

## کاربرد آنالیز هزینه - فایده در انتخاب سیستم حمل و نقل عمومی مناسب برای یک کریدور شهری

تاریخ دریافت: ۱۳۸۴/۳/۱۶

تاریخ پذیرش: ۱۳۸۴/۹/۲۰

دکتر محمود صفارزاده<sup>۱</sup>

علی ملک زاده فر<sup>۲</sup>

### چکیده

امروزه حمل و نقل و ترافیک یکی از بزرگترین مشکلات جوامع انسانی بخصوص در شهرهای بزرگ می باشد. برای حل این مشکل و تبعات ناشی از آن، بیشتر مدیران و مسئولان شهری به استفاده از سیستم های حمل و نقل عمومی روی آورده اند. این سیستم ها دارای اشکال بسیار متنوعی هستند و در این بین مسأله انتخاب مناسبترین سیستم برای هر کریدور شهری همواره مطرح بوده است.

در این تحقیق، با محاسبه هزینه ها و منافع سالیانه ناشی از احداث سیستم های مختلف در یک کریدور شهری، به معرفی روش نسبت منافع به هزینه ها جهت انتخاب مناسبترین سیستم از دید اقتصادی پرداخته شده است. هزینه ها شامل هزینه های ساخت، راه اندازی و بهره برداری از سیستم و منافع شامل صرفه جویی در زمان سفر استفاده کنندگان و غیراستفاده کنندگان از حمل و نقل عمومی و صرفه جویی در هزینه، روش های دیگر حمل و نقل می باشند. در این تحقیق علاوه بر ارائه متدولوژی، به مطالعه موردی بر روی یکی از کریدورهای شهر تهران پرداخته شده است. همچنین به منظور مشاهده اثر برخی از پارامترهای به کار رفته در ارزیابی اقتصادی، آنالیز حساسیت بر روی این پارامترها صورت گرفته است.

**کلید واژه:** حمل و نقل عمومی، انتخاب سیستم، ارزیابی اقتصادی، کریدور، آنالیز حساسیت.

۱. دانشیار، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

saffar\_m@modares.ac.ir  
a.malekzadehfar@Jmail.com

۲. کارشناس ارشد، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

## ۱- مقدمه

افزایش جمعیت در شهرهای بزرگ کشور و گسترش بی رویه شهرها بدون برنامه ریزی صحیح، چیدمان اتفاقی مراکز تولید و جذب سفر و عدم وجود فن آوری ارتباطی جایگزین، سبب ایجاد سفرهای شهری زیاد به ویژه با وسایل نقلیه شخصی شده است. این مسأله اثرات سوئی نظیر اتلاف وقت شهروندان، افزایش تصادفات، مشکلات روانی و عدم بهره‌وری مردم و خسارتهای جبران ناپذیری مانند آلودگی محیط زیست و مصرف بی رویه سوختهای فسیلی را به همراه دارد. برای حل مشکلات فوق، سیستم‌های حمل و نقل عمومی که قادر به جابجایی حجم انبوه مسافران بویژه در ساعات اوج می‌باشند راه حل مناسبی به نظر می‌رسند.

این سیستم‌ها به دلیل ظرفیت بالا، از لحاظ میزان مصرف انرژی، سطح اشغال معابر و ایجاد آلودگیهای زیست محیطی برحسب سرانه سفرهای انجام شده نسبت به وسایل نقلیه شخصی ارجحیت دارند. در طول سالهای اخیر اشکال بسیار متنوعی از اینگونه سیستم‌ها در جهان ساخته شده است که هر یک ویژگی‌ها و آثار فیزیکی، اجتماعی و اقتصادی خاص خود را دارند. اما سؤالی که همواره و از ابتدای توسعه سیستم‌ها مطرح بوده این است که کدامیک از این سیستم‌ها مناسب تر و کارا تر می‌باشند؟

این مورد توسط کارشناسان حمل و نقل در جهان نتیجه گیری‌های کاملاً متفاوتی به عمل آمده است اما بدیهی است که انتخاب هر سیستم حمل و نقل باید با توجه به امکانات، شرایط و محدودیت‌های محلی صورت گیرد. برای این امر ابتدا باید سیستم‌های قابل اجرا شناسایی شوند و پس از آن جنبه‌های مختلف فنی، اقتصادی، اجتماعی و زیست محیطی مورد ارزیابی قرار گیرند تا مناسب ترین سیستم برای هر شرایط مشخص شود. در این تحقیق به جهت اهمیت زیاد معیار اقتصادی، گزینه‌های مختلف بر اساس این دیدگاه مورد مقایسه و ارزیابی قرار گرفته‌اند.

## ۲- ارزیابی اقتصادی پروژه‌های حمل و نقلی و روشهای آن

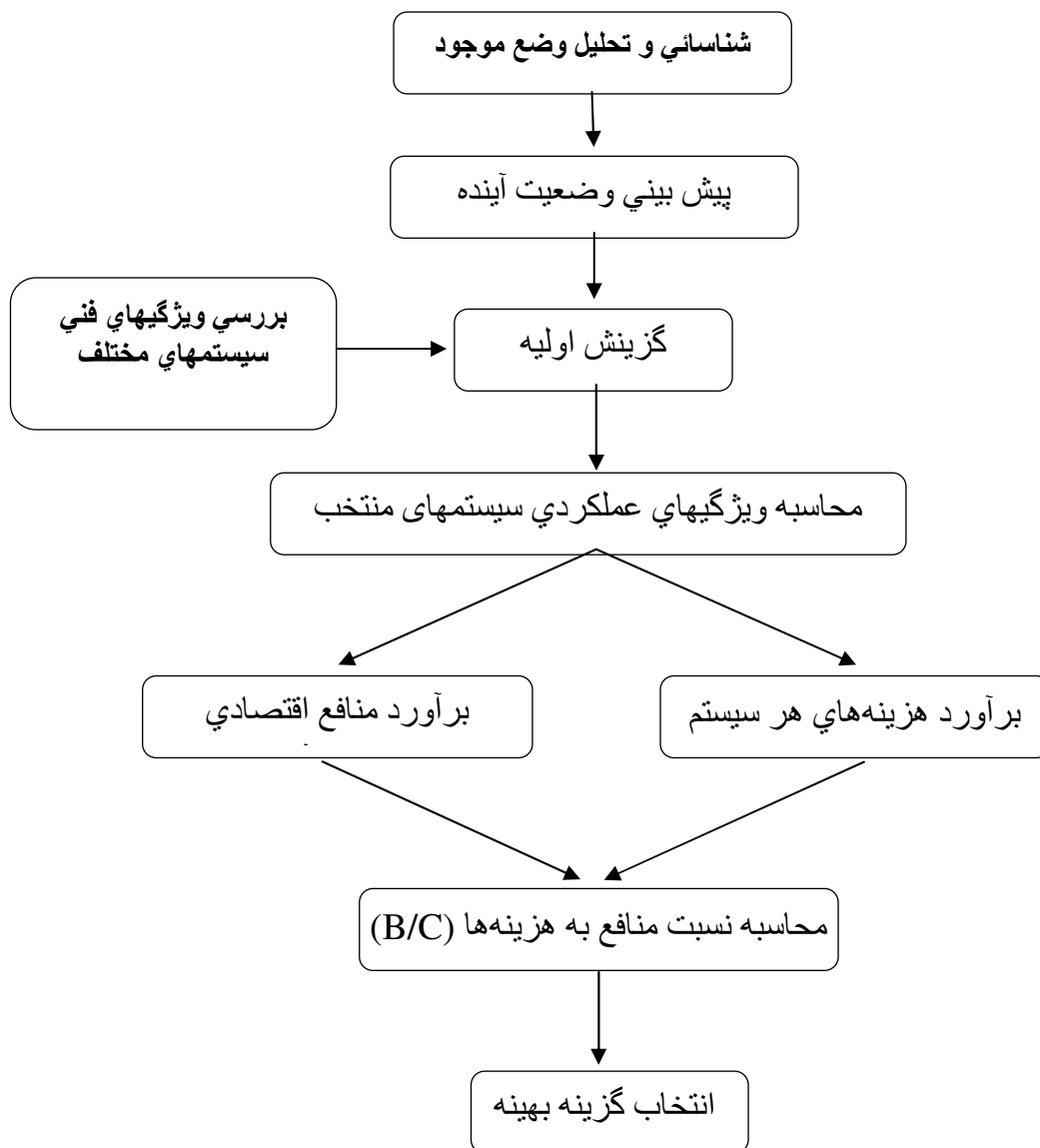
ارزیابی اقتصادی ترکیبی از منافع و هزینه‌های در نظر گرفته شده در طول عمر مفید هر گزینه، برای مقایسه گزینه‌ها است.

روشهای مختلفی برای ارزیابی اقتصادی پروژه‌های حمل و نقل ابداع شده‌اند. ساده ترین روشها در این زمینه روشهایی هستند که با مساوی در نظر گرفتن آثار گزینه‌ها، تنها با مقایسه هزینه‌های هر گزینه به انتخاب گزینه برتر می‌پردازند. از جمله این روشها می‌توان به روش هزینه معادل یکنواخت سالیانه (EUAC) اشاره کرد. در روشهای بعدی، با محاسبه هزینه نسبی سفر با سیستم‌های مختلف نسبت به انتخاب سیستم مناسب مبادرت می‌ورزند که از آن جمله می‌توان به مطالعات Wohl, kain, Meyer در سال ۱۹۶۵، James, Deen در سال ۱۹۶۹، Wetzler, Asher, Boyd در ۱۹۷۳ و Keeler و همکارانش در سال ۱۹۷۵ اشاره کرد [۱].؟

گروه بعدی روشهای ارزیابی، تحلیل‌های اقتصاد مهندسی هستند. این تحلیل‌ها می‌کوشند تا با تبدیل همه اثرات گزینه‌ها به یک ارزش پولی واحد، آنها را مورد مقایسه قرار

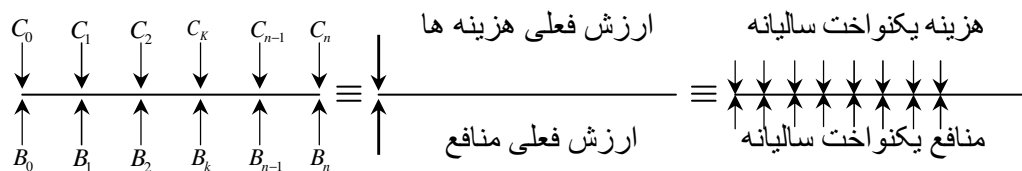


شکل (۱): متدولوژی انتخاب سیستم حمل و نقل عمومی مناسب برای یک کریدور شهری



در شکل ۲ دیاگرام جریان نقدی در روش نسبت منافع به هزینه‌ها نشان داده شده است.

شکل (۲): دیاگرام جریان نقدی در روش نسبت منافع به مخارج



$$\frac{B}{C} = \frac{\sum_{k=0}^n B_k \left[ \frac{1}{(1+d)^k} \right]}{\sum_{k=0}^n C_k \left[ \frac{1}{(1+d)^k} \right]}$$

با توجه به شکل داریم:

(1)

که در آن:

$B$  و  $C$ : ارزش خالص فعلی منافع و هزینه‌ها،

$B_k$  و  $C_k$ : منافع و هزینه‌ها در سال  $k$  ام،

$d$ : نرخ تنزیل (نرخ تخفیف)، و

$n$ : دوره آنالیز (معمولاً ۳۰ تا ۴۰ سال شامل دوره ساخت و بهره‌برداری).

نرخ تنزیل به کار رفته در رابطه فوق، نرخ بهره‌ای است که رابطه ارزش پول در آینده را با ارزش معادل امروز آن تعیین می‌کند. علت در نظر گرفتن این نرخ این است که هزینه‌ها و منافع یک پروژه در مقاطع مختلف زمانی حادث می‌شوند، ولی برای مقایسه آنها با یکدیگر باید با توجه به ارزش زمانی پول، معیار زمانی یکسانی را در نظر گرفت.

### ۳-۱-۳-۱- برآورد هزینه‌ها

به طور کلی هزینه‌های یک سیستم حمل و نقل عمومی به سه بخش تقسیم می‌گردد: هزینه ساخت یا احداث، هزینه راه اندازی و هزینه بهره‌برداری.

#### ۳-۱-۱-۱- هزینه ساخت یا احداث

این هزینه‌ها معمولاً بدون توجه به میزان تقاضای سفر برای هر سیستم مقدار ثابتی دارند. در حالی که میزان آنها از جایی به جای دیگر ممکن است تغییرات زیادی داشته باشد. مقدار دقیق این هزینه‌ها باید پس از انتخاب طرح نهایی و با توجه به ویژگی‌های مسیر، شرایط زمین شناسی محل، موقعیت شبکه‌های شهری زیرزمینی، محل دقیق ایستگاه‌ها و... بر اساس نرخ واحد جزئیات انجام کار محاسبه گردد.

#### ۳-۱-۳-۲-۱- هزینه راه اندازی

هزینه راه اندازی یک سیستم حمل و نقل عمومی عبارت است از هزینه خرید ناوگان لازم برای آن سیستم. مقدار سالیانه این هزینه از رابطه (۲) محاسبه می‌شود:

$$C_R = N \cdot c_R \quad (2)$$

که در آن:

$C_R$ : هزینه راه اندازی سیستم حمل و نقل عمومی،

$N$ : تعداد ناوگان لازم در هر سال بهره‌برداری، و

$c_R$ : هزینه واحد ناوگان.

تعداد کل ناوگان در طول عمر پروژه بستگی به طول عمر وسایل نقلیه دارد؛ زیرا معمولاً طول عمر وسایل نقلیه کمتر از طول عمر پروژه می‌باشد و لازم است تا در طول دوره بهره‌برداری، بخشی از ناوگان نوسازی گردد.

### ۳-۱-۳- هزینه مدیریت و بهره‌برداری

هزینه‌های بهره‌برداری مربوط به زمانی هستند که احداث سیستم حمل و نقل عمومی به پایان رسیده و نوبت به بهره‌برداری و استفاده از سیستم می‌رسد. این هزینه‌ها تا حد زیادی به تقاضای سفر بستگی دارند؛ به طوری که با افزایش تقاضا و به دلیل نیاز به سرویس‌های بیشتر این هزینه‌ها نیز افزایش می‌یابند. هزینه‌های بهره‌برداری معمولاً به روش "هزینه بهره‌برداری واحد" محاسبه می‌شوند. در این روش معمولاً هزینه بهره‌برداری به ازای هر وسیله نقلیه \_ کیلومتر مبنای محاسبه هزینه بهره‌برداری سالانه قرار می‌گیرد، داریم:

$$C_o = (Car - km) \times c_o \quad (3)$$

که در آن:

$C_o$ : هزینه بهره‌برداری سالانه،

$Car - km$ : تعداد وسیله نقلیه \_ کیلومتر سالانه، و

$c_o$ : هزینه بهره‌برداری واحد برای هر وسیله نقلیه - کیلومتر.

مقدار  $Car - km$  سالانه با این فرض که تمامی وسایل نقلیه در کل طول مسیر به

کار گرفته شوند، از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$Car - km = f \times n_t \times \frac{100}{PHF} \times 2L \times X \quad (4)$$

که در آن:

$f$ : تعداد واحدهای حمل و نقلی در ساعت اوج (TU/hr)،

$n_t$ : تعداد واگن‌ها در هر واحد حمل و نقلی (car/TU)،

$PHF$ : ضریب ساعت اوج (درصد سفرهای انجام شده در ساعت اوج)،

$2L$ : طول مسیر رفت و برگشت (Km) و

$X$ : تعداد روزهای کاری در طول سال (day/year).

## ۳-۲- منافع

### ۳-۲-۱- صرفه جویی در زمان سفر

با توجه به حرکت موجی شکل ترافیک، چنانچه معابر شهری دارای ظرفیت لازم جهت گذردهی جریان ترافیک تخصیص نیافته باشند، شاهد ازدحام و راه‌بندان‌های طولانی در شبکه درون شهری خواهیم بود؛ بنابراین یک سیستم حمل و نقلی جدید که سرعت بیشتری نسبت به سیستم‌های قدیمی مورد استفاده در یک کریدور داشته باشند، علاوه بر آنکه باعث صرفه جویی

در زمان سفر استفاده‌کنندگان از حمل و نقل عمومی می‌شود، به علت کاهش بار ترافیک خیابانی روی شبکه، زمان سفر غیراستفاده‌کنندگان (استفاده‌کنندگان از حمل و نقل خصوصی) را نیز کاهش می‌دهد. هر چه یک سیستم حمل و نقل عمومی بتواند تعداد زیادتری از مسافران بین دو نقطه را به خود جذب کند، هم منافع استفاده‌کنندگان از آن و هم غیر استفاده‌کنندگان افزایش خواهد یافت.

مجموع سود سالیانه ناشی از صرفه جویی در زمان سفر کلیه مسافران در کریدور، به کمک رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$TTSB = (\sum_{i=1}^m T_i - \sum_{j=1}^{m'} T'_j) \times PHE \times X \times u \quad (5)$$

که در آن:

$T_i$ : زمان سفر کلیه مسافران شکل حمل و نقل  $i$  در طول کریدور در شرایط موجود در ساعت اوج،

$T'_j$ : زمان سفر کلیه مسافران شکل حمل و نقل  $j$  در طول کریدور پس از توسعه سیستم جدید در ساعت اوج،

$m', m$ : تعداد اشکال حمل و نقل در شرایط موجود و پس از توسعه سیستم جدید،

$PHE$ : متوسط ساعات کار روزانه بر حسب معادل ساعت اوج، و

$u$ : ارزش اقتصادی زمان سفر (واحد پول بر ساعت).

در هر دو حالت شرایط موجود و پس از احداث سیستم جدید، برای محاسبه زمان سفر با وسایل نقلیه شخصی در هر قطعه کریدور، از رابطه سازمان راهبای عمومی استفاده می‌شود، داریم [۴]:

$$t = \frac{L_S}{v} (1 + 0.15 (\frac{V}{C})^4) \quad (6)$$

در آن:

$t$ : زمان سفر در جریان ترافیک  $V$  در طول قطعه (hr)،

$L_S$ : طول قطعه (Km)،

$v$ : سرعت جریان آزاد (Km/hr)،

$V$ : جریان ترافیک تخصیص داده شده به قطعه (وسیله همسنگ سواری در ساعت)، و

$C$ : ظرفیت خیابان در سطح سرویس  $c$  (وسیله همسنگ سواری در ساعت).

بنابراین مجموع زمان سفر کلیه مسافران وسیله نقلیه شخصی در ساعت اوج به کمک

روابط زیر به دست می‌آید:

$$T_P = \sum_{k=1}^r (D_{P_k} \times t_{P_k}) \quad \text{و} \quad T'_P = \sum_{k=1}^r (D'_{P_k} \times t'_{P_k}) \quad (7) \quad \text{و} \quad (8)$$

که در آن:

سیستم جدید (psg/hr)،  
 $D_{P_k}$  و  $D'_{P_k}$ : تقاضای سفر با وسیله نقلیه شخصی در قطعه  $k$  ام قبل و پس از احداث

سیستم جدید (hr/psg)، و  $r$ : تعداد قطعات در طول کریدور.  
 $t_{P_k}$  و  $t'_{P_k}$ : زمان سفر هر مسافر وسیله شخصی در طول قطعه  $k$  ام قبل و پس از احداث

اما زمان سفر با وسایل نقلیه عمومی علاوه بر زمان داخل وسیله نقلیه (زمانهای توقف، افزایش و کاهش سرعت و حرکت با سرعت ثابت)، شامل زمان پیاده روی تا رسیدن به ایستگاه، زمان انتظار و زمان پیاده روی از ایستگاه تا مقصد نیز می‌شود، در این حالت مجموع زمان سفر کلیه مسافران وسیله نقلیه عمومی در طول کریدور در ساعت اوج به کمک روابط زیر محاسبه می‌شود:

$$T_B = [P_B \times (\gamma \times \frac{l}{S_p} + t_w) + \sum_{k=1}^r (D_{B_k} \times t_{B_k})] / 3600 \quad (9)$$

$$T'_{NS} = [P_{NS} \times (\gamma \times \frac{l'}{S_p} + t'_w) + \sum_{k=1}^r (D'_{NS_k} \times t'_{NS_k})] / 3600 \quad (10)$$

که در آن:

$P_{NS}$  و  $P_B$ : تعداد کل مسافران وسیله نقلیه عمومی در ساعت اوج قبل و پس از احداث سیستم جدید (psg/hr)،

$l'$  و  $l$ : میانگین مسافت پیاده روی هر مسافر برای رسیدن به ایستگاه (m) (تقریباً  $\frac{1}{4}$  فاصله ایستگاه‌ها)،

$S_p$ : سرعت پیاده روی (m/s)،

$t'_w$  و  $t_w$ : زمان انتظار (sec) (بطور میانگین برابر  $\frac{1}{4}$  سر فاصله)،

$D'_{NS_k}$  و  $D_{B_k}$ : تقاضای سفر با وسیله نقلیه عمومی در قطعه  $k$  ام (psg/hr)، و

$t'_{NS_k}$  و  $t_{B_k}$ : زمان سفر هر مسافر با وسیله نقلیه عمومی در طول قطعه  $k$  ام (sec/psg).

## ۲-۲-۳- صرفه‌جویی در هزینه‌های دیگر حمل و نقل

حرکت يك وسیله نقلیه در سطح شهر سالیانه هزینه زیادی را بر صاحب آن و نیز برکل جامعه تحمیل می‌کند که از مهمترین اقلام این هزینه‌ها می‌توان به هزینه خرید وسایل نقلیه، هزینه بهره‌برداری و تعمیرات وسیله نقلیه، هزینه نوسازی و بهسازی معابر، هزینه تصادفات، هزینه ناشی از آلودگی‌های زیست محیطی و هزینه پارکینگ وسایل نقلیه اشاره کرد. اما احداث يك سیستم حمل و نقل عمومی مناسب و دارای ظرفیت کافی باعث کاهش نیاز به وجود گونه‌های دیگر حمل و نقل از جمله اتوبوس‌ها و سواری‌های شخصی می‌گردد و با صرفه‌جویی در هزینه وسایل نقلیه اضافه، منافع اقتصادی زیادی را برای جامعه به ارمغان



می‌آورد. برای محاسبه این میزان صرفه‌جویی لازم است تا هزینه سالانه سفر با وسایل نقلیه مختلف، در دو حالت "شرایط موجود" و "پس از احداث سیستم جدید" محاسبه گردند که داریم:

$$VOCS = \sum_{i=1}^m C_i - \sum_{j=1}^{m'} C'_j \quad (11)$$

که در آن:

$VOCS$ : میزان صرفه‌جویی سالانه در هزینه گونه‌های دیگر حمل و نقل،

$C_i$ : مجموع هزینه سفر سالانه مسافران شکل حمل و نقل  $i$  در طول کریدور در شرایط موجود،

$C'_j$ : مجموع هزینه سفر سالانه مسافران شکل حمل و نقل  $j$  در طول کریدور پس از توسعه سیستم جدید، و

$m', m$ : تعداد اشکال حمل و نقل در شرایط موجود و پس از توسعه سیستم جدید.

لازم به ذکر است هزینه سفر با سیستم جدید به دلیل آنکه قبلاً در هزینه‌های بهره‌برداری در نظر گرفته شده است، در این بخش وارد نمی‌شود.

#### ۴- مطالعه موردی

وسعت و جمعیت زیاد شهر تهران و استفاده روز افزون از وسایل نقلیه شخصی در سفرهای درون شهری، حمل و نقل و جابجایی را در این شهر به یک معضل جدی تبدیل کرده است. مسئولان شهر تهران نیز در طول سالهای متمادی به فکر گسترش سیستم‌های حمل و نقل عمومی در این شهر بوده‌اند. بر اساس سیاستهای شهرداری تهران، ۹ خط مترو در شهر تهران ساخته خواهد شد و این سیستم بدنه اصلی حمل و نقل عمومی این شهر را تشکیل می‌دهد. اما بحث استفاده از سیستم‌های دیگری مانند قطار سبک شهری و مونوریل نیز به عنوان مکمل خطوط مترو در سالهای اخیر مطرح گردیده است و علاوه بر خطوط مترو، برای ساخت ۷ خط قطار سبک شهری نیز برنامه‌ریزی شده است [۵].

در این تحقیق مسیر ۸۰۴ که در مطالعات جامع شهر تهران دارای اولویت شماره ۱ احداث سیستم قطار سبک شهری است، جهت بررسی بیشتر و انجام ارزیابی اقتصادی انتخاب شده است. در این طرح، مسیر سیستم حمل و نقل عمومی از ابتدای بزرگراه آیت ... اشرفی اصفهانی در شمال غرب تهران آغاز شده و با گذر از این بزرگراه به ایستگاه متروی تهران می‌رسد. پس از آن مسیر در امتداد بزرگراه شهید برادران رحمانی تا تقاطع جاده مخصوص کرج امتداد یافته و با حرکت از حاشیه فرودگاه مهرآباد وارد بزرگراه

آیت ... سعیدی شده و تا میدان زمزم واقع در جنوب غرب تهران ادامه می‌یابد. طول مسیر در این گزینه ۱۶/۴ کیلومتر و تعداد ایستگاه‌های آن ۱۵ عدد می‌باشد.

با توجه به تقاضای سفر فعلی با سیستم‌های حمل و نقل همگانی در کریدور ۸۰۴ (حدود ۱۵۰۰۰ مسافر در ساعت اوج در یک جهت) و با فرض رشد ۱/۵ درصدی سفرها در این منطقه، مقدار تقاضا در پایان دوره بهره برداری برای یک افق ۴۰ ساله به حدود ۲۷۰۰۰ مسافر در ساعت اوج خواهد رسید. لذا سیستم مورد نظر جهت احداث در این مسیر باید قادر به جوابگویی به این مقدار تقاضا باشد.

همچنین توصیه می‌گردد که به لحاظ تقاضای سفر زیاد در طول این کریدور، جهت عدم کاهش ظرفیت جاده‌ای، سیستم حتی الامکان در سطح معابر احداث نگردد. در این تحقیق جهت ارزیابی و مقایسه گزینه‌های مختلف، دو گزینه زیر مورد آنالیز و بررسی قرار گرفتند.

*الف- سیستم قطار سبک شهری<sup>۱</sup>*: این سیستم دارای واگن‌های کوچک الکتریکی است و از لحاظ تکنولوژی مشابه سیستم‌هایی است که هم اکنون در شهرهای مشهد و شیراز در حال اجرا می‌باشد.

*ب- سیستم موتور القایی خطی<sup>۲</sup>*: این سیستم مشابه مترو می‌باشد با این تفاوت که در آن واگن‌ها توسط میدان مغناطیسی ایجاد شده بین موتور خطی نصب شده در زیر واگن‌ها و صفحه واکنش نصب شده در وسط خط به حرکت در آمده و متوقف می‌شود. به کارگیری موتور خطی القایی در این سیستم باعث کاهش ارتفاع واگن‌ها و در نتیجه کاهش مقطع عرضی تونل‌ها می‌شود و به همین دلیل هزینه احداث آن بسیار کمتر از مترو می‌باشد.

ویژگی‌های فنی و اقتصادی گزینه‌های مورد نظر در جدول ۱ نشان داده شده است.

---

1. Light Rail Transit : LRT

2. Linear Induction Motor : LIM

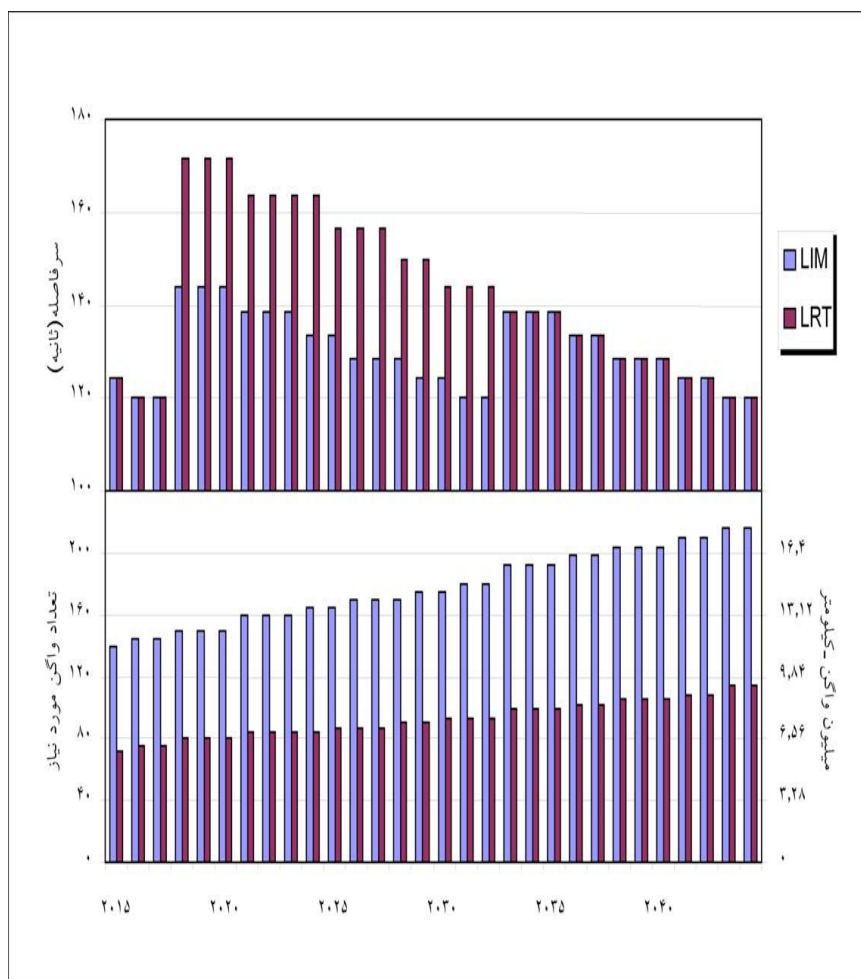
جدول (۱): مشخصات فنی سیستم‌های پیشنهادی جهت احداث در کریدور ۸۰۴ [۷۰۶]

| عنوان                                       | LRT                    | LIM              |
|---|------------------------|------------------|
| حداکثر شیب (%)                              | ۶                      | ۸                |
| حداقل شعاع قوس (m)                          | ۵۰                     | ۸۰               |
| حداکثر تعداد وسایل نقلیه در هر قطار         | ۴                      | ۸                |
| حداقل سرفاصله (min)                         | ۲                      | ۲                |
| حداکثر سرعت (Km/hr)                         | ۸۰                     | ۹۰               |
| شتاب افزایش یافته (m/s <sup>۲</sup> )       | ۱                      | ۱/۱              |
| شتاب کاهش یافته (m/s <sup>۲</sup> )         | ۱                      | ۱                |
| ابعاد وسیله نقلیه (m)                       | ۳۰*۲/۸۵*۳/۶۸           | ۱۶*۲/۵*۳/۱       |
| نوع وسیله نقلیه                             | ۶ محوره (۳ بوژی) مفصلی | ۴ محوره (۲ بوژی) |
| ظرفیت وسیله نقلیه (نشسته)                   | ۲۰۰ (۶۰)               | ۱۰۰ (۴۰)         |
| هزینه هر واگن (میلیارد ریال)                | ۱۱/۵                   | ۹                |
| عمر مفید واگن (سال)                         | ۲۰                     | ۲۰               |
| هزینه بهره برداری واحد (هزار ریال بر واگن - | ۱۲                     | ۶                |
| قیمت احداث هر کیلومتر مسیر (میلیارد ریال)   | ۱۱۰                    | ۱۷۰              |
| دوره ساخت (سال)                             | ۷                      | ۱۰               |

پس از انتخاب گزینه‌های اولیه، یک طرح عملکردی مناسب برای این گزینه‌ها پیش‌بینی گردید. منظور از طرح عملکردی، محاسبه و ارائه ویژگی‌های بهره‌برداري از سیستم از جمله تعیین سرفاصله در بازه‌های زمانی مختلف، تعداد واگن‌های مورد نیاز و مقدار واگن-کیلومتر در هر سال بهره برداری و ... می‌باشد که با توجه به مشخصات مسیر، مشخصات سیستم حمل و نقل، میزان تقاضا و استانداردهای سرویس دهی تعیین می‌شوند.

سرفاصله‌ها به روش «فواصل زمانی حداکثر ظرفیت» محاسبه شدند. در این روش با ثابت در نظر گرفتن تعداد واگن‌ها و بر اساس میزان تقاضا، فواصل زمانی برای پر شدن واحد حمل و نقل محاسبه می‌شوند. همچنین برای کسب رضایت استفاده کنندگان، مقدار ۵ دقیقه به عنوان حداکثر برای سرفاصله لحاظ گردید. نتایج طرح عملکردی پیش‌بینی شده در شکل ۳ نشان داده شده است.

شکل (۳): مقادیر سرفاصله، تعداد واگن مورد نیاز و مقدار واگن-کیلومتر سالیانه سیستم‌های منتخب



در مرحله بعد، تعداد سفرهای پیش‌بینی شده با هر یک از اشکال حمل و نقل در سالهای آتی، از مطالعات انجام گرفته توسط سازمانهای مرتبط با حمل و نقل شهر تهران استخراج شدند. این پیش‌بینی‌ها به کمک مدل‌های چهارگانه برآورد تقاضا شامل مدل‌های تولید، مدل‌های توزیع، مدل‌های انتخاب وسیله نقلیه و مدل‌های تخصیص سفر انجام گرفته‌اند. این مدل‌ها تقاضای سفر برای انواع وسایل نقلیه را در هر دوره زمانی از روز و برای هر سال دوره آنالیز، به طور مناسبی برآورد می‌کنند. در انجام پیش‌بینی‌ها فرضیات زیر در نظر گرفته شده است [۶]:

- خط مورد نظر، سرویس دهی خود را در سال ۲۰۱۵ شروع می‌کند (سال افق طرح).
- خطوط ۱ تا ۷ مترو تا سال ۲۰۱۵ به بهره‌برداری خواهند رسید.
- تعداد سفرهای ماشینی روزانه به ازای هر نفر تغییر نخواهد کرد (۱/۶ سفر به ازای هر نفر).
- سهم حمل و نقل عمومی از کل سفرها تغییر نخواهد کرد (این مقدار در حال حاضر ۵۹ درصد می‌باشد).

- تعداد سفرهای ساعت اوج ۱۰٪ مجموع سفرهای روزانه است (ضریب ساعت اوج).  
جدول ۲ نتایج پیش بینی تقاضای سفر برای مسیر ۸۰۴ را نشان می‌دهد. برای پیش‌بینی سفرها از مدل جاذبه برای توزیع سفرها بین مناطق مختلف و روش همه یا هیچ بدون مانع ظرفیت برای تخصیص سفرها استفاده شده است.

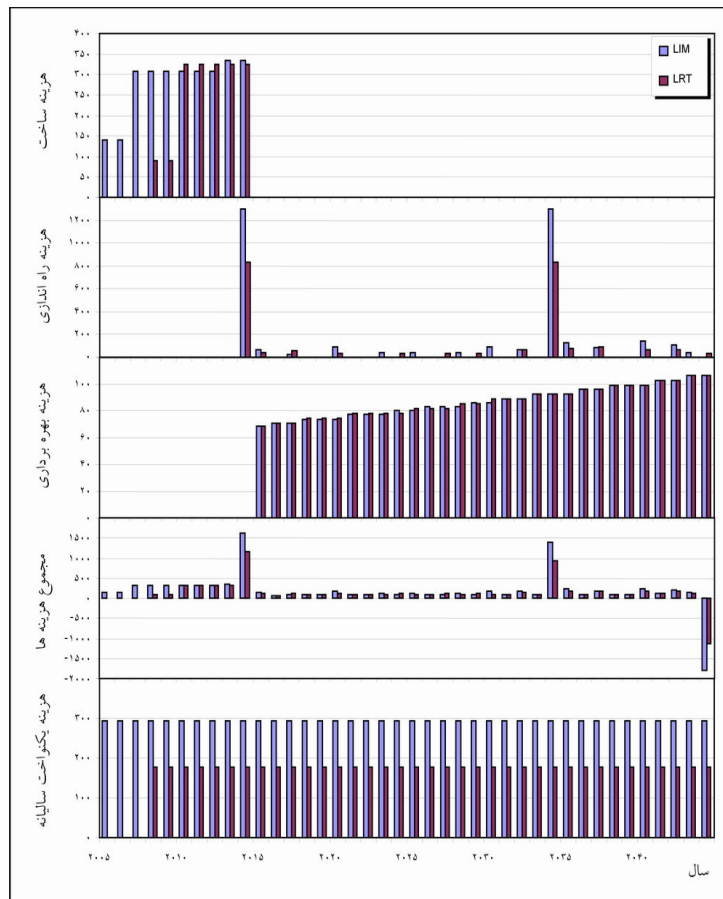
جدول (۲): حجم مسافر بین ایستگاه‌های سیستم جدید در ساعت اوج سال ۲۰۱۵ [۶]

| ایستگاه | فاصله (Km) | حجم مسافر در ساعت اوج |                    | مسافر-کیلومتر ساعت اوج |
|---------|------------|-----------------------|--------------------|------------------------|
|         |            | از ایستگاه ۱ به ۱۵    | از ایستگاه ۱۵ به ۱ |                        |
| ۱~۲     | ۱/۱        | ۸۵۰۰                  | ۶۷۰۰               | ۱۶۷۲۰                  |
| ۲~۳     | ۱/۰        | ۱۰۴۰۰                 | ۷۷۰۰               | ۱۸۱۰۰                  |
| ۳~۴     | ۱/۱        | ۱۴۲۰۰                 | ۱۰۲۰۰              | ۲۶۸۴۰                  |
| ۴~۵     | ۰/۹        | ۱۶۳۰۰                 | ۱۱۴۰۰              | ۲۴۹۳۰                  |
| ۵~۶     | ۱/۳        | ۱۷۳۰۰                 | ۱۲۵۰۰              | ۳۸۷۴۰                  |
| ۶~۷     | ۱/۴        | ۱۶۰۰۰                 | ۱۱۰۰۰              | ۳۷۸۰۰                  |
| ۷~۸     | ۱/۰        | ۱۴۸۰۰                 | ۱۳۳۰۰              | ۲۸۰۰۰                  |
| ۸~۹     | ۱/۴        | ۱۳۱۰۰                 | ۱۲۰۰۰              | ۳۵۱۴۰                  |
| ۹~۱۰    | ۱/۴        | ۱۱۷۰۰                 | ۱۲۳۰۰              | ۳۳۶۰۰                  |
| ۱۰~۱۱   | ۰/۹        | ۱۱۵۰۰                 | ۱۲۲۰۰              | ۲۱۳۳۰                  |
| ۱۱~۱۲   | ۱/۲        | ۱۰۹۰۰                 | ۱۱۷۰۰              | ۲۷۱۲۰                  |
| ۱۲~۱۳   | ۱/۳        | ۸۲۰۰                  | ۹۵۰۰               | ۲۳۰۱۰                  |
| ۱۳~۱۴   | ۱/۴        | ۶۱۰۰                  | ۶۳۰۰               | ۱۷۳۶۰                  |
| ۱۴~۱۵   | ۱/۰        | ۱۲۰۰۰                 | ۱۰۰۰۰              | ۲۲۰۰۰                  |
| مجموع   | ۱۶/۴       |                       |                    | ۳۷۰۶۹۰                 |

پس از مشخص شدن تعداد سفرها با وسایل نقلیه مختلف در سالهای دوره آنالیز، ارزیابی هزینه- فایده برای هر یک از سیستم‌ها انجام گرفت. جدول ۳ مشخصات کلی ارزیابی صورت گرفته را نشان می‌دهد. همچنین در اشکال ۴ و ۵ مقدار بخشهای مختلف هزینه‌ها و منافع ناشی از احداث سیستم جدید در هر یک از سالهای دوره آنالیز رسم شده است.  
جدول (۳): مشخصات در نظر گرفته شده جهت ارزیابی سیستم‌های پیشنهادی

| توضیحات   | مقدار | پارامتر              |
|---|-------|----------------------|
|   | ۲۰۰۵  | سال انجام محاسبات    |
|   | ۲۰۱۵  | سال شروع بهره برداری |
| با توجه به پروژه های مشابه  | ۴۰    | دوره آنالیز (سال)    |
| بر اساس مطالعات بانک جهانی بازسازی و توسعه <sup>۱</sup>   | ۱۲    | نرخ تنزیل (%)        |
| با فرض میانگین درآمد ماهیانه ۲۴۰۰۰۰۰ ریال برای هر خانواده و ۱۶۰ ساعت کاری در هر ماه و ارزش زمان هر ساعت | ۵۰۰   | ارزش زمان سفر        |

شکل (۴): اجزای مختلف هزینه‌های احداث سیستم‌های LIM و LRT

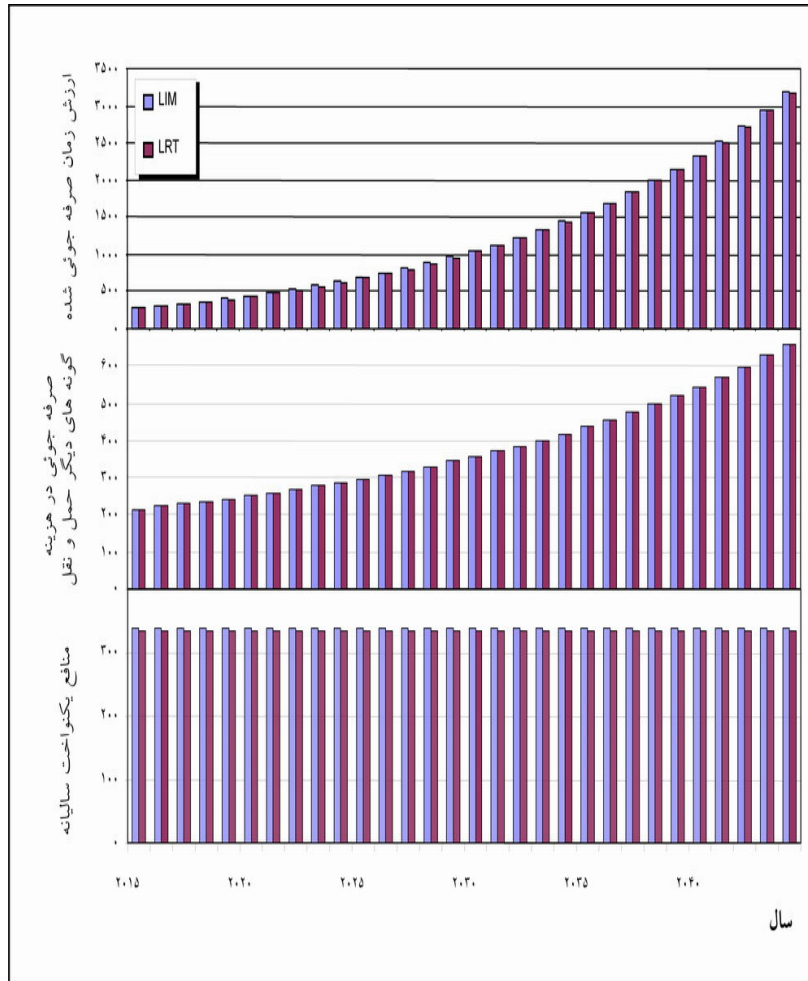


نتایج نهایی  
هزینه-

آنالیز  
فایده در

مورد احداث هر یک از سیستم‌های LIM و LRT در کریدور ۸۰۴ در جدول ۴ ارائه شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌گردد نسبت B/C برای هر دو سیستم از یک بیشتر و در نتیجه ساخت هر دو سیستم با معیارهای اقتصاد ملی مطابقت دارد اما در بین این دو سیستم، سیستم LRT علی‌رغم آنکه منافع یکبار ساخت سالانه کمتری دارد، دارای نسبت B/C بیشتری بوده و یا به عبارت دیگر به نسبت هزینه‌های آن سود بیشتری را به همراه خواهد داشت. بنابراین، این سیستم جهت ساخت در کریدور ۸۰۴ پیشنهاد می‌گردد که این مطلب با مطالعات انجام گرفته توسط شهرداری تهران مطابقت دارد.

شکل (۵): منافع حاصل از احداث هر یک از سیستم‌های LIM و LRT



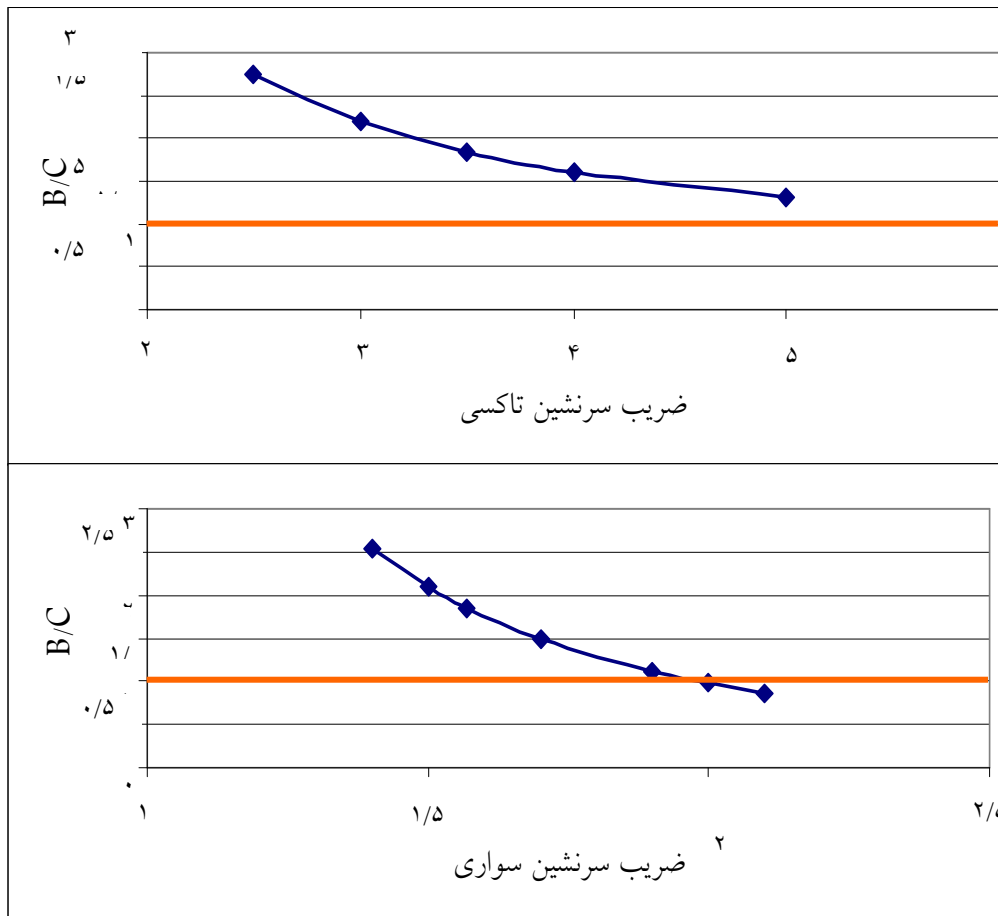
جدول (۴): نتیجه آنالیز هزینه - فایده در مورد احداث سیستم‌های LIM و LRT در کریدور ۸۰۴

| B/C   | ارزش خالص فعلی هزینه ها | ارزش خالص فعلی منافع | سیستم |
|-------|-------------------------|----------------------|-------|
| ۱/۱۴۲ | ۱۴۶۲/۲۵                 | ۲۶۹۴/۱۷              | LRT   |
| ۱/۱۲۲ | ۲۴۲۳/۳۸                 | ۲۷۱۹/۱۱              | LIM   |

در این تحقیق، همچنین با توجه به اینکه امکان ایجاد تغییراتی در هزینه‌ها و منافع سیستم انتخاب شده وجود دارد، آنالیز حساسیت ارزیابی در مورد تغییر برخی از پارامترهای مهم ارزیابی انجام گرفته که نتایج آن در ذیل تشریح شده است:

ضریب اشغال سواری و تاکسی‌ها: میانگین ضریب اشغال سواری و تاکسی‌ها در حال حاضر به ترتیب ۱/۵۷ و ۳ در نظر گرفته شده است. اگر به واسطه سیاست‌های اتخاذ شده این مقادیر دستخوش تغییرات شوند، بدون شک نسبت B/C نیز تغییر خواهد یافت. شکل ۶ تغییرات B/C را نسبت به این دو پارامتر نشان می‌دهد. همان طور که ملاحظه می‌شود با افزایش ضرایب سرنشین، نسبت B/C به صورت غیر خطی کاهش می‌یابد که علت این امر نیز رابطه غیر خطی سرعت با تعداد وسایل نقلیه تخصیص یافته می‌باشد. مشاهده می‌شود که با افزایش تعداد سرنشینان وسایل نقلیه شخصی به ۲ نفر، افزایش قابل ملاحظه‌ای در سرعت حرکت ایجاد شده و در نتیجه منافع ایجاد سیستم کاهش می‌یابد. این امر توجیه‌کننده سیاست‌هایی جهت افزایش تعداد سرنشینان خودرو و کاهش خودروهای تک سرنشین در سطح شهرهای بزرگ کشور بوده و نشان می‌دهد که با افزایش تعداد سرنشینان خودروها می‌توان بهبود قابل ملاحظه‌ای در ترافیک خیابانها ایجاد نمود.

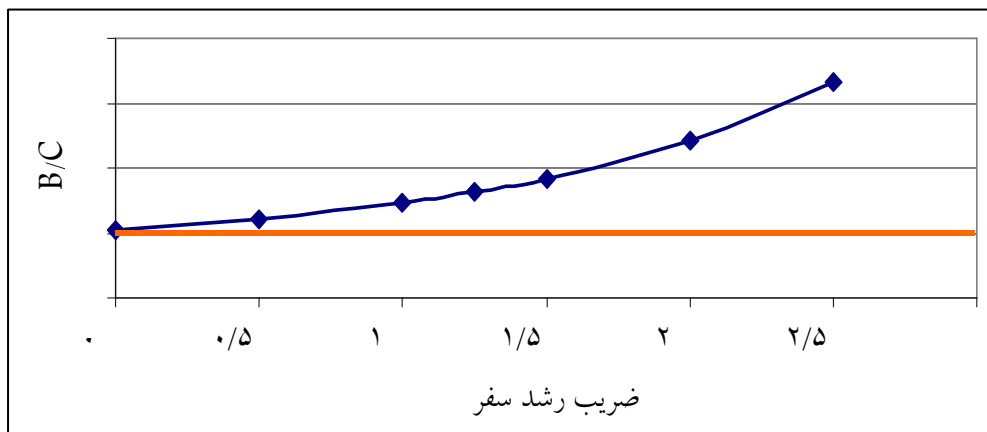
شکل (۶): حساسیت تصمیم در مورد انتخاب گزینه LRT نسبت به تغییرات ضرایب سرنشین تاکسی و سواری





ضریب رشد سفر: ضریب رشد سفرها در شرایط عادی ۱/۵٪ فرض شده اند. در صورتی که به هر دلیلی این مقدار دستخوش تغییرات گردد، هم هزینه‌ها (هزینه‌های راه اندازی و بهره‌برداری) و هم منافع تغییر خواهد کرد. شکل ۷ روند تغییرات B/C را در برابر ضریب رشد سفرها نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که این روند به صورت غیر خطی می‌باشد که علت این مسأله روابط غیر خطی سرعت و مصرف سوخت با افزایش تقاضا می‌باشد؛ اما حتی در صورتی که سفرها نسبت به سال شروع بهره‌برداری بدون رشد باقی بماند، باز هم پروژه سودمند خواهد بود.

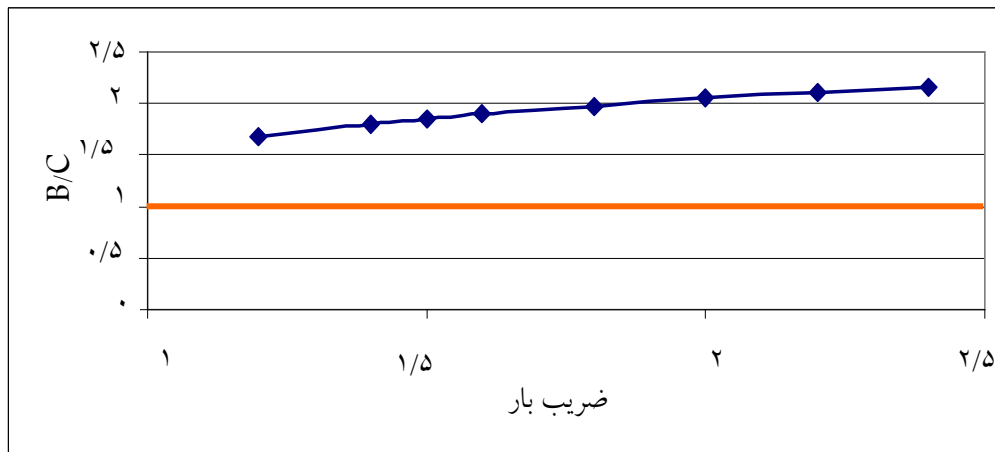
شکل (۷): تحلیل حساسیت تصمیم در مورد انتخاب گزینه LRT نسبت به تغییرات ضریب رشد سفر



ضریب بار<sup>۱</sup>: مقدار ضریب بار، اثر مستقیم بر روی راحتی سفر دارد. به طوری که با افزایش این ضریب، تعداد مسافریں هر واگن افزایش یافته و فضای کمتری به هر مسافر اختصاص می‌یابد. این مسأله کاهش تعداد واگن‌های مورد نیاز و در نتیجه کاهش هزینه‌ها را به دنبال خواهد داشت. در شکل ۸ تغییرات B/C بر اساس ضریب بار را مشاهده می‌کنید. ملاحظه می‌شود که با افزایش ضریب بار، نسبت B/C نیز افزایش می‌یابد ولی همان‌طور که گفته شد راحتی سفر کاهش یافته و ممکن است بر تعداد مسافران تأثیر منفی بگذارد. این مسأله ضرورت اتخاذ تصمیمات درست را در هنگام بهره‌برداری از سوی مسئولان ایجاب می‌کند.

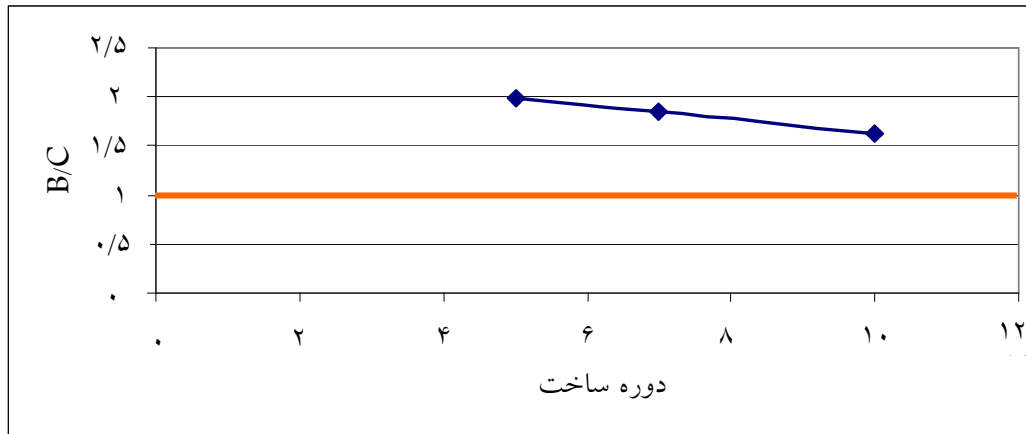
1. Load factor

شکل (۸): تحلیل حساسیت تصمیم در مورد انتخاب گزینه LRT نسبت به تغییرات ضریب بار



• دوره ساخت: این پارامتر یکی از مهمترین بخشهای هر پروژه می باشد. پروژه هایی که دوره ساخت آنها بیش از مقدار معمول باشد از لحاظ اقتصادی توجیه پذیر نمی باشد. زیرا بخش عمده ای از سرمایه ها در این پروژه ها بلا استفاده می ماند. شکل ۹ تغییرات  $B/C$  را در صورت افزایش یا کاهش دوره ساخت نشان می دهد. مشخص است که با افزایش زمان ساخت، سودمندی پروژه کاهش می یابد که این امر ضرورت برنامه ریزی دقیق در اتمام به موقع پروژه را نشان می دهد.

شکل (۹): تحلیل حساسیت تصمیم در مورد انتخاب گزینه LRT نسبت به تغییرات دوره ساخت



به طور کلی از آنالیزهای صورت گرفته مشاهده می‌شود که حتی با افزایش ۳۰ درصدی هزینه‌ها و کاهش ۳۰ درصدی منافع، پروژه همچنان از نظر اقتصادی توجیه پذیر است و لذا می‌توان گفت احداث سیستم LRT در کریدور ۸۰۴ کاملاً با معیار اقتصاد ملی مطابقت می‌کند.

## ۵- نتیجه گیری

بر طبق نتایج حاصل از آنالیز هزینه-فایده بر روی دو سیستم قطار سبک شهری (LRT) و سیستم موتور القایی خطی (LIM) جهت احداث در کریدور میدان پونک - میدان زمزم واقع در غرب تهران، سیستم قطار سبک شهری دارای نسبت منافع به هزینه‌های بیشتری بوده و بر اساس متدولوژی ارائه شده به عنوان گزینه مناسب شناخته شده است. نتایج حاصل از مطالعه موردی و آنالیز حساسیت به شرح زیر می‌باشند:

۱- احداث یک سیستم حمل و نقل عمومی با سرعت بالا در کریدور ۸۰۴ و نیز کریدورهای مشابه با آن از نظر میزان تقاضا، علی‌رغم آنکه هزینه‌های بسیار هنگفتی را به همراه خواهند داشت، کاملاً از نقطه نظر اقتصادی توجیه پذیر می‌باشند.

۲- مقادیر هزینه‌ها و منافع به تنهایی معیار مناسبی برای تصمیم‌گیری نمی‌باشد. به عنوان نمونه مطالعه موردی نشان می‌دهد که سیستم LIM دارای منافع و هزینه‌های بیشتری نسبت به سیستم LRT بوده ولی نسبت فایده به هزینه برای آن کمتر می‌باشد.

۳- سیاستهای بهره‌برداري تأثیر قابل ملاحظه‌ای در انتخاب سیستم خواهند داشت. برای نمونه در مورد سیستم LRT افزایش ضریب بار از مقدار ۱/۵ به ۲/۵ مجموع هزینه‌ها را تا ۲۰ درصد کاهش خواهد داد؛ اگر چه ممکن است این کار باعث کاهش مطلوبیت سیستم حمل و نقل عمومی و در نتیجه کاهش میزان تقاضا با آن شود.

۴- تدوین برنامه ریزی دقیق جهت ساخت و راه‌اندازی یک سیستم حمل و نقل عمومی امری ضروری می‌باشد. به طوری که در مطالعه انجام شده مشاهده می‌شود که افزایش دوره ساخت سیستم LRT از هفت به ده سال منجر به افزایش ۱۵ درصدی در ارزش خالص فعلی هزینه‌ها می‌گردد.

۵- افزایش تعداد سرنشینان وسایل نقلیه شخصی تأثیر قابل ملاحظه‌ای در بهبود حمل و نقل شهری دارد. به طوری که مشاهده می‌شود با افزایش ضریب سرنشینان از ۱/۵۷ به ۲/۰۰ منافع حاصل از احداث سیستم LRT، ۹۰ درصد کاهش خواهد یافت؛ که علت آن کاهش منافع سالیانه ناشی از صرفه‌جویی در زمان سفر و صرفه‌جویی در مصرف سوخت به دلیل افزایش سرعت حرکت در طول کریدور بوده است.

## فهرست منابع

۱. اسکونزاد، م. (۱۳۸۳) "اقتصاد مهندسی؛" چاپ نوزدهم، تهران: دانشگاه صنعتی امیر کبیر، تهران.
۲. صفارزاده، م. (۱۳۸۱) "مهندسی ترابری و ترافیک؛" جلد اول، تهران: دانشگاه تربیت مدرس.
۳. سازمان حمل و نقل و ترافیک تهران (۱۳۸۱) "بررسی هزینه حرکت وسایل نقلیه در شهر تهران؛" معاونت مطالعات و برنامه ریزی، تابستان .
۴. سازمان حمل و نقل و ترافیک تهران (۱۳۸۳) "معرفی سیستم جابجایی انبوه مسافر جهت دستیابی به توسعه پایدار در بخش حمل و نقل و ترافیک شهر تهران.
۵. عربی، س. (۱۳۸۰) "ارزیابی اقتصادی پروژه قطار شهری مشهد؛" پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه علم و صنعت ایران.
۶. مؤیدفر، ر. (۱۳۸۰) "طراحی مدل مسیریابی سیستم‌های ریلی شهری؛" پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه علم و صنعت ایران.
7. Brand, D., Kiefer, M. R. & Parody, T. E., & Mehndireatta, Sh. R. (2001)
8. "Application Of Benefit – Cost Analysis To The Proposed California High – Speed Rail System"؛ Transportation Research Record, 1742, Washington D.C.
9. Ismart, D. (1990) "Calibrating and Adjustment of System Planning Models ؛" Federal Highway Administration , Washington D.C.
10. Japan Bank For International Cooperation (2003) "Report of Study on Urban
11. Meyer, M. D. & Miller, E. J. (1984) "Urban Transportation Planning: A Decision- Oriented Approach".
12. Murphy, J. & Delucchi, M. (1997) "Review of Some of the Literature on the Social Cost of Motor-Vehicle Use؛" The Annualized Social Cost of Motor-Vehicle Use in the United States, Report #3, USA, California.
13. Transit System Construction Project In Tehran؛ "March.
14. Vuchic, V. R. (1981) "Urban Public Transportation: Systems And Technology؛" Prentice –Hall Inc., New Jersey.