

## استفاده از بهینه‌سازی فازی در تعدیل مقادیر نرخ‌های سفر جداول دسته‌بندی متقاطع چندگانه\*

امیر عباس رصافی، استادیار، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران  
روح‌ا... رضائی، کارشناس ارشد، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران  
E-mail: info@rasafi.ir

### چکیده

جداول دسته‌بندی متقاطع یکی از روشهای مورد استفاده برای برآورد میزان سفر است. این جداول می‌توانند به صورت دو بعدی تعریف شوند که در آن، نرخ سفر تولید شده توسط هر خانوار در روز با استفاده از دو متغیر برآورد می‌شود. علاوه بر جداول دوبعدی، جداول دسته‌بندی متقاطع چندگانه نیز مطرح شده، که در آن از متغیرهای بیشتری (معمولاً سه متغیر) برای برآورد نرخ سفر تولیدی خانوارها استفاده می‌شود. به دلیل استفاده از داده‌های آماری در تهیه این جداول، ممکن است بعضی از مقادیر نرخ سفر غیرمنطقی بوده و بی‌نظمی‌هایی در بین خانه‌های مجاور دیده شود. روش سنتی برای تعدیل مقادیر نرخ سفر این جداول، استفاده از روش تحلیل واریانس است. در این مقاله روش برنامه‌ریزی خطی فازی برای تعدیل مقادیر نرخ سفر این جداول معرفی می‌شود. در این روش، قضاوت و درک متخصص حمل‌ونقل برای تعدیل مقادیر جداول به مقادیر مشاهده شده به صورتی بکار گرفته می‌شود که بعد از اعمال روش، میزان سفرهای واقعی با میزان سفرهای به دست آمده از جداول تعدیل شده، تقریباً یکسان شود. در این مقاله بعد از شرح مسئله و روش انجام آن، با استفاده از داده‌های آماری مربوط به شهر مشهد مسئله‌ای برای نشان دادن قابلیت این روش در مقابل روش تحلیل واریانس حل شده است.

واژه‌های کلیدی: ایجاد سفر، مدل دسته‌بندی متقاطع چندگانه، تعدیل نرخ سفر، تحلیل واریانس، برنامه‌ریزی خطی فازی

### 1. مقدمه

استفاده از متغیرهای مستقل مؤثر در ایجاد سفر به دست می‌آید. در روش دیگر یعنی جداول دسته‌بندی متقاطع تعداد سفرهای روزانه تولید شده توسط هر خانوار به دست می‌آید و مبنای برآورد در آینده می‌شود. در این جدول، خانوارها با توجه به ویژگیهای مشترک دسته‌بندی شده‌اند. این جدول به صورت کلی، یا برای

در مدل‌های ایجاد سفر یک نوع ارتباط بین ویژگیهای اجتماعی- اقتصادی افراد و ویژگیهای کاربری زمین و سیستم حمل و نقل برآورد می‌شود. روش متداول در تهیه این مدلها، رگرسیون خطی است. با استفاده از روش رگرسیون خطی، یک رابطه ریاضی برای برآورد میزان سفر ایجاد شده در هر ناحیه با

تدوین مدل، نبود ملاک مشخصی برای نحوه انتخاب متغیرهای موجود در دسته‌بندی خانوارها و تشکیل جدول، اعتبار و اطمینان متفاوت نرخ‌های سفر به دلیل متفاوت بودن تعداد نمونه‌های آماری قابل دسترس برای هر خانه، نداشتن پشتوانه محکم علمی و ... از معایب این مدل به شمار می‌رود [2 و 4]. برای افزایش دقت مدل دسته‌بندی متقاطع، حالت چندگانه آن (معمولاً سه بعدی) مطرح است. در حالت سه بعدی، علاوه بر دو متغیر تعریفی در حالت دو بعدی، متغیر سومی که در فرآیند تولید سفر خانواده‌ها مؤثر است، در ساختار مدل وارد می‌شود. در این حالت، برای هر یک از محدوده‌های تعریفی متغیر سوم، جدول دسته‌بندی متقاطع دو بعدی تشکیل می‌شود. معمولاً متغیرهایی همچون درآمد، جمعیت، چگالی مسکونی و ... به عنوان متغیر سوم در نظر گرفته می‌شوند. نحوه استفاده از این متغیرها به این صورت است که خانوارهای موجود در یک ناحیه، منطقه یا کل شهر با توجه به محدوده‌های مختلف تعریفی برای هر یک از این متغیرها، تفکیک شده و سپس نرخ سفر تولید شده توسط هر خانوار براساس متغیرهای تعریفی مدل دسته‌بندی متقاطع، برای محدوده‌های موردنظر محاسبه می‌شود.

محدوده‌ها با مفاهیمی همچون پائین، متوسط و بالا تعریف می‌شوند و می‌توان آنها را با محدوده‌های عددی از هم تفکیک کرد. یادآوری می‌شود که متغیرهای مستقل مورد استفاده در تعریف این جداول براساس روش‌های آماری و با توجه به اهمیت آنها در فرآیند ایجاد سفر، انتخاب می‌شوند. در خصوص نحوه تهیه جدول دسته‌بندی متقاطع یادآوری می‌شود که ابتدا خانواده‌های موجود در منطقه براساس مجموعه‌ای از خصوصیات و ویژگی‌هایشان دسته‌بندی می‌شوند. معمولاً در تعریف دسته از ترکیب خصوصیات هم‌چون میزان مالکیت وسیله نقلیه، تعداد اعضای خانواده، میزان درآمد خانواده، محل و موقعیت زندگی خانواده استفاده می‌شود [2]. سپس آماربرداری با تماس تلفنی و مصاحبه با خانواده‌های از پیش مشخص شده، انجام می‌گیرد.

در این مصاحبه‌ها، خانواده‌های موردنظر به اطلاعات و سؤالات مشخص شده، پاسخ می‌دهند تا با توجه به آنها فعالیت‌های سفری هر یک از اعضای خانواده ثبت شود [3]. در ادامه میانگین تعداد سفرهای هر دسته از خانواده‌ها، با تقسیم کل تعداد سفرهای تولید شده در آن دسته، به تعداد خانواده‌های موجود در آن دسته به دست می‌آید و جدول اولیه نرخ سفر خانوارها تهیه می‌شود. در حالت سه بعدی مدل، این جداول برای هر یک از محدوده‌های

اهداف مختلف سفر تهیه می‌شود [1]. نرخ‌های سفر هر دسته از خانوارها در این جدول با استفاده از آماربرداری به دست می‌آید. گاهی مواقع مقادیر به دست آمده از آماربرداری الگوی سفر مورد انتظار از رفتار انسان را نشان نمی‌دهد، برای مثال، میزان نرخ سفر برای یک خانواده یک نفره بدون وسیله نقلیه باید بسیار کمتر از یک خانواده پنج نفره با دو وسیله نقلیه باشد که برخی مواقع اعداد به دست آمده از آماربرداری، این الگو را نشان نمی‌دهند. به دلیل تفاوت این مقادیر با الگوی سفر مناسب با رفتار انسان، فرآیند تعدیل مقادیر جدول مطرح می‌شود. این مقاله به این شکل سازماندهی شده است که ابتدا مدل دسته‌بندی متقاطع چندگانه معرفی شده و سپس مسئله مورد نظر تعریف و اصول پیشنهاد شده برای تعدیل مقادیر بعد از آماده شدن جدول اولیه نرخ سفر، توضیح داده شده است. در این روش از مفهوم بهینه‌سازی فازی برای محاسبه نرخ‌های سفر نزدیک به مقادیر اولیه به دست آمده از آماربرداری استفاده می‌شود. سپس کاربرد روش برای یک نمونه آماری از داده‌های مطالعات جامع حمل و نقل مشهد توضیح داده شده و نتایج بررسی شده است. در انتها نتیجه‌گیری و مراجع ارایه شده‌اند.

## 2. تعریف مدل دسته‌بندی متقاطع چندگانه

اولین استفاده‌ها از این مدل در انگلستان (در سال 1967 توسط Wootton و Pick تحت عنوان تحلیل گروهی)، و آمریکا (تحت عنوان مدل دسته‌بندی متقاطع) صورت گرفت [2]. در این مدل، خانوار به عنوان واحد اصلی فرآیند تولید سفر به شمار می‌آید و در آن فرض بر این است که سفرهای تولید شده توسط هر خانوار به مشخصات و موقعیت محلی آن خانوار نسبت به محل کار، محل خرید و تسهیلات دیگر بستگی دارد. در این مدل، سفرهای تولید شده به صورت تعداد متوسط سفرهای یک‌طرفه تولید شده به وسیله یک خانوار در یک روز عادی هفته اندازه‌گیری می‌شود [1 و 2]. سادگی مدل، تأثیر نپذیرفتن مدل از نوع ناحیه‌بندی منطقه مورد مطالعه، در نظر گرفته نشدن هیچ فرضی در مورد شکل روابط بین متغیرها و همچنین امکان متفاوت بودن روابط بین متغیرها در هر یک از دسته‌های خانوار، از جمله ویژگی‌های بیان شده در مورد این مدل است. نبود ملاک خوب آماری برای اعتبارسنجی مدل، نیاز به نمونه‌های آماری زیاد برای

خانواده با جمعیتی برابر 9755 نفر است. در جداول 1، 2، 3 نرخ سفر تولید شده توسط هر خانوار برای محدوده‌های تعریفی تراکم جمعیتی نشان داده شده است.

### 3. تعریف مسئله

با توجه به نوع جدول و ویژگی‌های در نظر گرفته شده در دسته‌بندی خانواده‌ها، یک الگوی سفر منطقی با توجه به تغییرات موجود در ویژگی‌های مورد نظر، انتظار می‌رود. برای مثال در جداول نرخ سفر اولیه انتظار می‌رود که مقادیر نرخ سفر با افزایش تعداد افراد خانواده و همچنین با افزایش میزان مالکیت وسیله نقلیه، در هر یک از محدوده‌های تعریفی متغیر تراکم جمعیتی به صورت متناسب افزایش یابد، که این اصل کلی در بعضی از مقادیر جداول دیده نمی‌شود. بعضی از خانه‌های جداول به دلیل نبود نمونه آماری، بدون مقدار هستند. همچنین یک روند افزایشی یا کاهشی متناسب بین مقادیر نرخ سفر خانه‌های یکسان در هر یک از محدوده‌های تعریفی متغیر تراکم جمعیتی دیده نمی‌شود. علاوه بر موارد فوق، به دلیل نبود تناسب کافی بین تعداد نمونه‌های آماری در هر دسته خانوار با نسبت واقعی خانواده‌های دسته مورد نظر در منطقه، دقت بعضی از مقادیر جداول، کافی به نظر نمی‌رسد. با توجه به این موارد، لزوم تعدیل مقادیر جدول مطرح می‌شود. فرآیند بهینه‌کردن مقادیر نرخ سفر جداول دسته‌بندی متقاطع معمولاً با استفاده از روش تحلیل واریانس انجام می‌شود، به این شکل که برای یک مدل سه بعدی، میانگین نرخ سفر کل نمونه آماری و همچنین میانگین نرخ سفر نمونه آماری و میانگین نرخ سفر هر یک از سطرها و ستونهای هر یک از جداول دسته‌بندی متقاطع مربوط به محدوده‌های تعریفی متغیر سوم محاسبه می‌شود. سپس انحراف میانگین سطرها و ستونهای هر یک از جداول از میانگین کل نمونه آماری محاسبه شده و بعد از آن با استفاده از مقادیر به دست آمده، نرخ سفر هر یک از خانه‌های جداول از حاصل جمع میانگین نمونه آماری جدول مورد نظر با انحراف میانگین سطر و ستون مربوط به آن خانه جدول به دست می‌آید [2 و 4]. این روش تا حدی می‌توانست بی‌نظمی‌ها و برخی از اشکالات مدل را حل کند، زیرا اساس این روش منطبق بر داده‌های آماری است و در آن به روابط بین مقادیر خانه‌های مجاور توجه نشده است، و نیز میانگین‌های مورد نظر با استفاده از نرخ‌های سفر مشاهده شده، به دست آمده‌اند (که در برخی موارد

تعریفی متغیر سوم، تهیه می‌شوند. برای نمونه مدل دسته‌بندی متقاطع سه بعدی با تعریف دو متغیر اصلی، تعداد اعضای خانواده و میزان مالکیت وسیله نقلیه هر خانوار و متغیر سوم «تراکم جمعیتی ناحیه محل سکونت خانواده‌ها» با توجه به نمونه آماری موجود برای شهر مشهد تهیه شد.

لازم به توضیح است که با استفاده از روشهای پردازش داده‌ای و بررسی شاخص  $R^2$  و آزمون  $t$  آماری معناداری و تأثیر متغیر سوم «تراکم جمعیتی ناحیه محل سکونت خانواده‌ها» تأیید شده بود. برای این متغیر، سه محدوده با مفاهیم تراکم جمعیتی کم، متوسط و زیاد تعریف شد. سپس برای هر تعریف مفهوم تراکم جمعیتی، محدوده‌های کمی مختلفی تعریف شده و برای هر یک از این محدوده‌ها، تعداد ناحیه‌ها، جمعیت و مساحت ناحیه و درصد آن از کل، محاسبه شد. سپس با در نظر گرفتن ملاکهای همچون درصد جمعیت و درصد مساحت هر یک از محدوده‌ها و همچنین هماهنگی بین تعداد نواحی موجود در هر محدوده، محدوده‌های تراکمی برای هر یک از تعاریف تراکم جمعیتی به صورت زیر پیشنهاد و مبنای استفاده قرار گرفت [6]:

الف- محدوده با تراکم جمعیتی بین 0 تا 50 نفر بر هکتار به عنوان نواحی با تراکم جمعیتی کم،  
ب- محدوده با تراکم جمعیتی بین 50 تا 150 نفر بر هکتار به عنوان نواحی با تراکم جمعیتی متوسط،  
پ- محدوده با تراکم جمعیتی بیشتر از 150 نفر بر هکتار به عنوان نواحی با تراکم جمعیتی زیاد.

بعد از تعریف هر یک از محدوده‌ها، آمار موجود با توجه به محدوده‌های تعریفی در سه دسته تفکیک شدند، سپس برای هر دسته، جدول نرخ سفر تولید شده توسط هر خانوار براساس دو متغیر «تعداد اعضای خانواده» و «میزان مالکیت وسیله نقلیه به ازای هر خانوار» تشکیل شد (با توجه به داده‌های آماری در دسترس و براساس اصول علمی مطرح در خصوص تعداد دسته‌های خانوار) [2]، برای متغیر «میزان مالکیت وسیله نقلیه به ازای هر خانوار» 3 سطح (بدون وسیله، یک وسیله، دو وسیله یا بیشتر) و برای متغیر «تعداد اعضای خانواده» 7 سطح (خانواده‌های یک نفره، دو نفره، سه نفره، چهار نفره، پنج نفره، شش نفره و هفت نفره یا بیشتر) در نظر گرفته شد. نمونه آماری مورد استفاده برای محدوده تراکم جمعیتی کم شامل 812 خانواده با جمعیتی برابر 4151 نفر، برای محدوده تراکم جمعیتی متوسط شامل 1984 خانواده با جمعیتی برابر 9658 نفر و برای محدوده تراکم جمعیتی زیاد شامل 1911

## رصفای و رضایی

اگرچه

خانه‌های جدول نسبت به خانه‌های مجاور، به خصوص بین هر یک از محدوده‌های تراکم جمعیتی، برآورده نشده است. همچنین یادآوری می‌شود که تعداد کل سفرهای به دست آمده از مقادیر تعدیل شده جدول با این روش برای هر دسته از خانوارها مساوی یا نزدیک به تعداد سفرهای واقعی مشاهده شده برای همان دسته از خانوار نبوده و تفاوت زیادی دارد [6].

اعتبار این نرخ‌های سفر تأیید نشده است). پس از اعمال روش تا حدودی مدل بهبود می‌یافت، اما باز هم مدل موردنظر در انطباق با واقعیت دارای محدودیت‌ها و نواقصی بود. در جدول 4، 5 و 6 مقادیر نرخ سفر تعدیل شده با استفاده از روش تحلیل واریانس نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، مقادیر نرخ سفر تعدیل یافته با استفاده از روش تحلیل واریانس، به مقادیر به دست آمده از آماربرداری نزدیک نبوده و همچنین الگوی مورد انتظار یعنی افزایش یا کاهش هر یک از

جدول 1. نرخ سفر اولیه برای محدوده تراکم جمعیتی کم

تعداد اعضای خانواده	تعداد وسایل نقلیه به ازای هر خانوار		
	0	1	2+
1	1/78	1	-
2	4/55	5/26	-
3	5/14	6/69	9/50
4	6/25	7/94	8/06
5	6/64	8/14	9/75
6	7/5	8/64	9/24
7+	7/66	9/50	12/23

جدول 2. نرخ سفر اولیه برای محدوده تراکم جمعیتی متوسط

تعداد اعضای خانواده	تعداد وسایل نقلیه به ازای هر خانوار		
	0	1	2+
1	1/67	--	-
2	4/33	5/63	-
3	4/69	5/00	-
4	5/56	6/69	10/67
5	6/02	7/48	7/57
6	7/30	9/03	9/86
7+	7/00	7/89	10/69

جدول 3. نرخ سفر اولیه برای محدوده تراکم جمعیتی زیاد

تعداد اعضای خانواده	تعداد وسایل نقلیه به ازای هر خانوار		
	0	1	2+
1	2/27	-	-
2	4/50	4/48	7/00
3	4/93	5/63	5/33
4	6/03	7/38	7/2
5	6/03	7/56	11/27
6	6/84	8/72	9/00

استفاده از بهینه‌سازی فازی در تعدیل مقادیر نرخ‌های سفر جداول ...

7+	6/97	9/08	12/68
----	------	------	-------

جدول 4. نرخ سفر تعدیل شده با روش تحلیل واریانس برای محدوده تراکم جمعیتی کم

تعداد اعضای خانواده	تعداد وسایل نقلیه به ازای هر خانوار		
	0	1	2+
1	0/5	2/07	4/41
2	3/34	4/91	7/25
3	4/55	5/12	7/46
4	4/80	6/37	8/71
5	5/29	6/86	9/20
6	6/68	8/25	10/59
7+	6/54	8/11	10/45

جدول 5. نرخ سفر تعدیل شده با روش تحلیل واریانس برای محدوده تراکم جمعیتی متوسط

تعداد اعضای خانواده	تعداد وسایل نقلیه به ازای هر خانوار		
	0	1	2+
1	1/39	3/35	5/18
2	4/31	6/27	8/10
3	5/13	7/09	8/92
4	3/36	8/32	10/15
5	7/04	9/00	10/83
6	7/69	6/65	11/48
7+	8/32	10/28	12/11

جدول 6. نرخ سفر تعدیل شده با روش تحلیل واریانس برای محدوده تراکم جمعیتی زیاد

تعداد اعضای خانواده	تعداد وسایل نقلیه به ازای هر خانوار		
	0	1	2+
1	1/26	3/35	5/99
2	3/50	5/59	8/23
3	4/07	6/16	8/80
4	5/37	7/46	10/10
5	5/77	7/86	10/50
6	6/66	8/75	11/39
7+	7/34	9/43	12/07

### 3-1 اصول روش پیشنهادی

در روش بهینه‌سازی فازی، مقادیر نرخ سفر جداول با استفاده از روابط و محدودیت‌هایی تصحیح می‌شوند که این روابط و محدودیت‌ها، همان انتظارات از نرخ‌های سفر است. این کار توسط روش برنامه‌ریزی خطی انجام می‌گیرد. مسئله تعدیل با این روش با توجه به شرایط زیر شکل داده می‌شود [5]:

شرط اول: مقادیر تعدیل یافته، باید به مقادیر به دست آمده از آماربرداری نزدیک باشند.

شرط دوم: مقادیر تعدیل یافته باید الگوی مورد انتظار را در خصوص روند کلی بین داده‌های جدول برآورده کند. این شرط شامل دو قسمت است، یعنی بایستی الگوی مورد انتظار در خصوص روابط بین خانه‌های جداول در هر یک از محدوده‌های تعریفی متغیر سوم و همچنین برای هر یک از خانه‌های یکسان محدوده‌های تعریفی متغیر سوم تأمین شود.

شرط سوم: تعداد کل سفرهای به دست آمده از مقادیر تعدیل شده جدول برای همه دسته‌ها (i,j) خانوارها، بایستی مساوی یا نزدیک به تعداد سفرهای واقعی مشاهده شده برای همان دسته از خانوار باشد.

برای تعریف و شکل‌دهی ساختار مسئله، پارامترهای مسئله به صورت زیر معرفی و تعریف می‌شود [5]:

$A_{ij}$  = مجموعه فازی «نزدیک به مقدار  $a_{ij}$ » که در آن مقدار  $a_{ij}$  مقدار نرخ سفر به دست آمده از آماربرداری است.

$X_{ij}$  = نرخ سفر تعدیل شده (مجهول مسئله).

$R_k$  = مجموعه‌ی روابط فازی که نشان دهنده روابط بین مقادیر انتخاب شده  $X_{ij}$  ها است.

$F_{A_{ij}}(x_{ij})$  = درجه عضویتی که در آن  $x_{ij}$ ، حالت نزدیک بودن به مقدار مشاهده شده  $a_{ij}$  را برآورده می‌کند.

$F_{R_k}(x_{ij})$  = درجه عضویتی که در آن مجموعه مقادیر انتخاب شده  $x_{ij}$ ، رابطه فازی  $R_k$  را برآورده می‌کند.

$n_{ij}$  = تعداد خانواده‌های دسته  $(i,j)$ ، یا خانه  $(i,j)$ .

$t_{ij}$  = تعداد سفرهای مشاهده شده برای دسته  $(i,j)$  در آماربرداری.

با عنایت به تعاریف فوق مدل بهینه‌سازی فازی به صورت زیر فرمول‌بندی می‌شود:

تابع هدف

Maximize F

با محدودیت‌های زیر:

(1) تابع عضویت  $A_{ij}$  باید به مقادیر  $a_{ij}$  نزدیک باشد:

$$F_{A_{ij}}(x_{ij}) \geq F \quad (1) \quad \text{برای همه } (i,j) \text{ ها}$$

(2) برای نشان دادن شرط دوم با روابط فازی، رابطه بین مقادیر همسایه  $(X_{i,j} - X_{i-1,j})$  و همچنین رابطه بین خانه‌های یکسان در محدوده‌های تعریفی متغیر سوم به صورت ساده و براساس یک مفهوم زبانی مانند «تا اندازه‌ای بزرگ‌تر» یا «زیاد بزرگ‌تر» تعریف می‌شود. این مورد با استفاده از توابع عضویت برای مجموعه فازی موردنظر به صورت زیر قابل فرمول‌بندی است:

$$F \text{ «زیاد بزرگ‌تر»} \quad \text{یا} \quad F \text{ «تا اندازه‌ای بزرگ‌تر»} \\ (X_{i,j} - X_{i-1,j}) \geq F \quad (3)$$

(3) برای تأمین شرط تعادل تعداد سفرهای مشاهده شده و تخمین زده شده برای دسته‌های خاص خانواده، باید رابطه زیر برای خانه‌های  $(i,j)$  برآورده شود:

$$X_{ij} * n_{ij} \approx t_{ij} \quad (3)$$

که می‌توان آن را به صورت فرم محدودیت فازی زیر استفاده کرد:

مسئله بهینه‌سازی بالا باید برای  $F$  و  $X_{ij}$  هر یک از جداول حل شود. به علت خطی فرض شدن توابع عضویت (مثلی شکل)، مسئله به صورت مسئله برنامه‌ریزی خطی در می‌آید. مقدار به دست آمده  $F$ ، حداقل درجه عضویت بین مجموعه‌های فازی تعریف شده برای برآورده کردن  $X_{ij}$  است. بنابراین بیشینه کردن مقدار  $F$  به معنی تعدیل مقادیر جدول به مقادیر مشاهده شده است، به طوری که محدودیت‌های موردنظر را برآورده کند. اگر مسئله قابل حل نباشد، در این صورت جواب در بین محدوده تعریف شده توسط توابع عضویت قرار ندارد. بنابراین برای رسیدن به جواب باید گستره توابع عضویت افزایش یابد.

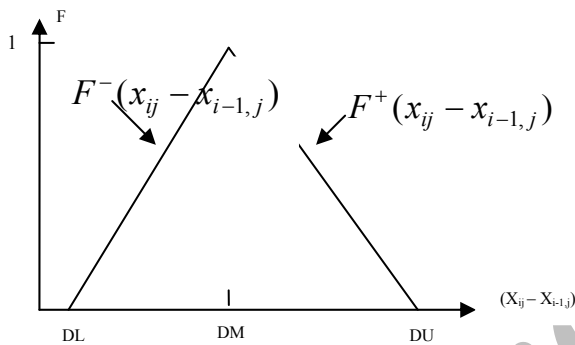
### 3-2 گام‌های محاسباتی

گام 1) ساخت تابع عضویت برای شرط نزدیکی مقادیر تعدیل یافته به مقادیر مشاهده شده:

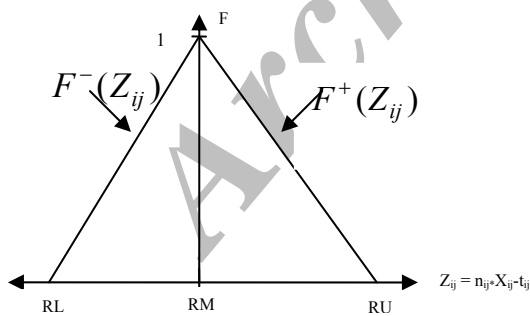
در شکل شماره 1 تابع عضویت مربوط به این شرط با مقدار میانی  $a_{ij}$  و محدوده بین  $L_{ij}$  به عنوان حد پائین و  $U_{ij}$  به عنوان حد بالا، نشان داده شده است. تابع عضویت مثلی به عنوان شرط اولیه لازم نیست، بلکه در صورت نبود اطلاعات کافی، این تابع یک فرض منطقی است و در اغلب مسایل بهینه‌سازی استفاده می‌شود

$X_{ij}$  و  $X_{i-1,j}$  و همچنین الگوی روند تغییرات خانه‌های یکسان در محدوده‌های تعریفی متغیر سوم تعریف می‌شود.  
گام 3) ساخت تابع عضویت برای شرط نزدیکی تعداد سفرهای مشاهده شده و برآورد شده:

این شرط نشان‌دهنده نزدیک بودن تفاوت بین  $t_{ij}$  و  $(n_{ij} * X_{ij})$  است. به عبارت دیگر درجه عضویت بیشینه مقدار تفاوت بین این دو  $(Z_{ij} = [(n_{ij} * X_{ij}) - t_{ij}])$  باید نزدیک صفر باشد. این شرط باید برای همه جفت‌های  $(i,j)$  یا مجموعه انتخابی از زوج‌های  $(i,j)$  امتحان شود. شکل شماره 3 تابع عضویت مجموعه فازی تفاوت مجاز بین تعداد سفر تخمین زده شده با تعداد سفر واقعی را نشان می‌دهد، مقدار میانی مثلث (RM) برابر صفر است و حد پایین و بالا به ترتیب RL و RU است.



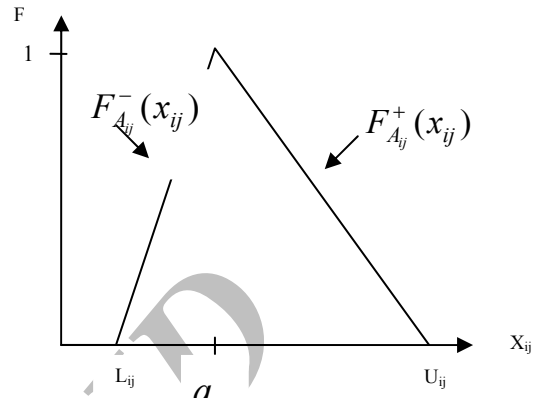
شکل 2. تابع عضویت مثلثی برای شرط وجود الگوی مورد انتظار در بین داده‌های جدول



شکل 3. تابع عضویت شرط نزدیکی تعداد سفرهای مشاهده شده و برآورد شده

گام 4) حل مسئله بهینه‌سازی مدل بهینه‌سازی با هدف بیشینه کردن مقدار F و برآورده شدن محدودیت‌های تعریف شده در بالا باید فرمول‌بندی شود. این

که در آن  $a_{ij}$  نرخ سفر مشاهده شده یا عددی نزدیک آن بنا به نظر متخصص، و مقادیر  $L_{ij}$  و  $U_{ij}$  کمینه و بیشینه نرخ سفر مشاهده شده برای آن دسته از خانواده است.



شکل 1. تابع عضویت شرط نزدیکی مقادیر تعدیل یافته به مقادیر مشاهده شده

گام 2) ساخت تابع عضویت برای شرط وجود الگوی مورد انتظار در بین داده‌های جداول:

این شرط الگوی مورد انتظار مقادیر را در جدول نشان می‌دهد. به عنوان مثال با فرض تعداد اعضای خانواده و میزان مالکیت وسیله نقلیه به عنوان متغیر، انتظار می‌رود که مقادیر نرخ‌های سفر با افزایش مقدار هر یک از این متغیرها افزایش یابند. همچنین تغییرات معنادار مقادیر نرخ سفر خانه‌های یکسان در هر یک از محدوده‌های تعریفی متغیر سوم نیز انتظار می‌رود. تعیین میزان این افزایش و مقدار آن در جهت‌های مختلف به نظر متخصص مورد نظر بستگی دارد. با توجه به این موضوع، تابع عضویت برای این شرط با مفهوم «تا اندازه‌ای بزرگ‌تر از صفر» یا «بسیار بزرگ‌تر از صفر» تعریف می‌شود. این تابع نشان‌دهنده مطلوب بودن تفاوت نسبی بین دو خانه تعدیل یافته نزدیک به هم یا یکسان در جداول مختلف است. در شکل شماره 2، تابع عضویت مربوط به این شرط نشان داده شده است.

در این شکل مقدار میانی (DM)، میزان تفاوت بسیار منطقی بین دو مقدار است و مقدار حد پائین (DL)، به عنوان کمینه میزان تفاوت قابل قبول و مقدار حد بالا (DU)، به عنوان بیشینه میزان تفاوت قابل قبول است. تابع عضویت برای نمایش الگوی افزایشی مقادیر در جهت افقی (بین  $X_{ij}$  و  $X_{i-1,j}$ ) و در جهت عمودی (بین

نواحی با تراکم جمعیتی متوسط، تابع عضویت مربوط به روند افزایش ستونی با مقادیر  $DU=2/81$ ،  $DM=1/48$  و  $DL=0$  و تابع عضویت مربوط به روند افزایش سطری با مقادیر  $DU=2/99$ ،  $DM=1/14$  و  $DL=0/16$  و برای نواحی با تراکم جمعیتی زیاد، تابع عضویت مربوط به روند افزایش ستونی با مقادیر  $DU=3/71$ ،  $DM=1/96$  و  $DL=0$  و تابع عضویت مربوط به روند افزایش سطری با مقادیر  $DU=4/07$ ،  $DM=1/35$  و  $DL=0$  تشکیل شد. الگوی تغییرات نرخ سفر بین نواحی محدوده تراکم جمعیتی کم با نواحی محدوده تراکم جمعیتی متوسط، روند افزایشی داشته و برای آن  $DU=2/18$ ،  $DM=0/91$  و  $DL=0/11$  است. الگوی تغییرات نرخ سفر بین نواحی محدوده تراکم جمعیتی پایین با نواحی محدوده تراکم جمعیتی بالا، روند افزایشی داشته و برای آن  $DU=3/70$ ،  $DM=0/89$  و  $DL=0/01$  است. الگوی تغییرات نرخ سفر بین نواحی محدوده تراکم جمعیتی متوسط با نواحی محدوده تراکم جمعیتی زیاد، روند کاهشی داشته و برای آن  $DU=-4/17$ ،  $DM=-0/79$  و  $DL=-0/05$  است.

– برای شرط سوم مقدار  $RM=0$  در نظر گرفته شد. تعیین مقدار  $RU$  و  $RL$ ، به دقت کار آماربرداری و یکنواختی نمونه آماری و همچنین به قضاوت متخصص از اعداد جدول بستگی دارد. هر قدر جدول نرخ سفر اولیه با دقت بیشتر تهیه شده باشد، در این صورت این مقادیر را می توان کمتر فرض کرد. با توجه به تأثیر زیاد این شرط در جواب حاصله، مقدار  $RU$  و  $RL$  به عنوان بیشینه مقدار خطای قابل قبول، برابر 5 درصد میزان سفر تولید شده در هر دسته در نظر گرفته شد.

#### 4. تعدیل نرخ های سفر اولیه

با استفاده از توابع عضویت تعریف شده در بالا، برای هر دسته از خانوارها در هر یک از جداول، روابط بین مقادیر  $X_{ij}$  و  $F_{ij}$  برای هر یک از شرایط مسئله محاسبه و مدل برنامه ریزی خطی تشکیل می شود. برای نمونه، مدل برنامه ریزی خطی ساده شده برای خانواده سه نفره با مالکیت یک وسیله نقلیه برای محدوده تراکم جمعیتی متوسط به صورت زیر است.

Maximize F

Subject to

$$1) X_{32} + 10.31 F_{32} \leq 17$$

مسئله، یک مسئله برنامه ریزی خطی استاندارد بوده و با استفاده از بسته های نرم افزاری برنامه ریزی خطی حل می شود. با توجه به موارد بیان شده، فرآیند بهینه سازی جداول اولیه نرخ سفر با ساخت توابع عضویت مربوط به شرایط تعریفی در بالا به شرح زیر، انجام می گیرد:

– تابع عضویت شرط نزدیکی مقادیر تعدیل یافته به مقادیر مشاهده شده با فرض  $a_{ij}$  برابر نرخ سفر به دست آمده از آماربرداری و  $I_{ij}$  و  $U_{ij}$  به ترتیب کمینه و بیشینه نرخ سفر مشاهده شده در آن دسته از خانواده برای هر یک از خانه های جداول تشکیل می شود. برای خانه های بدون مقدار و همچنین خانه های با نمونه آماری برابر یک، از تابع عضویت خانه سمت چپ آن استفاده شده است.

– شرط دوم الگوی مورد انتظار در خصوص روند کلی بین داده های جدول را بیان می کند. این الگو در خصوص روابط بین خانه های جداول در هر یک از محدوده های تعریفی متغیر سوم الگوی افزایشی است. به دلیل نقش مهم وسیله نقلیه در ایجاد سفر در کشورمان، الگوی افزایشی بین مقادیر سطری و ستونی جداول جداگانه در نظر گرفته شد (علت آن بیشتر بودن میزان افزایش نرخ سفر با افزایش میزان مالکیت وسیله نقلیه نسبت به افزایش تعداد اعضای خانواده است). در خصوص روند تغییرات نرخ سفر تولید شده توسط خانوار در اثر تغییرات تراکم جمعیتی ناحیه الگوی زیر نتیجه گیری شد [6]:

– نرخ سفر تولید شده توسط خانواده های موجود در نواحی با تراکم جمعیتی متوسط از خانواده های موجود در نواحی با تراکم جمعیتی کم و زیاد بیشتر است.

– نرخ سفر تولید شده توسط خانواده های موجود در نواحی با تراکم جمعیتی زیاد از خانواده های موجود در نواحی با تراکم جمعیتی کم بیشتر است.

برای به دست آوردن پارامترهای تعریف شده در ساختار تابع عضویت، مقدار تفاوت بین خانه های مجاور سطری و ستونی و خانه های یکسان در جداول مختلف جداگانه به دست آمدند (در این مورد خانه هایی که مقدار نرخ سفر اولیه آنها غیرطبیعی بود، در نظر گرفته نشدند). سپس مقادیر منفی از این مجموعه حذف شد. در نهایت برای نواحی با تراکم جمعیتی کم، تابع عضویت مربوط به روند افزایش ستونی با مقادیر  $DU=3/98$ ،  $DM=1/45$  و  $DL=0$  و تابع عضویت مربوط به روند افزایش سطری با مقادیر  $DU=2/29$ ،  $DM=1/28$  و  $DL=0/36$ ، برای



$$4) X_{32} - 1.48F_{32} \geq 5.33$$

$$5) X_{32} + 1.15 F_{32} \leq 8.39$$

قابل قبول است. بنابراین ملاحظه می‌شود که این روش می‌تواند به صورت ساده و منطقی نرخ‌های تولید سفر مربوط به هر دسته از خانوار را تعدیل کند. برای مقایسه و همچنین نشان دادن قدرت و اعتبار روش تعدیل فازی در مقابل روش تحلیل واریانس، علاوه بر موارد قبلی یاد شده در قسمت تعریف مسئله، می‌توان به ضریب برازش خطی ( $R^2$ ) بین مقادیر نرخ سفر تعدیل شده با روش بهینه‌سازی فازی و روش تحلیل واریانس با مقادیر نرخ سفر اولیه، که به ترتیب برای محدوده تراکم جمعیتی کم برابر 0/87 و 0/91، برای محدوده تراکم جمعیتی متوسط برابر 0/91 و 0/90، برای محدوده تراکم جمعیتی زیاد 0/94 و 0/78 است، اشاره کرد. دلایل یاد شده نشان‌دهنده بهتر بودن روش بهینه‌سازی فازی در برابر روش تحلیل واریانس برای حالت سه بعدی مدل دسته‌بندی متقاطع است [6].

## 6. سپاسگزاری

از دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره) به دلیل حمایت از این مطالعه، و نیز از مرکز مطالعات و تحقیقات حمل و نقل دانشگاه صنعتی شریف برای در اختیار گذاشتن آمار مربوط به این تحقیق، نهایت سپاس را داریم.

$$2) X_{32} - 4.69 F_{32} \geq 2$$

$$3) X_{32} + 1.33 F_{32} \leq 8.14$$

$$6) X_{32} - 0.98 F_{32} \geq 5.56$$

$$7) X_{32} + 1.27 F_{32} \leq 7.36$$

$$8) X_{32} - 0.8 F_{32} \geq 5.29$$

$$9) X_{32} + 3.38 F_{32} \leq 9.98$$

$$10) X_{32} - 0.74 F_{32} \geq 5.86$$

$$11) 45 X_{32} + 15.05F_{32} \leq 316.05$$

$$12) 45 X_{32} - 15.05F_{32} \geq 285.95$$

مدل برنامه‌ریزی خطی فوق با استفاده از نرم افزار Lindo حل شده، و برای هر دسته از خانوار مقادیر بهینه  $X$  و  $F$  به دست می‌آید. در جداول 7، 8 و 9 نرخ سفر تعدیل شده نشان داده شده است.

## 5. نتیجه‌گیری

در جداول 10، 11 و 12، تعداد سفر تولید شده توسط خانوارها در روز تعدیل، قبل و بعد از آن برای هر یک از محدوده‌های تراکم جمعیتی نشان داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، تفاوت بین میزان سفر آماربرداری شده و میزان سفر تخمین زده شده با استفاده از جدول دسته‌بندی متقاطع تعدیل شده، بسیار کم است. مقایسه تعداد کل سفرهای مشاهده شده، برای محدوده با تراکم جمعیتی کم (5284)، با تعداد کل سفرهای تخمین زده شده برای این محدوده (5488)، تفاوتی حدود 3/86 درصد را نشان می‌دهد، این تفاوت برای محدوده‌های با تراکم جمعیتی متوسط و زیاد به ترتیب برابر 3/98 درصد و 6/45 درصد است که

جدول 7. نرخ سفر تعدیل شده برای محدوده تراکم جمعیتی پایین

تعداد اعضای خانواده	تعداد وسایل نقلیه به ازای هر خانوار		
	0	1	2 <sup>+</sup>
1	1/67	1/94	1/99
2	3/91	4/20	4/25
3	4/79	5/18	5/98
4	5/68	6/74	8/20
5	6/25	7/64	8/63
6	7/37	8/99	10/01
7 <sup>+</sup>	7/79	9/39	10/91

جدول 8. نرخ سفر تعدیل شده برای محدوده تراکم جمعیتی متوسط

تعداد اعضای خانواده	تعداد وسایل نقلیه به ازای هر خانوار		
	0	1	2+
1	2/36	3/72	4/15
2	4/73	5/40	6/21
3	5/33	6/56	8/12
4	6/46	8/05	8/41
5	6/88	8/44	10/91
6	7/75	9/16	11/08
7+	8/00	9/81	12/48

جدول 9. نرخ سفر تعدیل شده برای محدوده تراکم جمعیتی زیاد

تعداد اعضای خانواده	تعداد وسایل نقلیه به ازای هر خانوار		
	0	1	2+
1	2/30	3/43	4/09
2	4/52	4/69	6/03
3	5/09	5/81	6/06
4	6/17	7/50	8/24
5	6/32	7/85	10/91
6	7/38	9/11	10/94
7+	7/80	9/49	12/35

جدول 10. تعداد سفر مشاهده شده و برآورد شده برای محدوده تراکم جمعیتی کم

تعداد اعضای خانواده	تعداد وسایل نقلیه به ازای هر خانوار								
	0			1			2+		
	مشاهده	برآورد	خطا(%)	مشاهده	برآورد	خطا(%)	مشاهده	برآورد	خطا(%)
1	10	10	0	-	-	-	-	-	-
2	212	192	9/4	45	34	24/4	-	-	-
3	361	369	2/2	50	52	4	-	-	-
4	634	648	2/2	301	303	0/6	32	25	12/9
5	794	825	3/9	374	382	2/1	53	60	13/2
6	774	781	1	334	333	0/3	69	70	1/4

استفاده از بهینه‌سازی فازی در تعدیل مقادیر نرخ‌های سفر جداول ...

7+	581	647	11/4	489	582	19	171	175	2.3
----	-----	-----	------	-----	-----	----	-----	-----	-----

Archive of SID

جدول 11. تعداد سفر مشاهده شده و برآورد شده برای محدوده‌ی با تراکم جمعیتی متوسط

تعداد اعضای خانواده	تعداد وسایل نقلیه به ازای هر خانوار								
	0			1			2+		
	مشاهده	برآورد	خطا(%)	مشاهده	برآورد	خطا(%)	مشاهده	برآورد	خطا(%)
1	32	42	31/2	1	4	-	-	-	-
2	737	766	3/9	163	167	2/5	-	-	-
3	1075	1114	3/6	301	295	2	38	32	15/8
4	1980	2048	3/4	786	797	1/4	145	151	4.1
5	1467	1520	3/6	1204	1249	3/7	234	262	12
6	1387	1434	3/4	1020	1081	6	231	277	20
7+	1577	1648	4/5	1169	1207	3/3	367	374	1/9

جدول 12. تعداد سفر مشاهده شده و برآورد شده برای محدوده‌ی با تراکم جمعیتی زیاد

تعداد اعضای خانواده	تعداد وسایل نقلیه به ازای هر خانوار								
	0			1			2+		
	مشاهده	برآورد	خطا(%)	مشاهده	برآورد	خطا(%)	مشاهده	برآورد	خطا(%)
1	68	69	1/5	-	-	-	-	-	-
2	657	660	0/5	127	167	31/5	7	6	14/3
3	985	1018	3/4	321	331	3/1	16	18	12/5
4	1368	1401	2/4	539	548	1/7	72	82	13/9
5	1309	1520	16/1	930	966	3/9	169	164	3
6	1238	1336	7/9	1003	1048	4/5	189	230	21/7
7+	1561	1747	11/9	1852	1936	4/5	469	457	2/6

## 7. منابع

1. سید حسینی، م. (1380) "برنامه‌ریزی مهندسی حمل و نقل و تحلیل جابجایی مواد"، تهران: دانشگاه علم و صنعت ایران.
2. Ortúzar, J. D.D., Willumsen, L.G. (1998) "Modelling transport", Second Edition, London: John Wiley and Sons Ltd.
3. پژوهشکده حمل و نقل و مرکز مطالعات و تحقیقات حمل و نقل، دانشگاه صنعتی شریف (1379) "مطالعات جامع حمل و نقل شیراز، مدل‌های تولید و جذب سفر"، تهران: دانشگاه صنعتی شریف.
4. Stopher, P.R. and McDonald, K.G., "Trip generation by cross – classification: an alternative methodology", TRR 944.[n.d.]
5. Kikuchi, Sh., Rhee, J. "Adjustment of trip rates in the cross – classification table using fuzzy optimization method", TRB2003, Annual Meeting.
6. رضائی، ر. (1384) "بکارگیری منطق فازی در مدل‌های ایجاد سفر"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، مهندسی عمران، گرایش مهندسی و برنامه‌ریزی حمل و نقل، قزوین "دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره).