مکان یابی بهینه ایستگاههای دوچرخه در سامانه های شهری به اشتراک گذاری دوچرخه با توجه به مساله متعادلسازی مجدد

مجتبی آشنا[1]* و دکتر امید بوشهریان[2]
[1] کارشناس ارشد مهندسی فناوری اطلاعات گرایش طراحی و تولید نرم افزار ، دانشگاه شیراز، mojtaba.ashena@yahoo.com
[2] دانشیار دانشگاه صنعتی شیراز، دانشکده مهندسی فناوری اطلاعات و ارتباطات، bushehrian@sutech.ac.ir

چکیده : در سامانه‌های اشتراک‌گذاری دوچرخه، مکان‌یابی ایستگاه‌های دوچرخه به‌نحوی‌که درآمد اپراتور بیشینه گردد، یکی از مسائل مهم می‌باشد. در تحقیقات گذشته این مسئله به فرم یک مسئله بهینه‌سازی، با تابع هدف حداکثر سازی میزان دسترس‌پذیری مشترکان فرموله شده است. در این تحقیق چالش متعادل‌سازی مجدد دوچرخه‌ها در ایستگاه‌ها علاوه بر مسئله دسترس‌پذیری در سامانه‌های اشتراک‌گذاری دوچرخه مطالعه شده و مدل بهینه‌سازی جامعی که هر دو چالش را در نظر می‌گیرد، ارائه گردیده است. موضوع متعادل‌سازی مجدد، موضوع مهمی است که عدم توجه به آن هزینه اپراتور سامانه را بسیار بالا می‌برد. به‌منظور پیش‌بینی میزان عدم تعادل ایستگاه‌ها، از یک مدل مارکوف گسسته بهره گرفته شده است. مدل بهینه‌سازی پیشنهادی، توسط الگوریتم ژنتیک حل‌شده است و نتایج نشان می‌دهند که در نظر گرفتن موضوع متعادل‌سازی مجدد در مکان‌یابی محل ایستگاه‌ها (علاوه بر موضوع دسترس‌پذیری)، تأثیر بسزایی در درآمدزایی این سامانه‌ها دارد.

کلید واژه‌ها: اشتراک‌گذاری دوچرخه، ایستگاه دوچرخه، توزیع دوچرخه، شهر هوشمند، مکان‌یابی ایستگاه

۱- مقدمه

در دنیای امروز با گسترش شهرها و زیادشدن مشکلات حمل‌ونقل و ترافیک شهری، ارتقاء شهر هوشمند پاسخ نوآورانه برای چالشهای در حال گسترش می‌باشد. در شهرهای مدرن، سامانه اشتراک‌گذاری دوچرخه عمومی به‌عنوان راهکاری سالم و کارآمد برای رفت‌وآمد و هدایت شهر به وجود آمده است. با توجه به مشکلات فراوان ناشی از حمل‌ونقل موتوری در شهرهای بزرگ، یکی از گزینه‌های مناسب برای مرتفع ساختن این مشکلات استفاده از اشتراک‌گذاری دوچرخه می‌باشد. سامانه‌های اشتراک‌گذاری دوچرخه در بسیاری از شهرها برای ترویج حمل‌ونقل سبز و شیوه زندگی سالم به کار گرفته‌شده است*[1]* .

با گسترش سامانه‌های اشتراک‌گذاری دوچرخه، تعدادی از مطالعات به‌منظور شناسایی مناطق مناسب ایستگاه دوچرخه، پیش‌بینی تعداد دوچرخه موردنیاز در ایستگاه و نحوه توزیع دوچرخه‌ها انجام‌شده‌اند. تعیین موقعیت ایستگاه‌ها یکی از موضوعات قابل‌توجه جهت افزایش دسترس‌پذیری سامانه می‌باشد. قرار دادن ایستگاه‌های دوچرخه در مکان‌هایی که به بهترین وجه با نیاز کاربران همسو باشند، دسترس‌پذیری سامانه را افزایش می‌دهد.

استفاده کاربران از این سامانه باعث جابه‌جایی دوچرخه‌ها از یک ایستگاه به ایستگاه دیگر می‌شود که جابجایی دوچرخه‌ها سامانه را از حالت تعادل خارج خواهد کرد. هنگامی‌که ایستگاه‌ها از حالت تعادل خارج شوند، ممکن است که در برخی از ایستگاه‌ها دوچرخه وجود نداشته باشد و در برخی از ایستگاه‌ها بیشتر از ظرفیت ایستگاه دوچرخه وجود داشته باشد و مکان کافی برای پارک دوچرخه وجود نداشته باشد. در این حالت سامانه از حالت تعادل خارج می‌شود و دسترس‌پذیری سامانه کاهش می‌یابد که در این حالت نیاز به متعادل‌سازی مجدد سامانه خواهد بود. برای متعادل‌سازی سامانه، دوچرخه‌ها از ایستگاه‌هایی که بیشتر از ظرفیت خود دوچرخه دارند برداشته می‌شود و به ایستگاه‌هایی که در آن‌ها دوچرخه وجود ندارد و یا تعداد دوچرخه‌های موجود در آن کم است، به‌وسیله کامیون‌های حمل دوچرخه منتقل می‌شود. به این عملیات متعادل‌سازی مجدد گفته می‌شود که این عملیات هزینه‌های زیادی را در بر خواهد داشت؛ بنابراین متعادل‌سازی مجدد سامانه یکی از عوامل تأثیرگذار در دسترس‌پذیری سامانه است.

عملیات توزیع مجدد دوچرخه‌ها در شبکه با استفاده از خودروها و یا کامیون‌های حمل دوچرخه انجام می‌شود که منجر به متعادل‌سازی دوچرخه‌ها در ایستگاه‌ها می‌شود. در توزیع مجدد دوچرخه‌ها مبحث زمان و تعداد دفعات توزیع دوچرخه‌ها، مسیریابی کامیون‌های حمل دوچرخه و ترغیب کاربران به متعادل‌سازی سیستم مطرح می‌شود که بحث چالش‌برانگیزی می‌باشد.

یکی از عوامل تأثیرگذار در هزینه توزیع و متعادل‌سازی سیستم موقعیت قرارگیری ایستگاه‌ها و چیدمان ایستگاه‌ها در سیستم می‌باشد. در این مطالعه، ابتدا معیارهای ارزش‌گذاری بر مکان و تعداد و ظرفیت ایستگاه‌ها شناسایی خواهد شد و سپس کیفیت چیدمان ایستگاه‌ها ازنظر تسهیل و کارایی توزیع مجدد دوچرخه‌ها بین ایستگاه‌ها مطالعه خواهد گردید.

۲- پیشینه پژوهشی

سامانه‌های اشتراک‌گذاری دوچرخه به دودسته مبتنی بر ایستگاه و شناور تقسیم‌بندی می‌شوند. در سامانه‌های مبتنی بر ایستگاه کاربران دوچرخه را در ایستگاه‌های تعیین‌شده می‌توانند تحویل بگیرند و پس از استفاده دریکی از ایستگاه‌های تعیین‌شده تحویل دهند. در سامانه‌های اشتراک‌گذاری دوچرخه شناور دوچرخه را می‌توان در هرکجا پارک کرد و نیاز به ایستگاه‌های خاص از بین می‌رود. توزیع و متعادل‌سازی دوچرخه‌ها به دو شکل ایستا و پویا

می‌تواند انجام شود. متعادل‌سازی دوچرخه در شب و یا زمانی که استفاده کاربران از دوچرخه کم است، متعادل‌سازی استاتیک نامیده می‌شود. درصورتی‌که متعادل‌سازی در هنگام استفاده کاربران و همچنین نقش استفاده کاربران در نظر گرفته شود، متعادل‌سازی پویا نامیده می‌شود.

جهت حل مسئله مطرح‌شده مقالاتی با موضوعات اشتراک‌گذاری دوچرخه، اینترنت اشیاء، شهر هوشمند مطالعه شد که چند مقاله که ارتباط بیشتری با موضوع داشتند انتخاب شدند. در ادامه خلاصه‌ای از مطالب این مقالات ارائه‌شده است.

۲-۱- افزایش دسترس‌پذیری در سامانه

برای افزایش دسترس‌پذیری سیستم و کاهش نارضایتی کاربر در سامانه‌های اشتراک‌گذاری دوچرخه راه‌حلی پویا برای توزیع دوچرخه در سامانه‌های اشتراک‌گذاری دوچرخه ارائه‌شده است *[2]*. دسترس‌پذیری سیستم به این معنی می‌باشد که ایستگاه‌ها کاملاً پر و یا کاملاً خالی نباشد. در حالتی که ایستگاه کاملاً پر باشد مکانی برای پارک دوچرخه‌های جدید نمی‌باشد و در حالتی که ایستگاه کاملاً خالی باشد امکان اجاره دوچرخه برای کاربر وجود نخواهد داشت. برای بهبود این وضعیت از تخمین تعداد درخواست‌ها در هر ایستگاه استفاده می‌شود. تخمین میزان استفاده از اشتراک‌گذاری دوچرخه در هر ایستگاه وابسته به ساعت، روز هفته، ماه می‌باشد. مدل‌سازی هر ایستگاه از طریق الگوی *BDP* انجام می‌شود که با استفاده از آن زمانی که ایستگاه کاملاً پر و یا کاملاً خالی می‌شود تخمین زده می‌شود. درصورتی‌که سود حاصل از توزیع مجدد بیشتر از هزینه حرکت کامیون جهت توزیع دوچرخه‌ها باشد، توزیع مجدد انجام خواهد شد. در این روش توزیع مجدد ممکن است چند بار در طول روز انجام شود. در این روش از سه پارامتر زیر جهت ارزیابی استفاده می‌شود:

- میزان زمانی که سیستم خارج از سرویس است (کاملاً پر و یا کاملاً خالی)
- تعداد دفعات توزیع مجدد دوچرخه‌ها توسط کامیون‌ها
- مسافتی که کامیون‌ها روزانه جهت توزیع دوچرخه‌ها طی می‌کنند.

۲-۲- متعادل‌سازی سامانه

برای متعادل‌سازی سامانه‌های اشتراک‌گذاری دوچرخه از یک مدل تقویتی برای انگیزه دادن به کاربران ارائه شده است *[3]*. در سامانه‌های اشتراک‌گذاری دوچرخه شناور کاربر ملزم به برگرداندن دوچرخه به ایستگاه‌های تعیین‌شده نمی‌باشد و این امر باعث پراکندگی دوچرخه‌ها در سطح شهر و آشفتگی پیاده‌روها و معابر عمومی می‌گردد. در این روش جمع‌آوری دوچرخه‌ها با استفاده از کامیون‌ها بسیار هزینه‌بر می‌باشد؛ بنابراین تلاش می‌شود که این کار تا حد امکان توسط کاربران انجام شود. رویکرد مبتنی بر کاربر یک روش ارزان‌تر و انعطاف‌پذیر برای متعادل‌سازی سیستم با ارائه انگیزه‌ها مالی و پیشنهاد مکان جایگزین برای رها کردن و یا برداشتن دوچرخه می‌باشد. برای حل این مشکل از الگوریتم یادگیری تقویتی قیمت‌گذاری سلسله‌مراتبی ایجادشده است. در این الگوریتم یک مشکل به چند مشکل کوچک‌تر تقسیم می‌شوند. نتایج به‌دست‌آمده با استفاده از یک معیار به نام کاهش خدمت مورد ارزیابی قرارگرفته است. این پارامتر سطح خدمات را در تعداد درخواست‌های رضایت‌بخش در نظر می‌گیرد که معادل تعداد درخواست‌هایی که بدون خدمت بوده‌اند می‌باشد. از مزایای این روش این است که با ایجاد انگیزه برای کاربران، توزیع به‌خوبی در مناطق ناشناخته و کم‌کاربرد انجام می‌دهد. از مشکلات این روش این است که درزمانی که تعداد درخواست‌ها کم است توزیع به‌خوبی انجام نمی‌شود.

در سامانه‌های اشتراک‌گذاری دوچرخه شناور، دوچرخه را می‌توان در هرکجا پارک کرد. درنتیجه نیاز به ایستگاه‌های خاص را از بین می‌برد. در مقایسه با سیستم اشتراک‌گذاری دوچرخه مبتنی بر ایستگاه، صرفه‌جویی در هزینه راه‌اندازی و ساخت ایستگاه‌ها انجام می‌شود *[3]*. در سامانه‌های اشتراک‌گذاری دوچرخه شناور ردیابی دوچرخه در هر زمان با *GPS* انجام می‌شود و از سرقت دوچرخه جلوگیری می‌کند و امکانات قابل‌توجهی را برای مدیریت هوشمند سیستم فراهم می‌کند. در این سیستم سطح رضایت مشتری افزایش می‌یابد، زیرا به دست آوردن و بازگشت دوچرخه‌ها بسیار راحت‌تر می‌شود و متوسط فاصله پیاده‌روی کاربر کوتاه‌تر است. همچنین مشتریان با کمبود نقاط خالی در ایستگاه‌هایی که نیاز به بازگشت دوچرخه‌ها دارند مواجه نخواهند شد.

در این مقاله طرحی برای به حداقل رساندن مسافت طی شده توسط کامیون‌های حمل دوچرخه ارائه‌شده است که در سامانه‌های اشتراک‌گذاری دوچرخه شناور و مبتنی بر ایستگاه کاربرد دارد. از مزایای این طرح این است که فرمول ارائه‌شده در سامانه‌هایی که از یک و یا حتی چند وسیله نقلیه در ناوگان حمل دوچرخه استفاده می‌کنند قابل‌استفاده می‌باشد و همچنین در هر بار توزیع دوچرخه یک ایستگاه بیش از یک‌بار ملاقات شود. از مشکلات این روش این است که در صورت به حداقل رساندن زمان متعادل‌سازی ناوگان تعداد دفعات متعادل‌سازی دوباره تا حد زیادی کاهش میابد.

۲-۳- بهینه‌سازی جانمایی ایستگاه‌ها

برای جانمایی ایستگاه‌های اشتراک دوچرخه در جهت کاهش سفرهای کوتاه که با ماشین انجام می‌شود، در مقاله *[4]* یک روش بهینه‌سازی را ارائه کرده است. در این مقاله شهر سئول موردمطالعه قرارگرفته است. در این مقاله جهت تعیین موقعیت ایستگاه از مسیرهای کوتاه طی شده توسط تاکسی‌ها استفاده‌شده است تا مکان ایستگاه‌های اشتراک دوچرخه را به‌طور مؤثر برای جایگزینی سفرهای کوتاه اتومبیل تعیین کند. همچنین در این مطالعه، از داده‌های جمعیت شناور در مقیاس واقعی که به‌صورت ساعتی ثبت می‌شود استفاده‌شده است تا تقاضای بالقوه را دقیق‌تر ارزیابی کند. این داده‌ها از یکی از سرویس‌دهندگان تلفن همراه که اکثریت مشترکان در کره از آن استفاده می‌نمایند، دریافت شده است. این اطلاعات شامل تعداد افرادی می‌باشد که در سلول‌های ۵۰ مترمربع از هر منطقه جغرافیایی در هر ساعت با سیگنال‌های تلفن همراه ثبت‌شده‌اند. به دلایل مختلف، یک سامانه اشتراک‌گذاری دوچرخه می‌تواند جایگزین مناسبی برای سفرهای کوتاه که با خودرو انجام می‌شود، باشد. اولاً، در مناطق مرکز شهر دوچرخه‌ها می‌توانند کارآمدتر از خودروهای شخصی برای سفرهای کوتاه مانند خرید و رفت‌وآمد باشند. دوم، در مناطق مرکز شهر اختلاف چشمگیری بین سرعت حرکت دوچرخه‌ها و خودروها وجود دارد. در مقاله *[5]* ۱۱۰ میلیون مسیر دوچرخه را در مرکز شهر لیون، فرانسه مورد تجزیه‌وتحلیل قرارداد و نشان داد که سفرهای دوچرخه درواقع سریع‌تر از سفرهای ماشین بود. درحالی‌که میانگین سرعت اتومبیل در شهرهای اروپایی از ۱۰ تا ۱۵ کیلومتر در ساعت متغیر است. طی تحقیقات

به‌عمل‌آمده *[6]* سرعت متوسط تمام وسایل نقلیه خودرویی در مرکز شهر سئول در سال ۲۰۱۵، ۱۷.۹ کیلومتر در ساعت بوده است؛ بنابراین توصیه می‌شود که سامانه‌های اشتراک‌گذاری دوچرخه به‌عنوان جایگزینی برای حمل‌ونقل عمومی یا اتومبیل‌های شخصی معرفی شوند چراکه در سال‌های اخیر پیشرفت چشمگیری داشته و با سایر وسایل حمل‌ونقل در مناطق شهری هماهنگ شده است. علاوه بر این، دوچرخه‌سواری باعث کاهش انتشار دی‌اکسید کربن می‌شود و به کاهش تراکم ترافیک شهر کمک می‌کند، زیرا دوچرخه نیاز به فضایی کمتر از اتومبیل دارد. به‌طور خلاصه، دوچرخه‌ها به‌عنوان ابزار بهینه برای سفر کوتاه به فاصله از راه دور به شمار می‌روند زیرا آن‌ها حافظ محیط‌زیست، اقتصادی و راحت هستند *[7]*. از مزایای این طرح این است که از آن می‌توان در پیاده‌سازی سامانه اشتراک‌گذاری دوچرخه در شهر و یا کشورهای دیگر نیز استفاده نمود. از مشکلات این طرح این است که مسافرت‌های کوتاهی که توسط تاکسی‌ها انجام‌شده‌اند موردمطالعه قرارگرفته‌اند. درحالی‌که خودروهای شخصی بسیاری در مرکز شهر تردد دارند. همچنین در بررسی تعداد جمعیت شناور در منطقه جغرافیایی جهت حرکت و مسیر حرکت آن‌ها تعیین نشده است.

در مقاله‌ای دیگر *[8]* روشی در خصوص یافتن مکان مناسب برای ایستگاه‌های دوچرخه از طریق پیش‌بینی میزان تقاضا بر اساس موقعیت ارائه‌شده است. جهت ارزیابی از داده‌های موجود در دنیای واقعی در شهرهای *Washington, D.C* و *Hangzhou* استفاده‌شده است. نتیجه ارزیابی نشان می‌دهد که این روش می‌تواند برای شهرهای مختلف به‌طور مؤثری استفاده شود تا مکان‌هایی با ظرفیت بالقوه برای قرار دادن ایستگاه‌های دوچرخه شناسایی شود. در این مقاله از یک رویکرد مبتنی بر داده برای پیش‌بینی تقاضای سفر دوچرخه جهت یافتن مکان مناسب برای قرار دادن ایستگاه دوچرخه استفاده‌شده است. با توجه به وجود انواع داده‌های قابل‌استفاده در هر شهر ابتدا مجموعه داده‌های قابل‌استفاده در هر شهر را شناسایی می‌کنیم و سپس با استفاده از ویژگی‌های موردنظر مجموعه داده‌ها را انتخاب مکنیم و سپس از این داده‌ها جهت ارزیابی موقعیت مکانی برای قرار دادن ایستگاه‌های دوچرخه استفاده می‌شود.

در مقاله *[9]*، طراحی و تجزیه‌وتحلیل یک مدل طراحی استراتژیک برای سامانه‌های اشتراک‌گذاری دوچرخه ارائه شده است. پارامترهای کلیدی در طراحی این سیستم عبارت‌اند از: تعداد و مکان ایستگاه‌های اشتراک دوچرخه در سیستم، ساختار مسیر بین ایستگاه‌های دوچرخه، انتخاب مسیرها بین مبدأ و مقصد کاربران و میزان موجودی دوچرخه‌ها در ایستگاه‌ها. تصمیمات طراحی با در نظر گرفتن هزینه کل و سطح دسترس‌پذیری سیستم (وجود داشتن دوچرخه در ایستگاه‌هایی که کاربر درخواست می‌دهد و پوشش مطلوب مبدأ و مقصد کاربران) ساخته‌شده است.

یکی از عوامل موفقیت این سیستم این است که کاربران به‌راحتی با پیمودن یک مسیر پیاده‌روی کوتاه به ایستگاه‌های دوچرخه دسترسی پیدا کنند. این سیستم نیاز به وجود تعداد کافی ایستگاه‌های دوچرخه دارد تا این ایستگاه‌ها در مکان‌های مناسب جهت استفاده کاربران قرار گیرد و کاربران بتوانند دوچرخه را در نزدیکی مبدأ خود دوچرخه را تحویل بگیرند و در نزدیکی مقصد خود دوچرخه را تحویل دهند. مثال‌های موجود نشان می‌دهد که ایستگاه‌های دوچرخه نباید بیش از ۳۰۰-۵۰۰ متر از مبدأ و مقصدهای مهم قرار گیرد.

طراحی مطلوب این سیستم نیاز به یکپارچه کردن دیدگاه‌های هزینه‌های سفر کاربران، هزینه‌های موجود در دوچرخه و هزینه‌های تأسیسات ایستگاه‌های دوچرخه و خطوط دوچرخه و همچنین سطح سرویس دارد. هدف از این مطالعه ایجاد یک مدل رسمی است که چنین دیدگاهی یکپارچه را فراهم می‌کند و همچنین روش‌هایی برای به دست آوردن راه‌حل برای متغیرهای طراحی در شرایط عملی ایجاد می‌کند.

۳- فرموله سازی مسئله

در سامانه اشتراک‌گذاری دوچرخه در طول عملیات روزانه و استفاده کاربران، توزیع دوچرخه در سیستم از توازن خارج می‌شود. جابجایی دوچرخه‌ها باعث می‌شود که در ساعاتی از روز یک ایستگاه خالی از دوچرخه شود و یا در ایستگاه دیگر تجمع زیادی از دوچرخه‌ها به وجود بیاید و امکان پارک دوچرخه دیگر وجود نداشته باشد. این امر منجر به کیفیت پایین خدمات و نارضایتی کاربر می‌شود. برای جلوگیری از چنین سناریویی، اپراتورها دوچرخه‌ها را در سراسر شبکه جابه‌جا می‌کنند تا سیستم به توزیع مناسب دست یابد. عملیات توزیع مجدد دوچرخه‌ها در شبکه با استفاده از خودروها و یا کامیون‌های حمل دوچرخه انجام می‌شود که منجر به متعادل‌سازی دوچرخه‌ها در ایستگاه‌ها می‌شود. در توزیع مجدد دوچرخه‌ها مبحث زمان و تعداد دفعات توزیع دوچرخه‌ها، مسیریابی کامیون‌های حمل دوچرخه و ترغیب کاربران به متعادل‌سازی سیستم مطرح می‌شود که بحث چالش‌برانگیزی می‌باشد. یکی از عوامل تأثیرگذار در هزینه توزیع و متعادل‌سازی سیستم موقعیت قرارگیری ایستگاه‌ها و چیدمان ایستگاه‌ها در سیستم می‌باشد. در این مطالعه ابتدا معیارهای ارزش‌گذاری بر مکان و تعداد و ظرفیت ایستگاه‌ها شناسایی خواهد شد و همچنین کیفیت چیدمان ایستگاه‌ها ازنظر تسهیل و کارایی باز توزیع دوچرخه‌ها بین ایستگاه‌ها بررسی خواهد گردید. با توجه به اهداف گفته‌شده، برای حل مسئله دو تابع هدف در نظر گرفته شده است. تابع اول برازش دسترس‌پذیری سامانه و تابع دوم برازش هزینه توزیع مجدد سامانه را محاسبه می‌نماید. در ادامه این دو تابع به تفضیل شرح داده شده است.

۳-۱- برازش دسترس‌پذیری

این تابع میزان دسترس‌پذیری سامانه را با توجه به چینش ایستگاه‌ها و ماتریس تقاضا محاسبه می‌نماید. هدف ما در این مقاله مکان‌یابی k ایستگاه دوچرخه به‌نحوی‌که متوسط فاصله سلول‌ها (با احتساب وزن آن‌ها) از ایستگاه محلی حداقل گردد. این محاسبه باید بدین‌صورت انجام شود که برای هر سلول فاصله آن با نزدیک‌ترین ایستگاه محاسبه شود و سپس متوسط وزن‌دار همه گرفته شود. توزیع تعدادی دوچرخه‌ها در ایستگاه‌ها متناسب با تقاضای سلول‌های مجاور آن‌ها باشد.

(۱)

$$f(x_1, x_2, \dots, x_n) = \frac{\sum_{i=1}^{n} D(i, x_1, x_2, \dots, x_n) \times w_i}{\sum_{i=1}^{n} w_i}$$

$$D(i, x_1, x_2, \dots, x_j) = Min\left\{\frac{1}{b_j} \times d(i,j) \times (1 + MaxValue \times (1 - x_j))\right\}$$

تعداد ایستگاه ها $= K$
در هر سلول ایستگاه وجود دارد یا ندارد $= x_i$
وزن هر سلول بر اساس ماتریس تقاضا $= w_i$
تعداد سلول ها $= n$
تعداد دوچرخه ها در هر سلول $= b_j$
فاصله بین دو سلول $= d(i,j)$

۳-۲- برازش توزیع مجدد

شبکه ایستگاه‌ها ازنظر بالانس نمودن مجدد به‌وسیله کامیون توزیع مجدد می‌بایست حداقل هزینه را داشته باشد. تور بین ایستگاه‌ها ازنظر ترافیک و سادگی حرکت کامیون مناسب باشد. به شبکه ایستگاه‌ها ازنظر اینکه چقدر احتمال دارد وارد حالت غیر متعادل بشود باید بتوانیم یک عدد بین ۰ و ۱ تخمینی اختصاص دهیم و این عدد ضریب هزینه تور خواهد بود. در این مقاله یک مدل مارکوف دوحالته این احتمال را به دست خواهد آمد. به دلیل اینکه در سامانه اشتراک‌گذاری دوچرخه احتمال گذار سیستم از حالت به حالت دیگر مستقل از مرحله آن می‌باشد از مدل زنجیره مارکوف همگن استفاده می‌کنیم. برای محاسبه هزینه توزیع مجدد سیستم با استفاده از الگوریتم زنجیره مارکوف گسسته ابتدا حالت اولیه سیستم را به دست می‌آوریم. پس‌ازآن با استفاده از ماتریس احتمال حرکت بین سلول‌ها که شامل درصد احتمال حرکت از یک سلول به سلول دیگر می‌باشد، ماتریس انتقال را به دست می‌آوریم. همان‌طور که در قطعه کد زیر نشان داده‌شده است ابتدا سلول‌هایی را که در آن ایستگاه وجود دارد را به دست می‌آوریم و سپس ماتریس انتقال را بر اساس این سلول‌ها به دست می‌آوریم.

۳-۳- کدگذاری کروموزوم‌ها

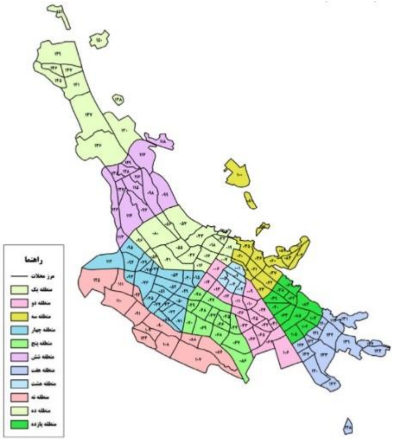
هر کروموزوم نشان‌دهنده چینش ایستگاه‌ها در سلول‌های متفاوت می‌باشد. هر کروموزوم به تعداد سلول‌های نظر گرفته‌شده در سطح شهر، دارای ژن‌های متفاوت می‌باشد. هر ژن موجود در کروموزوم نشان‌دهنده یکی از سلول‌های شهر می‌باشد و مقدار آن نشان‌دهنده تعداد دوچرخه‌های موجود در آن سلول می‌باشد. درصورتی‌که مقدار ژن صفر باشد در آن سلول ایستگاهی وجود نخواهد داشت و درصورتی‌که مقدار ژن مخالف صفر باشد در آن سلول ایستگاه وجود خواهد داشت و مقدار ژن نشان‌دهنده تعداد دوچرخه در آن ایستگاه می‌باشد. به‌طور مثال در شکل زیر نمونه کروموزوم‌های ایجادشده در سیستم مشاهده می‌شود.

0	0	0	12	0	0	15	0	0	12	0	0	0	10	0	0	0	0	15	0	0	0	0	0	11	0
0	13	0	0	0	0	0	0	0	15	15	0	0	0	5	0	0	0	15	0	0	0	0	0	12	0

شکل ۱: نمونه کروموزوم ایجادشده در سیستم

۴- مدل پیشنهادی

برای یافتن راه‌حل تقریبی بهینه مسئله از الگوریتم ژنتیک استفاده‌شده است. در این روش شهر به‌صورت سلول‌هایی در نظر گرفته‌شده است. هر سلول دارای ویژگی‌های وزن و موقعیت جغرافیایی (*latitude, longitude*) می‌باشد. وزن هر سلول بر اساس معیارهایی ازجمله میزان نزدیک بودن به اماکن عمومی مانند مدرسه، دانشگاه، کتابخانه، ایستگاه اتوبوس، ایستگاه مترو محاسبه می‌شود و به‌صورت ورودی در الگوریتم استفاده می‌شود.

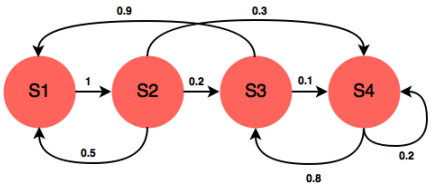


شکل ۲: محدوده جغرافیایی محلات به تفکیک مناطق شهرداری شیراز **[10]**

در مرحله بعد جمعیت اولیه از کروموزوم‌های مختلفی شامل چیدمان ایستگاه‌ها در سلول‌های مختلف ایجاد می‌شود. در هر کروموزوم با توجه به حداکثر تعداد دوچرخه موجود در سیستم و تعداد ایستگاه‌های موردنیاز سلول‌ها چیده می‌شوند. در این روش کروموزوم‌ها نشان‌دهنده نحوه چینش ایستگاه‌ها می‌باشد. هر ژن در این کروموزوم‌ها نماینده یک سلول می‌باشد که مقدار ژن معادل تعداد دوچرخه‌های موجود در سلول می‌باشد. درصورتی‌که مقدار ژن برابر با صفر باشد، در آن سلول ایستگاهی وجود نخواهد داشت. در غیر این صورت مقدار ژن برابر با تعداد دوچرخه موجود در آن سلول می‌باشد و این سلول در این کروموزوم به‌عنوان ایستگاه در نظر گرفته می‌شود.

حال برای ارزیابی هر کروموزوم از تابع برازش استفاده می‌نماییم. در این تابع مقدار برازش هر کروموزوم تعیین می‌شود. هدف حداقل کردن این تابع است. پس احتمال انتخاب کروموزومی برای تولید نسل بیشتر است که مقدار محاسبه‌شده توسط تابع برازش برای آن کمتر باشد. مقدار برازش در هر کروموزوم برابر با میزان دسترس‌پذیری و هزینه متعادل‌سازی مجدد می‌باشد. دسترس‌پذیری معادل با میزان مسافتی که کاربر باید طی کند تا به نزدیک‌ترین ایستگاه برسد می‌باشد. جهت بالا بردن دسترس‌پذیری می‌بایست چیدمان ایستگاه‌ها به نحوی باشند که میزان مسافت طی شده توسط کاربران حداقل باشد.

برای محاسبه هزینه متعادل‌سازی مجدد از مدل زنجیره مارکوف استفاده می‌نماییم. به دلیل اینکه در سامانه اشتراک‌گذاری دوچرخه احتمال گذار سیستم از حالت به حالت دیگر مستقل از مرحله آن می‌باشد از مدل زنجیره مارکوف همگن استفاده می‌کنیم. ماتریس گذار ماتریسی است که عنصر تشکیل‌دهنده‌ی آن در سطر i و ستون j مقدار P_{ij} یا همان احتمال حرکت کاربر از سلول i به سلول j است. تمام عناصر این ماتریس غیر منفی می‌باشد همچنین مجموع عناصر هر سطر برابر با یک است اما مجموع عناصر یک ستون الزاماً یک نیست. در این سیستم تعداد سطر و ستون‌های ماتریس گذار به تعداد سلول‌ها می‌باشد که هر عدد در این ماتریس احتمال حرکت از یک سلول به سلول دیگر می‌باشد.



شکل ۳: گراف وزن‌دار زنجیره مارکوف

$$P = \begin{array}{c} \\ S_1 \\ S_2 \\ S_3 \\ S_4 \end{array} \begin{array}{c} \begin{array}{cccc} S_1 & S_2 & S_3 & S_4 \end{array} \\ \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0.5 & 0 & 0.2 & 0.3 \\ 0.9 & 0 & 0 & 0.1 \\ 0 & 0 & 0.8 & 0.2 \end{bmatrix} \end{array}$$

شکل ۴: ماتریس گذار

ماتریس وضعیت اولیه نمایانگر میزان درخواست‌ها در هر ایستگاه می‌باشد. برای محاسبه وضعیت بعدی سیستم، ماتریس وضعیت جاری را در ماتریس گذار ضرب می‌کنیم و نتیجه حاصل‌شده وضعیت سیستم را در حالت بعدی نشان خواهد داد. این کار را تا n مرحله تکرار می‌کنیم. وضعیت نهایی را سیستم را در تعداد دوچرخه‌های کل ضرب می‌کنیم تا تعداد دوچرخه در هر ایستگاه در وضعیت نهایی تعیین گردد. با مقایسه تعداد دوچرخه‌ها در هر ایستگاه در وضعیت اولیه و وضعیت نهایی می‌توانیم تعداد دوچرخه‌هایی که نیاز به توزیع مجدد دارند را محاسبه کنیم. هر چه که تعداد دوچرخه‌ها در سیستم برای متعادل‌سازی مجدد کمتر باشد، متعاقباً هزینه متعادل‌سازی مجدد نیز کمتر خواهد بود.

۵- ارزیابی

الگوریتم مطرح‌شده در مدل پیشنهادی باهدف امکان مقایسه و ارزیابی نتایج طی ۲۰ مرحله متفاوت با ورودی‌های ثابت اجرا شده است. در ۱۰ مرحله اول در تابع برازش تنها مقدار دسترس‌پذیری به‌عنوان مقدار برازش در نظر گرفته شد و خروجی آن را که شامل مکان و ظرفیت ایستگاه بود را به‌عنوان ورودی در شبیه‌ساز سامانه مورداستفاده قرار گرفت. پس از اجرای الگوریتم شبیه‌ساز، عملکرد سامانه با توجه به تعداد دوچرخه‌های موردنیاز به توزیع مجدد و تعداد درخواست‌های پاسخ‌داده‌شده کاربران بررسی گردید. نتیجه خروجی الگوریتم شبیه‌ساز در این مرحله را در جدول زیر مشاهده می‌نمایید.

جدول۱: خروجی شبیه‌ساز سامانه بدون در نظر گرفتن متعادل‌سازی مجدد

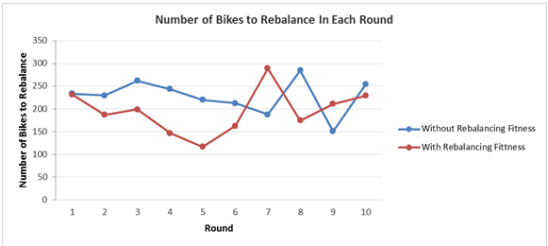
ردیف	تعداد دوچرخه‌های موردنیاز به توزیع مجدد	تعداد درخواست‌های پاسخ داده‌شده کاربران
۱	۲۳۴	۵۲۲
۲	۲۳۰	۵۵۶
۳	۲۶۲	۶۲۷
۴	۲۴۴	۵۸۶
۵	۲۲۰	۶۰۹
۶	۲۱۳	۵۱۸
۷	۱۸۸	۵۳۳
۸	۲۸۵	۷۹۶
۹	۱۵۱	۶۱۲
۱۰	۲۵۴	۷۲۶
متوسط	۲۲۸	۶۰۸

در ۱۰ مرحله دوم مقدار دسترس‌پذیری و هزینه متعادل‌سازی مجدد به‌عنوان مقدار خروجی در نظر گرفته شد و خروجی آن را که شامل مکان و ظرفیت ایستگاه بود را به‌عنوان ورودی در شبیه‌ساز سامانه مورداستفاده قرار گرفت. پس از اجرای الگوریتم شبیه‌ساز، عملکرد سامانه در این مرحله نیز بررسی گردید. نتیجه خروجی الگوریتم شبیه‌ساز با در نظر گرفتن متعادل‌سازی مجدد را در جدول زیر مشاهده می‌نمایید.

جدول۲: خروجی شبیه‌ساز سامانه با در نظر گرفتن متعادل‌سازی مجدد

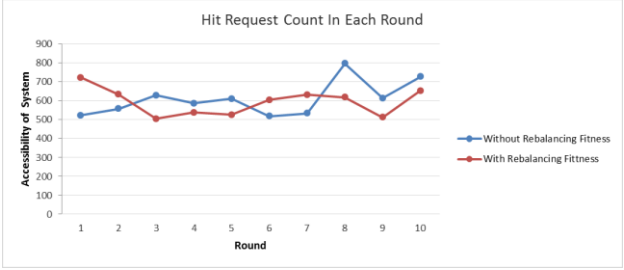
ردیف	تعداد دوچرخه‌های موردنیاز به توزیع مجدد	تعداد درخواست‌های پاسخ داده‌شده کاربران
۱	۲۳۲	۷۲۱
۲	۱۸۷	۶۳۳
۳	۱۹۹	۵۰۴
۴	۱۴۷	۵۳۷
۵	۱۱۷	۵۲۵
۶	۱۶۳	۶۰۳
۷	۲۸۹	۶۳۱
۸	۱۷۵	۶۱۷
۹	۲۱۱	۵۱۱
۱۰	۲۲۹	۶۵۲
متوسط	۱۹۴	۵۹۳

مقایسه خروجی‌ها در شبیه‌ساز نشان می‌دهد که در سامانه به اشتراک‌گذاری دوچرخه، در حالتی که هزینه متعادل‌سازی مجدد در چینش ایستگاه‌ها در نظر گرفته نشود، به‌طور متوسط ۲۲۸ دوچرخه نیاز به متعادل‌سازی مجدد دارند. در حالتی که هزینه متعادل‌سازی را در تابع برازش چیدمان ایستگاه‌ها تأثیر می‌دهیم، تعداد دوچرخه‌هایی که در سیستم نیاز به متعادل‌سازی مجدد دارند به ۱۹۴ دوچرخه کاهش می‌یابد. در شکل زیر نمودار مقایسه این دو حالت را می‌توانید مشاهده نمایید.



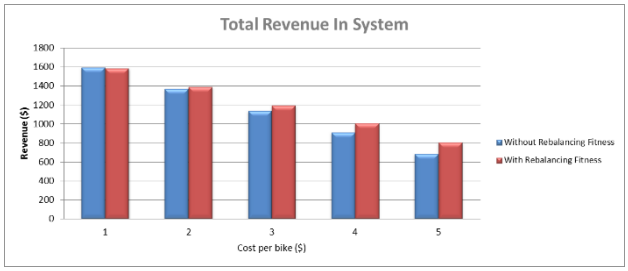
شکل ۵: مقایسه تعداد دوچرخه‌های موردنیاز به متعادل‌سازی مجدد

همچنین مقایسه خروجی‌ها پس از اجرای شبیه‌ساز سامانه نشان می‌دهد که متوسط تعداد درخواست‌های پاسخ داده‌شده کاربران، بدون در نظر گرفتن هزینه متعادل‌سازی مجدد در چیدمان ایستگاه‌ها، ۶۰۸ می‌باشد. هنگامی‌که هزینه متعادل‌سازی را در تابع برازش چیدمان ایستگاه‌ها تأثیر می‌دهیم، متوسط تعداد درخواست‌های پاسخ داده‌شده کاربران به ۵۹۳ کاهش می‌یابد. در شکل زیر نمودار مقایسه این دو حالت را می‌توانید مشاهده نمایید.



شکل ۶: مقایسه متوسط ورنی مسافت طی شده جهت دسترسی به دوچرخه

برای مقایسه درآمد خالص سیستم در دو حالت ذکرشده از دو پارامتر استفاده می‌نماییم. پارامتر اول هزینه توزیع مجدد به ازای هر دوچرخه است و پارامتر دوم میزان درآمد حاصل‌شده از تعداد درخواست‌های پاسخ داده‌شده کاربران می‌باشد. با ضرب کردن پارامتر هزینه توزیع هر دوچرخه به ازای مقادیر ۱ تا ۵ دلار و ضرب کردن پارامتر تعداد درخواست‌های پاسخ داده‌شده به ازای مقدار ۳ دلار، امکان مقایسه تأثیر مدل پیشنهادی در درآمد خالص سیستم تعیین می‌شود. مقادیر ۱ تا ۵ دلار را در متوسط تعداد دوچرخه‌های موردنیاز به توزیع مجدد و مقدار درآمد ۳ دلار به ازای اجاره هر دوچرخه را در متوسط تعداد درخواست‌های پاسخ داده‌شده ضرب می‌نماییم. برای به دست آوردن درآمد خالص سیستم هزینه توزیع مجدد را از درآمد کلی حاصل از سیستم کسر می‌کنیم. مقایسه این دو حالت در نمودار زیر مشاهده می‌شود.



شکل ۶: مقایسه درآمد خالص سیستم در دو حالت

همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود، با در نظر گرفتن مقدار برازش هزینه توزیع مجدد در جانمایی ایستگاه‌ها، درآمد خالص سیستم بیشتر خواهد بود.

۶- نتیجه‌گیری

امروزه سامانه اشتراک‌گذاری دوچرخه به‌عنوان یکی از سامانه‌های حمل‌ونقل عمومی بکار می‌رود. در این سامانه‌ها، شناسایی مناطق مناسب ایستگاه دوچرخه، پیش‌بینی تعداد دوچرخه موردنیاز در ایستگاه و نحوه توزیع دوچرخه‌ها از اهمیت خاصی برخوردار است. جهت افزایش دسترس‌پذیری سیستم، تعیین موقعیت ایستگاه‌ها یکی از عوامل کلیدی می‌باشد. جهت کاهش هزینه سیستم، کاهش میزان توزیع مجدد دوچرخه‌ها نیز از عوامل کلیدی می‌باشد. در این مطالعه، مدلی جهت بهینه‌سازی مکان ایستگاه‌ها با توجه به کاهش هزینه توزیع دوچرخه‌ها ارائه شد.

جهت مکان‌یابی بهینه ایستگاه‌های دوچرخه از الگوریتم ژنتیک بهره گرفته شد. در تابع برازش این الگوریتم دو پارامتر میزان دسترس‌پذیری و هزینه متعادل‌سازی مجدد در نظر گرفته شد. چیدمان بهینه ایستگاه‌ها با توجه به افزایش دسترس‌پذیری و کاهش هزینه متعادل‌سازی مجدد محاسبه گردید. نتایج خروجی در دو حالت مختلف یکی با در نظر گرفتن هزینه متعادل‌سازی مجدد و دیگری بدون در نظر گرفتن هزینه متعادل‌سازی مجدد باهم مقایسه شدند. با توجه به نمودارها و مقادیر خروجی مشاهده گردید که با در نظر گرفتن هزینه متعادل‌سازی مجدد در چیدمان ایستگاه‌ها، تعداد دوچرخه‌هایی که نیاز به متعادل‌سازی مجدد دارند، کاهش پیدا کرد و تعداد درخواست‌های پاسخ‌داده‌شده کاربران به مقدار کمی کاهش یافت. جهت مقایسه این دو مقدار و تأثیر آن‌ها در درآمد خالص، مقادیر به‌دست‌آمده را به دلار تبدیل کرده و مشاهده شد که با در نظر گرفتن مقدار برازش هزینه توزیع مجدد در جانمایی ایستگاه‌ها درآمد خالص سیستم افزایش خواهد یافت..

مراجع

[1] J. Lin and T. Yang, "Strategic design of public bicycle sharing systems with service level constraints," *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, pp. 284-294, 03 2011.

[2] F. Chiariotti, C. Pielli, A. Zanella and M. Zorzi, "A Dynamic Approach to Rebalancing Bike-Sharing Systems," *Sensor*, p. 512, 08 02 2018.

[3] A. Pal and Y. Zhang, "Free-floating bike sharing: Solving real-life large-scale static rebalancing problems," *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, pp. 92-116, 07 2017.

[4] C. Park and S. Y. Sohn, "An optimization approach for the placement of bicycle-sharing stations to reduce short car trips," *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, pp. 154-166, 2017.

[5] P. Jensen, J. Rouquier, N. Ovtracht and C. Robardet, "Characterizing the speed and paths of shared bicycle use in Lyon," *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, p. 522–524, 2010.

[6] L. M. Martinez, L. Caetano, T. Eiró and F. Cruz, "An Optimisation Algorithm to Establish the Location of Stations of a Mixed Fleet Biking System: An Application to the City of Lisbon," *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, pp. 513-524, 2012.

[7] A. Kabra, E. Belavina and K. Girotra, "Bike-Share Systems: Accessibility and Availability," *SSRN Electronic Journal*, 2018.

[8] L. Chen, D. Zhang, G. Pan, X. Ma, D. Yang and K. Kushlev, "Bike sharing station placement leveraging heterogeneous urban open data," *Proceedings of the 2015 ACM International Joint Conference on Pervasive and Ubiquitous Computing - UbiComp 15*, 2015.

[9] J.-R. Lin, T.-H. Yang and Y.-C. Chang, "A hub location inventory model for bicycle sharing system design: Formulation and solution," *Computers & Industrial Engineering*, pp. 77-86, 2013.

[۱۰] شهرداری شیراز, "محله بندی شهر شیراز با رویکرد توسعه همگون و متوازن," ۱۳۹۶.