

بِسْمِ اللّٰهِ الرَّحْمٰنِ الرَّحِیْمِ



بسمه تعالی

## تاییدیه اعضای هیات داوران حاضر در جلسه دفاع از رساله دکتری

آقای حمید فروش رساله ۲۴ واحدی خود را با عنوان توسعه روش های حل مسئله

طراحی شبکه حمل و نقل دو سطحی در تاریخ ۱۳۹۰/۲/۱۲ ارائه کردند.

اعضای هیات داوران نسخه نهایی این رساله را از نظر فرم و محتوا تایید کرده و پذیرش آنرا برای تکمیل درجه دکتری مهندسی صنایع - مهندسی صنایع پیشنهاد می کنند.

عضو هیات داوران	نام و نام خانوادگی	رتبه علمی	امضا
استاد راهنما	دکتر محمد مهدی سپهری	دانشیار	
استاد مشاور	دکتر محمد رضا امین ناصری	دانشیار	
استاد مشاور	دکتر محمود صفارزاده	استاد	
استاد ناظر	دکتر سید حسام الدین ذگردی	دانشیار	
استاد ناظر	دکتر سید کمال چهارسوقی	دانشیار	
استاد ناظر	دکتر محمد مدرس یزدی	استاد	
استاد ناظر	دکتر کوروش عشقی السنجی	استاد	
استاد ناظر	دکتر سید حسام الدین ذگردی	دانشیار	

## دستورالعمل حق مالکیت مادی و معنوی در مورد نتایج پژوهشهای علمی دانشگاه تربیت مدرس

**مقدمه:** با عنایت به سیاست‌های پژوهشی دانشگاه در راستای تحقق عدالت و کرامت انسانها که لازمه شکوفایی علمی و فنی است و رعایت حقوق مادی و معنوی دانشگاه و پژوهشگران، لازم است اعضای هیات علمی، دانشجویان، دانش آموختگان و دیگر همکاران طرح، در مورد نتایج پژوهشهای علمی که تحت عناوین پایان‌نامه، رساله و طرحهای تحقیقاتی که با هماهنگی دانشگاه انجام شده است، موارد ذیل را رعایت نمایند:

**ماده ۱-** حقوق مادی و معنوی پایان‌نامه‌ها / رساله‌های مصوب دانشگاه متعلق به دانشگاه است و هرگونه بهره‌برداری از آن باید با ذکر نام دانشگاه و رعایت آیین‌نامه‌ها و دستورالعمل‌های مصوب دانشگاه باشد.

**ماده ۲-** انتشار مقاله یا مقالات مستخرج از پایان‌نامه / رساله به صورت چاپ در نشریات علمی و یا ارائه در مجامع علمی باید به نام دانشگاه بوده و استاد راهنما مسئول مکاتبات مقاله باشد.

تبصره: در مقالاتی که پس از دانش آموختگی بصورت ترکیبی از اطلاعات جدید و نتایج حاصل از پایان‌نامه / رساله نیز منتشر می‌شود نیز باید نام دانشگاه درج شود.

**ماده ۳-** انتشار کتاب حاصل از نتایج پایان‌نامه / رساله و تمامی طرحهای تحقیقاتی دانشگاه باید با مجوز کتبی صادره از طریق حوزه پژوهشی دانشگاه و بر اساس آئین‌نامه‌های مصوب انجام می‌شود.

**ماده ۴-** ثبت اختراع و تدوین دانش فنی و یا ارائه در جشنواره‌های ملی، منطقه‌ای و بین‌المللی که حاصل نتایج مستخرج از پایان‌نامه / رساله و تمامی طرحهای تحقیقاتی دانشگاه باید با هماهنگی استاد راهنما یا مجری طرح از طریق حوزه پژوهشی دانشگاه انجام گیرد.

**ماده ۵-** این دستورالعمل در ۵ ماده و یک تبصره در تاریخ ۱۳۸۴/۴/۲۵ در شورای پژوهشی دانشگاه به تصویب رسیده و از تاریخ تصویب لازم‌الاجرا است و هرگونه تخلف از مفاد این دستورالعمل، از طریق مراجع قانونی قابل پیگیری می‌شود.

نام و نام خانوادگی: حمید فرورش

امضاء

## آیین نامه چاپ پایان نامه (رساله) های دانشجویان دانشگاه تربیت مدرس

نظر به اینکه چاپ و انتشار پایان نامه (رساله) های تحصیلی دانشجویان دانشگاه تربیت مدرس، مبین بخشی از فعالیتهای علمی - پژوهشی دانشگاه است بنابراین به منظور آگاهی و رعایت حقوق دانشگاه، دانش آموختگان این دانشگاه نسبت به رعایت موارد ذیل متعهد می شوند:

ماده ۱: در صورت اقدام به چاپ پایان نامه (رساله) ی خود، مراتب را قبلاً به طور کتبی به «دفتر نشر آثار علمی» دانشگاه اطلاع دهد.

ماده ۲: در صفحه سوم کتاب (پس از برگ شناسنامه) عبارت ذیل را چاپ کند:

«کتاب حاضر، حاصل پایان نامه کارشناسی ارشد/ رساله دکتری نگارنده در رشته **مهندسی صنایع** است که در سال **۱۳۹۰** در دانشکده **فنی و مهندسی** دانشگاه تربیت مدرس به راهنمایی جناب آقای دکتر **محمد مهدی سپهری**، مشاوره جناب آقای دکتر **محمد رضا امین ناصری** و مشاوره جناب آقای دکتر **محمود صفارزاده** از آن دفاع شده است.»

ماده ۳: به منظور جبران بخشی از هزینه های انتشارات دانشگاه، تعداد یک درصد شمارگان کتاب (در هر نوبت چاپ) را به «دفتر نشر آثار علمی» دانشگاه اهدا کند. دانشگاه می تواند مازاد نیاز خود را به نفع مرکز نشر در معرض فروش قرار دهد.

ماده ۴: در صورت عدم رعایت ماده ۳، ۵۰٪ بهای شمارگان چاپ شده رابه عنوان خسارت به دانشگاه تربیت مدرس، تأدیه کند.

ماده ۵: دانشجو تعهد و قبول می کند در صورت خودداری از پرداخت بهای خسارت، دانشگاه می تواند خسارت مذکور را از طریق مراجع قضایی مطالبه و وصول کند؛ به علاوه به دانشگاه حق می دهد به منظور استیفای حقوق خود، از طریق دادگاه، معادل وجه مذکور در ماده ۴ را از محل توقیف کتابهای عرضه شده نگارنده برای فروش، تامین نماید.

ماده ۶: اینجانب **حمید فرورش** دانشجوی رشته **مهندسی صنایع** مقطع **دکتری** تعهد فوق و ضمانت اجرایی آن را قبول کرده، به آن ملتزم می شوم.

نام و نام خانوادگی: **حمید فرورش**

تاریخ و امضا:



دانشگاه تربیت مدرس  
دانشکده فنی و مهندسی  
بخش مهندسی صنایع

رساله دکترای تخصصی مهندسی صنایع

**توسعه روش‌های حل مسئله طراحی شبکه حمل و نقل دو سطحی**

**حمید فرورش**

**استاد راهنما: دکتر محمد مهدی سپهری**

**اساتید مشاور: دکتر محمدرضا امین‌ناصری، دکتر محمود صفارزاده**

اردیبهشت ۱۳۹۰

تقدیم بہ:

پونڈگان و جوینڈگان راستین حقایق، آنان کہ بہ خاطر بیچ منافع و مصالحتی حقایق را

کتمان نمی کنند، بلکہ حاضرند شجاعانہ، سخاوتمندانہ و فروتنانہ منافع و مصالح

را قربانی کشف حقایق کنند.

## تشکر و قدردانی

پژوهش جاری حاصل تلاش‌های علمی نگارنده با همکاری و همیاری افراد تاثیرگذار دیگری است. در رأس همه و بیش از همه، استاد راهنمای عزیز، آقای دکتر محمد مهدی سپهری در همه مراحل پژوهش نقشی بسزا داشته‌اند. خداوند را سپاسگزارم که دوره کارشناسی ارشد و دکتری را اسباب آشنایی بنده با ایشان قرار داد تا در طول این دوره نکته‌ها و اندرزهایی فراوان برای زندگی علمی و غیرعلمی بیاموزم. امیدوارم زین پس، بیشتر از این آموخته‌ها در زندگی بهره‌گیرم. امیدوارم چون ایشان صرفنظر از موقعیت شخصی، علمی و سازمانی، همواره فروتن، نیک‌رو و نیک‌خو باشم. به خاطر همه راهنمایی‌ها، مهربانی‌ها و حمایت‌ها نهایت تشکر و قدردانی از ایشان دارم.

از استاد مشاور گرامی، آقای دکتر محمدرضا امین ناصری به خاطر مشاوره‌های با ارزش و نیز درس‌های آموزشی که با ایشان گذرانده‌ام، سپاسگزارم. اشارات مختصر ایشان در باب فلسفه علم، بنده را به یک رشته مطالعات مفید در این باره رهنمون کرد و علاقه‌ای فراوان برای مطالعات بیشتر را در من برانگیخت. از آقای دکتر محمود صفارزاده دیگر استاد مشاور بنده نیز به خاطر نکات مفید و عمدتاً عمل‌گرایانه در باب حمل‌ونقل سپاسگزارم.

از مجموعه اساتید بخش مهندسی صنایع دانشگاه تربیت مدرس سپاسگزارم. بنده در طول دوره کارشناسی ارشد و دکتری در فرصت‌های مختلف اعم از کلاس‌های آموزشی (اجباری، اختیاری و مستمع آزاد) و جلسات پژوهشی مطالب زیادی را یادگرفته‌ام.

از همه دانشجویان و دوستانم در بخش مهندسی صنایع به خاطر مباحثات مفید علمی و غیرعلمی سپاسگزارم. به ویژه از آقای دکتر بابک تیمورپور که اوقات زیادی را با ایشان در آزمایشگاه گذرانده‌ام و نیز دیگر دوستان شرکت‌کننده در جلسات هم‌افزایی متشکرم. جلسات هم‌افزایی که به ابتکار دکتر سپهری راه‌اندازی و بطور مستمر برگزار شد، سبب به اشتراک‌گذاری ایده‌ها و کسب مهارت‌های مختلف آموزشی و پژوهشی برای شرکت‌کنندگان شده است. از دوست دیرین و گرامی‌ام، آقای فوآد بهزادپور به خاطر ویرایش مقالات انگلیسی مستخرج از رساله و نیز مساعدت‌های دیگر خیلی ممنونم.

در پایان، اما بی‌پایان، از خانواده‌ام متشکرم. از پدر و مادر عزیزم به خاطر زحمات بیشماری که در طول حیات بنده متحمل شده‌اند، سپاسگزارم. از همسرم به خاطر همراهی‌ها و صبوری‌شان در طول دوران نسبتاً طولانی تحصیلات تکمیلی‌ام بسیار متشکرم. بدون ایشان طی این مسیر برای اینجانب میسر نبود. امیدوارم بتوانم محبت‌های آنها را جبران کنم.

## چکیده:

شبکه‌های حمل‌ونقل یکی از اجزای اصلی حمل‌ونقل محسوب می‌شوند و کارایی عملکرد آنها بر صرفه‌جویی (اتلاف) منابع در سطوح خرد و کلان تاثیر زیادی دارد. عملکرد شبکه‌های حمل‌ونقل هم متاثر از ساختار و توپولوژی این شبکه‌ها و هم رفتار کاربران است. به تعبیری دگر، متغیرهای تصمیم بین دو تصمیم‌گیر اصلی توزیع شده است. توسعه زیرساخت‌ها در اختیار متولیان شبکه (عمدتاً دولت‌ها) و شیوه‌ی استفاده در اختیار کاربران است. نکته اصلی در ساختار سلسله مراتبی تصمیم‌گیری است، به گونه‌ای که متولی توسعه شبکه (تصمیم‌گیر سطح سیستم یا سطح اول) با ملاحظه واکنش کاربران (پیش‌بینی با اطلاعات کامل) ابتدا تصمیم می‌گیرد و بعد کاربران (تصمیم‌گیر سطح دوم) در مورد شیوه‌ها و الگوهای تردد تصمیم می‌گیرند. از دیدگاه برنامه‌ریزی ریاضی، به مدل‌های تصمیم‌گیری حاکم بر این مسائل، برنامه‌ریزی دوسطحی گفته می‌شود که در آن متولی ساخت و توسعه در سطح اول و کاربران در سطح دوم تصمیمات مربوط را اتخاذ می‌کنند. برنامه‌ریزی دوسطحی یکی از مسائل پیچیده پژوهش در عملیات محسوب می‌شود و عموماً در کلاس پیچیدگی NP-Complete قرار می‌گیرد.

طراحی شبکه حمل‌ونقل در طول ۴۰ سال اخیر یکی از مسائل محوری پژوهش در عملیات بوده است. با وجود تلاش‌های مستمر، هنوز راه زیادی تا توسعه روش‌هایی که بتواند مسائل با مقیاس واقعی را حل کند پیش‌رو است. پژوهش جاری به یکی از مسائل کلاسیک طراحی شبکه زیرساخت حمل‌ونقل در قالب برنامه‌ریزی دوسطحی می‌پردازد. آورده و سهم این پژوهش، شامل سه قسمت است. دو قسمت اول و دوم به مسئله طراحی شبکه گسسته (DNDD) یعنی تصمیم‌گیری در مورد اضافه کردن یک سری راه‌های جدید به شبکه فعلی می‌پردازد و قسمت سوم به طراحی شبکه گسسته-پیوسته (MNDD) یعنی اضافه کردن یال‌های جدید و تعریض راه‌های موجود به طور همزمان می‌پردازد.

تمرکز این پژوهش ارائه روش‌های حل مسئله است. در این راستا، برای مسئله DNDD دو روش حل پیشنهاد شده است. روش نخست، فرمول‌بندی جدیدی در قالب برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح آمیخته تک سطحی ارائه می‌دهد که با تقریب خوبی معادل برنامه‌ریزی دو سطحی غیرخطی اصلی است. بنابراین، محور اصلی روش اول، ارائه فرمول‌بندی جدیدی است که (تقریباً) معادل فرمول‌بندی دوسطحی باشد. کیفیت تقریب رضایت‌بخش است و در آزمایشات عددی انجام شده، جواب بهینه به دست آمده است. روش دوم الگوریتم شاخه و کرانی است که مسئله دوسطحی را بدون تغییر فرمول‌بندی حل می‌کند. در روش پیشنهادی کران پایین نسبتاً کارایی برای مسئله اصلی و روش حل آن توسعه داده می‌شود. همچنین، کران بالایی به دست می‌آید که در طول پیشرفت درخت جستجوی الگوریتم به طرز مناسبی بهبود می‌یابد.

وجه مشخصه روش اول، خطی عدد صحیح آمیخته و تک سطحی بودن آن است (صورت متعارف و بیشتر جا افتاده برنامه‌ریزی ریاضی). این فرمول‌بندی امکان بهره‌گیری از ادبیات غنی برنامه‌ریزی عدد صحیح و جریان‌های شبکه چندکالایی را فراهم می‌کند. یکی از مزیت‌های اصلی این فرمولاسیون، امکان وارد کردن محدودیت‌های جانبی نظیر ظرفیت راه‌های شبکه در آن است. علیرغم اهمیت زیاد این گونه محدودیت‌ها، امکان اعمال آنها در روش‌های قبلی وجود ندارد. در حال حاضر، این روش تنها قادر است مسائل کوچک تا متوسط را حل کند و نمی‌تواند مسائل واقعی را حل نماید. محاسبات عددی روی مسائل آزمایشی برتری‌های آن با الگوریتم‌های موجود را نشان می‌دهد.



وجه مشخصه روش دوم، توانایی آن در حل مسائل با مقیاس واقعی است. این روش کامل<sup>1</sup> است به این معنی که جواب بهینه را (در صورت وجود) تضمینی می‌یابد و در صورت غیرموجه بودن مسئله، به عدم وجود جواب پی می‌برد. البته در مسئله طراحی شبکه گسسته، در مسائل واقعی در هر صورت جوابی برای مسئله وجود دارد. آزمایشات عددی روی مسائل موجود (واقعی و غیرواقعی) برتری این روش را هم از حیث هزینه‌های محاسباتی و هم کیفیت جواب نسبت به روش‌های موجود نشان می‌دهد.

روش سوم، تعمیم روش اول یعنی ارائه فرمول‌بندی خطی عدد صحیح تک‌سطحی برای دو مسئله CNDP و MNDP است. این روش قادر است جواب بهینه را برای هر دو مسئله بیابد و در نوع خود نخستین روش یابنده جواب بهینه برای MNDP محسوب می‌شود، اما در حال حاضر این روش نمی‌تواند مسائل مقیاس بزرگ را حل کند. مقایسه عملکرد محاسباتی و کیفیت جواب فرمول‌بندی ارائه شده نشانگر برتری آن نسبت به روش‌های موجود است. این فرمول‌بندی از همه مزایای روش نخست برای مسائل MNDP برخوردار است و انتظار می‌رود در پژوهش‌های آتی جنبه محاسباتی آن بهبود داده شود.

**واژگان کلیدی:** مسئله طراحی شبکه گسسته، مسئله طراحی شبکه پیوسته، مسئله طراحی شبکه گسسته-پیوسته، برنامه‌ریزی دوسطحی، برنامه‌ریزی عدد صحیح، الگوریتم شاخه‌وکران، تعادل کاربر بهینه، تعادل سیستم بهینه.

---

<sup>1</sup> complete

۱- معرفی پژوهش .....	۱
۱-۱ سرآغاز .....	۲
۲-۱ بیان مساله اصلی پژوهش .....	۳
۳-۱ اهداف پژوهش .....	۶
۴-۱ دشواری‌های پژوهش .....	۶
۵-۱ کاربردهای انتظاری پژوهش .....	۶
۶-۱ محدودیت‌های پژوهش .....	۷
۷-۱ مفروضات پژوهش .....	۸
۸-۱ جنبه‌های جدید و نوآوری پژوهش .....	۸
۹-۱ روش انجام پژوهش .....	۹
۱۰-۱ ساختار کلی پژوهش .....	۹
۲- مبانی نظری پژوهش، اصطلاح‌شناسی و علائم .....	۱۰
۱-۲ اصطلاح‌شناسی و علائم .....	۱۱
۲-۲ مسئله تعادل شبکه .....	۱۲
۱-۲-۲ مسائل تعادل کاربر قطعی (DUE) .....	۱۳
۲-۲-۲ مسائل تعادل کاربر تصادفی (SUE) .....	۱۷
۳-۲ برنامه‌ریزی دوسطحی .....	۲۱
۱-۳-۲ شکل عمومی برنامه‌ریزی دوسطحی .....	۲۲
۲-۳-۲ مسئله برنامه‌ریزی دوسطحی خطی .....	۲۳
۳-۳-۲ مثال برنامه‌ریزی دوسطحی خطی .....	۲۵
۴-۳-۲ چالش‌های حل BLPP .....	۲۹
۵-۳-۲ شکل استاندارد BLPP .....	۳۰
۴-۲ طراحی شبکه حمل‌ونقل به کمک برنامه‌ریزی دوسطحی .....	۳۲

۳۲	.....NDP	۱-۴-۲	چارچوب برنامه‌ریزی دوسطحی برای مسائل
۳۳	.....مدل‌ها	۵-۲	
۳۴	.....مسئله طراحی شبکه	۱-۵-۲	
۳۹	.....الگوریتم‌های حل مسائل طراحی شبکه در قالب برنامه‌ریزی دوسطحی	۶-۲	
۴۰	.....DNDP	۱-۶-۲	الگوریتم‌های ارائه شده برای
۴۵	.....NDP	۳-۳	الگوریتم‌هایی پیشنهادی برای حل
۴۶	.....مقدمه	۱-۳	
۴۷	.....فرمول‌بندی خطی عدد صحیح آمیخته تک‌سطحی	۲-۳	
۵۵	.....نامساوی‌های معتبر برای فرمول‌بندی پیشنهادی	۱-۲-۳	
۵۸	.....الگوریتم شاخه‌وکران برای مسئله طراحی شبکه گسسته دوسطحی	۳-۳	
۵۸	.....شاخه‌زنی	۱-۳-۳	
۵۹	.....کران‌یابی	۲-۳-۳	
۶۰	.....به عمق رسیدن	۳-۳-۳	
۶۱	.....تشریح الگوریتم	۴-۳-۳	
۶۴	.....محاسبه کران‌های پایین	۵-۳-۳	
۶۸	.....انتخاب متغیر برای شاخه‌زنی	۶-۳-۳	
۶۹	.....MNDP و CNDP	۴-۳	فرمول‌بندی خطی عدد صحیح برای مسائل
۶۹	.....CNDP	۱-۴-۳	فرمول‌بندی مسئله
۷۴	.....MNDP	۲-۴-۳	فرمول‌بندی مسئله
۷۶	.....آزمایشات عددی	۴-۴	
۷۷	.....مقدمه	۱-۴	
۷۸	.....SL-MILP	۲-۴	نتایج عددی فرمول‌بندی
۷۸	.....مسئله آزمایشی ۱	۱-۲-۴	
۸۰	.....مسئله آزمایشی ۲	۲-۲-۴	
۸۷	.....الگوریتم شاخه‌وکران پیشنهادی	۳-۴	نتایج عددی
۸۷	.....مسئله آزمایشی ۱	۱-۳-۴	

۸۹	..... مسئله آزمایشی ۲	۲-۳-۴
۹۱	..... مسئله آزمایشی ۳	۳-۳-۴
۹۶	..... مسئله آزمایشی ۴	۴-۳-۴
۱۰۰	..... DNDP و CNDP برای مسئله SL-MILP	۴-۴
۱۰۰	..... CNDP نظیر مسئله	۱-۴-۴
۱۰۲	..... MNDP نظیر مسئله	۲-۴-۴
۱۰۶	..... جمع‌بندی و پیشنهادات آتی برای ادامه پژوهش	۵-۵
۱۰۷	..... خلاصه پژوهش	۱-۵
۱۰۸	..... DNDP برای مسئله SL-MILP	۱-۱-۵
۱۰۹	..... جمع‌بندی الگوریتم شاخه‌وکران پیشنهادی	۲-۱-۵
۱۱۱	..... MNDP و CNDP برای مسئله SL-MILP	۳-۱-۵
۱۱۳	..... مراجع	۶-۶
۱۱۹	..... پیوست‌ها	۷-۷
۱۱۹	..... پیوست الف	۱-۷
۱۲۲	..... پیوست ب	۲-۷

## فهرست جداول

عنوان جدول	صفحه
جدول ۱-۲: نقاط ناحیه تقاعد مثال ۱.....	۲۷
جدول ۲-۲: دسته‌بندی الگوریتم‌های ارائه شده برای مسائل سه‌گانه طراحی شبکه.....	۴۴
جدول ۱-۴: پارامترهای یال‌های جدید.....	۷۹
جدول ۲-۴: نتیجه حل فرمول‌بندی پیشنهادی در مقایسه با روش (Gao et al. (2005) روی مسئله آزمایشی ۱.....	۸۰
جدول ۳-۴: نتایج روش SL-MILP روی مسئله آزمایشی ۲ در مقایسه با روش‌های قبلی.....	۸۶
جدول ۴-۴: مشخصات مسائل آزمایشی استفاده شده در ارزیابی الگوریتم شاخه‌وکران.....	۸۷
جدول ۵-۴: نتایج بکارگیری الگوریتم‌های قبلی و پیشنهادی این تحقیق روی مسئله آزمایشی ۱.....	۸۹
جدول ۶-۴: نتایج بکارگیری الگوریتم‌های قبلی و پیشنهادی این تحقیق روی مسئله آزمایشی ۲.....	۹۱
جدول ۷-۴: نتیجه بکارگیری الگوریتم‌های پیشین و الگوریتم شاخه‌وکران پیشنهادی روی مسئله آزمایشی ۳.....	۹۳
جدول ۸-۴: نتیجه بکارگیری الگوریتم‌های پیشین و الگوریتم شاخه‌وکران پیشنهادی روی مسئله آزمایشی ۴.....	۹۴
جدول ۹-۴: شکاف نسبی بین اولین جواب الگوریتم FS-B&B و جواب نهایی سایر الگوریتم‌ها.....	۹۸
جدول ۱۰-۴: داده‌های مسئله آزمایشی مربوط به مسئله CNDP.....	۱۰۱
جدول ۱۱-۴: نتایج پژوهش جاری در مقایسه با مطالعات پیشین روی مسئله آزمایشی CNDP.....	۱۰۱
جدول ۱۲-۴: داده‌های مسئله آزمایشی ۱ مربوط به مسئله MNDP.....	۱۰۲
جدول ۱۳-۴: نتایج نظیر مسئله آزمایشی ۱ برای مسئله MNDP.....	۱۰۳
جدول ۱۴-۴: مشخصات یال‌های جدید قابل اضافه به شبکه مسئله آزمایشی ۲ مربوط به مسئله MNDP.....	۱۰۴
جدول ۱۵-۴: نتایج حاصل از حل مسئله MNDP برای مسئله آزمایشی ۲ در سطح بودجه ۳۰ واحد.....	۱۰۵
جدول ۱۶-۴: مقایسه عملکرد فرمول بندی CNDP و MNDP در بهبود عملکرد شبکه در سطوح مختلف بودجه.....	۱۰۵

## فهرست اشکال

عنوان شکل	صفحه
شکل ۱-۲: توپولوژی شبکه حمل و نقل نظیر مسئله طراحی شبکه حمل و نقل پیوسته.....	۴
شکل ۱-۱: توپولوژی شبکه حمل و نقل نظیر مسئله طراحی شبکه حمل و نقل گسسته.....	۴
شکل ۳-۱: توپولوژی شبکه حمل و نقل نظیر مسئله طراحی شبکه حمل و نقل گسسته-پیوسته.....	۵
شکل ۱-۲: چند وجهی متناظر با محدودیتهای مثال ۱.....	۲۵
شکل ۲-۲: ناحیه تقاعد متناظر با مثال ۱.....	۲۶
شکل ۳-۲: چند وجهی متناظر با محدودیتهای مثال ۱ به همراه مقادیر تابع هدف در نقاط مختلف آن.....	۲۷
شکل ۴-۲: چند وجهی موجه متناظر با محدودیتهای مثال ۲.....	۲۸
شکل ۵-۲: ناحیه تقاعد مثال ۲.....	۲۹
شکل ۶-۲: (الف) فضای موجه و ناحیه تقاعد مثال ۳ ، (ب) فضای موجه و ناحیه تقاعد مثال ۴.....	۳۱
شکل ۱-۳: تقریب خطی ترکیب محدب تابع زمان سفر.....	۵۳
شکل ۲-۳: شبه کد الگوریتم شاخه و کران پیشنهاد شده برای DNDP.....	۶۳
شکل ۳-۳: شبکه کد مبتنی بر OA برای حل مسئله $(SP_n)$ در مرحله کران یابی الگوریتم شاخه و کران.....	۶۷
شکل ۴-۳: افراز دامنه $x \times u$ به مجموعه‌ای از نقاط محدود از قبل معین برای تقریب خطی تابع زمان سفر.....	۷۱
شکل ۱-۴: شبکه نظیر مسئله آزمایشی ۱.....	۷۸
شکل ۲-۴: شبکه نظیر مسئله آزمایشی ۲.....	۸۱
شکل ۳-۴: شبکه نظیر مسئله آزمایشی ۱. شبکه‌ای فرضی که مستعد وقوع تناقض برائس است.....	۸۸
شکل ۴-۴: شبکه نظیر مسئله آزمایشی ۲. شبکه Sioux-Falls.....	۹۰
شکل ۵-۴: شبکه نظیر مسئله آزمایشی ۴.....	۹۷
شکل ۶-۴: شبکه آزمایشی ۶ گره‌ای و ۱۶ یالی نظیر مسئله CNDP.....	۱۰۰
شکل ۷-۴: شبکه نظیر مسئله آزمایشی ۱ برای مسئله DNDP.....	۱۰۳
شکل ۸-۴: شبکه نظیر مسئله آزمایشی ۲ مربوط به مسئله MNDP.....	۱۰۴

# فصل اول

## ۱- معرفی پژوهش

## ۱-۱ سر آغاز

حمل و نقل یکی از مؤلفه‌های مهم حیات بشری است و نقش بسزایی در اقتصاد هر کشوری دارد. شبکه‌های حمل و نقل یکی از اجزای اصلی حمل و نقل محسوب می‌شوند و کارایی عملکرد آنها بر صرفه‌جویی (اتلاف) منابع تاثیر زیادی دارد. شبکه‌های حمل و نقل زمینی به دلیل سرمایه‌بری بالا همواره از دغدغه‌های اصلی دولت‌ها، تصمیم‌گیرندگان کلان و متولیان توسعه این شبکه‌ها بوده‌اند. به همین خاطر، همواره سعی شده است تا منابع محدود و در رأس آنها منابع مالی به بهترین شیوه به مناسب‌ترین گزینه‌های توسعه شبکه زیرساخت تخصیص داده شود.

شبکه‌های حمل و نقل از جمله نخستین مسائلی بودند که با استفاده از برنامه‌ریزی ریاضی مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. مشکلی که همیشه همراه این گونه تحقیقات بوده است، پیچیدگی مسائل در مقیاس بزرگ است. بخاطر پیچیدگی مسائل و نیز محدودیت‌های برنامه‌ریزی ریاضی، علیرغم توفیق‌های زیادی که به دست آمده است، هنوز رویکردی جامع برای برنامه‌ریزی حمل و نقل و خصوصاً مسئله طراحی شبکه وجود ندارد.

طراحی شبکه زیرساخت حمل و نقل در طول ۵۰ سال اخیر یکی از مسائل محوری پژوهش در عملیات بوده است. به نظر می‌رسد دلیل اصلی این تداوم پژوهش روی این مسئله نیاز عملی به آن باشد. به رغم تلاش‌های زیاد هنوز راه زیادی تا توسعه روش‌هایی که بتواند مسائل با مقیاس واقعی را حل کند پیش‌رو است. پژوهش جاری به یکی از مسائل کلاسیک طراحی شبکه زیرساخت حمل و نقل در قالب برنامه‌ریزی دوسطحی می‌پردازد.

عملکرد شبکه‌های حمل و نقل هم متأثر از ساختار و توپولوژی این شبکه‌ها و هم رفتار کاربران است. به تعبیری بهتر، متغیرهای تصمیم بین دو تصمیم‌گیر عمده توزیع شده است. توسعه زیرساخت‌ها در اختیار متولیان (عمدتاً دولت‌ها) و شیوه استفاده در اختیار کاربران است. نکته اصلی در ساختار سلسله‌مراتبی تصمیم‌گیری است به گونه‌ای که متولی توسعه شبکه (تصمیم‌گیر سطح سیستم یا سطح اول) با ملاحظه (پیش‌بینی با اطلاعات کامل) واکنش کاربران ابتدا تصمیم می‌گیرد و بعد از اتخاذ و عملی شدن تصمیم او، کاربران (تصمیم‌گیر سطح دوم) در مورد شیوه‌ها و الگوهای تردد تصمیم می‌گیرند. از دیدگاه برنامه‌ریزی ریاضی، به مدل‌های تصمیم‌گیری حاکم بر این مسائل، برنامه‌ریزی دوسطحی گفته می‌شود که در آن متولی ساخت و توسعه در سطح اول و کاربران در سطح دوم تصمیمات مربوط را اتخاذ می‌کنند. برنامه‌ریزی دوسطحی یکی از مسائل پیچیده پژوهش در عملیات محسوب می‌شوند و عموماً در کلاس پیچیدگی NP-Complete قرار می‌گیرند (Dempe, 2002).

به دلیل کمبود منابع مالی و نیز عدم بازگشت سرمایه، در بخش حمل و نقل ساخت و توسعه زیرساخت‌های راه همواره با مشکلات زیادی مواجه بوده است. در کشورهای در حال توسعه، به خاطر عمومی بودن و تقریباً غیر تجاری بودن راه‌ها، سرمایه‌گذاری در زیرساخت‌های حمل و نقل بسیار اندک است؛ زیرا از یک طرف نظر سرمایه‌گذاران برای سرمایه‌گذاری در این بخش جلب نمی‌شود و از سویی دیگر، هزینه‌های حاشیه‌ای و اجتماعی زیادی در بخش حمل و نقل به بار می‌آید. بنابراین استفاده بهینه از منابع موجود برای ساخت، توسعه و نگهداری زیرساخت‌های راه بسیار حیاتی است. در این رابطه، یکی از مهم‌ترین مسائل، طراحی شبکه‌های حمل و نقل است.



مسئله طراحی شبکه حمل و نقل جزئی لاینفک از فرآیند برنامه‌ریزی حمل و نقل است. حل این مسئله پاسخ‌هایی برای این سئوالات فراهم می‌کند: چگونه می‌توان از منابع مالی برای ساخت، توسعه، بهبود و نگهداری زیرساخت‌های راه با توجه به برخی محدودیت‌های واقعی به طور بهینه استفاده کرد. چگونه می‌توان با کمترین منابع مالی کارترین شبکه ممکن را داشت. البته، امروزه طراحی شبکه درگیر مسائل دیگری نیز شده است که از جمله می‌توان به قیمت‌گذاری راه‌ها اشاره کرد. قیمت‌گذاری راه‌ها، عموماً برای پوشش هزینه‌های ساخت و نگهداری (و بعضاً درآمدزایی) و نیز جبران هزینه‌های خارجی و اجتماعی از محل پرداخت کاربران صورت می‌گیرد.

حوزه مطالعاتی پژوهش جاری به طراحی شبکه زیرساخت حمل و نقل با ملاحظه رفتارهای کاربران در قالب مدل‌های برنامه‌ریزی ریاضی دوسطحی محدود می‌شود. ارائه روش‌های حل کارتر از اهداف اصلی پژوهش به شمار می‌رود.

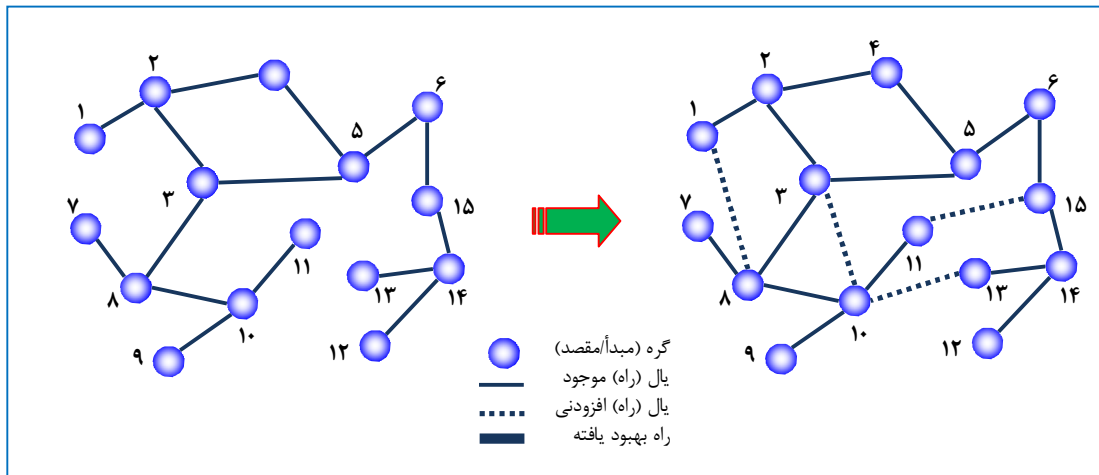
در ادامه این فصل، ابتدا مسئله اصلی پژوهش تعریف می‌شود و سعی می‌شود مرزها و قلمرو پژوهش به طور شفاف بیان شود. در همین قسمت مفروضات پژوهش تشریح می‌شوند. سپس اهداف پژوهش بیان می‌شوند و میزان تحقق آنها مورد اشاره قرار می‌گیرد. روش انجام کار، شیوه ارزیابی و اعتبارسنجی یافته‌های پژوهش تشریح می‌شوند. نوآوری‌ها و سهم آورده پژوهش به ادبیات موضوع در بندی جداگانه مورد بحث قرار می‌گیرد. کاربردهای متصور برای پژوهش و مقیاس این کاربردها در بندی دیگر مورد اشاره قرار می‌گیرند. سرگذشت انجام این پژوهش با تاکید بر دشواری‌های آن و به شکل رویدادنگارانه در بندی تحت عنوان سیر شکل‌گیری، انجام و دشواری‌های پژوهش ارائه می‌شود. در نهایت ساختار کلی پژوهش آورده می‌شود. به دلیل کم سابقه بودن پژوهش در داخل کشور، لازم دانسته شد مبانی نظری پژوهش در فصلی جداگانه آورده شود. به همین خاطر، تعاریف، علائم و اصطلاحات که معمولاً در فصل اول پژوهش ارائه می‌شوند، به فصل دوم انتقال یافته‌اند.

## ۱-۲ بیان مساله اصلی پژوهش

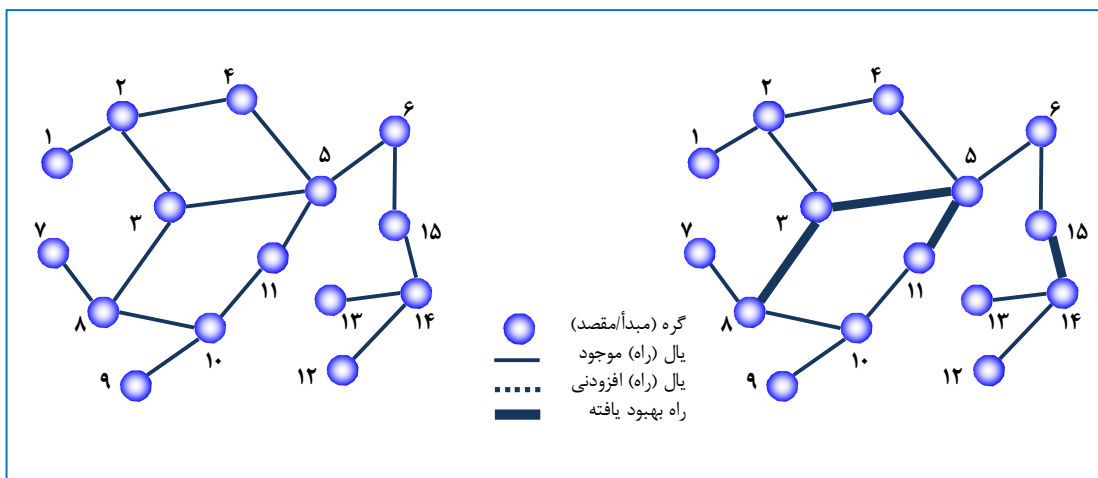
برای پاسخگویی به رشد سریع تقاضای ترافیک در شبکه‌های حمل و نقل، در توسعه شبکه دو گزینه پیش‌روی متصدیان حمل و نقل یا همان بخش متولی زیرساخت‌های شبکه می‌باشد: افزایش ظرفیت یال‌های پر ترافیک یا به اصطلاح شلوغ و دیگری اضافه کردن یال‌های جدید به شبکه. در این صورت، چگونگی انتخاب مکان یال‌های جدید و چگونگی انتخاب یال‌های موجود برای توسعه و میزان توسعه هر کدام از جمله مسائلی بوده که در چند دهه‌ی اخیر مورد توجه محققان حوزه حمل و نقل و همچنین سایر رشته‌هایی که با مسائل تصمیم‌گیری درگیر هستند، بوده است. در هر حال، در هر کدام از مسائل پیش‌رو، اعم از تصمیم‌گیری برای اضافه کردن یال‌های جدید یا تصمیم‌گیری برای افزایش ظرفیت یال‌های موجود، هدف اصلی، داشتن سیستم حمل و نقل با کمترین هزینه و بیشترین کارایی با ملاحظه الگوهای رفتار ترافیکی کاربران می‌باشد.

به طور کلی مسائل طراحی شبکه (NDP) به سه دسته اصلی تقسیم می‌شوند. (۱) مسئله طراحی شبکه گسسته (DNDP) که به تصمیم‌گیری در خصوص انتخاب یال‌های جدید می‌پردازد و مسئله‌ای است با متغیرهای صحیح دودویی (شکل ۱-۱)، (۲) مسئله طراحی شبکه پیوسته (CNDP) که به تصمیم‌گیری در خصوص میزان

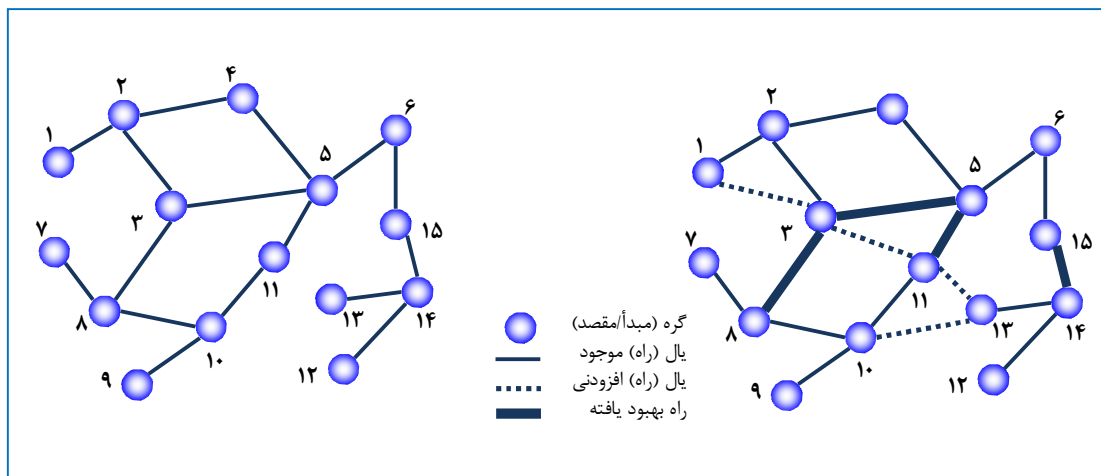
افزایش یال‌های جدید می‌پردازد (شکل ۱-۲) و معمولاً مسئله‌ای است با متغیرهای پیوسته و (۳) مسئله طراحی شبکه حمل‌ونقل گسسته-پیوسته (MNDP) که هر دو مسئله CNDP و DNDP را به طور توأم در قالب یک مسئله تصمیم‌گیری مدنظر دارد (شکل ۱-۳).



شکل ۱-۱: توپولوژی شبکه حمل‌ونقل نظیر مسئله طراحی شبکه حمل‌ونقل گسسته



شکل ۱-۲: توپولوژی شبکه حمل‌ونقل نظیر مسئله طراحی شبکه حمل‌ونقل پیوسته



شکل ۱-۳: توپولوژی شبکه حمل و نقل نظیر مسئله طراحی شبکه حمل و نقل گسسته-پیوسته

با توجه به مقدمات فوق مسئله اصلی پژوهش به صورت زیر تعریف می شود:

**مسئله پژوهش**

از بین پروژه های کاندید برای اضافه شدن به شبکه و نیز پروژه های تعریض راه های موجود (افزایش ظرفیت) با توجه به محدودیت بودجه کدام پروژه ها را باید انتخاب کرد تا ضمن بر آوردن تقاضای حمل و نقلی شبکه و ملاحظه رفتار کاربران، عملکرد سیستم بیشترین بهبود را داشته باشد؟

**خروجی مورد انتظار:** پیشنهاد شبکه ای جدید با تعدادی یال جدید اضافه شده و تعدادی یال بهبود داده شده شبکه (مجموعه  $E$ ) است. به عبارتی پاسخ مسئله، مجموعه ای اصلاح شده مجموعه یال های تعدادی یال موجود را برای بهبود پیشنهاد داد و میزان بهبود هر کدام را نیز مشخص نمود. در این جا دو دسته متغیر موجود است. دسته اول متغیرهای دودویی  $y_{ij}$  که یال های جدیدی را که باید احداث شوند، نشان می دهند و دسته دوم، متغیرهای پیوسته  $u_{ij}$  هستند که میزان بهبود هر کدام از یال های موجود شبکه را نشان می دهند.

حول مسئله فوق دو زیر مسئله قابل تعریف هستند. مسئله اولی، طراحی شبکه حمل و نقل گسسته و دومی طراحی شبکه حمل و نقل پیوسته که طرح آن قبلاً آورده شد.

## ۱-۳ اهداف پژوهش

هدف اصلی پژوهش حل مسئله اصلی پژوهش از طریق ارائه الگوریتم‌های حل و فرمول‌بندی‌های جدید است. در واقع، این پژوهش با هدف بهبود روش‌های حل مسئله طراحی شبکه حمل‌ونقل در قالب برنامه‌ریزی دو سطحی شکل گرفته و ادامه یافته است. به اختصار هدف اصلی پژوهش عبارت از:

بهبود روش‌های کنونی حل مسئله طراحی شبکه با رویکرد برنامه‌ریزی دوسطحی یا ارائه روش‌های جدید حل مسئله به نحوی که بتوان یکی یا هر دو معیار زیر را بهبود داد:

الف) کارایی محاسباتی اعم از کیفیت جواب و زمان،

ب) ارائه فرمول‌بندی‌های جدید به نحوی که صورت‌های واقعی‌تری از مسئله در خود جای دهد.

## ۱-۴ دشواری‌های پژوهش

برای انجام این پژوهش لازم است سه حوزه حمل‌ونقل و ترافیک، برنامه‌ریزی ریاضی و به ویژه برنامه‌ریزی دوسطحی و شیوه‌ها و فنون پیاده‌سازی الگوریتم‌ها و مدل‌ها را در کامپیوتر تا حد ممکن بررسی کرد. اگرچه درک بسیاری از مفاهیم حمل‌ونقل ترافیک ساده نیست و نیز درک تحلیل تکنیک‌ها و الگوریتم‌های برنامه‌ریزی ریاضی خالی از مشکلات نیست، اما عمده دشواری‌های پژوهش مربوط به پیاده‌سازی الگوریتم‌ها و مدل‌ها در محیط کامپیوتر برمی‌گردد. البته طراحی الگوریتم موفق خود کاری دشوار است، اما با توجه به اجزای الگوریتم‌ها لازم است ماجول‌های مختلف برنامه‌نویسی و کتابخانه‌های مختلفی برای پیاده‌سازی الگوریتم‌ها تدارک دیده شود. به همین خاطر یکدست‌سازی و یکپارچه‌سازی این الگوریتم‌ها مشکلات خاص خود را به همراه دارد. به طور مثال، برای پیاده‌سازی الگوریتم شاخه‌وکران ارائه شده جهت حل مسئله طراحی شبکه حمل‌ونقل گسسته، لازم شد به طور همزمان از سه محیط MATLAB، C++ و GAMS استفاده شود و در هر مرحله از پژوهش بارها ماجول‌هایی از این محیط‌ها فراخوانی شوند. در این مسیر مشکلات و کارهای پیش‌بینی نشده زیادی وجود دارد و معمولاً همه برنامه‌ها و زمان‌بندی‌ها را دچار اختلال می‌کند.

## ۱-۵ کاربردهای انتظاری پژوهش

مسئله پژوهش جاری به دلیل وجه کاربردی آن در طول ۵۰ سال گذشته غالباً به همین صورت و یا با تغییراتی اندک مورد بررسی بوده است. یکی از دلایل اصلی آن نیاز عملی و روزمره به نتایج پژوهش است. کاربردهایی که می‌توان برای پژوهش جاری برشمرد عبارتند از:

۱- استفاده از مدل‌ها و الگوریتم‌های حل ارائه شده برای بهبود شبکه‌های زیرساخت حمل‌ونقل

درون‌شهری در شهرهای کوچک تا متوسط،

۲- استفاده از مدل‌ها و الگوریتم‌های ارائه شده برای طراحی و بهبود شبکه‌های زیرساخت حمل‌ونقل

بین‌شهری در مقیاس ملی،