دانشگاه تربیت مدرس
دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست

پایان‌نامه کارشناسی ارشد
مهندسی عمران (برنامه ریزی حمل‌ونقل)

طراحی شبکه خطوط حمل‌ونقل همگانی با استفاده از یک روش ابتکاری

دانشجو

ایران خانزاد

استاد راهنما

دکتر سید احسان سیدابریشمی

استاد مشاور

دکتر امیررضا ممدوحی

دی 1393

تقدیم‌به

محضر ارزشمند پدر و مادر عزیزم که در تمامی مراحل زندگی حامی و

مشوق من بوده‌اند و باصبرومهربانی خود

چگونه زیستن را به من آموختند.

چکیده

طراحی خطوط شبکه حمل‌ونقل همگانی، به‌عنوان یکی از پیچیده‌ترین مسائل در زمینه برنامه‌ریزی حمل-ونقل، می‌تواند نقش مهمی در افزایش سهم حمل‌ونقل همگانی در سفرهای شهری و کاهش تراکم ترافیک داشته باشد. در برخی از مطالعات پیشین، روش تولید و توسعه مسیر، با انتخاب مبدأ- مقصد و تشکیل کوتاه-ترین مسیر بین آن‌ها برای تولید مسیر و ورود گره به مسیر برای پوشش تقاضای بیشتر برای توسعه آن مورد استفاده قرار گرفته است. مطالعه جاری با اضافه کردن محدودیت‌های جدید به مسأله در نظر دارد تا روش توسعه مسیر پیشین را بهبود داده تا شرایط بهتری برای پیاده‌سازی در شبکه‌های شهری فراهم شود. در روش پیشنهادی توسعه مسیر با ورود گره‌هایی با فاصله یک کمان از گره‌های کوتاه‌ترین مسیر، بین گره‌هایی از کوتاه‌ترین مسیر با کمترین فاصله از آنها صورت می‌گیرد و برخلاف روش پیشین گره مجاور بین تمام زوج گره‌های کوتاه‌ترین مسیر وارد نمی‌شود. علاوه بر این در روش پیشنهادی فاصله بین زوج گره‌ها در مسیر به 1/5 برابر فاصله کوتاه‌ترین مسیر بین زوج گره محدود شده و اشتراک کمان هر مسیر با سایر مسیرهای شبکه نیز به 4 کمان محدود می‌شود.

روش حل پیشنهادی در محیط نرم‌افزار متلب نوشته شده و برای شبکه نمونه سوفالز پیاده‌سازی شده است. نتایج پیاده‌سازی نشان‌دهنده‌ی کاهش 72 درصدی تعداد مسیرها در شبکه سوفالز با اضافه شدن شرطی برای کمینه‌سازی مقدار زمان سفر برای مسیرهای شبکه است. همچنین نتایج تحلیل حساسیت نشان می‌دهند که روش حل پیشنهادی برای پوشش تقاضای 30 درصد، تعداد مسیرهای شبکه را 70 درصد کاهش می‌دهد. همچنین برای همین مقدار پوشش تقاضا، میزان هم‌پوشانی در روش پیشنهادی تا یک سوم کاهش پیدا می‌کند.

کلید واژه‌ها: طراحی شبکه، تولید و توسعه مسیر، ورود گره، طراحی شبکه حمل‌ونقل همگانی

فهرست مطالب

عنوان | صفحه

فصل 1

مقدمه و تعریف مسأله 1

1-1 مقدمه 1

1-2 مسأله طراحی خطوط شبکه حمل‌ونقل 1

1-3 تعریف مسأله 4

1-4 فرض‌های مسأله 4

1-5ساختار پایان‌نامه 5

فصل 2

مروری بر مطالعات پیشین 6

2-1 مقدمه 6

2-2 مطالعات صورت گرفته در زمینه ترکیب دو روش حل 12

2-2-1 مطالعه مندل 12

2-2-2 مطالعه سدر و ویلسون 13

2-2-3 مطالعه لی و ووچیک 13

2-2-4 مطالعه سدر و اسدی 14

2-2-5 مطالعه سیپریانی و همکاران 15

2-2-6 مطالعه باج و مهمسانی 15

2-2-7 مطالعه موتون و اورکوهارت 17

2-3 جمع‌بندی 18

فصل 3

روش حل مسأله طراحی شبکه خطوط حمل‌ونقل همگانی 22

3-1 مقدمه 22

3-2 فرض‌ها 23

3-3 تعریف ریاضی مسأله 23

3-3-1 تابع هدف طراحی 24

3-3-2 محدودیت‌های طراحی 25

3-4 روش حل 26

3-4-1 فرآیند کلی ورود گره به مسیر 30

3-4-2 شرط پذیرش زیرمسیر 31

3-4-3 فرآیند توسعه مسیر نوع 1 32

3-4-4 فرآیند توسعه مسیر نوع 2 34
3-4-5 شرط کمینه طول مسیر 39
3-4-6 شرط بیشینه هم‌پوشانی مسیرها 39
5-3 جمع‌بندی 40

فصل 4
کاربرد روش حل پیشنهادی 42
4-1 مقدمه 42
4-2 پیاده‌سازی روش حل پیشنهادی برای مثال عددی 42
4-3 پیاده‌سازی روش حل پیشنهادی برای شبکه سوفالز 53
4-3-1 سناریو شماره یک 58
4-3-2 سناریو شماره دو 60
4-3-3 سناریو شماره سه 61
4-3-4 سناریو شماره چهار 62
4-3-5 سناریو شماره پنج 63
4-3-6 سناریو شماره شش 64
4-4 تحلیل حساسیت پارامترهای ورودی مسأله 67
4-4-1 تحلیل حساسیت مقدار(m) 67
4-4-2 تحلیل حساسیت مقدار کمینه و بیشینه زمان سفر زیرمسیر 70
4-4-3- تحلیل حساسیت درصد پوشش تقاضای حمل‌ونقل همگانی 72
4-5 جمع‌بندی 75

فصل 5
نتیجه‌گیری و پیشنهادها 77
5-1 خلاصه مطالعه 77
5-2 نتیجه‌گیری 78
5-3 پیشنهادها 79

فهرست شکل‌ها

عنوان صفحه

شکل (1-1) مراحل طراحی شبکه حمل‌ونقل همگانی 2
شکل (2-1) دسته‌بندی مسائل طراحی شبکه حملو نقل همگانی 7
شکل (2-2) روش حل ابتکاری بر اساس تشکیل مسیر بهینه 10
شکل (2-3) روش حل ابتکاری بر اساس توسعه مسیر اولیه) 11
شکل (3-1) شبه کد بدنه اصلی روش حل پیشنهادی برای طراحی خطوط شبکه حمل‌ونقل همگانی 27
شکل (3-2) نحوه ورود گره بین دو گره از مسیر 31
شکل (3-3) شبه کد پذیرش زیرمسیر 32
شکل (3-4) نمونه‌هایی از مجاورت گره منتخب با دو یا بیش از دو گره از مسیر 32
شکل (3-5) ورود گره جدید در مسیر نامزد از طریق ورود بین هر زوج گره از مجموعه گره‌های با فاصله یک کمان . 33
شکل (3-6) شبه کد فرآیند توسعه مسیر نوع 1 34
شکل (3-7) حالات ورود گره به مسیر در فرآیند توسعه مسیر نوع 2 35
شکل (3-8) شبه کد فرآیند توسعه مسیر 2 36
شکل (3-9) حالت خاص ایجاد حلقه با درنظر گرفتن تمام شروط مسأله 37
شکل (3-10) توسعه مسیر با اعمال شروطی برای جلوگیری از تشکیل حلقه 37
شکل (4-1) ساختار شبکه مثال عددی 42
شکل (4-2) زمان سفر کوتاه‌ترین مسیر از گره 1 به گره‌های شبکه 45
شکل (4-3) کوتاه‌ترین مسیر بین زوج گره (11و1) 46
شکل (4-4) نمایش شبکه سوفالز به‌عنوان شبکه مطالعه موردی 55
شکل (4-5) شبکه حاصل از پیاده‌سازی سناریو یک در شبکه سوفالز 60
شکل (4-6) شبکه حاصل از اجرای سناریو چهار و شش 67
شکل (4-7) تغییر شاخص‌های ارزیابی با تغییر مقدار m 68
شکل (4-8) تغییر زمان سفر در شبکه با تغییر مقدار m 68
شکل (4-9) تغییر تعداد مسیر در شبکه با تغییر مقدار m 69
شکل (4-10) تغییر هزینه بر تقاضا در شبکه با تغییر مقدار m 69
شکل (4-11) شبکه حاصل از پیاده‌سازی روش حل برای m=1/2 69
شکل (4-12) تغییر شاخص‌های ارزیابی با تغییر بازه مجاز زمان سفر زیرمسیر 71
شکل (4-13) تغییر زمان سفر با تغییر بازه مجاز زمان سفر زیرمسیر 71
شکل (4-14) تغییر تعداد مسیر با تغییر بازه مجاز زمان سفر زیرمسیر 71
شکل (4-15) تغییر هزینه بر تقاضا با تغییر بازه مجاز زمان سفر زیرمسیر 71

شکل (4-16) شبکه حاصل از پیاده‌سازی روش حل برای بازه مجاز (15-20) زمان سفر زیرمسیر 72
شکل (4-17) تغییر شاخص‌های ارزیابی شبکه در درصد پوشش 30، 35 و 40 74
شکل (4-18) تغییرات زمان سفر شبکه در درصد پوشش 30، 35 و 40 74
شکل (4-19) تغییرات تعداد مسیر شبکه در درصد پوشش 30، 35 و 40 74
شکل (4-20) تغییرات هزینه بر تقاضا در شبکه در درصد پوشش 30، 35 و 40 74

فهرست جداول

عنوان صفحه

جدول (2-1) مروری بر مطالعات گذشته 20
جدول (3-1) معرفی پارامترهای مورد استفاده در روش حل پیشنهادی 24
جدول (4-1) ماتریس زمان سفر همگانی مثال عددی 43
جدول (4-2) ماتریس تقاضای سفر همگانی برای مثال عددی 44
جدول (4-3) توسعه‌ی کوتاه‌ترین مسیر بین زوج گره (11و1) با ورود گره‌های مجاور 47
جدول (4-4) نتایج پیاده‌سازی روش حل برای مثال عددی 48
جدول (4-5) شاخص‌های ارزیابی مسیرهای نهایی در شبکه حاصل از پیاده‌سازی روش حل پیشنهادی برای مثال عددی 48
جدول (4-6) نحوه محاسبه شاخص‌های ارزیابی شبکه 49
جدول (4-7) حالات تشکیل زیرمسیرها با ورود گره 7 به مسیر در فرآیند توسعه مسیر نوع دو 51
جدول (4-8) حالات تشکیل زیرمسیرها با ورود گره 7 به مسیر در فرآیند توسعه مسیر نوع دو 52
جدول (4-9) نتایج پیاده‌سازی روش حل پیشنهادی برای مثال عددی 53
جدول (4-10) ماتریس تقاضای سفر همگانی 56
جدول (4-11) ماتریس زمان سفر حمل‌ونقل همگانی 57
جدول (4-12) مسیرهای پیشنهادی حمل‌ونقل همگانی برای شبکه سوفالز با روش حل پیشنهادی در سناریو شماره یک 60
جدول (4-13) مسیرهای پیشنهادی حمل‌ونقل همگانی برای شبکه سوفالز با روش حل پیشنهادی در سناریو شماره دو 61
جدول (4-14) مسیرهای پیشنهادی حمل‌ونقل همگانی برای شبکه سوفالز با روش حل پیشنهادی در سناریو شماره سه 62
جدول (4-15) مسیرهای پیشنهادی حمل‌ونقل همگانی برای شبکه سوفالز با الگوریتم پیشنهادی در سناریو شماره چهار 62
جدول (4-16) مسیرهای پیشنهادی حمل‌ونقل همگانی برای شبکه سوفالز با الگوریتم پیشنهادی در سناریو شماره پنج 63
جدول (4-17) مسیرهای پیشنهادی حمل‌ونقل همگانی برای شبکه سوفالز با الگوریتم پیشنهادی در سناریو شماره شش 64
جدول (4-18) نتایج پیاده‌سازی روش حل پیشنهادی برای شبکه سوفالز با شش سناریوی پیشنهادی 65
جدول (4-19) نتایج پیاده‌سازی روش حل پیشنهادی برای شبکه سوفالز با مقادیر مختلف m 68
جدول (4-20) نتایج پیاده‌سازی روش حل پیشنهادی برای شبکه سوفالز با مقدار 15و 20 برای کمینه و بیشینه زمان سفر زیرمسیرها 71
جدول (4-21) نتایج پیاده‌سازی روش حل پیشنهادی برای شبکه سوفالز با درصد پوشش 30، 35 و 40 73

فصل 1

مقدمه و تعریف مسأله

1-1 مقدمه

با رشد روزافزون تقاضای حمل‌ونقل، نقش سیاست‌گذاری مناسب و کارا در افزایش سهم وسایل نقلیه همگانی بسیار با اهمیت است. در این راستا، سیاست‌گذاران و گردانندگان سیستم حمل‌ونقل همگانی باید به دنبال راه‌کارهای اجرایی و سیاست‌های مدیریتی برای افزایش مطلوبیت استفاده از حمل‌ونقل همگانی باشند. این درحالی است که در چند دهه گذشته عواملی از قبیل رشد اقتصادی- اجتماعی، حفظ حریم شخصی و راحتی باعث شده‌است که سهم قابل توجهی از جامعه استفاده از وسایل نقلیه‌ی شخصی را به استفاده وسایل نقلیه‌ی همگانی ترجیح بدهند (Kepaptsoglou and Karlaftis, 2009)، از این‌رو راه‌کارهای اجرایی و سیاست‌های مدیریتی باید به‌گونه‌ای باشند که مطلوبیت استفاده از وسایل نقلیه شخصی را کاهش داده و به نوعی مشوق کاربران به استفاده از حمل‌ونقل همگانی باشند.

گسترش حمل‌ونقل همگانی کارا و سرویس‌دهی مناسب، با درنظر گرفتن معیارهای اقتصادی و محیط-زیستی، نه تنها از مشکلات ترافیکی می‌کاهد، بلکه گامی به سوی توسعه پایدار و توسعه محیط شهری خواهد بود. در جوامع کنونی اغلب سیستم‌های حمل‌ونقل همگانی بر اساس تجربیات و الگوهای تقاضا و کاربری زمین بنا نهاده شده‌اند. توسعه‌ی نامناسب این سیستم نارضایتی کاربران را به‌دنبال داشته و سهم حمل‌ونقل همگانی را از سفرهای درون شهری کاهش داده است. (صفری، 1384)

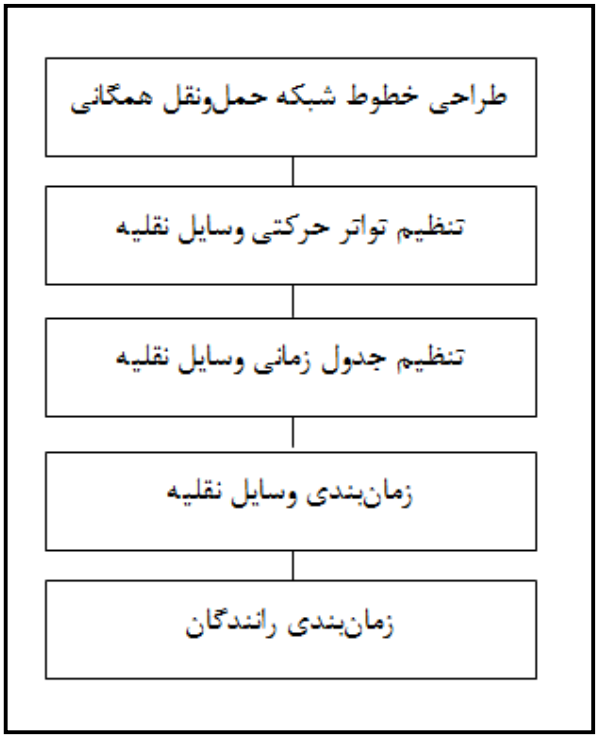
شبکه‌ای کارا برای حمل‌ونقل همگانی باید بتواند علاوه بر تأمین رضایت کاربران و سرویس‌دهی مناسب تقاضا، هزینه‌های موجود برای گردانندگان سیستم را تا جای ممکن به کمینه مقدار برساند و ایجاد این شرایط برای کاربران و گردانندگان سیستم به‌صورت هم‌زمان نقش طراحی بهینه برای خطوط شبکه حمل‌ونقل را معلوم می‌کند.

2-1 مسأله طراحی خطوط شبکه حمل‌ونقل

افزایش سهم حمل‌ونقل همگانی از سفرهای درون شهری در گرو میزان رضایت کاربران بوده که این مهم نیز با انتخاب هدف مناسب برای طراحی شبکه حمل‌ونقل همگانی و تلاش برای بهینه‌سازی آن حاصل می‌شود.

یکی از عوامل کارایی سیستم حمل‌ونقل همگانی و رضایت کاربران از سیستم حمل‌ونقل را می‌توان در زمان سفر کاربران از مبدأ به مقصد، شامل زمان سفر در داخل وسیله[1]، زمان انتظار[2]، زمان پیاده‌روی[3] (برای رسیدن از مبدأ به ایستگاه و از ایستگاه به مقصد)، دانست.

به طور کلی طراحی شبکه حمل‌ونقل همگانی در پنج مرحله شکل (1-2) صورت می‌گیرد:



شکل (1-1) مراحل طراحی شبکه حمل‌ونقل همگانی (Mauttone and Urquhart, 2009)

در مرحله‌ی ابتدایی، طراحی خطوط، تعیین مکان ایستگاه‌ها و موقعیت مسیرها نسبت به‌یکدیگر برای شبکه قرار دارد که براساس هدف مسأله و محدودیت‌ها حاصل می‌شود. در ادامه، در مرحله‌ی تنظیم تواتر حرکت وسایل نقلیه برای هرکدام از خطوط طراحی شده برنامه‌ی حرکتی و تعداد عبور وسایل در هر خط مشخص می‌شود. جدول زمانی باید شامل اطلاعات زمان حرکت از مبدأ، زمانی که انتظار می‌رود به یک

---

[1] In vehicle travel time
[2] Waiting time
[3] Walking time

ایستگاه مشخص برسد و زمان رسیدن به مقصد باشد. در دو مرحله‌ی انتهایی هم به تنظیم برنامه‌ی وسایل نقلیه و تخصیص رانندگان به این وسایل برای یک دوره‌ی خاص مثلاً یک هفته پرداخته می‌شود.

در مرحله طراحی خطوط شبکه حمل‌ونقل همگانی تلاش برای ایجاد کمان‌هایی در شبکه است که (Kepaptsoglou and Karlaftis, 2009):

1. امکان اجرای این کمان‌ها تا جای ممکن در شبکه شهری موجود باشد.
2. اطمینان کافی از مناسب بودن سیستم حمل‌ونقل همگانی برای کاربران را حاصل کند.
3. محدودیت منابع را ارضاء کند.

مسائل طراحی خطوط شبکه حمل‌ونقل همگانی در دو بخش فرمول‌بندی و حل مسأله مطرح می‌شوند. در بخش اول به تعریف تابع هدف، محدودیت‌ها و متغیرهای تصمیم در مسأله پرداخته می‌شود. توابع هدف در این مسائل برای کاربران شبکه عواملی از قبیل کمینه کردن هزینه‌های سفر، دسترسی، انتظار و تعداد جابجایی خط و بیشینه پوشش تقاضا توسط سیستم حمل‌ونقل همگانی است. از طرفی منافع برای گرداننده به‌صورت بیشترین بهره‌برداری یا سود ریالی است.

محدودیت در این مسائل اغلب محدودیت بودجه بوده که توسط گرداننده برای اجرای سیستم تعیین شده است. سایر محدودیت‌های این مسأله محدوده تواتر حرکت مناسب[4]، ظرفیت وسیله نقلیه، شکل و حداکثر طول مسیر، تعداد مسیر و اندازه‌ی ناوگان‌ها هستند.

یکی از مهم‌ترین مسائل وابسته به طراحی شبکه خطوط حمل‌ونقل همگانی چگونگی مدیریت سیستم برای استفاده کمینه از منابع با برقراری سطح خدمت مورد رضایت کاربران است. متغیرهای تصمیمی که برای بیشتر توابع هدف در نظر گرفته می‌شوند زمان، طول مسیر و تناوب عبوری وسایل نقلیه هستند ولی متغیرهای دیگری مانند کرایه، سطح خدمت، اندازه اتوبوس‌ها هم برای فرمول‌بندی مسأله طراحی خطوط شبکه حمل‌ونقل مورد استفاده قرار می‌گیرند.

روش حل مورد استفاده در طراحی خطوط شبکه حمل‌ونقل همگانی به دو دسته‌ی روش‌های دقیق و روش‌های تقریبی تقسیم شده که دسته دوم نیز خود به روش‌های ابتکاری و روش‌های فرایابنده تقسیم می‌شود. روش‌های ابتکاری در پی عدم کارایی روش‌های دقیق برای شبکه‌هایی با ابعاد بزرگ به‌وجود آمدند. این روش‌ها برخلاف دسته اول الزاماً جواب دقیق مسأله را نمی‌دهند، ولی می‌توانند جواب مناسبی برای شبکه‌های

---

[4]Range of feasible frequencies

واقعی ارائه دهند. این روش‌ها با استقبال زیادی از پژوهشگران روبرو شده‌اند. در ادامه این روش‌ها، روش‌های فرایابنده ابداع شدند که از جمله آن‌ها می‌توان به فرآیند ژنتیک[5]، فرآیند تجمع مورچگان[6]، جست‌وجوی ممنوع[7] و شبیه‌سازی گرم و سرد کردن[8] اشاره کرد.

3-1 تعریف مسأله

یکی از قدیمی‌ترین روش‌ها برای طراحی خطوط شبکه حمل‌ونقل همگانی استفاده از کوتاه‌ترین مسیر بین هر مبدأ و مقصد است. در ادامه روش‌های ابتکاری دیگری برای حل مسأله طراحی خطوط شبکه حمل-نقل همگانی برمبنای کوتاه‌ترین مسیر و با تغییر چند کمان از مسیرهای آن به‌وجود آمدند. روش‌های ابتکاری به‌صورت تنها یا به‌صورت ترکیبی با روش‌های فرایابنده برای حل این مسائل مورد استفاده قرار گرفتند.

ویژگی‌های مثبت این روش‌ها در شاخص‌های ارزیابی شبکه از جمله زمان سفر مسیرها و طول مسیرهای شبکه باعث شد تا به‌عنوان ابزار مناسبی برای حل مسائل مختلف پیش روی مهندسان حمل‌ونقل، قرار گیرد. تغییر مسیرهای ابتدایی به‌صورتی که بتوان با اضافه شدن گره‌ها و کمان‌های بیشتر در مسیر مقدار مناسبی برای تابع هدف حاصل شود یکی از روش‌های مورد استفاده برای طراحی خطوط شبکه حمل‌ونقل همگانی است.

4-1 فرض‌های مسأله

در این مطالعه برای طراحی خطوط شبکه حمل‌ونقل همگانی فرض‌های زیر در نظر گرفته شده است:

الف: تقاضای عبوری از کمان‌های شبکه به شرایط طراحی شبکه و مسیر بستگی ندارد و تقاضای مبدأ- مقصد ثابت است.

ب: زمان سفر کمان‌ها در طول مراحل طراحی ثابت فرض می‌شود و اثراتی مانند تراکم در کمان‌ها در نظرگرفته نمی‌شوند.

ج: اثر زمان‌بندی و برنامه‌ی حرکتی اتوبوس‌ها در مرحله‌ی طراحی در نظرگرفته نمی‌شود.

د: در تشکیل هر مسیر از هر کمان تنها یک بار می‌توان استفاده کرد.

---

[5] Genetic
[6] Ant colony
[7] Tabu search
[8] Simulated annealing

ه: طراحی در این مطالعه برای ایجاد مجموعه‌ای از خطوط حمل‌ونقل همگانی در شبکه گره‌ها و کمان‌هاست که مسیری بین آن‌ها موجود نبوده و مسیرهای حاصل از طراحی به عنوان تنها خطوط شبکه مورد استفاده قرار می‌گیرند.

5-1 ساختار پایان‌نامه

در ادامه‌ی این مطالعه در فصل دوم مروری بر مطالعات پیشینیان در زمینه طراحی خطوط شبکه حمل‌ونقل همگانی می‌شود. در فصل سوم به روش حل پیشنهادی و روند طراحی خطوط شبکه در این روش، در فصل چهارم به پیاده‌سازی این روش برای دو نمونه‌ی موردی شامل مثال عددی فرضی و شبکه سوفالز[9]، پرداخته می‌شود. در فصل پنجم جمع‌بندی مطالب و نتیجه‌گیری از مطالعه و ارائه پیشنهاداتی برای مطالعات آینده صورت می‌گیرد.

[9] Sioux falls

فصل 2

مروری بر مطالعات پیشین

2-1 مقدمه

اهمیت و پیچیدگی مسأله طراحی شبکه حمل‌ونقل همگانی پژوهشگران بسیاری را در چند دهه اخیر به مطالعه در این زمینه واداشته است که ابعاد آن از طراحی خطوط شبکه تا زمان‌بندی کارکنان، از محاسبات تقاضا تا تخصیص سفر به مسیر را دربرگرفته است. این گستردگی و پیچیدگی و اهمیت مسأله حمل‌ونقل همگانی از نظر اجرایی در جوامع مدرن کنونی از یک سو، و تنوع مسأله طراحی خطوط شبکه در زمینه تئوری از سوی دیگر، نیاز به مطالعات بیشتر را به‌دنبال داشته است. به‌همین دلیل مطالعات حمل‌ونقل همگانی بخش قابل توجهی از تحقیقات را به خود اختصاص داده است (Kepaptsoglou and Karlaftis, 2009).

برای ایجاد شبکه حمل‌ونقل همگانی شهری، طراحی خطوط شبکه اولین و مهم‌ترین گام است، زیرا خروجی از این مرحله درتمام مراحلی که در ادامه برای ایجاد شبکه وجود دارد استفاده می‌شود. هرگونه خطا در این مرحله باعث ایجاد خطا در محاسبات سایر مراحل می‌شود و اگر به‌صورت بهینه انجام گیرد باعث کاهش هزینه‌ها و توسعه کیفیت خدمت‌رسانی می‌شود.

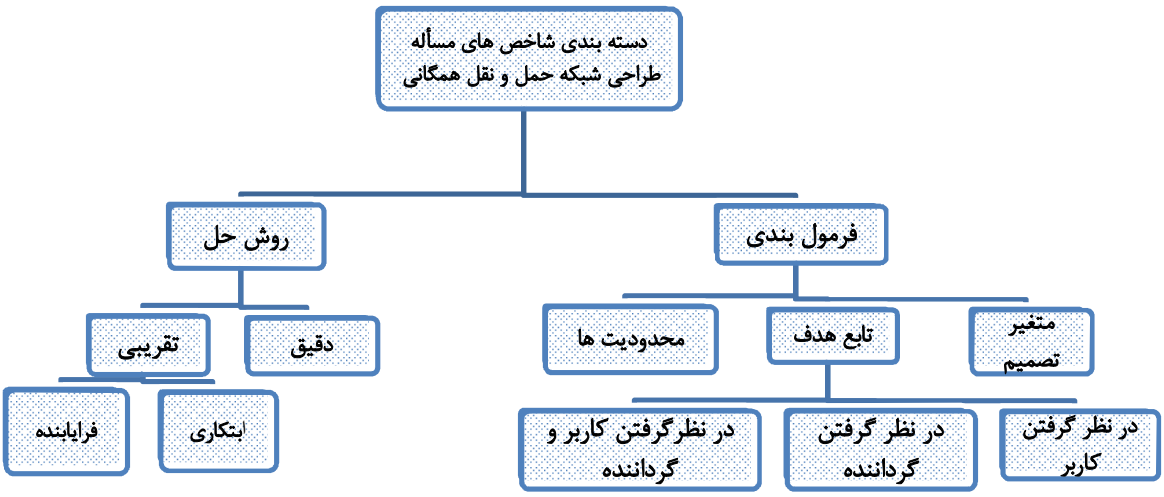
مسأله طراحی خطوط شبکه حمل‌ونقل همگانی را می‌توان به‌صورت یک مسأله بهینه‌سازی درآورد، که در گروه مسائل سخت برای حل[10] قرار می‌گیرد. دشواری حل این مسائل را باید در فضای جست‌وجوی گسترده و محدودیت‌های زیاد این مسائل دانست که حل این مشکلات و تلاش برای رسیدن به جواب بهینه، این مسائل را بسیار پیچیده می‌کند (Nayeem et al., 2014, Baxter et al., 2014). مندل[11] نیز در

---

[10] NP-Hard
[11] Mandle

مطالعه‌ی خود (Mandl, 1980) به این نکته اشاره کرده که توابع هدف گوناگونی برای این مسائل در نظر گرفته می‌شود هرچند که حل مسائلی از این نوع حتی در سطح بررسی یک تابع هدف نیز دشوار است.

در شکل (2-1) دسته‌بندی از شاخص‌های مسائل طراحی خطوط شبکه حمل‌ونقل همگانی، فرمول-بندی مسأله و روش‌های حل ارائه شده‌است. اولین مرحله در این مطالعات تعریف و انتخاب صورت مسأله است. تعریف مسأله با مشخص کردن هدف طراحی (از دید کاربر، گرداننده یا هردو)، انتخاب متغیری از شبکه که یافتن مقدار امکان‌پذیر و بهینه آن مقصود طراحی است و بررسی محدودیت گرداننده در تأمین منابع برای اجرای شبکه، انجام می‌شود.



شکل (2-1) دسته‌بندی مسائل طراحی شبکه حمل‌و نقل همگانی

با توجه به شکل (2-1) مراحل طراحی خطوط را می‌توان به‌صورت زیر دسته‌بندی کرد:

- انتخاب متغیرهای تصمیم (طراحی): متغیرهای تصمیم از مشخصات شبکه می‌باشند که برای نمایش شرایط واقعی از شبکه حمل‌نقل همگانی باید در نظر گرفته شوند این مشخصات نشان‌دهنده طرح کلی از شبکه و مشخصات اجرایی آن است.
- انتخاب تابع هدف: در مسائل طراحی شبکه، استفاده از توابع هدف برای هر دو دسته کاربران و گرداننده راه‌حلی مناسب به‌نظر می‌رسد که در آن‌ها بهینه‌سازی از دیدگاه هردو صورت می‌گیرد. این مسائل که می‌توان گفت ترکیبی از تمام مسائلی است که پیش‌تر برای طراحی خطوط حمل‌ونقل همگانی گفته شد از این جهت حائز اهمیت است که به یک اشتراک در حالت بهینه موجود بین کاربر و گرداننده می‌رسد.

تابع هدف در تعداد زیادی از مطالعات به‌صورت کمینه کردن هزینه در شبکه تعریف می‌شود. هزینه-های مربوط به طراحی خطوط شبکه حمل‌ونقل همگانی به طول مسیر، زمان سفرکامل اتوبوس و هزینه‌ها به-ازای هر کیلومتر و هر دقیقه سفر، بستگی دارد. هزینه‌های نهایی سیستم فقط به این عوامل وابسته نیست و به عواملی مانند برنامه‌ی حرکت اتوبوس‌ها و راننده‌ها نیز بستگی دارد، ولی ازآن‌جایی‌که این برنامه‌ها در مرحله‌ی طراحی خطوط در دسترس نیستند از آن‌ها برای محاسبه‌ی هزینه‌ها صرف نظر می‌شود (Schöbel, 2012).

- شناسایی محدودیت‌های مسأله: بهینه کردن هدف مسأله باید با درنظر گرفتن محدودیت‌های طراحی باشد.
- انتخاب روش حل مناسب با توجه به شرایط مسأله

برای حل این مسائل مطالعات و پیشنهادهای زیادی در زمینه روش حل و انتخاب روش مناسب با توجه به شرایط مسأله صورت گرفته که به دو دسته‌ی روش‌هایی با جواب دقیق برای مسأله و روش‌هایی با جواب تقریبی تقسیم می‌شوند که این دسته خود به دو گروه روش‌های ابتکاری و روش‌های فرایابنده تقسیم می‌شوند.

حل مسائل طراحی خطوط شبکه برای مسأله با تقاضای ثابت معمولاً جوابی مناسب ارائه می‌دهد ولی اگر مسأله با تقاضای متغیر مطرح شود ممکن است مشکلاتی برای حل به‌دنبال داشته‌باشد (Lee and Vuchic, 2005). پژوهشگران بسیاری از دیدگاه‌های مختلف به مسأله طراحی خطوط شبکه حمل‌ونقل نگریستند که به‌طور کلی به دو دسته تقسیم می‌شوند، گروهی طراحی را به صورت مطلوب[12] یا نظری در نظر گرفته‌اند و گروهی با مسیرهای واقعی کار می‌کنند.

اغلب روش‌های گروه نخست در زمینه روش‌های ریاضی‌اند که در آن‌ها از متغیرهایی چون طول مسیر، فاصله ایستگاه‌ها و سرفاصله‌های زمانی برای طراحی استفاده شده است. بسیاری از روش‌ها بر اساس تقاضای ثابت و متغیرهای طراحی محدود و با هدف کمینه‌سازی هزینه‌های کاربران و گردانندگان سیستم حمل‌ونقل همگانی بنا شده‌اند. بیرن[13]، هردل[14] و نیول[15] این روش (طراحی شبکه به صورت مطلوب) را با تقاضای متغیر

---

[12] Idealized
[13] Byrne
[14] Hurdle
[15] Newell

و گستره بزرگ‌تری از متغیرهای بازتابنده علایق کاربران و گردانندگان مورد استفاده قرار داده‌اند (افندی‌زاده و همکاران، 1389).

مسأله طراحی خطوط شبکه حمل‌ونقل همگانی یک مسأله غیر محدب و پیچیده است. این مسائل معمولاً به‌صورت مسائل غیرخطی بهینه‌سازی می‌شوند و شامل متغیرها و محدودیت‌های گسسته و پیوسته به‌صورت هم‌زمان هستند. از دیدگاه برنامه‌ریزی ریاضی، ساختار مسائل طراحی شبکه ترکیبی[16] است و چون معمولاً با انتخاب گسسته سروکار داشته و دارای فرمول‌بندی برنامه‌ریزی عدد صحیح است، حل این مسائل برای شبکه‌های واقعی با روش‌های دقیق عملاً امکان‌پذیر نیست. چند نمونه از این روش‌ها، روش شاخه و کرانه و روش برنامه‌ریزی ریاضی[17] می‌باشد که در میان آن‌ها باوجود جواب‌گویی روش برنامه‌ریزی ریاضی برای مسائل خطی و غیرخطی و برای شبکه‌هایی با ابعاد متوسط و بزرگ، سایر نمونه‌های روش‌های دقیق مانند روش شاخه و کرانه به دلیل پیچیدگی‌های مسأله برای مسائل با ابعاد بزرگ مناسب نبوده و تنها برای مسائل برنامه‌ریزی عدد صحیح[18] مورد استفاده قرار می‌گیرند (Farahani et al., 2013).

پیچیدگی فرمول‌بندی ریاضی مسائل طراحی خطوط شبکه حمل‌ونقل همگانی را می‌توان در ماهیت گسسته‌ی این مسائل و وجود مفاهیمی از جمله تعویض (جابجایی[19]) خط و پیوستگی مسیرها[20] دانست (Chakroborty and Wivedi, 2002). از این‌رو در شبکه حمل‌ونقل همگانی با اندازه واقعی که در آن پارامترهای زیادی باید در نظر گرفته شود، به دلیل ذات مسأله و غیرخطی و غیرکوژ بودن و ابعاد گسترده آن در این نوع شبکه‌ها، روش‌های دقیق نمی‌توانند به‌خوبی جوابگوی حل باشند (Newell, 1979)، (Baaj and Mahmassani, 1991) و (Mandl, 1980). با وجود این، توسعه روش‌های ریاضی مانند تحقیق در عملیات[21] باعث رشد توانایی در زمینه‌ی حل این مسائل شده‌است. این روش‌های حل در مطالعاتی همچون (Bussieck et al., 1997)، (Barra et al., 2007) و (Guan et al., 2006) مورد استفاده قرار گرفتند.

از مهم‌ترین دلایل عدم پاسخ‌گویی روش‌های دقیق، حجم محاسبات بالای ریاضی و پیچیدگی این روش‌ها است که روش‌های ابتکاری با کاستن از حجم این محاسبات بخش زیادی از این مشکلات را رفع کرده‌است. به‌دلیل این ساختار گسسته، تعداد زیاد متغیرهای مسائل طراحی خطوط شبکه حمل‌ونقل،

---

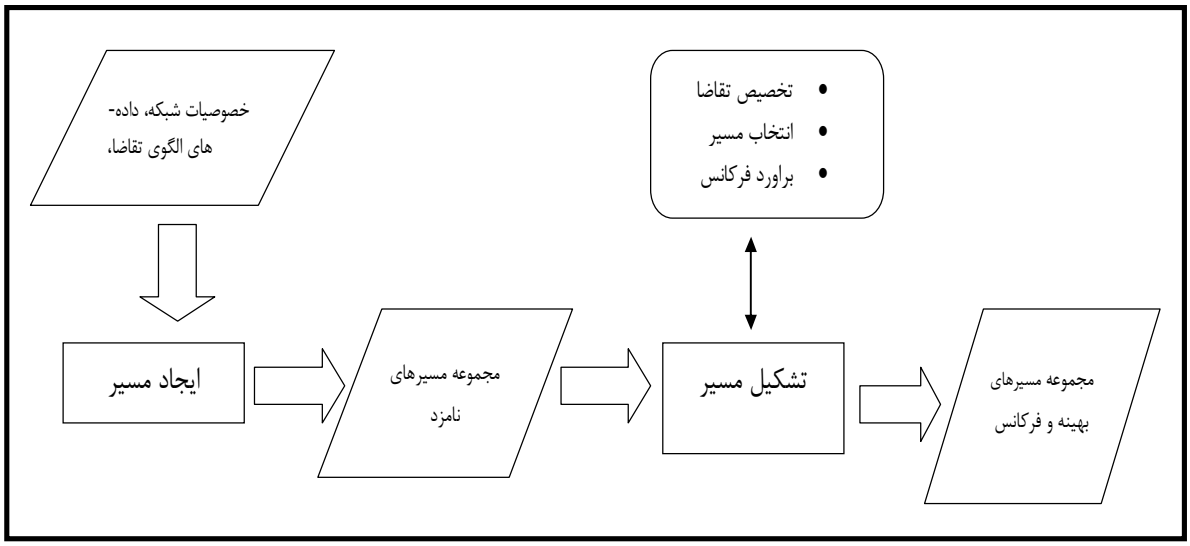
[16] Combinatorial
[17] Mathematical programming
[18] Integer programming
[19] Transfer
[20] Route continuity
[21] Operational Research

غیرخطی و غیرمحدب بودن توابع هدف آن‌ها، روش‌های حل تقریبی مانند روش‌های ابتکاری و فرایابنده برای این مسائل مناسب هستند. روش‌های ابتکاری مدل‌های تقریبی هستند که طراح با توجه به داده‌های مسأله و شرایط هندسی و الگوی تقاضای منطقه برای حل مسأله استفاده می‌کند. بیشتر این روش‌ها با انتخاب مجموعه‌ای از مسیرها به‌عنوان مسیر اولیه شکل گرفته و سپس از میان آن‌ها زیرمسیرهای بهینه به عنوان مسیرهای شبکه انتخاب می‌شوند (Kepaptsoglou and Karlaftis, 2009). در تعدادی از این مطالعات مانند فن و مکمهل (Fan and Machemehl, 2006a) و (Fan and Machemehl, 2006b)، اسدی و سدر (Asadi Bagloee and Ceder, 2011)، لی و ووچیک (Lee and Vuchic, 2005)، باج (Baaj and Mahmassani, 1991) و موتون و اورکوهارت (Mauttone and Urquhart, 2009)، روش کوتاه‌ترین مسیر برای توسعه‌ی مسیر اولیه استفاده شده‌است. هاستلسروم در ارائه‌ی روش حل ابتکاری خود کوتاه‌ترین مسیر را به‌عنوان معیاری برای طول مسیرهای شبکه در نظر می‌گیرد (Kepaptsoglou and Karlaftis, 2009).

الگوی کلی مورد استفاده در روش‌های حل ابتکاری را می‌توان به دو دسته‌ی زیر تقسیم کرد (Kepaptsoglou and Karlaftis, 2009):

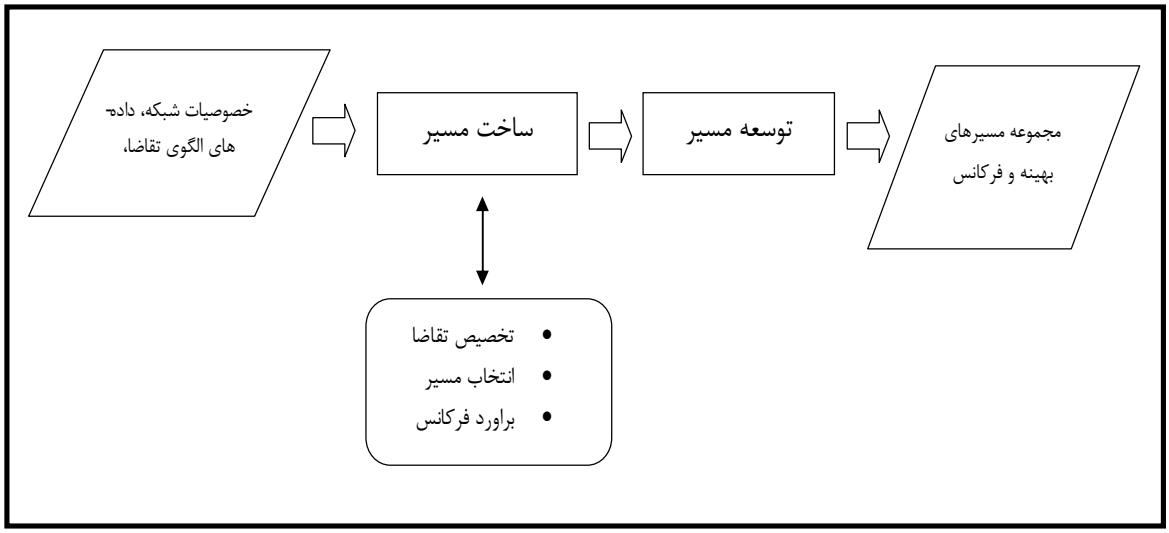
1- همان‌طور که در شکل (2-2) مشاهده می‌شود در دسته اول مسیرهای موجود را با توجه به شرایط مورد نظر طراح به دسته‌های همگن تقسیم‌بندی می‌کنند و از بین این دسته‌ها مجموعه‌ای از بهترین مسیرها را با توجه به تابع هدف مسأله به‌وجود می‌آورند.

این مرحله برای دسته‌بندی ابتدایی مسیرهای منتخب به‌کار می‌رود، در ادامه از روش‌های ابتکاری دیگر یا روش‌های فرایابنده برای پیدا کردن جواب بهینه استفاده می‌شود.



شکل (2-2) روش حل ابتکاری بر اساس تشکیل مسیر بهینه (Kepaptsoglou and Karlaftis, 2009)

2- با توجه به شکل (2-3) می‌توان از ابتدا یک مسیر با توجه به شرایط مسأله ایجاد کرد و در ادامه به توسعه آن مسیر پرداخت.



شکل (2-3) روش حل ابتکاری بر اساس توسعه مسیر اولیه (Kepaptsoglou and Karlaftis, 2009)

در ادامه براساس توسعه‌ی این روش‌ها (روش‌های ابتکاری مرسوم[22])، تکنیک‌های فرایابنده به‌وجود آمدند. روش حل فرایابنده دسته‌ای از روش‌های حل ابتکاری هستند که در چند دهه اخیر به‌صورت گسترده-ای در مقالات و زمینه‌های عملی استفاده شده‌اند. بر خلاف روش‌های ابتکاری که از الگوی خاصی پیروی نمی‌کنند، این روش‌ها از الگوی مشخص برای جست‌وجو در جواب‌های منتخب و یافتن جواب بهینه استفاده می‌کند. مطالعات بسیاری به استفاده از روش‌های فرایابنده برای طراحی شبکه روی آوردند که از جمله‌ی آن-ها می‌توان به استفاده از الگوریتم ژنتیک (Ngamchai and Lovell, 2003) و (Tom and Mohan, 2003)، الگوریتم تجمع مورچگان (Yang et al., 2007) و (Hu et al., 2005)، الگوریتم شبیه‌سازی سرد و گرم کردن (Zhao and Zeng, 2007) و (آشتیانی و حجازی، 1380) اشاره کرد.

تعدادی از مطالعات نیز مانند فن و مکمهل (Fan and Machemehl, 2006a, Fan and Machemehl, 2006b)، اگروای و متیو (Agrawal and Mathew, 2004)، (Asadi Bagloee and

[22] Traditional