دانشگاه صنعتی اصفهان

دانشکده مهندسی صنایع و سیستم‌ها

طراحی چندهدفه‌ی شبکه‌های هاب‌وکمان شرکت‌های هواپیمایی با استفاده از سیستم‌های صف

پایان‌نامه کارشناسی ارشد مهندسی صنایع

مصطفی پارسا

استاد راهنما

دکتر علی شاهنده

۱۳۹۰

دانشگاه صنعتی اصفهان

دانشکده مهندسی صنایع و سیستم‌ها

پایان‌نامه‌ی کارشناسی ارشد رشته‌ی مهندسی صنایع آقای مصطفی پارسا

تحت عنوان

طراحی چندهدفه‌ی شبکه‌های هاب‌وکمان شرکت‌های هواپیمایی با استفاده از سیستم‌های صف

در تاریخ ۱۳۹۰/۱۲/۲۳ توسط کمیته‌ی تخصصی زیر مورد بررسی و تصویب نهایی قرار گرفت.

۱- استاد راهنمای پایان‌نامه	دکتر علی شاهنده
۲- استاد مشاور پایان‌نامه	دکتر ناصر ملاوردی
۳- استاد داور	دکتر قاسم مصلحی
۴- استاد داور	دکتر نادر شتاب بوشهری
سرپرست تحصیلات تکمیلی دانشکده	دکتر مهدی بیجاری

ابتـدا از لطـف بـی‌کـران الهـی و سـپس از زحمـات پـدر و مـادر عزیـزم و از راهنمایی‌ها و کمک‌های بی‌دریغ آقـای دکتـر شـاهنده و مشـاوره‌هـای آقـای دکتر ملاوردی و پروفسور اُدُنی در تمامی مراحل انجام این پژوهش از صـمیم قلب سپاسگزارم.

کلیه‌ی حقوق مادی مترتب بر نتایج مطالعات، ابتکارات و نوآوری‌های ناشی از تحقیق موضوع این پایان‌نامه (رساله) متعلق به دانشگاه صنعتی اصفهان است.

تقدیم به:

سرزمین عزیزم ایران

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

فهرست مطالب ..... هشت

چکیده ۱

فصل اول: مقدمه

۱-۱ مقدمه ۲

۱-۲ اهداف پایان‌نامه و ضرورت انجام کار ۴

۱-۳ ساختار کلی پایان‌نامه ۵

فصل دوم: مفاهیم مرتبط با مسائل مکان‌یابی هاب

۲-۱ پایه و اساس مدل‌های مکان‌یابی هاب ۷

۲-۲ طبقه بندی مدل‌های مکان‌یابی هاب ۱۳

۲-۲-۱ تابع هدف ۱۴

۲-۲-۲ اجزای شبکه ۱۶

۲-۲-۳ محدویت‌ها ۱۸

۲-۳ پیچیدگی مسائل مکان‌یابی هاب ۱۸

فصل سوم: مروری بر ادبیات موضوع

۳-۱ مسائل مکان‌یابی هاب ۲۰

۳-۱-۱ مسئله‌ی پی-هاب مدین ۲۲

۳-۱-۲ مسئله‌ی مکان‌یابی هاب با هزینه‌های ثابت ۲۷

۳-۲ صف فرودگاه‌ها ۳۱

فصل چهارم: مفاهیم مرتبط با طراحی و برنامه‌ریزی فرودگاه‌ها

۴-۱ کد مرجع فرودگاه (ARC) ۳۶

۴-۲ پوشش باد ۳۷

۴-۲-۱ وضعیت آب و هوایی (قابلیت دید، ارتفاع ابر و بارش) ۳۸

۴-۲-۲ مقررات جدائی ترافیک هوایی ۳۹

۴-۳ طراحی ساعت اوج ۴۰

۴-۳-۱ تبدیل پیش‌بینی‌های سالیانه، ماهیانه و روزانه به پیش‌بینی‌های ساعت اوج ۴۰

۴-۳-۲ سناریوهای محتمل برای الگوی اوج مسافران ورودی، خروجی و کل (هم ورودی و هم خروجی) ۴۱

۴-۴ کمی کردن آلودگی صوتی هواپیماها ۴۲

۴-۴-۱ اندازه گیری مربوط به تک رویداد ۴۲

۴-۴-۲ اندازه گیری تجمعی ۴۳

۴-۴-۳ متوسط تراز شدت صوت شبانه‌روزی و واکنش‌های جامعه ۴۴

۴-۵ کمی کردن میزان آلودگی هوای هواپیماها ۴۵

۴-۵-۱ روش بسیار ساده ۴۶

۴-۵-۲ روش با جزئیات ۴۹

فصل پنجم: مدل‌سازی

۵-۱ توصیف کلی مسئله‌ی صف فرودگاه‌ها ۵۳
۵-۲ بررسی صفات سیستم صف فرودگاه‌ها ۵۴
۵-۲-۱ الگوی ورودی و خدمت‌دهندگان ۵۴
۵-۲-۲ نظم صف ۵۹
۵-۳ توصیف دقیق‌تر سیستم صف فرودگاه‌ها در این پژوهش ۵۹
۵-۴ توصیف سیستم M/G/1 ..... ۶۱
۵-۵ مدل‌های فرعی جهت تعیین ظرفیت باندها برای عملیات نشست و برخاست ۶۳
۵-۵-۱ باندهای ترکیبی ۶۴
۵-۵-۲ باندهای مختص عملیات نشست ۶۵
۵-۵-۳ باندهای مختص عملیات برخاست ۶۵
۵-۶ تعریف مسئله‌ی اصلاح‌شده‌ی مکان‌یابی هاب با تخصیص چندگانه و بدون ظرفیت، با درنظرگرفتن تنوع هواپیماها ($UMAHLP-R$) ۶۶
۵-۷ مدل UMAHLP اصلاح شده با درنظرگرفتن تنوع هواپیماها ($UMAHLP-R$) ۶۷
۵-۸ تعریف مسئله‌ی اصلاح‌شده‌ی مکان‌یابی هاب با تخصیص چندگانه و با ظرفیت، با درنظرگرفتن تنوع هواپیماها ($CMAHLP-R$) ۶۹
۵-۹ مدل CMAHLP اصلاح شده با درنظرگرفتن تنوع هواپیماها ($CMAHLP-R$) ۷۱
۵-۱۰ معیارهای اصلی مدل چندهدفه‌ی نهائی ۷۲
۵-۱۰-۱ معیار آلودگی صوتی ۷۳
۵-۱۰-۲ معیار آلودگی هوا و میزان مصرف سوخت ۷۴
۵-۱۱ مدل چندهدفه نهائی (CMAHLMOP) ۷۶

فصل ششم: اجرای مدل‌ها

۶-۱ داده‌های موردنیاز ۷۸
۶-۲ اجرای مدل‌های فرعی NLP1، NLP2 و NLP3 ..... ۸۸
۶-۳ تعادل بار ترافیک در هاب‌های در شبکه ۹۳
۶-۴ حل مدل چندهدفه‌ی نهائی (CMAHLMOP) ۱۰۰
۶-۴-۱ شدنی بودن مسئله (ناتهی بودن فضای جواب) ۱۰۰
۶-۴-۲ تحلیل هدف‌ها ۱۰۱
۶-۴-۳ اجرای شدنی بودن مسئله و تحلیل هدف‌ها ۱۰۱
۶-۴-۴ روش‌های MODM ۱۰۲
۶-۴-۵ روش ε-محدودیت ۱۰۳
۶-۴-۶ اجرای روش محدودیت-ε ۱۰۴
۶-۵ تحلیل حساسیت ۱۰۷
۶-۵-۱ اثر ضریب تخفیف بخش انتقال (α) و هزینه‌ی ثابت احداث هاب (f_k) بر مجموع هزینه‌ها و تعداد هاب‌ها ۱۰۷
۶-۵-۲ اثر ε_2 و ε_3 بر تعداد هواپیماهای مورد استفاده از هر نوع در شبکه حمل‌ونقل هوایی (n^v و $n^{\hat{v}}$) ۱۰۸

فصل هفتم: نتیجه‌گیری و پیشنهادات آتی

۷-۱ جمع‌بندی و نتیجه‌گیری ۱۱۳
۷-۲ پیشنهادات آتی ۱۱۴
مراجع ۱۱۵

چکیده

شرکت‌های هواپیمایی از شبکه‌های هاب‌وکمان به‌منظور بهره‌مندی از محاسن مقیاس اقتصادی آن استفاده می‌کنند. ولی برخی فرودگاه‌های هاب به‌دلیل تمرکز جریان، به‌خصوص در ساعات اوج از لحاظ ترافیک هوایی مزدحم می‌شوند و میزان تأخیرات به‌طور قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌یابد. مدل‌های معمول ظرفیت‌دار مکان‌یابی هاب به‌تنهایی راه‌حل مناسبی جهت جلوگیری از این پیامد نامطلوب نیستند. در این پژوهش جهت رفع این مشکل، باند هر یک از فرودگاه‌ها به‌طور مجزا به‌صورت سیستم صف M/G/1 درنظر گرفته شد. مدل‌های فرعی سه‌گانه جهت بدست آوردن ظرفیت ورودی بهینه‌ی هواپیماها به باندهای نشست، برخاست و ترکیبی ارائه گردید. ظرفیت بهینه‌ی حاصل در مدل نهائی متوسط تأخیرات مطلوب و حضور تعداد معینی هواپیما در هر لحظه بر روی هر باند را تضمین می‌کند. همچنین تا به حال در مدل‌های مکان‌یابی فرودگاه‌های هاب از تنوع هواپیماها به‌عنوان عامل تأثیرگذار در طراحی شبکه صرف‌نظر شده است. در مدل نهائی ارائه شده ضمن برطرف شدن این نقص، نحوه‌ی تخصیص هر یک از انواع هواپیماها به هر یک از باندها بعد از حل مشخص می‌شود. نتایج محاسباتی بر روی شبکه‌ی حمل‌ونقل هوایی داخلی کشور آمریکا در ساعت اوج سال ۲۰۰۴ نیز نشان می‌دهد که روش ارائه شده در این پژوهش تعادل بار ترافیک در فرودگاه‌های هاب را بهتر برقرار می‌کند و موجب کاهش ازدحام در هاب‌های شلوغ و افزایش بهره‌وری هاب‌های بیکار می‌شود.

ضمناً بیشتر مطالعات پیشین در حوزه‌ی مسائل مکان‌یابی هاب بر معیار هزینه‌های جریان و احداث شبکه متمرکز شده است. خلأ مطالعاتی در این حوزه دیده می‌شود که بتواند جنبه‌ها و چالش‌های واقعی زندگی انسان‌ها را در مدل‌سازی دخالت دهد. تأخیرات، آسیب‌های زیست‌محیطی (آلودگی صوتی و آلودگی هوا) و انرژی (سوخت مصرفی) از چالش‌های مهم صنعت حمل‌ونقل هوایی در حال حاضر هستند. با درنظر گرفتن معیارهای مذکور مدل چندهدفه‌ی جدیدی با محوریت سه‌گانه‌ی اقتصادی، زیست‌محیطی و انرژی برای مسئله‌ی مکان‌یابی هاب ظرفیت‌دار با تخصیص چندگانه ارائه شد. نتایج حاصل از حل مدل بر روی شبکه‌ی حمل‌ونقل هوایی داخلی کشور آمریکا در سال ۲۰۰۴ نشان‌دهنده‌ی بهبود این معیارها بود.

کلمات کلیدی: هاب‌وکمان، ازدحام در ترافیک، سیستم‌های صف، آسیب‌های زیست‌محیطی، انرژی، تعادل بار ترافیک

فصل اول
مقدمه

۱-۱ مقدمه

آزادسازی[1] صنعت خطوط هوایی از طریق مقررات‌زدایی[2] شرکت‌های هواپیمایی و خصوصی‌سازی[3] فرودگاه‌ها از جمله روندهای اصلی پایان قرن بیستم می‌باشد که بر همه‌ی جنبه‌های مربوط به برنامه‌ریزی، مدیریت و طراحی شبکه‌های حمل‌ونقل هوایی اثر گذاشته است. خصوصی‌سازی عموماً به معنی انتقال مالکیت از بخش دولتی به سرمایه‌گذار خصوصی و مقررات‌زدایی به معنی زدودن فرآیندهای دولتی از تصمیمات تجاری است به‌طوری‌که نیاز شرکت‌ها به کسب مجوز از دولت برای تصمیم‌گیری برطرف شود. اصلاح ساختار حمل و نقل هوایی از سیستم "نقطه به نقطه[4]" به "هاب‌وکمان[5]" از نتایج مهم مقررات‌زدایی شرکت‌های هواپیمایی[6] بود که الگوی ترافیک هوایی ایالات متحده‌ی آمریکا و اروپا را با تغییرات زیادی مواجه کرد [۱و۲].

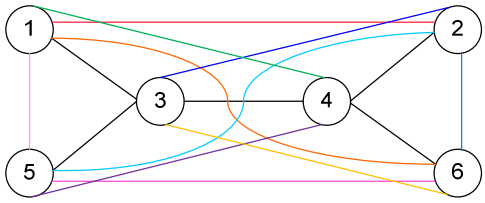
در سیستم نقطه به نقطه پروازهای بین مبدأ و مقصد به‌صورت مستقیم انجام می‌شود. درصورتی‌که ترافیک بین مبدأ و مقصد پایین و از تکرارشوندگی لازم برخوردار نباشد؛ پروازهای این مسیر از لحاظ اقتصادی با هزینه‌ی

---

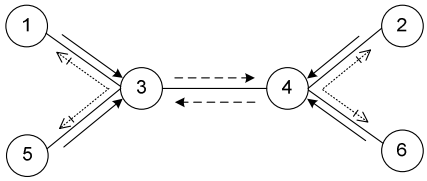
[1] liberalization
[2] deregulation
[3] privatization
[4] point to point
[5] hub-and-spoke

[6] مقررات‌زدایی شرکت‌های هواپیمایی ایالات متحده آمریکا در سال ۱۹۷۸ میلادی آغاز شد.

بالا به ازای هر صندلی در واحد مسافت برای مشتریان توجیه می‌شود اما در سیستم هاب‌وکمان ارتباط بین مسیرهای کم ترافیک به‌صورت غیرمستقیم و حداقل با یک فرودگاه واسطه (hub) انجام می‌شود، که البته خود هاب‌ها نیز می‌توانند مبدأ یا مقصد باشند.



شکل ۱-۱- یک سیستم حمل ونقل هوایی نقطه به نقطه



شکل ۱-۲- یک سیستم حمل ونقل هوایی هاب‌وکمان

همان‌طور که از شکل‌های ۱-۱ و ۱-۲ پیداست اگر مبدأ گره‌ی ۱ و مقصد گره‌ی ۲ باشد، در سیستم هاب‌وکمان مسیر ۲-۴-۳-۱ و در سیستم نقطه به نقطه مسیر ۲-۱ طی می‌شود. بنابراین سیستم هاب‌وکمان با عیب آشکاری مواجه است که آن اضافه شدن حداقل یک مسیر اضافی و طولانی شدن زمان سفر است که البته محاسن سیستم هاب‌وکمان این عیب را پوشش می‌دهد.

در یک سیستم هاب‌وکمان پروازها از یک نقطه‌ی ابتدایی به هاب(های) تخصیص داده شده، شامل همه‌ی پروازهای آن نقطه‌ی ابتدایی به عنوان مبدأ به همه‌ی نقاط مقصد می‌شود. همچنین پروازها به یک نقطه‌ی انتهایی از هاب(های) تخصیص داده شده شامل همه‌ی پروازها با مبدأهای مختلف به مقصد آن نقطه‌ی انتهایی است. پس به‌کارگیری شبکه‌های هاب‌وکمان باعث متمرکز شدن جریان در مسیرهای خاص در اثر استفاده‌ی کمتر از کمان‌ها و درنتیجه ایجاد مزیت مقیاس یا صرفه‌جویی به مقیاس[1] می‌شود که دلیل اصلی شکل‌گیری شبکه‌های هاب است. [۱] به‌طور کلی شبکه‌های هاب‌وکمان خدمات بهتر با قیمت مناسب‌تری به مشتریان ارائه می‌کند و به همین خاطر این ساختار در اروپا و آمریکا مورد توجه جدی قرار گرفته است.

به دلیل استفاده‌ی گسترده از شبکه‌های هاب در سیستم‌های حمل‌ونقل و ارتباطات راه دور، «مکان‌یابی هاب» یکی از مهم‌ترین بخش‌های تئوری مکان‌یابی در طول سه دهه‌ی گذشته بوده است [۳]. در شبکه‌های هاب جریان‌ها از یک مبدأ مشخص با مقصدهای مختلف در هابی(هاب‌هایی) ادغام و سپس جریان‌های ادغام شده به هاب (هاب‌های) دیگری منتقل و بعد جریان‌ها به مقصد مشخص خود توزیع می‌شوند. در واقع در شبکه‌های هاب‌وکمان خدمت به تقاضای (جریان) هر مبدأ و مقصدی از طریق یک مسیر مستقیم صورت نمی‌گیرد؛ بلکه

[1] Economies of scale

به‌صورت بالقوه از طریق مجموعه‌ای از مسیرهای کوچکتر بین مبدأ و هاب، بین هاب و هاب و بین هاب و مقصد انجام می‌شود.

۱-۲ اهداف پایان‌نامه و ضرورت انجام کار

هدف اصلی این پژوهش نزدیک کردن مدل‌های مکان‌یابی هاب به دنیای واقعی و چالش‌های حقیقی پیش‌روی آن است. تأخیرات و ازدحام در فرودگاه‌ها تهدید اصلی حمل‌ونقل هوایی را در آینده تشکیل می‌دهد[۱]. کنس [۴] در سال ۱۹۸۹گزارش می‌دهد که متوسط هزینه‌ی سالیانه‌ی تأخیرات سفرهای هوایی در بین سال‌های ۱۹۷۶ و ۱۹۸۶ در ایالات متحده آمریکا ۵/۱ میلیارد دلار تخمین زده شده که ۱/۸۱ میلیارد دلار آن مربوط به هزینه‌های عملیاتی و ۳/۲۹ میلیارد دلار دیگر مربوط به هزینه‌های اتلاف وقت مشتریان بوده است.

گزارش مرکز تحقیقات سیستم‌های حمل‌ونقل هوایی ایالات متحده‌ی آمریکا (CATSR[1]) [۵] قابل دریافت از سایت http://catsr.ite.gmu.edu[2] که با همکاری دانشگاه‌های جرج ماسون[3] و دانشگاه کالیفرنیا، برکلی[4] در سال ۲۰۰۸ انجام شد؛ از آمار و ارقام تکان‌دهنده‌ای حکایت داشت. بنابه نتایج این گزارش مجموع هزینه‌های تأخیرات سفرهای هوایی در سال ۲۰۰۷ در ایالات متحده به‌طور متوسط ۳۲/۹ میلیارد دلار برآورد شده است. از دیگر نتایج این گزارش آن است که در سال ۲۰۰۷ مجموع تأخیرهای سفرهای هوایی مسافران، ۲۸۱/۴ میلیون ساعت یا ۳۲۴۷۷ سال برآورد شده است.

بعد از چالش ازدحام و تأخیرات، تعداد زیادی از متخصصان علم هوانوردی معتقدند [۱] که آسیب‌های محیطی مهمترین مانع رشد صنعت حمل‌ونقل هوایی در آینده را تشکیل می‌دهد. به‌طورکلی، نگرانی‌ها راجع به سروصدا وآلودگی هوای ناشی از حرکت هواپیماها و اثرات مخرب آن‌ها بر سلامتی و کیفیت زندگی به‌طور فزآینده‌ای در حال گسترش است و محدودیت‌های شدیدی را بر صنعت هوایی تحمیل می‌کند. در مورد فرودگاه این محدودیت‌ها هزینه‌ی سرمایه، هزینه‌ی عملیاتی و توانایی فرودگاه‌ها برای افزایش ظرفیت به‌منظور رویارویی با افزایش تقاضاها را به‌طور عمده تحت تأثیر قرار داده است.

میزان مصرف سوخت نیز از دیگر معیارهای مهم است. انرژی و سوخت یکی از پایه‌های مهم اقتصاد و صنعت در جهان به شمار می‌آیند. انرژی در حیات اقتصادِ صنعتی جوامع، نقش زیربنائی را ایفا می‌کند، به این معنا

[1] Center for Air Transportation Systems Research
[2] http://catsr.ite.gmu.edu/pubs/AirlinePaxTripDelayReport2007.pdf
[3] George Mason University
[4] University of California, Berkeley

که هرگاه انرژی به مقدار کافی و به‌موقع دردسترس باشد توسعه‌ی اقتصادی نیز میسر خواهد شد. در دنیای کنونی مدیریت صحیح سوخت و انرژی بیش از هر زمان دیگری اهمیت پیدا کرده است. برای مقرون به‌صرفه بودن فعالیت یک شرکت هواپیمایی و با توجه به ملاحظات زیست‌محیطی کاهش مصرف سوخت امری ضروری است. از این‌رو به‌طور کلی در مدل چندهدفه‌ی ارائه شده در این تحقیق شاخص‌های میزان آلودگی صوتی، آلودگی هوا و مصرف سوخت در کنار مجموع هزینه‌ها درنظر گرفته می‌شود.

به‌طور خلاصه اهداف این پایان‌نامه عبارتست از:

۱- طراحی شبکه حمل‌ونقل هوایی به‌شکلی که از ایجاد شلوغی و ازدحام در فرودگاه‌های بزرگ به‌ویژه فرودگاه‌های هاب جلوگیری و متوسط زمان تأخیرات سفرهای هوایی مسافران به حد مطلوب رسانده شود.

۲- طراحی شبکه‌ی هاب‌وکمان شرکت‌های هواپیمایی براساس معیارهای جدیدی چون آلودگی صوتی، آلودگی هوا و میزان مصرف سوخت به‌عنوان چالش‌های مهم پیش‌روی صنعت حمل‌ونقل هوایی در کنار معیار مجموع هزینه‌ها

۳- درنظرگرفتن تنوع هواپیماها در طراحی شبکه به عنوان عاملی تأثیرگذار در هزینه‌های حمل‌ونقل، آلودگی صوتی، آلودگی هوا، مصرف سوخت و نیز محدودیت‌های مدل که موجب کاربردی‌تر و واقعی‌تر شدن نتایج حاصل از حل مدل می‌شود.

۱-۳ ساختار کلی پایان‌نامه

در فصل دوم به مفاهیم پایه‌ای به‌کار رفته در مدل‌های مکان‌یابی هاب پرداخته خواهد شد. در این فصل مدل اولیه‌ای که در فصل پنجم (مدل‌سازی) مبنا قرار گرفته و نیز موضوعات دیگری چون نحوه‌ی طبقه‌بندی مدل‌های مکان‌یابی هاب و پیچیدگی این مسائل شرح داده می‌شود. در فصل سوم پژوهش‌های انجام شده در حوزه‌ی مسائل مکان‌یابی هاب از سال ۱۹۸۷ تا ۲۰۱۱ و مدل‌سازی صف فرودگاه‌ها مرور می‌گردد و به‌صورت جامع سیر تکاملی فرمول‌بندی ریاضی مسائل هاب مرتبط با این پژوهش و روش‌های مختلف حل آن‌ها بررسی می‌شود.

برای فهم دقیق‌تر سیستم صف فرودگاه‌ها و روابط کمی مربوط به هدف‌های تعیین شده در مدل نهایی (آلودگی صوتی، آلودگی هوا و مصرف سوخت) لازم شد تا موضوعات مرتبط با طراحی و برنامه‌ریزی فرودگاه‌ها در فصل چهارم گنجانده شود. در واقع فصل چهارم به‌همراه فصل دوم از پیش‌نیازهای اصلی فصل پنجم می‌باشند. در فصل پنجم مدل‌سازی‌های انجام شده در راستای اهداف پایان‌نامه در قالب مدل‌های فرعی و مدل‌های تک هدفه

و چندهدفه‌ی نهایی ارائه خواهد شد. در فصل ششم مدل‌های پیشنهادی بـر روی داده‌هـای کشـور ایـالات متحـده‌ی آمریکا اجرا و نتایج حاصل از آن تحلیل می‌گردد. در فصل هفتم به جمع‌بندی و بیان خلاصه‌ی نتایج حاصـل از ایـن پایان‌نامه پرداخته و پیشنهادات آتی جهت توسعه‌ی این پژوهش ارائه می‌شود.

فصل دوم
مفاهیم مرتبط با مسائل مکان‌یابی هاب

۲-۱ پایه و اساس مدل‌های مکان‌یابی هاب

مدل‌های کلاسیک مکان‌یابی تجهیزات[1] با مدل‌های مکان‌یابی هاب، ارتباط تنگاتنگی دارند. مشابه‌ی هر یک از مسائل کلاسیک و پایه‌ای مکان‌یابی تجهیزات در فضای گسسته چون مسئله‌ی پی- مدین[2]، مسئله‌ی مکان‌یابی تسهیلات با هزینه‌های ثابت[3]، مسئله‌ی پی-سنتر[4] و مسئله‌ی پوششی[5]، مدل‌های مختلف مکان‌یابی هاب مانند مسئله‌ی پی-هاب مدین[6]، مسئله‌ی مکان‌یابی هاب با هزینه‌های ثابت[7]، مسئله‌ی پی-هاب سنتر[8] و مسئله‌ی پوششی هاب[9] مطالعه شده است[۶].

هر نوع از مسائل مکان‌یابی هاب از نظر نحوه‌ی تخصیص دارای دو گونه‌ی تکی و چندگانه است. در تخصیص تکی، هر گره‌ی غیرهاب می‌تواند فقط به یک گره‌ی هاب متصل شود، بنابراین همه‌ی جریان‌ها به (از) هر نقطه‌ی تقاضا از طریق یک گره‌ی هاب یکسان انتقال داده می‌شود. در تخصیص چندگانه، هر گره‌ی غیرهاب

[1] Classical Facility location models
[2] P-median problem
[3] Facility location problem with fixed costs
[4] P-center problem
[5] Covering problem
[6] P-hub median problem
[7] Hub location problem with fixed costs
[8] P-hub center problem
[9] Hub covering problem

می‌تواند به یک یا بیشتر از یک گره‌ی هاب تخصیص داده شود. انعطاف‌پذیری بالاتر شبکه‌های هاب با تخصیص چندگانه، هزینه‌ی پایین‌تری را ممکن می‌سازد؛ چون‌که برای مجموعه‌ی معین از گره‌های هاب، جریان بین هر مبدأ و مقصدی می‌تواند از راه یا راه‌هایی با کمترین هزینه مسیریابی شود.

مفهوم ظرفیت در مسائل مکان‌یابی هاب با ظرفیت در مسائل کلاسیک مکان‌یابی تجهیزات به خاطر متفاوت بودن طبیعت تقاضا، متفاوت است. ظرفیت در مسائل مکان‌یابی هاب می‌تواند برای جریان بین هاب‌ها، جریان بین گره‌های هاب و غیرهاب، به روی کل جریان‌های وارده به گره‌های هاب و یا فقط جریان وارده به صورت مستقیم از گره‌های غیر هاب به گره‌های هاب که در سیستم‌های مرتب‌سازی نامه‌های پستی کاربرد دارد، اعمال شود.

برنامه‌ریزی ریاضی عدد صحیح مختلط خطی به شیوه‌های مختلف برای مسائل مختلف مکان‌یابی هاب ارائه شده است. برای مثال کمپبل [۶] فرمولاسیون پیشنهادی خود را برای مسئله‌ی پی-هاب مدین ، مسئله‌ی مکان‌یابی هاب با هزینه‌های ثابت بدون ظرفیت یا با ظرفیت، مسئله‌ی پی-هاب سنتر و مسئله‌ی پوششی هاب ارائه کرد. [۳] اما به نظر می‌رسد که مؤثرترین رویکرد جهت برنامه‌ریزی ریاضی مسائل مکان‌یابی هاب توسط ارنست و کریشنامورتی [۷و۸] بر اساس مسیر جریان بر روی کمان برای هر مبدأ مشخص بنا نهاده شده باشد. به دلیل استفاده از این رویکرد برای مدل‌سازی نهائی در این تحقیق به بررسی آن پرداخته می‌شود.

در گراف کامل $G(V, E)$، $V = \{V_1, V_2, \dots, V_m\}$ مجموعه‌ی گره‌هاست و هر گره به‌صورت بالقوه می‌تواند هاب باشد. جریان از گره‌ی i به گره‌ی j برابر w_{ij}، مسافت بین گره‌های i و j برابر d_{ij} و همواره نامساوی مثلثاتی[1] بین مسافت‌های بین گره‌ها برقرار است. هر مسیر بین مبدأ به مقصد به‌صورت بالقوه می‌تواند سه جزء داشته باشد:

ادغام[2]: ورود جریان از مبدأ به هاب اول

انتقال[3]: انتقال از هاب اول به هاب دوم

توزیع[4]: توزیع جریان از هاب دوم به مقصد نهائی.

پارامترهای χ، α و δ ضریب‌های هزینه‌ای به‌ترتیب برای اجزاء ادغام، انتقال و توزیع هستند. بنابراین یک مسیر بین مبدأ و مقصد خاص برای مثال از مبدأ غیرهاب i به مقصد غیرهاب j از طریق هاب‌های k و L؛ یعنی

[1] Triangle inequality
[2] Collection
[3] transfer
[4] distribution

$i \to k \to l \to j$ برای هر واحد جریان دارای هزینه‌ای معادل $\chi d_{ik} + \alpha d_{kl} + \delta d_{lj}$ است. هزینه‌ی انتقال بین هاب‌ها، به دلیل صرفه‌جوئی به مقیاس حاصل از تمرکز جریان بین هاب‌ها کاهش می‌یابد. این کاهش هزینه در مدل با پارامتر α اعمال می‌شود. عموماً به این پارامتر، فاکتور تخفیف[1] گفته می‌شود. همواره $\alpha < 1$، $\alpha < \chi$ و $\alpha < \delta$ فرض می‌شود.

مدل‌های اصلی مکان‌یابی هاب می‌توانند به طراحی دو سطح از شبکه منتهی شوند؛ شبکه‌ی دسترسی[2] که کمان‌های متصل از مبدأ و مقصدهای غیرهاب به گره‌های هاب و شبکه‌ی گره‌های هاب[3] که مکان‌های متصل بین خود هاب‌ها را دربرمی‌گیرد. سه فرض ابتدائی در مدل‌های مکان‌یابی هاب عبارتنداز:

۱. مسیرهای بین هر مبدأ و مقصدی، حداقل دارای یک هاب است.
۲. هزینه‌ی انتقال جریان بین هاب‌ها با فاکتور تخفیف α کاهش می یابد.
۳. شبکه‌ی گره‌های هاب یک گراف کامل است.

برای مدل کردن مسائل مکان‌یابی هاب، سه مجموعه از متغیرهای تصمیم‌گیری مطابق با سه جزء از مسیر مبدأ- مقصد تعریف می‌شود.

این متغیرهای تصمیم‌گیری عبارتند از:

Z_{ik}: جریان از مبدأ i به هاب k (مربوط به جز ادغام)

Y_{kl}^{i}: جریان از هاب k به هاب L با مبدأ i (مربوط به جزء انتقال)

X_{lj}^{i}: جریان از هاب L به مقصد j با مبدأ i (مربوط به جزء توزیع)

متغیر تصمیم‌گیری دیگر H_k است. اگر گره‌ی k هاب باشد؛ H_k برابر ۱ و در غیر این صورت برابر ۰ است. هدف از مسئله‌ی پی-هاب مدین با تخصیص چندگانه و بدون ظرفیت (UMApHMP[4])، مکان‌یابی p هاب با کمینه‌کردن مجموع هزینه‌های جریان است. این مسئله به صورت $p - hub/D/MA/\bullet/\sum_{flow}$ نشان داده می‌شود. علت استفاده از چنین نمادی در بخش بعدی به طور کامل توضیح داده شده است. با استفاده از متغیرهای بالا این مسئله را می‌توان به صورت برنامه‌ریزی خطی عددصحیح مختلط (MIP[5]) مدل کرد:

مسئله‌ی $p - hub/D/MA/\bullet/\sum_{flow}$

[1] Discount factor
[2] access network
[3] back bone
[4] Uncapacitated Multiple Allocation p-Hub Median Problem
[5] Mixed Integer Programming

O_i: مطابق رابطه‌ی (۲-۱) مجموع جریان‌های خارج شده با مبدأ i است

$$O_i = \sum_{j \in V} W_{ij} \tag{۱-۲}$$

$$min \sum_{i \in V} \left[\sum_{k \in V} \chi \, d_{ik} Z_{ik} + \sum_{k \in V} \sum_{l \in V} \alpha \, d_{kl} Y_{kl}^{i} + \sum_{l \in V} \sum_{j \in V} \delta \, d_{lj} \, X_{lj}^{i} \right] \tag{۲-۲}$$

$$S.t.$$

$$\sum_{k \in V} H_k = p \tag{۳-۲}$$

$$\sum_{k \in V} Z_{ik} = O_i \qquad \forall i \in V \tag{٤-۲}$$

$$\sum_{l \in V} X_{lj}^{i} = w_{ij} \qquad \forall i, j \in V \tag{٥-۲}$$

$$Z_{ik} + \sum_{l \in V} Y_{lk}^{i} = \sum_{l \in V} Y_{kl}^{i} + \sum_{j \in V} X_{kj}^{i} \quad \forall i, k \in V \tag{٦-۲}$$

$$X_{lj}^{i} \leq w_{ij} H_l \quad \forall i, j, l \in V \tag{۷-۲}$$

$$Z_{ik} \leq O_i H_k \qquad \forall i, k \in V \tag{۸-۲}$$

$$Z_{ik}, Y_{lk}^{i}, \; X_{lj}^{i} \geq 0 \quad \forall i, j, k, l \in V \tag{۹-۲}$$

$$H_k \in \{0,1\} \quad \forall k \in V \tag{۱۰-۲}$$

تابع هدف (۲-۲) مجموع هزینه‌های حمل‌ونقل را کمینه می‌کند. محدودیت (۲-۳) تضمین می‌کند که تعداد هاب‌های موردنیاز انتخاب شوند. محدودیت (۲-۴) تضمین می‌کند که همه‌ی جریان از هر مبدأ از آن مبدأ خارج شود. محدودیت (۲-۵) تضمین می‌کند که همه‌ی جریان‌ها برای هر جفت مبدأ-مقصدی به مقصد صحیح خود وارد شوند. محدودیت (۲-۶) تساوی بقای جریان در هر هاب را بیان می‌کند. محدودیت‌های (۲-۷) و (۲-۸) تضمین می‌کنند که گره‌های هاب به‌ترتیب برای هر جزء توزیع و ادغام از هر مسیری مورد استفاده قرار گیرند.

مسئله‌ی پی-هاب مدین در حالت تخصیص تکی و بدون ظرفیت (USApHMP[1]) مشابه‌ی مسئله‌ی بالا (UMApHMP) است؛ تنها با این تفاوت که هر گره‌ی غیرهاب فقط می‌تواند به یک گره ی هاب متصل شود. مدل کردن این مسئله نیز مشابه UMApHMP است؛ با این تفاوت که متغیر Z_{ik}، یک متغیر صفر و یک است و متغیر تصمیم X_{ij}^{i} حذف می‌شود. همچنین می‌توان متغیر H_k را با Z_{kk} جایگزین نمود. اکنون متغیرهای تصمیم‌گیری عبارتند از:

[1] Uncapacitated Single Allocation p-Hub Median Problem