

دانشگاه بین‌المللی امام خمینی



IMAM KHOMEINI
INTERNATIONAL UNIVERSITY

شبکه‌های حمل و نقل شهری

تحلیل تعادل با روشهای برنامه‌ریزی ریاضی

مؤلف

یوسی شفی

مترجمان

امیرعباس رصافی

(عضو هیئت علمی دانشگاه بین‌المللی امام خمینی)

حسین رحیمی فراهانی

پاییز ۱۴۰۰

سرشناسه	: شفی، یوسف، ۱۹۴۸-م.
عنوان و نام پدیدآور	: Sheffi, Yosef شبکه‌های حمل و نقل شهری: تحلیل تعادل با روش‌های برنامه‌ریزی ریاضی / مولف یوسی شفی؛ مترجمان امیرعباس رصافی، حسین رحیمی‌فراهانی.
مشخصات نشر	: قزوین: دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، انتشارات، ۱۴۰۰.
مشخصات ظاهری	: ۵۴۲ص: مصور، نمودار.
شابک	: 978-622-6898-89-8
وضعیت فهرست نویسی	: فیبا
یادداشت	: Urban transportation networks : equilibrium analysis with mathematical programming methods, c1985.
یادداشت	: واژه‌نامه.
یادداشت	: کتابنامه: ص ۵۰۱-۵۱۴.
یادداشت	: نمایه.
موضوع	: حمل و نقل شهری -- الگوهای ریاضی Urban transportation -- Mathematical models
شناسه افزوده	: رصافی، امیرعباس، ۱۳۴۷-، مترجم
شناسه افزوده	: رحیمی فراهانی، حسین، ۱۳۶۹-، مترجم
شناسه افزوده	: دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، انتشارات
رده بندی کنگره	: HE۳۰۵
رده بندی دیویی	: ۳۸۸/۴۰۷۲۴
شماره کتابشناسی ملی	: ۸۷۳۵۰۶۲
اطلاعات رکورد کتابشناسی	: فیبا

عنوان : شبکه‌های حمل و نقل شهری: تحلیل تعادل با روش‌های برنامه‌ریزی ریاضی

مولف : یوسی (یوسف) شفی

مترجمین : امیرعباس رصافی و حسین رحیمی فراهانی

ناظر فنی : حمید کلهر

طرح جلد : فاطمه آرامش

شابک : ۹۷۸-۶۲۲-۶۸۹۸-۸۹-۸

نوبت چاپ : اول ۱۴۰۰

قیمت : ۱۳۰ هزار تومان

شمارگان : ۵۰۰ جلد

ناشر : انتشارات دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)

قزوین، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، تلفن ۰۲۸ - ۳۳۹۰۱۴۲۶

کلیه حقوق برای ناشر محفوظ است.

مسئولیت حقوقی و قانونی محتوای کتاب بر عهده صاحبان اثر است

فهرست مطالب

پیشگفتار مولف	۵
پیشگفتار مترجمان	۵
بخش نخست:	۱
شبکه‌های شهری و تعادل	۱
فصل ۱	۳
تحلیل شبکه‌های حمل‌ونقل شهری	۳
۱. ۱ تحلیل تعادلی از سیستم‌های حمل‌ونقل	۷
رویکرد سیستمی برای حمل‌ونقل شهری	۸
تعادل در بازارها	۱۰
عرصه حمل‌ونقل	۱۴
۱. ۲ نمایش شبکه	۱۶
نمایش شبکه راه‌های شهری	۱۷
نمایش شبکه حمل‌ونقل همگانی	۱۸
مرکز نواحی و کمان‌های اتصال	۲۱
تابع‌های عملکرد کمان	۲۳
۱. ۳ تعادل در شبکه‌های حمل‌ونقل شهری	۲۵
تعاریف تعادل	۲۶
مثال ساده‌ای از تعادل کاربر	۲۸
طرح کلی	۳۲
۱. ۴ خلاصه	۳۳
۱. ۵ منابع تشریح‌شده	۳۴
۱. ۶ مسایل	۳۴
بخش دوم:	۳۷
تعادل کاربر	۳۷
فصل ۲	۳۹
مفاهیم پایه در مسائل کمینه‌سازی	۳۹
۲. ۱ مسائل تک‌متغیره	۴۳
مسائل نامقید تک‌متغیره	۴۳

۴۷.....	مسائل کمینه‌سازی مقید.....
۵۱.....	۲.۲ مسائل چندبعدی.....
۵۱.....	مسائل کمینه‌سازی نامقید.....
۵۵.....	مسائل کمینه‌سازی مقید.....
۶۱.....	۳.۲ برخی مسائل خاص.....
۶۱.....	قیدهای غیرمنفی.....
۶۲.....	قیدهای تساوی خطی.....
۶۴.....	قیدهای غیرمنفی و تساوی خطی.....
۶۵.....	بیشتر درباره لاگرانژین.....
۶۷.....	مسائل خطی.....
۶۹.....	۴.۲ خلاصه.....
۷۰.....	۵.۲ منابع تشریح‌شده.....
۷۰.....	۶.۲ مسایل.....
۷۵.....	فصل ۳.....
۷۵.....	فرمول‌بندی مسئله تخصیص به عنوان برنامه ریاضی.....
۸۱.....	۱.۳ تبدیل پایه.....
۸۵.....	۲.۳ شرایط هم‌ارزی.....
۸۸.....	۳.۳ شرایط یکتایی.....
۹۲.....	۴.۳ مسئله بهینگی سیستم.....
۹۶.....	۵.۳ تعادل کاربر و بهینه سیستم.....
۱۰۲.....	۶.۳ خلاصه.....
۱۰۳.....	۷.۳ منابع تشریح‌شده.....
۱۰۴.....	۸.۳ مسایل.....
۱۰۷.....	فصل ۴.....
۱۰۷.....	مروری بر برخی از الگوریتم‌های بهینه‌سازی.....
۱۰۹.....	۱.۴ کمینه‌سازی تک‌بعدی.....
۱۱۰.....	روش‌های کاهش بازه.....
۱۱۰.....	روش بخش طلایی.....
۱۱۳.....	روش دوبخشی.....

۱۱۶	۲.۴ روش‌های برآزش منحنی
۱۱۷	روش نیوتن
۱۱۷	روش موقعیت ساختگی
۱۱۸	روش برآزش درجه دو
۱۱۹	۳.۴ کمینه‌سازی چندمتغیره
۱۲۱	الگوریتم‌های کمینه‌سازی غیرمقید
۱۲۲	روش تندترین فرود
۱۲۴	روش‌های دیگر
۱۲۵	الگوریتم‌های کمینه‌سازی مقید
۱۲۶	حفظ امکان‌پذیری در یک جهت مفروض
۱۲۸	یافتن جهت جستجوی امکان‌پذیر
۱۳۰	۴.۴ روش ترکیب‌های کوژ
۱۳۰	الگوریتم
۱۳۸	۵.۴ خلاصه
۱۴۰	۶.۴ منابع تشریح‌شده
۱۴۰	۷.۴ مسایل
۱۴۳	فصل ۵
۱۴۳	حل تعادل کاربر
۱۴۵	۵.۱ فنون ابتکاری برای برقراری تعادل
۱۴۶	محدودیت ظرفیت
۱۴۹	تخصیص جزئی
۱۵۱	۵.۲ به کارگیری روش ترکیب‌های کوژ
۱۵۷	۵.۳ کوتاه‌ترین مسیرها روی شبکه
۱۵۹	الگوریتم کوتاه‌ترین مسیر
۱۶۰	مثال
۱۶۲	یادداشتی برای اجرای رایانه‌ای
۱۶۶	۵.۴ خلاصه
۱۶۷	۵.۵ منابع تشریح‌شده
۱۶۸	۵.۶ مسایل

بخش سوم:	۱۷۱
گسترش‌های تعادل کاربر	۱۷۱
فصل ۶	۱۷۳
تعادل کاربر با تقاضای متغیر	۱۷۳
۶. ۱ بیان ریاضی مسئله کمینه‌سازی معادل	۱۷۶
انگیزه و تفسیر	۱۷۷
شرایط هم‌ارزی	۱۷۹
شرایط یکتایی	۱۸۲
۶. ۲ الگوریتم حل	۱۸۳
۶. ۳ پاسخ مبتنی بر نمایش شبکه	۱۸۸
فرمول‌بندی جریان سرریز بدون هزینه	۱۸۹
فرمول‌بندی تقاضای اضافی	۱۹۱
مثال	۱۹۴
ملاحظات محاسباتی	۱۹۵
۶. ۴ انتخاب شیوه با شیوه‌های مستقل	۱۹۷
تعادل بین شیوه‌ها	۱۹۹
فرمول‌بندی و الگوریتم حل	۲۰۱
مثال	۲۰۴
۶. ۵ خلاصه	۲۰۶
۶. ۶ منابع تشریح‌شده	۲۰۷
۶. ۷ مسایل	۲۰۹
فصل ۷	۲۱۳
مدل‌های توزیع سفر و تخصیص ترافیک	۲۱۳
۷. ۱ مسئله تخصیص/توزیع تعادل کاربر	۲۱۶
فرمول‌بندی مسأله	۲۱۷
الگوریتم	۲۲۰
حل از طریق نمایش شبکه	۲۲۱
۷. ۲ توزیع/تخصیص با تابع‌های تقاضای مقصد	۲۲۳
توزیع/تخصیص با تابع‌های لجیت	۲۲۴

۲۲۷	الگوریتم و حل مستقیم از طریق نمایش شبکه
۲۳۰	مثال
۲۳۲	مسائل محاسباتی
۲۳۳	الگوریتم دومرحله‌ای
۲۳۵	۷.۳ مدل‌های دوقیدی
۲۳۶	مدل آنتروپی
۲۴۰	حل با الگوریتم ترکیب‌های کوژ
۲۴۲	الگوریتم دومرحله‌ای
۲۴۳	ارزیابی
۲۴۵	۷.۴ حل مسئله حمل‌ونقل هیچکاک
۲۵۴	۷.۵ خلاصه
۲۵۵	۷.۶ منابع تشریح‌شده
۲۵۶	۷.۷ مسائل
۲۶۳	فصل ۸
۲۶۳	تعداد با اندرکنش‌های کمانی
۲۶۵	۸.۱ اندرکنش‌های ترافیک دوطرفه
۲۶۷	شرایط تعادل
۲۶۹	شرایط یکتایی
۲۷۱	الگوریتم
۲۷۲	مثال
۲۷۵	تعمیم مطالب
۲۷۸	۸.۲ تعداد با تابع‌های نامتقارن هزینه
۲۷۸	الگوریتم
۲۸۰	اثبات پاسخ
۲۸۵	ملاحظات همگرایی و یک الگوریتم ساده
۲۹۱	۸.۳ خلاصه
۲۹۳	۸.۴ منابع تشریح‌شده
۲۹۴	۸.۵ مسائل
۲۹۹	فصل ۹

ابر شبکه‌ها - مدل‌های توامان انتخاب‌های سفر.....	۲۹۹
۱.۹ سهم شیوه در ترافیک ترکیبی - گسترش‌ها.....	۳۰۲
سهم شیوه با شبکه کامل حمل‌ونقل همگانی.....	۳۰۲
سهم شیوه برای شیوه‌های وابسته به هم.....	۳۱۰
تخصیص همگانی غیر ت.ک.....	۳۱۶
۲.۹ ابر شبکه‌ها و تصمیمات سفر توامان.....	۳۲۰
مدل تخصیص/توزیع/سهم شیوه توامان.....	۳۲۱
مدل تخصیص/توزیع/سهم شیوه توامان با تقاضای متغیر.....	۳۲۷
تحلیل ابر شبکه‌ها.....	۳۲۹
۳.۹ خلاصه.....	۳۳۲
۴.۹ منابع تشریح‌شده.....	۳۳۳
۵.۹ مسائل.....	۳۳۴
بخش چهارم:.....	۳۳۹
تعادل کاربر تصادفی.....	۳۳۹
فصل ۱۰.....	۳۴۳
مدل‌های انتخاب گسسته و تخصیص ترافیک.....	۳۴۳
۱.۱۰ بررسی مدل‌های انتخاب گسسته.....	۳۴۵
تابع انتخاب.....	۳۴۶
لوجیت چند جمله‌ای.....	۳۴۸
پرو بیت چند جمله‌ای.....	۳۴۹
تابع رضایت‌مندی.....	۳۵۳
پیش‌بینی‌های هم‌فزون.....	۳۵۵
۲.۱۰ بارگذاری تصادفی شبکه.....	۳۵۶
انتخاب مسیر.....	۳۵۶
تناقض دیگری از جریان ترافیک.....	۳۶۰
زمان سفر درک‌شده مورد انتظار.....	۳۶۴
ماهیت متغیرهای جریان.....	۳۶۷
۳.۱۰ خلاصه.....	۳۶۹
۴.۱۰ منابع تشریح‌شده.....	۳۷۰

۳۷۲	۱۰. ۵ مسائل
۳۷۵	فصل ۱۱
۳۷۵	مدل‌های تصادفی بارگذاری شبکه
۳۷۷	۱.۱۱ مدل‌های بارگذاری لوجیت-مینا
۳۷۹	الگوریتم استوک
۳۸۷	نقد بارگذاری شبکه لوجیت-مینا
۳۹۱	۱.۱۲ مدل بارگذاری پروبیت-مینا
۳۹۲	استخراج زمان‌های سفر درک‌شده مسیر
۳۹۴	الگوریتم
۳۹۷	مقایسه مدل‌های بارگذاری پروبیت و لوجیت
۴۰۱	۱.۱۳ خلاصه
۴۰۲	۱.۱۴ منابع تشریح‌شده
۴۰۳	۱.۱۵ مسائل
۴۰۷	فصل ۱۲
۴۰۷	تعادل احتمالی کاربر
۴۱۳	۱.۱۲ کمینه‌سازی هم‌ارز ت.ا.ک.
۴۱۳	فرمول‌بندی مسئله
۴۱۷	شرایط هم‌ارزی
۴۲۰	شرایط یکتایی
۴۲۵	۱.۱۲ الگوریتم حل
۴۲۸	روش میانگین‌های متوالی
۴۳۶	۱.۱۲ نکاتی دیگر از تعادل احتمالی کاربر
۴۳۶	ملاحظات محاسباتی پیرامون ت.ا.ک. پروبیت-مینا
۴۴۰	ت.ا.ک. با اندرکنش کمان‌ها
۴۴۱	یادداشتی بر انتخاب روش
۴۴۴	انتخاب‌های توأمان سفر و فراشبکه‌ها
۴۴۶	۱.۱۲ خلاصه
۴۴۷	۱.۱۲ منابع تشریح‌شده
۴۴۸	۱.۱۲ مسایل

فصل ۱۳.....	۴۵۳
زمینه ایجاد ورودی‌های تحلیل.....	۴۵۳
۱.۱۳. تابع‌های عملکرد کمان.....	۴۵۵
مدل‌های جریان ترافیک.....	۴۵۵
تاخیر در تقاطع‌های چراغ‌دار.....	۴۶۰
تاخیر در تقاطع‌های غیرچراغ‌دار.....	۴۶۴
تابع‌های متداول عملکرد کمان.....	۴۶۹
۲.۱۳. برآورد پارامترهای عملکرد تقاضا.....	۴۷۱
برازش منحنی و کمینه مربعات.....	۴۷۲
بیشینه وقوع.....	۴۷۴
برآورد پارامترهای مدل‌های انتخاب گسسته.....	۴۷۶
۳.۱۳. برآورد ماتریس‌های م-م.....	۴۸۰
ماتریس‌های م-م که شرایط مشاهده شده را بازتولید می‌کنند.....	۴۸۱
انتخاب ماتریس مناسب.....	۴۸۲
۴.۱۳. خلاصه.....	۴۸۶
۵.۱۳. منابع تشریح‌شده.....	۴۸۷
۶.۱۳. مسائل.....	۴۸۹
پیوست:.....	۴۹۳
توزیع نرمال و تحلیل پروبیت.....	۴۹۳
پ. ۱. توزیع نرمال چند متغیره.....	۴۹۵
پ. ۲. مدل پروبیت چندجمله‌ای.....	۴۹۶
روش تقریب.....	۴۹۷
روش شبیه‌سازی.....	۴۹۹
فهرست منابع.....	۵۰۱
نمایه.....	۵۱۵
واژه‌نامه فارسی به انگلیسی.....	۵۳۳
واژه‌نامه انگلیسی به فارسی.....	۵۳۷
فهرست نام‌ها.....	۵۴۱

الگوی جریان در سراسر یک شبکه شهری را می‌توان به عنوان نتیجه دو سازوکار^۱ رقابتی در نظر گرفت. از یک طرف، کاربران سیستم (رانندگان، مسافران، عابران پیاده) سعی می‌کنند به گونه‌ای سفر کنند که عدم مطلوبیت^۲ مرتبط با حمل‌ونقل را کمینه کنند. به عنوان مثال، رانندگانی که بین یک مبدأ و یک مقصد مشخص رانندگی می‌کنند، احتمالاً مسیری را با کمترین زمان سفر انتخاب می‌کنند. از سوی دیگر، عدم مطلوبیت سفر ثابت نیست، بلکه تا حدی به استفاده از سیستم حمل‌ونقل بستگی دارد. بنابراین، در مثال پیشین، زمان سفر در هر یک از مسیرهای بین مبدأ و مقصد، به دلیل شلوغی^۳ تابعی از کل جریان ترافیک است. بنابراین از پیش^۴ مشخص نیست که کدام مسیر از طریق شبکه کمترین زمان سفر را دارد. در نتیجه، ممکن است مشخص نباشد که الگوی جریان در سراسر شبکه تحت شرایط مختلف چگونه خواهد بود. این کتاب توضیح می‌دهد که چگونه می‌توان این الگوی جریان را برای یک شبکه شهری با مدل‌سازی این دو سازوکار (تصمیم‌گیری سفر و شلوغی) تعیین کرد.

رویکرد تحلیلی شرح داده شده در این متن از قیاس بین دو سازوکاری که اینجا بیان شد، و تعامل عرضه و تقاضا در بازار استفاده می‌کند. به جای تحلیل قیمت یک محصول و مقدار مصرف آن، این کتاب به سطح خدمت حمل‌ونقل (یا معکوس آن، عدم مطلوبیت سفر) و جریان‌ها می‌پردازد. نتایج تحلیل شامل مجموعه‌ای از سنجه‌های جریان و سطح خدمت است که با یکدیگر در تعادل هستند.

این کتاب به ابعاد بسیاری از انتخاب سفر، از جمله تصمیم برای سفر، انتخاب شیوه سفر، توزیع سفرها بین مقصدهای مختلف ممکن، و انتخاب مسیر بین مبدأ و مقصد می‌پردازد. همه این تصمیمها، هنگامی که همزمان با اثرات شلوغی تجمیع و تحلیل شوند، منجر به الگوی جریان در شبکه می‌شوند. تحلیل همه این انتخاب‌های سفر با استفاده از یک

¹ . Mechanism

² . Disutility

³ . Congestion

⁴ . A priori

چهارچوب یکپارچه انجام می‌شود که بر روی نمایش گرافیکی و شبکه‌ای بنا شده است. مسئله یافتن الگوی جریان تعادل در یک شبکه حمل‌ونقل شهری معین، به عنوان «تخصیص ترافیک»^۱ نیز شناخته می‌شود. پایه روش حل، بر اساس فرمول‌بندی مسئله به عنوان یک بهینه‌سازی غیرخطی و حل آن در این قالب بنا شده است. با این حال، این کتاب هیچ پیش‌نیازی به برنامه‌ریزی ریاضی یا نظریه گراف ندارد. تمام پیشینه‌های مورد نیاز در سطح مقدماتی بررسی می‌شود. سطح ریاضیات مورد انتظار شامل حساب دیفرانسیل و انتگرال^۲ در سطح کارشناسی و (در قسمت‌های آخر کتاب) مفاهیم احتمال مقدماتی است. این کتاب از استدلال‌های شهودی و ساختارهای شبکه‌ای استفاده می‌کند که برای نشان دادن بسیاری از موقعیت‌ها به صورت گرافیکی استفاده می‌شوند.

این کتاب از مجموعه‌ای از یادداشت‌های درسی پدید آمد که برای دانشجویان دو دوره کارشناسی ارشد و کارشناسی در MIT استفاده می‌شد. در حال حاضر، مطالب درسی (و یادداشت‌ها) برای قابل استفاده بودن توسط دانشجویان سطح بالای کارشناسی و کارشناسی ارشد با هم ترکیب شده‌اند. این کتاب به عنوان متن درسی برای درس‌های زیر طراحی شده است:

۱. یک متن درسی اصلی برای درس(های) فشرده یک نیمسال (یا دو دوره سه ماهه).
۲. یک متن درسی اصلی برای یک درس یک ترم یا یک دوره سه ماهه آهسته تر، فصل‌های ۱-۶، ۷، و/یا ۸، احتمالاً ۹، و بخش‌هایی از ۱۳). چنین دوره‌ای فقط روش‌های تعادل قطعی را پوشش می‌دهد.
۳. یک متن درسی کمکی برنامه‌ریزی حمل‌ونقل شهری مقدماتی (فصل‌های ۱، ۳، ۵، ۶ و ۷ با تاکید بر الگوریتم‌ها).
۴. یک متن درسی کمکی تحقیق در عملیات و فنون برنامه‌ریزی ریاضی، برای نمایش کاربردهای روش.

^۱ . Traffic assignment

^۲ . Calculus

این کتاب همچنین می‌تواند مورد استفاده مهندسين حمل‌ونقل و برنامه‌ريزان شهري به عنوان يك راهنمای مرجع در مورد مسائل تخصیص ترافیک و تحلیل شبکه‌های حمل‌ونقل شهري قرار گیرد.

افراد زیادی در توسعه این کتاب مشارکت داشته‌اند. وارن پاول از دانشگاه پرینستون و کارلوس داگانزو از دانشگاه کالیفرنیا در برکلی در بیشتر تحقیقاتم در این زمینه با من همراه بودند. جوئل هوروویتز از دانشگاه آیووا و هانی مهمسانی از دانشگاه تگزاس در آستین با اظهار نظر گسترده در مورد نسخه‌های اولیه آن به تهیه متن کمک کردند. در سالهایی که نسخه خطی در حال آماده شدن بود نظرات مفیدی نیز توسط برایان برادمیر، استلا دافرموس، مارک داسکین، پاتریک هارکر، هریس کوتسوپولوس، لری لبلانک، جافر سوالت و همه دانشجویانی که درس شبکه‌های من را در MIT گذرانده بودند، ارائه شد. از کمک‌های کارن و جان‌تان نیز بسیار قدردانی می‌شود.

یوسف ("یوسی") شفی