

در این مطالعه، حوزه تحقیق به چند منطقه تقسیم می‌شود. حوزه تحقیق عمدتاً متشکل از محلات مسکونی، میدان‌های پارک، مؤسسات عمومی و غیره است.

چنانچه ناحیه‌ای که در آن PBS بنا خواهد شد به مناطقی تقسیم می‌شود و مجموعه مناطق با Z بیان می‌شود. فرض می‌شود که هر منطقه حاوی حداقل یک ایستگاه کاندید باشد و مکان ایستگاه‌های کاندید معین باشد و مجموعه ایستگاه‌های کاندید با E مشخص می‌شود. فرض می‌شود که کاربران فقط ایستگاه‌های درون یک فاصله قابل‌قبول از مبدأ یا مقصدهای خود را انتخاب می‌کنند، که معمولاً در بازه ۳۰۰ تا ۵۰۰ متر است. E^o مجموعه ایستگاه‌هایی است که کاربران در منطقه $o \in Z$ ممکن است انتخاب کنند. زمان سرویس سیستم به دوره‌هایی تقسیم می‌شود که تقاضای پویا را در نظر می‌گیرد و T مجموعه دوره‌هاست. فرض کنید f_{to} تقاضای اجاره در منطقه $o(o \in Z)$ در طی دوره $t(t \in T)$ باشد و p_{it}^o نسبت تقاضایی باشد که ایستگاه $i(i \in E^o)$ را انتخاب می‌کند. به همین ترتیب، g_{td} تقاضای برگشت در منطقه $d(d \in Z)$ در طی دوره $t(t \in T)$ است. و q_{jt}^o نسبت تقاضایی است که ایستگاه $j(j \in E^d)$ را انتخاب می‌کند. با توجه به هزینه‌های ثابت و متغیر ساختن یک ایستگاه دوچرخه‌سواری، ظرفیت و نرخ اولیه دسترس بودن دوچرخه در هر ایستگاه، PBSLP کل هزینه‌های ساخت ایستگاه‌ها را با تعیین مکان‌های بهینه ایستگاه‌ها و تعداد قفل کننده‌ها در هر ایستگاه، برای پاسخ به تقاضای پویا، به حداقل می‌رساند.

فرضیات مربوط به حل مسئله به شرح زیر می‌باشد:

۱. ناحیه منطقه‌بندی شده است.

۲. هزینه‌های ثابت ایستگاه ساخت، مشخص می‌باشد.

۳. هزینه‌های متغیر غیر قطعی می‌باشد.
۴. تقاضا برای هر منطقه مشخص غیر قطعی می‌باشد.
۵. حداقل ظرفیت، حداکثر ظرفیت و میزان موجودی اولیه دوچرخه‌ها در هر ایستگاه، معلوم باشد.
۶. کاربران به اطلاعات دوچرخه در ایستگاه‌ها آگاهی دارند. (برای مثال، کاربران می‌توانند از برنامه‌های تلفن همراه برای کسب آگاهی در مورد تعداد دوچرخه‌های بدون درنگ در هر ایستگاه، استفاده کنند).
با توجه به این موضوع که دنیای واقعی همواره با عدم قطعیت همراه است، برای نزدیک کردن شرایط مسأله به مسأله دنیای واقعی از رویکرد احتمالیp- استواراستفاده شده است.
نمادهای استفاده شده در این مدل به شرح زیر هستند:

پارامترها

Z	مجموعه مناطق
E	مجموعه ایستگاه‌های دوچرخه عمومی کاندید
S	مجموعه کل سناریوها $s \in S$
p_s	احتمال وقوع سناریوی s
T	مجموعه دوره‌های زمان سرویس
T1	مجموعه $\{2, 3, \dots, \lvert T\rvert\}$
E^o	مجموعه ایستگاه‌های در فاصله پیاده‌روی قابل‌قبول از منطقه $o \in Z$
E^d	مجموعه ایستگاه‌های در فاصله پیاده‌روی قابل‌قبول به منطقه $d \in Z$
f_{to}^s	تقاضای اجاره برای منطقه $o \in Z$ در طول دوره $t \in T$ در سناریوی s
g_{td}^s	تقاضای برگرداندن برای منطقه $d \in Z$ در طول دوره $t \in T$ در سناریوی s
ci	حداکثر ظرفیت ایستگاه $i \in E$
Cmin	حداقل ظرفیت یک ایستگاه
α	نرخ اولیه موجودی دوچرخه
u_i	هزینه ثابت ساخت ایستگاه $i \in E$
v_i^s	هزینه متغیر ساخت مربوط به تعداد قفل کننده‌های ایستگاه $i \in S$ در سناریوی s
N	یک عدد صحیح غیر منفی
β	ضریب مجاز تاسف

متغیرهای تصمیم

x_{id}	اگر ایستگاه $i \in E$ در منطقه $d \in Z$ ساخته شود برابر ۱، در غیر این صورت برابر ۰ است.
r_i^s	تعداد قفل کننده‌های ایستگاه دوچرخه‌سواری $i \in E$ در سناریوی s

b_{it}^{s} تعداد دوچرخه‌ها در ایستگاه دوچرخه‌سواری $i \in E$ در ابتدای دوره $t \in T$ در سناریوی s

p_{it}^{os} نسبت مشترک تقاضای اجاره f_{to}^{s} در ایستگاه $i \in E_o^s$ در منطقه $o \in Z$ در سناریوی s

q_{jt}^{ds} نسبت مشترک تقاضای اجاره g_{td}^{s} در ایستگاه $i \in E_d^s$ در منطقه $d \in Z$ در سناریوی s

با توجه به مطالب و مفروضات ارائه شده، مدل ریاضی زیر برای مسئله معرفی می‌گردد:

$$\text{Min } C = \sum_{i\in E}\sum_{d\in z} u_i x_{id} + \sum_{s\in S} p_s \left[\sum_{i\in E} v_i^s r_i^s\right] \quad (1)$$

s. t.

$$C_{min}.x_{id} \le r_i^s \le C_i x_i \qquad \forall\, d \in Z.\, i \in E, s \in S \quad (2)$$

$$r_i^s \ge b_{it}^s \qquad \forall i \in E, t \in T \in S \quad (3)$$

$$b_{i1}^s = \alpha.\, r_i^s \qquad \forall i \in E, s \in S \quad (4)$$

$$\sum_{o\in Z} f_{to}^s . p_{it}^{os} \le b_{it}^s + \sum_{o\in Z} g_{td}^s . q_{it}^{ds} \qquad \forall\, i \in E^o, t \in T, s \in S \quad (5)$$

$$\sum_{d\in Z} g_{td}^s . q_{jt}^{ds} \le r_j^s - b_{jt}^s + \sum_{d\in Z} f_{td}^s . p_{jt}^{ds} \qquad \forall\, j \in E^d, t \in T, s \in S \quad (6)$$

$$b_{it}^s = b_{i1}^s - \sum_{t'=1}^{t-1}\sum_{o\in Z} f_{t'o}^s . p_{it'}^{os} + \sum_{t'=1}^{t-1}\sum_{d\in Z} g_{t'd}^s . q_{it'}^{ds} \qquad \forall\, o, d \in Z, i \in E^o, t \in T_1, s \in S \quad (7)$$

$$\sum_{i\in E}\sum_{d\in z} u_i x_{id} + \sum_{i\in E} v_i^s r_i^s \le (1+\beta) C_s^* \qquad \forall s \in S \quad (8)$$

$$\sum_{t\in E^o} p_{it}^{os} = 1 \qquad \forall\, t \in T, o \in Z, s \in S \quad (9)$$

$$\sum_{t\in E^d} q_{jt}^{ds} = 1 \qquad \forall\, t \in T, d \in Z, s \in S \quad (10)$$

$$p_{it}^{os} \le x_{id} \qquad \forall\, t \in T, o \in Z, i \in E^o, s \in S. d \in Z \quad (11)$$

$$q_{jt}^{ds} \le x_{jd} \qquad \forall\, t \in T, d \in Z, j \in E^d, s \in S, d \in Z \quad (12)$$

$$\sum_{i\in E}\sum_{d\in z} x_{id} = 1 \qquad \forall\, i \in E\ d \in Z \quad (13)$$

$$0 \le p_{it}^{os} \le 1 \qquad \forall\, t \in T, o \in Z, i \in E^o, s \in S \quad (14)$$

$$0 \le q_{jt}^{ds} \le 1 \qquad \forall\, t \in T, d \in Z, j \in E^d, s \in S \quad (15)$$

$$x_{id} \in \{0,1\} \qquad \forall\, i \in E\ d \in Z \quad (16)$$

$$b_{it}^s, r_i^s \in N \qquad \forall\, i \in E, t \in T, s \in S \quad (17)$$

تابع هدف (۱)، هزینه ثابت و هزینه متغیرِ ساختن ایستگاه‌های دوچرخه‌سواری را به حداقل می‌رساند، جمله اول تابع هدف به هزینه‌های ثابت ساخت ایستگاه اشاره دارد که وابسته به سناریو نیست. همچنین جمله دوم تابع هدف هزینه‌های متغیر را شامل می‌شود. محدودیت (۲) نشان می‌دهد که فقط هنگام ساخت ایستگاه دوچرخه قفل کننده‌ها می‌توانند نصب شوند و تعداد قفل کننده‌ها نمی‌تواند بیشتر از حداکثر ظرفیت ایستگاه باشد و نمی‌تواند کمتر از حداقل ظرفیت ایستگاه باشد. محدودیت (۳) نشان

می‌دهد که تعداد دوچرخه‌ها در هر ایستگاه در هر دوره زمانی نمی‌تواند بیشتر از تعداد قفل کننده‌های ایستگاه باشد. محدودیت (۴) تعداد دوچرخه‌ها در هر ایستگاه در ابتدای زمان سرویس را تعیین می‌کند. محدودیت (۵) نشان می‌دهد که تعداد دوچرخه‌هایی که می‌توانند از یک ایستگاه اجاره شوند، نمی‌تواند بیشتر از تعداد دوچرخه‌ها در شروع دوره به علاوه تعداد دوچرخه‌های پس داده شده به ایستگاه در طول دوره باشد. محدودیت (۶) نشان می‌دهد که تعداد قفل‌های خالی در هر دوره زمانی باید بیشتر از تقاضای برگشت در طول آن دوره باشد. محدودیت (۷) تعداد دوچرخه‌ها در شروع دوره $t \in T_1$ را نشان می‌دهد. محدودیت (۸) مربوط به محدودیت روباست شده می‌باشد. محدودیت‌های (۹) و (۱۰) نشان می‌دهند که تقاضای کاربر باید پاسخ داده شود. محدودیت-های (۱۱) و (۱۲) نشان می‌دهند که کاربران می‌توانند دوچرخه‌ها را فقط زمانی اجاره کنند و برگردانند که ایستگاه ساخته شده باشد. محدودیت (۱۳) بیان می‌کند که در هر منطقه حداکثر یک ایستگاه ایجاد شود. محدودیت‌های (۱۷)-(۱۴) دامنه متغیرهای تصمیم را محدود می‌کنند.

۳- نتایج و بحث

به منظور اعتبارسنجی مدل دو مثال عددی در اندازه‌های مختلف و به صورت تصادفی تولید شده‌اند. مقادیر پارامترهای مورد استفاده در جدول شماره (۱) و همچنین نتایج حاصل از حل این مثال‌ها در نرم‌افزار گمز در جداول شماره‌های (۲) و (۳) ارائه شده است.

جدول شماره (۱): مقادیر پارامترها

شماره مثال	مثال شماره ۱	مثال شماره ۲	مثال شماره ۳
تعداد سناریو	۳	۳	۳
تعداد ناحیه	۶	۱۰	۱۶
تعداد ایستگاه	۳	۵	۱۰
تعداد دوره زمانی	۳	۳	۳
ظرفیت	(۴۰۰و۲۰۰)	(۴۰۰و۲۰۰)	(۴۰۰و۲۰۰)
هزینه عملیاتی	(۴۰۰و۱۰۰)	(۴۰۰و۱۰۰)	(۴۰۰و۱۰۰)
هزینه ثابت احداث	(۴۵۰۰و۱۵۰۰)	(۴۵۰۰و۱۵۰۰)	(۴۵۰۰و۱۵۰۰)
تقاضای رفت	(۴۰و۱۰)	(۴۰و۱۰)	(۴۰و۱۰)
تقاضای برگشت	(۴۰و۱۰)	(۴۰و۱۰)	(۴۰و۱۰)

جدول شماره (۲): حل مثال عددی (تابع هدف)

سناریوها	مثال اول		مثال دوم		مثال سوم	
	مقدار تابع هدف	زمان حل (ثانیه)	مقدار تابع هدف	زمان حل (ثانیه)	مقدار تابع هدف	زمان حل (ثانیه)
سناریوی خوشبینانه	۱۱۲۰۰	۰/۲۳	۴۳۷۵۰	۱/۱۳	۸۳۶۰۰	۲/۲۳
سناریوی محتمل	۱۹۹۰۰	۰/۲۷	۴۴۳۶۶/۶	۱/۵۵	۸۵۱۳۶/۳۶	۲/۱۳
سناریوی بدبینانه	۲۱۲۰۰	۰/۳۳	۴۸۶۷۷/۹	۱/۵۶	۸۷۶۵۳/۴۸	۲/۱۴
p- استوار	۱۲۱۵۰	۱/۳	۴۷۰۵۰	۲/۴	۸۵۶۰۰	۳/۸۳

مسائل حل‌شده در بالا نخست برای حالت‌های تک سناریویی حل شده است. هدف مدل ارائه شده در این پژوهش، حل همزمان مسئله برای تمامی سناریوها می‌باشد. مسئله p-استوار، تمامی سناریوهای معرفی شده را در قالب یک مسئله حل می‌کند. مقدار تابع هدف به دست آمده برای مسئله p-استوار مقدار بیشتر از حالات تک سناریویی است. لازم به ذکر است مقدار β در نظر-

گرفته شده برای حل این مسئله ۰/۲ است. نتایج به دست آمده برای هر سناریو در پاسخ استوار نیز در جدول (۲) مشخص شده است. همچنین جواب متغیرهای مربوط به مسئله برای حالت‌های تک سناریویی و p–استوار در جدول (۳) ارائه شده است. توضیح اینکه با توجه به پیچیدگی مدل و با افزایش تعداد ناحیه‌ها به ۱۰۰ ناحیه و تعداد ایستگاه‌ها به ۵۰ ایستگاه، حل مدل در نرم‌افزار گمز در زمان قابل قبول امکان‌پذیر نمی‌باشد.

جدول شماره (۳): حل مثال عددی(متغیرها)

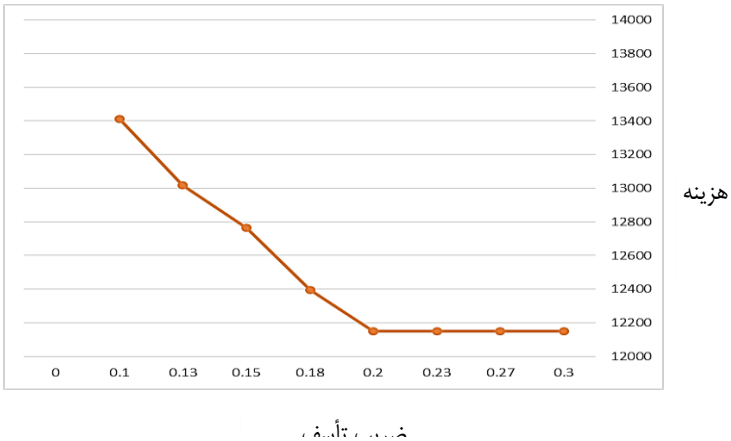
سناریوها	مثال اول				مثال دوم				مثال سوم			
	تعداد قفل کننده	تعداد دوچرخه‌ها			تعداد قفل کننده	تعداد دوچرخه‌ها			تعداد قفل کننده	تعداد دوچرخه‌ها		
		۱T	۲T	۳T		۱T	۲T	۳T		۱T	۲T	۳T
سناریوی خوشبینانه	۲	۲	۱۸	۴۲	۵۰	۱۴	۲۰	۵۰	۸۱	۲۸	۳۶	۸۱
سناریوی محتمل	۳۹	۳	۲۴	۳۹	۱۴	۴	۰	۱۴	۷۰	۱۸	۲۲	۷۰
سناریوی بدبینانه	۴۵	۳	۷	۸	۵۵	۱	۷		۸۵	۳	۴	۱
p– استوار	۴۱	۳	۲۱	۴۱	۳۲	۹	۱۰	۳۲	۷۵	۲۳	۲۹	۷۵

برای تعیین میزان اثرپذیری مدل از پارامترهای مختلف مسئله، بر روی آن تحلیل حساسیت صورت گرفت. مقدار تابع هدف مسئله برای مقادیر مختلف پارامترها سنجیده شده است. لازم به ذکر است هر بار تنها یک پارامتر تغییر کرده است و پارامترهای دیگر ثابت باقی مانده‌اند. زمانی که مقدار β تغییری نداشته است، مقدار آن برابر ۰/۲ فرض شده است. این مثال برای نمونه اول در جدول شماره (۴) اجرا شده است.

جدول شماره (۴): نتایج تحلیل حساسیت مدل

مقدار β	۰/۰۸	۰/۱	۰/۱۳	۰/۱۵	۰/۱۸	۰/۲	۰/۲۳	۰/۲۷	۰/۳
مقدار تابع هدف	–	۱۳۴۱۰	۱۳۲۰	۱۲۷۶۵	۱۲۳۹۳	۱۲۱۵۰	۱۲۱۵۰	۱۲۱۵۰	۱۲۱۵۰

پارامتر تأثیرگذار در مسئله، مقدار β است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، برای ضریب تأسف کمتر از ۰/۱ مقدار تابع هدف نشدنی بوده و با افزایش آن، مقدار تابع هدف کاهش یافته است، افزایش تدریجی β منجر به بهبود مقدار تابع هدف و هزینه‌ها گردیده است و نهایتاً مقدار تابع هدف ثابت باقی مانده و به حالت استواری رسیده است. شکل (۲) نیز به صورت نموداری این تغییرات را نشان داده است.



شکل شماره (۲): رابطه بین ضریب تأسف وهزینه

از آنجا که جهان امروز با پیشرفت سریع تکنولوژی همراه است؛ حمل و نقل پارامتری مهم و تعیین‌کننده در تمامی جنبه‌های حیات شهری است. ایستگاه‌های کرایه دوچرخه به عنوان عنصری از مبلمان شهری واسط بین کاربران و دوچرخه‌ها بوده که با

هدف توسعه فرهنگ دوچرخه‌سواری در سطح شهر نصب می‌شود. این ایستگاه‌ها اگر در مکان‌های مناسب احداث شده باشند موجب افزایش تمایل شهروندان در استفاده از دوچرخه می‌گردد. لذا در این پژوهش به دنبال مکان‌یابی ایستگاه‌های دوچرخه با استفاده از مدلسازی ریاضی و حل آن در نرم افزار گمز بوده‌ایم و با توجه به احتمالی بودن داده‌های ورودی، این مسئله به وسیله بهینه‌سازی استوار حل، اعتبارسنجی و تحلیل حساسیت شده است.

این مدل، یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط می باشد که هدف از حل بهینه آن کاهش هزینه‌های ساخت ایستگاه‌های دوچرخه‌سواری می‌باشد. برای نزدیک شدن به شرایط دنیای واقعی، تقاضای مشتریان و هزینه‌های متغیر به صورت غیر قطعی در نظر گرفته شده‌اند. بدین منظور از رویکرد p–استوار استفاده شده است. مدل ریاضی ارائه شده با بهره‌گیری از سناریوهای مختلف، توسط مثال‌های عددی و نرم‌افزار گمز حل، اعتبار سنجی و تحلیل حساسیت شده است. نتایج حاصل از حل مسئله نمونه و تحلیل حساسیت روی مقادیر مختلف ضریب تأسف، نشان می‌دهد با اندک افزایش مقدار ضریب تأسف، هزینه‌های ساخت کاهش یافته و به جواب بهینه نزدیک می‌شود.

با توجه به نتایج به دست آمده مشخص گردید که به دلیل پیچیدگی مدل، نرم‌افزار گمز توانایی حل مثال‌های عددی با ابعاد بزرگ را در زمان قابل قبول ندارد و برای حل این مسئله در ابعاد مختلف نیاز به توسعه الگوریتم حل مناسب وجود دارد.

پیشنهادات علمی و کاربردی:

حوزه تحقیقاتی مکان‌یابی ایستگاه‌های دوچرخه‌سواری در این گزارش به تفصیل مورد بررسی قرار گرفته است. در ادامه این گزارش و در مجموع موارد زیر را می‌توان برای تحقیقات آتی در نظر گرفت.

الف) پیشنهادات علمی:

۱. به کارگیری شیوه‌های دیگر برای مدلسازی و حل مثال غیر قطعی نظیر روش‌های احتمالی یا فازی.

۲. بررسی رویکردهای فرا ابتکاری برای حل مسئله مورد نظر، نظیر رویکردهای ژنتیک، شبیه‌سازی تبرید، جستجوی ممنوعه، شبکه عصبی مصنوعی و غیره و مقایسه نتایج آن‌ها با نتایج تحقیق حاضر.

۳. افزودن هدف یا هدف‌های دیگر به مدل مسئله، از جمله در نظر گرفتن ملاحظات زیست محیطی و غیره.

۴. افزودن فرضیات دیگر به مدل مسئله که ضمن نزدیکی به مسائل دنیای واقعی، بر پیچیدگی مسئله می‌افزاید، از جمله حداقل کردن و یا حداکثر کردن ظرفیت ایستگاه‌ها، زمان مورد نیاز سفر و غیره.

ب– پیشنهادات کاربردی و مدیریتی:

۱. استفاده از نتایج مدل در تعیین صحیح مکان‌ها می‌تواند موجب بهبود ترافیک گردد. به عبارت دیگر ایستگاه‌های دوچرخه می‌توانند بر روی ترافیک موجود تاثیرگذار باشد. لذا لازم است محققین بعدی شرایط محیطی را هم اعمال نمایند.

۲. توجه به سنین مختلف استفاده از دوچرخه و استفاده از انواع مختلف دوچرخه می‌تواند شرایط مورد مطالعه را واقعی‌تر نماید.

٤–منابع

Cid López, A., Hornos Barranco, M. J., Herrera Viedma, E., & others. (2022). *Decision-making model for designing telecom products/services based on customer preferences and non-preferences*.

Fitton, B., & Symons, D. (2018). A mathematical model for simulating cycling: applied to track cycling. *Sports Engineering*, *21*(4), 409–418.

Hillgärtner, J. (2021). The History of the German Newspaper. In *News in Times of Conflict* (pp. 1–26). Brill.

Litman, T., Blair, R., Demopoulos, B., Eddy, N., Fritzel, A., Laidlaw, D., Maddox, H., & Forster, K. (2015). Pedestrian and bicycle planning. *A Guide to Best Practices. Report from the Victoria Transport Policy Institute (Canada)*.

Marshall, A. (2018). *Americans are falling in love with bike share*. May.

Matin, A. G., & Moghadasnejad, F. (2015). Feasibility study on creation of bike paths network in urban transport (case study: Rasht city). *Computational Research Progress in Applied Science and Engineering*, *1*(1).

Paydar, M., Fard, A. K., & Mashlool, F. (2021). Cycling network and its related criteria; the case study: Shiraz, Iran. *Journal of Transport \& Health*, *21*, 101045.

Roess, R. P. (2004). *Traffic engineering*. United states of Anerica.

Tahanisaz, S., & others. (2020). Evaluation of passenger satisfaction with service quality: A consecutive method applied to the airline industry. *Journal of Air Transport Management*, *83*, 101764.

Van Mead, N. (2017). Uber for bikes: how “dockless” cycles flooded China--and are heading overseas. *The Guardian*, *22*.

Yiannakis, A. (1989). Toward an applied sociology of sport: The next generation. *Sociology of Sport Journal*, *6*(1), 1–16.

Presenting a Mathematical Model for Locating Bicycle Stations under Conditions of Uncertainty

Mahdi Yousefi Nejad Attari (Corresponding Author)
Email: mahdi_108108@yahoo.com
Department of industrial engineering, Azad University, Bonab branch, Bonab, Iran
Shahram Banaii
Department of Mathematics, Bonab Branch, Islamic Azad University, Bonab, Iran
Fatemeh Ahmad
Industrial Engineering Department, Seraj Non-Profit Institute, Tabriz, Iran
Zohreh Khalilpourshiraz
Department of Industrial Engineering, Bonab Branch, Islamic Azad University, Bonab, Iran

Abstract
Due to the necessity of sustainable development and its increasing importance in urban issues, today in different cities of the world, the bicycle as the main means of transportation is receiving more attention day by day. In this research, a positioning problem under the conditions of uncertainty is presented. In order to get closer to the real world conditions, customer demand and variable costs are considered as non-deterministic. In dealing with the uncertainty of the parameters of the problem, the p-stable approach has been used. The innovation of this research is the addition of p-based uncertainty to the problem of locating bicycle stations. The mathematical model of the problem has been solved and validated using different scenarios, numerical examples and Gomes software. The results of solving the sample problem and sensitivity analysis on different values of the coefficient of regret show that with a slight increase in the value of the coefficient of regret, the construction costs are reduced and it approaches the optimal solution.

Keywords: Bicycle sharing stations, p-stable approach, location, uncertainty**.**