

## ارائه متدولوژی تعیین تاثیر وضعیت روسازی راهها بر ظرفیت تسهیلات

### تحت جریان ترافیکی پیوسته

حمید بهبهانی\* و سید مهدی ابطحي\*\*

دانشکده عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران

دانشکده عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان

(دریافت مقاله: ۸۵/۶/۲۰ - دریافت نسخه نهایی: ۸۶/۱/۲۰)

**چکیده** - نشانه خدمت دهی راه (PSR) یکی از معیارهای مهم در تعیین زمان تعمیر و مرمت راه است. در این مقاله مدل‌هایی برای تعیین رابطه PSR و سرعت آزاد عبور در تسهیلات تحت جریان ترافیکی پیوسته توسعه یافته است. سپس بر اساس روابط مختلف موجود بین سرعت و ظرفیت، تأثیر وضعیت روسازی بر ظرفیت ارائه شده است. دو وسیله نقلیه متداول به همراه ده نفر ارزیاب ۲۳ مقطع از دو مسیر اصلی جدا شده و بزرگراه با شرایط هندسی مشابه و وضعیت متفاوت روسازی را مورد ارزیابی قرار داده‌اند. به منظور تعیین خدمت دهی راه مقاطع آزمون به گونه‌ای انتخاب شده‌اند که در طولی حداقل برابر ۴۰۰ متر ناهمواریها یکنواخت باشد و نیز مقاطع به گونه‌ای انتخاب شده‌اند که طیف قابل قبولی از خدمت دهی را پوشش دهند. برای ساخت مدل ۹ مقطع در مسیری جدا شده شش خطه (هر طرف سه خط) با شیب کمتر از دو درصد و برای اعتبار سنجی از چهارده مقطع دیگر با شرایط هندسی مشابه استفاده شد. در تحلیل داده از نرم افزار SAS استفاده شده است. نتایج نشان دهنده وجود ارتباطی معنی دار بین پارامترهاست. در این تحقیق مدل سرعت - نشانه خدمت دهی راه و سپس مدل ظرفیت - نشانه خدمت دهی راه ارائه شده و نهایتاً ضریب کاهش ظرفیت در نتیجه تقلیل کیفیت روسازی برای تکمیل ضرایب HCM 2000 ارائه شده است.

**واژگان کلیدی:** نشانه خدمت دهی، ظرفیت جریان ترافیکی پیوسته، ضریب کاهش ظرفیت ترافیکی

# An Improved Methodology for Measurement of Uninterrupted – Flow Capacity Affected by Pavement Condition

H. Behbahani and M. Abtahi

Department of Civil Engineering, Iran University of Science and Technology

Department of Civil Engineering, Isfahan University of Technology

**Abstract:** The Present Serviceability Rating (PSR) is one of the major criteria in selecting road for rehabilitation. In this paper, statistically realistic models for are developed PSR and free speed correlation on uninterrupted flow facilities. Then, the previously developed relations between free speed and capacity are used to determine the effect of pavement condition on flow capacity. Two nearly identical cars were used and ten raters were selected to evaluate 23 test sections on two major separated roads and an expressway with similar geometric characteristics with a wide range of pavement conditions. Using SAS, it was shown that linear negative exponential models were the best regression models that fit the data according to  $-R^2$  and T-test.

**Keywords:** Present Serviceability, Uninterrupted flow, Highway capacity

## فهرست علائم

ضریب تصحیح عرض	fw	ضریب سنجش وضعیت روسازی	B
تعداد خطوط هر جهت عبور	N	مقدار ترکهای مهم	C
مقدار لکه گیری سطح روسازی	P	ظرفیت هر خط عبور	Cj
مقدار متوسط گودی مسیر چرخها	$\overline{RD}$	تراکم	D
سرعت متوسط مکانی	S	تراکم بحرانی	D <sub>c</sub>
سرعت بحرانی	S <sub>c</sub>	تراکم عارضه روسازی	D <sub>ij</sub>
سرعت آزاد	S <sub>f</sub>	تراکم راهبندان	D <sub>j</sub>
شدت عارضه روسازی	S <sub>j</sub>	تابع تصحیح ترکیب عوارض	F(t,d)
میانگین ناهمواری سطح روسازی برحسب تغییرات شیب	$\overline{SV}$	ضریب تصحیح شرایط روسازی	F <sub>D</sub>
نوع عارضه روسازی	T <sub>i</sub>	ضریب تصحیح وسایل سنگین	f <sub>HV</sub>
		ضریب تصحیح آشنایی راننده	f <sub>p</sub>

## ۱- مقدمه

خط عبور، شیب و طول فراز راهها، محل تقاطعها و رمپها با پارامترهای ترافیکی چون ظرفیت معابر، در طول پنج دهه اخیر شناخته شده و بسط یافته است.

ارتباط مطالعات حمل و نقل شهری و طرح هندسی نیز ارتباطی معین و تعریف شده است. ارتباطی که در مدل‌های انتخاب مسیر کارایی دارد. اما گاهی ارتباط اجزای مهندسی راه به روشنی تعیین نشده است. در طول پنج دهه اخیر در دو

مجموعه مهندسی راه که در تقسیم بندی کلی متشکل از علوم طرح هندسی، روسازی، مهندسی ترافیک و مهندسی ترابری است، مجموعه‌ای به هم پیوسته است. گاه این پیوستگی ظهوری شناخته شده دارد و از بیان کلی به روابطی کمی سیر کرده است. ارتباط مشخصات هندسی چون عرض معابر، عرض هر

شاخه از مجموع علوم راه تلاشهای جداگانه‌ای در جهت کسب اطلاعات لازم برای طراحی صورت گرفته است.

از طرفی مهندسان ترافیک سعی در توسعه نظری جریان و تعیین ظرفیت راهها و شناخت عوامل مؤثر بر ظرفیت معابر کرده‌اند که این مطالعات با تلاشهای گرینشیلد شروع و به تدوین کتاب راهنمای راهها HCM<sup>۱</sup> در سال ۱۹۶۵ انجامید. کتاب راهنمایی که به طور ادواری کامل شده و وسیعترین مرجع تعیین ظرفیت راهها و کیفیت عبور است و در کشورهای زیادی پس از انطباق با شرایط محلی مورد استفاده قرار می‌گیرد. از طرف دیگر، محققان مهندسی روسازی سعی در تبیین معیاری برای گسیختگی راهها داشته‌اند. این مطالعات با تلاشهای کری و اریک در خلال آزمایش جاده‌ای اش تو (۱۹۶۰) تدوین شد. در آزمایش جاده‌ای اش تو از مفهوم درجه خدمت دهی فعلی PSR<sup>۲</sup> که متوسط درجه اعلام شده توسط افراد جداگانه در تشخیص کیفیت راه است، استفاده شد. پس از آن پژوهشگران به دنبال رسیدن به معیاری قابل سنجش به صورت فیزیکی بوده‌اند که بتواند قضاوت کیفی را به دست دهد و در این تلاش شاخص خدمت دهی فعلی PSI<sup>۳</sup> را ارائه کرده‌اند. اهمیت موضوع تا بدانجا بود که حمایت بانک جهانی را برای دستیابی به شاخص بین‌المللی ناهمواریها IRI<sup>۴</sup> در سال ۱۹۸۲ جلب کرد.

سؤال اصلی مقاله حاضر این است که آیا می‌توان در آنچه به عنوان تعیین ظرفیت راهها در نیم قرن گذشته در حوزه مطالعات ترافیکی مطرح بوده است و خدمت دهی روسازیها که به همان میزان در حوزه مهندسی روسازی قدمت دارد ارتباطی یافت؟ آیا بین شاخصهای تعیین وضعیت روسازی و ظرفیت راه ارتباطی قابل تامل وجود دارد؟ و در صورت وجود آیا می‌توان ضرایب تقلیل ظرفیت ناشی از وضعیت روسازی را به دست آورد؟

## ۲- پیشینه موضوع

### ۲-۱- بررسی روابط جریان ترافیکی

ظرفیت تسهیلات ترددی منعکس کننده قابلیت این تسهیلات در هدایت جریان افراد و یا خودروهاست. ظرفیت

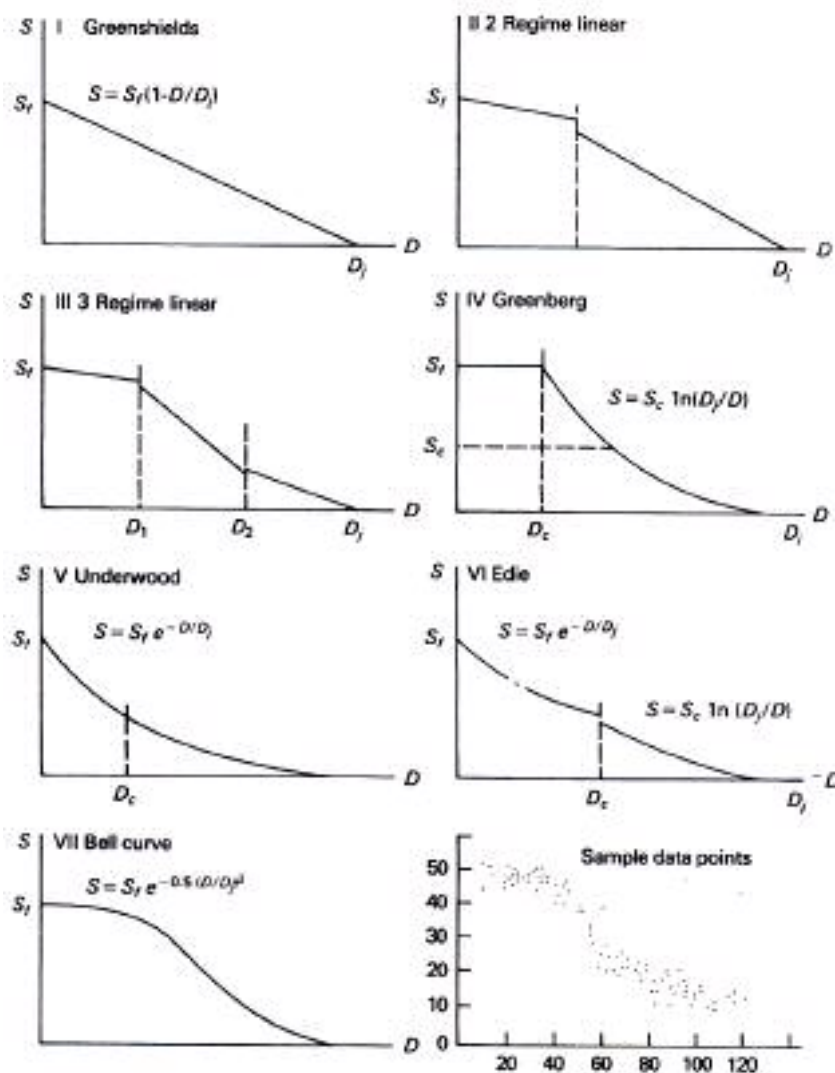
عبور خودروها بیان کننده حداکثر تعداد خودروهایی است که می‌تواند از یک نقطه در خلال دوره زمانی معین در شرایط متداول راه، ترافیک و یا شرایط کنترل ترافیک عبور کند.

نکته مهمی که در تعریف فوق آمده است «شرایط متداول راه، ترافیک و کنترل ترافیک» است که باید در مقطع به صورت یکنواخت وجود داشته باشد. هر تغییری در شرایط متداول باعث تغییر در ظرفیت راهها می‌شود. در بررسی ظرفیت، شرایط ایدئالی تعریف می‌شود که عبارت است از شرایطی که هیچ بهبودی در این شرایط نمی‌تواند باعث افزایش ظرفیت راه شود. این شرایط عبارت است از وضعیت خوب آب و هوایی و روسازی راه و آشنایی رانندگان با مسیر و نیز عدم وجود تصادف در محل.

تسهیلات بسته به جریان عبور به دو دسته تقسیم می‌شوند. تسهیلات با جریان عبور پیوسته<sup>۵</sup> و تسهیلات با جریان عبور ناپیوسته<sup>۶</sup>. در نوع اول هیچ عامل تثبیت شده‌ای که باعث انقطاع جریان ترافیکی شود وجود ندارد و جریان ترافیکی در نتیجه تعامل بین وسایل نقلیه و هندسه و محیط راه شکل می‌گیرد. تسهیلات جریان ترافیکی ناپیوسته دارای عوامل کنترل ترافیک ثابت است که باعث انقطاع جریان یا کاهش سرعت جریان ترافیکی می‌شود.

پیوستگی و یا عدم پیوستگی جریان به نوع تسهیلات بستگی دارد و نه کیفیت عبور در ساعتی خاص. در نتیجه آزاد راهها در شرایط ترددی با تراکم زیاد همچنان نشان دهنده جریان پیوسته تلقی می‌شوند.

روند تحلیل ظرفیت تسهیلات با جریان پیوسته براساس رابطه بین سرعت، جریان و چگالی، تحت شرایط ایدئال ترافیک و مسیر استوار است. این روابط امکان تعیین معیار سطح خدمت‌دهی را فراهم آورده و مقادیر پایه‌ای را در اختیار می‌گذارند که تمام تصحیحات لازم در شرایط غیر ایدئال بر آنها اعمال می‌شود. سه متغیر پایه حجم (و یا جریان ترافیکی)، سرعت و چگالی برای توصیف جریان ترافیکی در تمام تسهیلات به‌کار می‌روند.



نمودار ۱- روابط مختلف سرعت - چگالی [۸]

بار توسط گرینشیلد در سال ۱۹۳۴ ارائه شد. مدل کاملاً ساده و به شکل زیر است [۱]:

$$S = S_f(1 - D/D_j) \quad (1)$$

علی‌رغم سادگی و گستردگی استفاده از این مدل، بیشتر مطالعات اخیر نشان می‌دهد که داده‌های سرعت چگالی کاملاً خطی نیست.

الیس مدل خطی‌ای ارائه کرد که بهتر می‌تواند با مشاهدات نواحی مختلف تطبیق نماید [۸]. منحنی سه پاره خطی جریان آزاد، جریان کند و جریان متراکم را مشخص کرده است. مزیت

تا کنون روابط مختلفی از سرعت-چگالی ارائه شده‌اند که نمودار (۱) گونه‌های مختلف رابطه سرعت-چگالی را به دست می‌دهد. در سه گونه اول، رابطه خطی بین سرعت و چگالی به صورت پیوسته و گسسته ارائه شده است. سایر گونه‌ها بیانی نمایی یا لگاریتمی از رابطه سرعت-چگالی را ارائه می‌دهد.

هریک از روابط نشان داده شده در نمودار (۱) به‌طور خلاصه در زیر شرح داده می‌شوند.

رابطه گرینشیلد که مبنای مطالعات HCM ۱۹۸۵ است اولین

تحت شرایط معمول عرض راه، ترافیک و شرایط کنترلی تعریف شده وجود داشته باشد و در واقع نقطه ماکزیمم منحنی سرعت - جریان است. در نتیجه با توجه به مدل‌های ارائه شده و نیز رابطه  $v = S \times D$  می‌توان  $v_{max}$  را تعیین کرد. مقدار ظرفیت در رابطه گرینشیلد برابر است با:

$$C = \frac{S_f D_j}{4} \quad (5)$$

به طریق مشابه براساس ظرفیت طبق مدل‌های مختلف به دست می‌آید:

$$C = (\text{Greenberg}) = S_c \frac{D_j}{e} \quad (6)$$

$$C(\text{Underwood}) = D_c \frac{S_f}{e} \quad (7)$$

HCM از بین مدل‌هایی که قبلاً اشاره شده به دو مدل می‌پردازد. مدل خطی گرینشیلد را دارای مزیت سادگی و انطباق خوب با داده های سرعت چگالی می‌داند و مدل گرینبرگ که براساس «حالت سیال یک بعدی»<sup>۷</sup> است و با رابطه زیر تعریف می‌شود را در نواحی با چگالی بالاتر قابل توصیف می‌کند [۲۰].

$$S = S_c * \ln(D_j/D) \quad (8)$$

## ۲-۲- شاخصهای تعیین وضعیت روسازی راه

مفهوم خدمت دهی روسازی راه در ابتدا به وسیله کری و اریک ارائه شد [۴]. این مفهوم برای اولین بار در آزمایش جاده‌ای اشتو مورد استفاده قرار گرفت تا نیاز به روشی را پاسخ گوید که توانایی ارزیابی عملکرد روسازیه را داشته باشد. خدمت دهی هر ساختار باید متناسب با اهداف آن ساختار باشد. در مورد روسازیها، هدف، داشتن سطحی هموار، راحت و ایمن برای رانندگی است.

تعیین وضعیت خدمت دهی روسازیها باید متأثر از دیدگاه استفاده کنندگانی باشد که تحت تاثیر عوامل مختلفی قرار می‌گیرند. برای آنکه بتوان از قضاوت ذهنی استفاده کنندگان ملاکی قابل سنجش و عینی استخراج کرد، لازم است که اولاً مدل ریاضی مناسبی برای مشخصات ناهمواریهای روسازی شکل داد، ثانیاً مدل ریاضی مناسبی برای توصیف پاسخ دینامیک وسیله نقلیه

بزرگ مدل‌های پاره خطی این است که روابط غیرخطی را می‌توان به طور تقریبی به مدل خطی تبدیل کرد. علاوه بر آن این مدلها در مرز بین قسمتهای خطی، ناپیوسته‌اند که این ناپیوستگی می‌تواند تحلیل گر را به چند ظرفیت در این نقاط رهنمون کند و تفسیر مناسبی از اثر تصادفات در کاهش ظرفیت ارائه دهد. گرینبرگ مدلی لگاریتمی برای توصیف رابطه بین سرعت و چگالی به صورت زیر ارائه کرده است [۸]:

$$S = S_c \ln \frac{D_j}{D} \quad (2)$$

مشکل عمده این مدل ناتوانی در چگالیهای پایین است. در این حالت ماکزیمم سرعت (سرعت آزاد) را باید مستقلاً وارد مدل کرد.

اندروود مدل نمایی برای رابطه چگالی - سرعت به صورت زیر ارائه داده است [۸]:

$$S = S_f \exp(-D/D_c) \quad (3)$$

این مدل در چگالیهای کم جوابگوست ولی در چگالیهای بالا S بدون آنکه صفر شود به سمت صفر میل می‌کند.

ادی نشان داد که استفاده از رابطه گرینبرگ برای چگالیهای زیاد و معادله اندروود در چگالیهای کم بهترین ترکیب را به دست می‌دهد. این نظریه، مدل ناپیوسته نشان داده شده در نمودار (۱) را به دست می‌دهد [۸].

استفاده از روابط گرینبرگ و اندروود منحنی مناسب در نواحی مختلف چگالی را با شکلی مقعر به دست می‌دهد. ناپیوستگی منحنی در نقطه‌ای نزدیک به چگالی بحرانی رخ می‌دهد که باعث ناپیوستگی منحنی جریان - سرعت و جریان - چگالی در نقطه ظرفیت می‌شود.

می‌تواند منحنی زنگی شکل را برای برخی از داده های سرعت چگالی مفسر خوبی دانسته است [۸].

منحنی دارای معادله زیر است:

$$S = S_f \exp \left[ -0.5 \left( \frac{D}{D_c} \right)^2 \right] \quad (4)$$

این منحنی دارای نقطه ضعیفی همانند مدل اندروود است. ظرفیت حداکثر آهنگ جریانی است که می‌تواند در یک مقطع

در هنگام عبور از ناهمواریها ابداع کرد و ثالثا اطلاعات کمی‌ای از واکنش انسانها در برابر حرکت به‌دست آورد.

بدیهی است که برای تعیین ملاکی قابل‌سنجش و عینی برای تفسیر درجه بندی ذهنی انسانها از کیفیت راه، مطالعه فرکانس، طول موج و دامنه ناهمواریها ضرورت می‌یابد. براساس فرضیات فوق‌کری و اریک شاخص خدمت‌دهی فعلی را تعریف کردند که در آزمایش جاده‌ای آشتو به‌کار گرفته شد. پس از آن نشان داده شد که عملکرد روسازی<sup>۸</sup> (که روند شاخص خدمت‌دهی در طول زمان است) را می‌توان به عوامل معینی از طرح روسازی مرتبط کرد. در نتیجه ملاکهای اندازه‌گیری خدمت‌دهی برای شبیه‌سازی نقطه نظر استفاده‌کنندگان (که تحلیلی نظری از کیفیت عبور روسازی است) به‌کارگرفته شد. در مطالعات آشتو، روند دستیابی به شبیه‌سازی نقطه نظر استفاده‌کنندگان با تشکیل تیم ارزیاب<sup>۹</sup> و عبور دادن اعضا از مقاطع روسازی صورت گرفت. قواعدی نیز برای ارزیابی به‌گروه داده شد و مقرر شد هر عضو نظر مستقل خود را در فرم مربوطه ارائه کند.

PSR به‌عنوان میانگین نمره‌ای که استفاده‌کنندگان برحسب راحتی عبور به روسازی می‌دهند (در مقیاس صفر تا پنج) تعریف شد.

بررسی و مطالعات بسیار بر روی اطلاعات جمع‌آوری شده در مدت چند سال، همراه با انجام آزمایشات تکمیلی و تحلیلهای نظری منجر به ارائه شاخص وضعیت روسازی PCI<sup>۱۲</sup> شد.

PCI یک شاخص عددی است که مقدار آن از صفر برای یک روسازی غیر قابل‌استفاده تا صد برای یک روسازی کاملاً بی‌عیب تغییر می‌کند.

محاسبه PCI براساس نتایج بررسیهایی صورت می‌گیرد که در آن نوع، شدت و میزان خرابی مشخص می‌شود [۶]. نتیجه این مطالعات در رابطه زیر آورده شده است:

$$PCI = C - \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^m g(TiSj, Dij)F(t, d) \quad (9)$$

در طول دوره‌ای طولانی، شاخص ناهمواری به‌عنوان مقیاس

درجه بندی روسازیها استفاده شده است، اما اشکال عمده، عدم وجود ملاک و استاندارد مطلق برای این شاخص بوده است. هرچند محققانی چون هاتچینسون سعی کرده‌اند که مبانی‌ای را برای درجه بندیهای ذهنی تعریف کنند که در نتیجه آن امکان تقارب دیدگاهها پدید آید [۷].

در سال ۱۹۸۲ آزمایش بین‌المللی ناهمواری راه IRRE با حمایت بانک جهانی توسط کشورهای برزیل، انگلیس، فرانسه، بلژیک و ایالات متحده در برزیل انجام شد. هدف این آزمایش تعیین نشانه ناهمواری بین‌المللی قابل‌اتکا به منظور تسهیل و تبادل داده‌ها و انتشار رهنمودهایی برای اندازه‌گیری ناهمواریهایی براساس یک مقیاس استاندارد بود.

نشانه ناهمواری بین‌المللی IRI از نسبت جابه‌جایی تجمعی قسمت آویخته یک سیستم ربع اتومبیل QCS<sup>۱۳</sup> که با سرعت ثابت ۸۰ km/h حرکت می‌کند به مسافت پیموده شده توسط این سیستم به‌دست می‌آید.

در آزمایش آشتو سعی شد که علاوه بر آنکه وضعیت روسازیها با به‌کار بردن درجه خدمت‌دهی فعلی PSR به‌طور نظری و ذهنی ارزیابی می‌شود به‌طور عینی و با روشهای آماری نیز ارزیابی شد. این دو به یکدیگر مرتبط می‌شوند. کری و اریک با ارائه مفهوم شاخص خدمت‌دهی فعلی PSI سعی کردند تا با سنجش ناهمواری که ملاکی عینی است تخمینی از خدمت‌دهی روسازی ارائه دهند. این رابطه پس از مطالعات منطقه‌ای کری و اریک به صورت زیر ارائه شد [۸]:

$$PSI = 5/03 - 1/9 \log(1 + SV) - 1/38 \left[ \frac{RD}{2/5} \right]^2 - 0/01 \sqrt{C + P} \quad (10)$$

مطالعات نشان داد که متغیرهای به‌کار رفته و رگرسیون انجام شده انطباق قابل‌قبولی ارائه می‌دهند و واردکردن متغیرهای دیگر بهبودی در روابط پدید نمی‌آورد.

### ۳- مبانی نظری پژوهش

در بخشهای قبل به مجموعه تلاشهای محققان و موسسات

مسافری نسبت به تغییرات سرعت و شتاب گیری و ملاحظات ایمنی است [۱۴].

در نتیجه روشهای سنجشی که به تحلیل روسازی می‌پردازد فارغ از عوامل دیگری است که خود در رضایتمندی از سطح راه مؤثر است.

#### ۴- متدلوژی پژوهش

برای تعیین اثر خرابی راهها بر ظرفیت در جریان ترافیکی پیوسته به سنجش دو مشخصه مهم یعنی خدمت دهی روسازی و سرعت پرداخته شده است. خدمت دهی شاخص مقبولیت مسیر و سرعت مشخصه‌ای از ظرفیت راه است. به منظور تعیین خدمت دهی راه، مقاطع آزمون به گونه‌ای انتخاب شده‌اند که در طولی حداقل برابر ۴۰۰ متر دارای شدت ناهمواری یکنواخت باشد. انتخاب مقطعی با شرایط هندسی مشابه، بدون وجود عوامل کنترل سرعت (در طولی حداقل برابر ۳ کیلومتر) و با شرایط روسازی متفاوت به سادگی ممکن نیست.

دو مسیر جدا شده اصلی و یک بزرگراه انتخاب شده و جمعا ۲۳ مقطع مطالعه شدند. شرایط مقاطع به گونه‌ای انتخاب شد که طیف قابل قبولی از خدمت دهی را پوشش دهد. به منظور تعیین خدمت راه از مفهوم «PSR استفاده شد. ارزیابی توسط یک گروه ده نفره (آن گونه که گولن و همکاران توصیه کرده‌اند انجام شد [۱۵]). ارزیابان ابتدا روسازی را بسیار خوب، خوب، قابل قبول، ضعیف و یا بسیار ضعیف توصیف کرده و سپس در دامنه ارائه شده، درجه راحتی را تعیین می‌کردند. ارزیابی با سواری و با سرعت عبور ۸۰ km/hr انجام گردید. در تمام مقاطع مطالعه در خط سبقت صورت گرفت تا مقاطع با یکدیگر قابل مقایسه باشند. سنجش سرعت با این نگرش که ابزار سنجش دقیق و ساده بوده و در عین حال، سنجش بدون جلب توجه و بدون آنکه هیچ اثری روی ترافیک بگذارد انتخاب شد. دستگاه سرعت سنجی که صحت اطلاعات آن با سرعتهای مختلف آزمایش شد در حال استقرار در داخل وسیله‌ای شخصی که در خارج جاده متوقف بود انتخاب شد.

در بررسی ظرفیت جریان پیوسته ترافیکی و نیز ارزیابی وضعیت روسازها پرداخته شد. در این بخش با دیدی تحلیلی به آنچه گذشت به توسعه مفاهیم و دربخش بعد به تبیین متدلوژی ارتباط مفاهیم پرداخته می‌شود.

در بخش دوم بیان شد که در کتاب راهنمای راهها پس از آنکه ظرفیت را در شرایط ایدئالی که از جمله شروط آن داشتن شرایط خوب آب و هوایی و روسازی است، مطالعه می‌کند به تصحیح روابط برای شرایط غیرایدهال (شرایط متداول) اشاره می‌کند. در روابط تصحیح ظرفیت به اثر عرض راه، فاصله بی مانع کناری، ترکیب وسایل و ناآشنایی رانندگان با محیط اشاره شده است. اما در این راهنما به طور اجمالی اثرات آب و هوایی را مورد بحث قرار داده تقلیل در ظرفیت را در دو مورد تحقیقی حتی در بارندگیهای خفیف ۸٪ ذکر می‌کند و با افزایش بارندگی کاهش ظرفیت را برای هر ۲۵/۰ میلیمتر بر ساعت ۶/۰ درصد افزون به مقدار کاهش اولیه می‌داند [۱۳].

به بیان دیگر

$$F_R = 0/92 - 0/006 \times \frac{R}{0/25} \quad (1-3)$$

در HCM اثر خرابی راهها بر ظرفیت مورد بررسی قرار نگرفته است.

در بررسی شرایط روسازی دو شیوه ارزیابی و سنجش موجود است. یکی ارزیابی ذهنی از سطح راه توسط گروهی ارزیاب که نتیجه آن ارائه PSR در آمریکا، RCI در کانادا و PUR در استرالیا بوده است و دیگری استفاده از سنجش عینی تکرارپذیر که نتیجه مطالعات وسیع بین المللی IRI در اختیار گذاشت و ملاحظه شد که هنوز در دنیا به هر دو ملاک ارزیابی و سنجش توجه می‌شود.

هر چند معمولا مهندسان نسبت به مفاهیم نظری و ذهنی خوش بین نیستند و ترجیح می‌دهند که ساختارها را با معیارهای اندازه گیری فیزیکی سنجش می‌کنند اما توجه به نکات زیر ضروری است که عامل تعیین کننده ناهمواریها تنها وضعیت روسازی نیست بلکه ناهمواری پدیده‌ای است که تابع پروفیل سطح روسازی، مشخصات وسیله نقلیه و حساسیت

جدول ۱- اطلاعات سرعت متوسط مکانی - PSR

سرعت متوسط مکانی	PSR
۸۵/۲	۴/۱۲۵
۷۴	۳/۲
۷۲/۴	۱/۳۷۵
۸۴	۴/۶۲۵
۶۵/۵	۳/۱۲۵
۵۳/۷	۱/۲۵
۷۳	۳/۹۵
۸۸/۶	۴/۲۵
۸۹/۶	۴/۸۵

برای مسیر بلوار استقلال

جدول ۲- اطلاعات سرعت متوسط مکانی - PSR

سرعت متوسط مکانی	PSR
۶۵/۷	۰/۹
۶۰/۶	۰/۷۵
۵۶/۹	۱/۱
۷۷	۲/۴۵
۸۳	۲/۲
۸۲	۲/۴۵
۷۶	۲/۷
۸۵/۲	۲/۵۵
۸۱/۱	۲/۸
۷۶	۱/۳۵
۷۷	۱/۱
۷۷	۰/۸۵
۸۴/۴	۲/۵۵
۸۴/۴	۲/۱

برای مسیر بلوار دفاع مقدس

## ۵- تجزیه و تحلیل داده ها

### ۱-۵- بررسی روابط قابل انطباق

همان گونه که قبلا بیان شد اطلاعات مورد نیاز در جریان عبور آزاد و در خط سبقت سنجش شده است. مطالعه در سه مسیر و جمعا در ۲۳ مقطع صورت گرفته است، مقاطع دارای شیب طولی کمتر از ۲٪ بوده اند. برای تحلیل داده ها مجموعه وسیعی از روابط بررسی شده اند. از بین این روابط چهار رابطه ارائه شده در جدول (۳) بیشترین انطباق را با داده ها نشان دادند.

### ۲-۵- تحلیل حساسیت مدلها نسبت به پارامترها

در تحلیل حساسیت هر مدل نسبت به پارامترها از نرم افزار SAS استفاده شده است. بررسی مدلهای جدول (۳) با این نرم افزار، در مسیر اول دو مدل  $y = a + bx$  و  $y = a(b - e^{-cx})$  را برازشی قابل قبول نشان می دهد، نتایج این بررسی به صورت زیر است

$$y = a + bx$$

الف- مدل

با توجه به مقادیر  $t$  بحرانی، مقدار  $t$  برای ۸ درجه آزادی و

در هر مقطع از ۱۰۰ نمونه برای سنجش سرعت استفاده شد. سنجشها در ساعات غیر اوج صبح و در شرایط جریان آزاد (سطح خدمت دهی الف) صورت گرفت و وسایل بسیار کند از آمار حذف شدند.

از نرم افزارهای Curve Expert و SAS برای رگرسیون استفاده شد، طبق مطالعات ون ارد متوسط سرعت در ناحیه ای که  $\frac{V}{C} < 0/5$  است، سرعت آزاد را در اختیار می گذارد [۱۴] و نیز آن گونه که اکسلیک بیان می کند، در شرایطی که تقاضا کمتر از ظرفیت است سرعت نسبت به تقاضا غیر حساس است [۹].

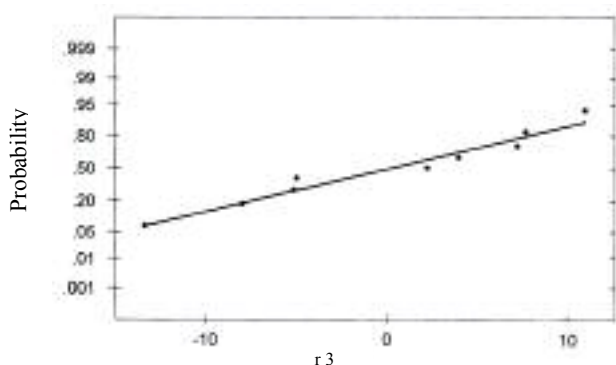
و نیز طبق گزارش HCM که به نقل از هاردل، داتا، رز، مک شین و پیگناتوره بیان می دارد که سرعت نسبت به جریان در دامنه جریان پایدار حساسیت کمی دارد، [۲، ۵ و ۸]. متوسط سرعت میانگین مکانی در ناحیه جریان آزاد به عنوان سرعت آزاد تلقی و ظرفیت به صورت تابعی از راحتی عبور تعریف می شود.

داده های به دست آمده در دو مسیر و جمع کل داده ها در جداول (۱) و (۲) داده شده اند.



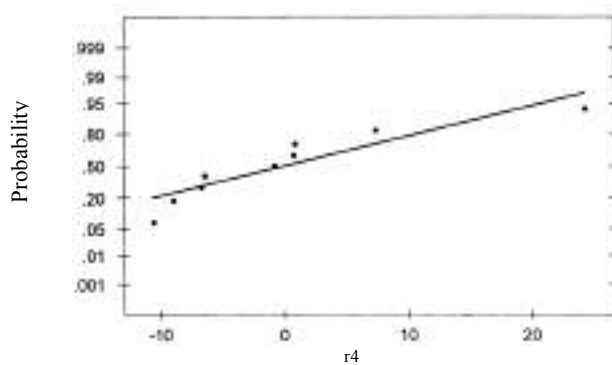
جدول ۳ - روابط قابل انطباق با اطلاعات استخراجی از مسیر بلوار استقلال

شماره	عنوان	معادله	مقدار ضرایب تخمینی				S.D	r	مدل
			d	c	b	a			
۵-۱	3 r <sup>d</sup> degree Polynomial	$y = a + bx + cx^2 + dx^3$	۲/۸۲	-۲۵/۰۵	۷۴/۱۷	۰/۷۲	۷/۷۲	۰/۹۷	
۶-۱	Exponential Association	$y = a(1 - \exp(-bx))$			۰/۹۹	۸۲/۶۱	۸/۲۵	۰/۹۶	
۷-۱	Exponential Association (3)	$y = a(b - \exp(-cx))$		۰/۹۸	۱/۰۱	۸۱/۹۹	۸/۸۲	۰/۹۶	
۸-۱	Linear Fit	$y = a + bx$			۱۳/۸۰	۲۶/۱۶	۱۴/۵۲	۰/۸۶	



Average: 0.081111  
Std Dev: 8.2433  
N of data: 9  
Anderson-Darling Normality Test  
A-Squared: 0.276  
p-value: 0.564

نمودار ۳ - نمودار احتمال نرمال برای مدل خطی (بلوار استقلال)



Average: 0.000001  
Std Dev: 10.7610  
N of data: 9  
Anderson-Darling Normality Test  
A-Squared: 0.566  
p-value: 0.101

نمودار ۲ - نمودار احتمال نرمال برای مدل خطی (بلوار استقلال)

که نشان دهنده، نرمال بودن باقیمانده‌هاست. نمودار مقادیر باقیمانده در مقابل مقادیر برازش شده نیز باید تصادفی بودن نقاط را نشان دهد که این شرط نیز محقق است.

### ۳-۵- اعتبار سنجی مدل

برای بررسی اعتبار مدل‌های ارائه شده در بخش قبل قطعاتی از بلوار دفاع مقدس که دارای شرایط هندسی طولی مشابه (به لحاظ عرض مقطع و شیب طولی) را انتخاب کردیم. اطلاعات به دست آمده از این مقاطع در جدول (۲) ارائه شده است. تحلیل این داده‌ها نشان می‌دهد که داده‌ها نرمال نبوده و شرط اول رگرسیون محقق نیست در نتیجه ابتدا طبق داده‌ها نرمال شده سپس مدل‌های قابل انطباق در نرم افزار SAS تحلیل شده‌اند. مطالعه نشان می‌دهد که باز هم بهترین مدل‌های قابل انطباق مدل‌های خطی و نمایی منفی‌اند.

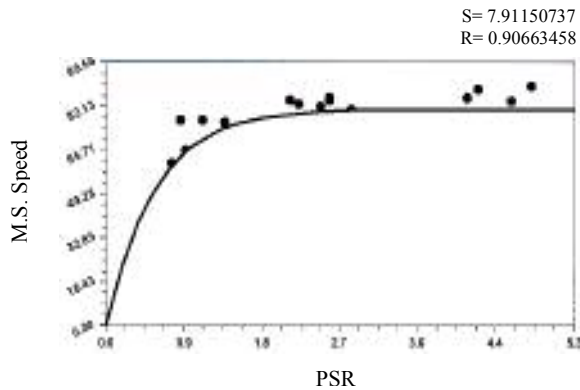
$\alpha = 0/05$ ،  $1/86$  و برای  $8$  درجه آزادی  $\alpha = 0/01$  برابر  $2/896$  به دست می‌آید. نرم افزار SAS مقادیر  $t$  بزرگی را ( $2/29$  و  $12/1$ ) برای این مدل ارائه می‌دهد که نشان دهنده معنی دار بودن هر دو پارامتر  $a$  و  $b$  است.

### ب- مدل $y = a(b - e^{-cx})$

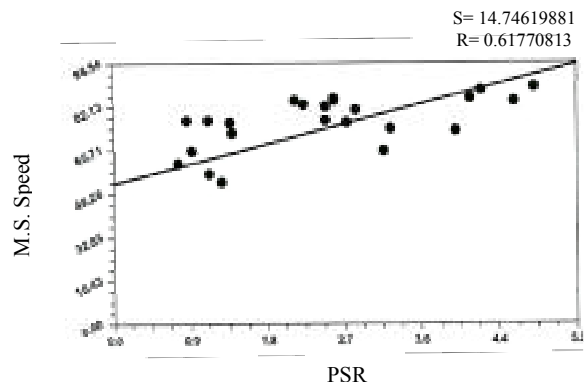
این مدل نیز با توجه به مقدار  $t$  استخراجی که مقادیر  $27/87$ ،  $30/01$  و  $5/53$  را در اختیار می‌دهد پارامترهای معنی‌داری را ارائه کرده است.

مقایسه خطای استاندارد باقیمانده دو مدل نشان می‌دهد که مدل خطی مدلی بهتر است.

نمودارهای رسم نرمال (نمودارهای ۲ و ۳) برای مدل خطی و مدل نمایی منفی نشان می‌دهند که داده‌ها حول خط نرمال‌اند. همچنین آزمون اندرسون و دارلینگ مقادیر  $P$  بزرگتر از  $0/05$  را نشان می‌دهد



نمودار ۵ - مدل نمایی برای کل داده‌ها



نمودار ۴ - مدل خطی برای کل داده‌ها

زمانی مدل‌های آماری قابل اعتماد هستند که فرض‌های اولیه، رگرسیون یعنی ثابت بودن واریانس خطای مدل و نرمال بودن آنها برقرار باشد.

این فرض‌ها توسط رسم احتمال نرمال و نمودار باقی مانده در مقابل مقدار برازش داده شده قابل بررسی است.

با توجه به نمودار احتمال نرمال برای کل داده‌ها، قابل مشاهده است که کل داده‌ها حول خط نرمال‌اند، نیز آزمون اندرسون-دارلینگ مقادیر  $P$  بزرگتر از  $0.05$  را نشان می‌دهد که نشان دهنده نرمال بودن باقیمانده‌هاست. نمودارهای باقیمانده در مقابل مقادیر برازش شده نیز باید تصادفی بودن نقاط را نشان دهند تا واریانس خطای مدل ثابت باشد، (نمودارهای (۶) و (۷)).

#### ۴-۵- ارائه مدل‌های تاثیر کیفیت روسازی بر ظرفیت

##### راه‌های تحت جریان پیوسته

همان‌گونه که در بررسی روابط جریان ترافیکی آمد در جریان‌های ترافیکی پیوسته مدل‌های مختلفی قابلیت تفسیر رابطه چگالی، سرعت و جریان را دارند.

در این بخش با تلفیق نتایج تحلیلهای بخش قبل و مدل‌های مورد توجه در تعیین ظرفیت به ارائه روابط ظرفیت - کیفیت روسازی پرداخته سپس مدل‌ها را با روابط وزیری در آزادراه‌های ایران [۱۰] تلفیق کرده مدلی قابل قبول در آزادراه‌های کشور ارائه می‌شود. نتایج قسمت اول ضرایب

#### الف- مدل

$$y = a(1 - \exp(-bx))$$

با توجه به جداول آماری که  $t$  را برای ۱۳ درجه آزادی و  $a = 0.05$ ،  $b = 1/76$  و برای  $a = 0.01$ ،  $b = 2/624$  ارائه می‌دهد و با توجه به خروجی نرم افزار SAS مقادیر  $t$  را  $14/23$  و  $8/09$  ارائه می‌کنند هر دو پارامتر مدل معنی دار است.

#### ب- مدل خطی

$$y = a + bx$$

با توجه به مقادیر جداول آماری که مقادیر  $t$  را طبق خروجی نرم افزار نشان می‌دهد ( $6/4$  و  $11/6$ ) مدل خطی نیز برای تفسیر داده‌ها قابل قبول است.

با تحلیل کل داده‌ها در ارائه مسیرهای انتخاب شده مشاهده می‌شود که باز بهترین مدل‌های قابل انطباق مدل‌های خطی و نمایی‌اند.

#### برای کل داده‌ها:

#### الف: مدل

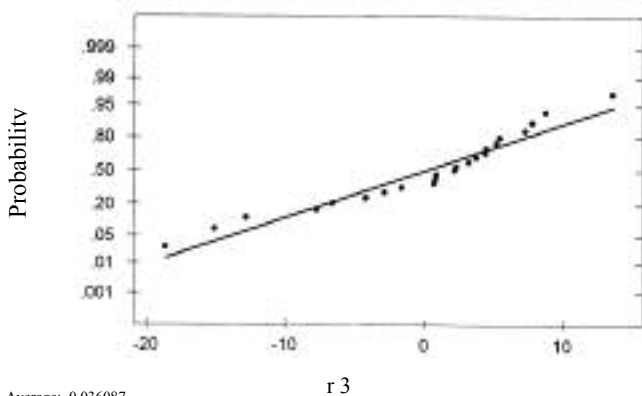
$$y = a + bx, \text{ نمودار (۴)}$$

با توجه به مقادیر جدول‌های آماری که  $t$  را برای ۲۲ درجه آزادی و  $a = 0.05$ ،  $b = 1/714$  و برای  $a = 0.01$ ،  $b = 2/508$  تعیین می‌کند و با توجه به خروجی نرم افزار SAS مقادیر  $t$  را  $29/05$  و  $11/81$  ارائه می‌دهد، مدل معنی دار است.

#### ب: مدل

$$y = a(1 - e^{-cx}), \text{ نمودار (۵)}$$

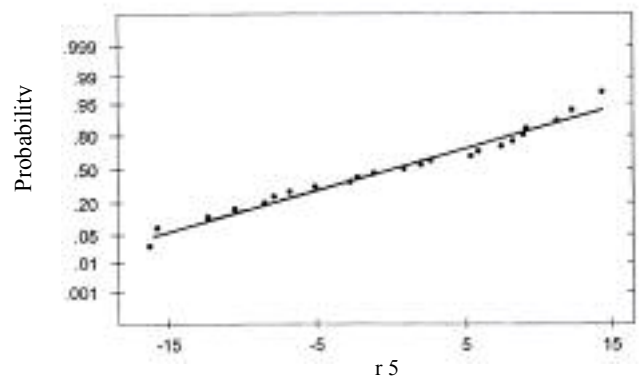
در این مدل نیز مقادیر  $t$  معنی دار است.



Average: 0.036087  
Std Dev: 7.91234  
N of data: 23

Anderson-Darling Normality Test  
A-Squared: 0.622  
p-value: 0.093

نمودار ۷ - نمودار احتمال نرمال برای نمای منفی  
(کل داده‌ها)



Average: -0.0008696  
Std Dev: 9.14766  
N of data: 23

Anderson-Darling Normality Test  
A-Squared: 0.280  
p-value: 0.613

نمودار ۶ - نمودار احتمال نرمال برای مدل خطی  
(کل داده‌ها)

$$\frac{dF}{dD} = S_f \left( e^{-D/D_j} - \frac{1}{D_j} e^{-D/D_j} * D \right) \quad (20)$$

با قراردادن مشتق برابر صفر

$$D = D_j \text{ ظرفیت } D_j$$

$$F_{\max} = C = \frac{S_f D_j}{e} \quad (21)$$

با قراردادن رابطه (۱۳) در رابطه فوق داریم:

$$C = 30.4(1 - \exp(-0.99PSR)) \quad (22)$$

درشرایطی که رابطه می تفسیر کننده جریان ترافیکی باشد داریم:

$$S = S_f e^{-0/5(D/D_c)^2} \quad (23)$$

$$F = S_f e^{-0/5(D/D_c)^2} * D \quad (24)$$

$$\frac{dF}{dD} = S_f \left( -\frac{D}{D_c^2} e^{-0/5(D/D_c)^2} * D + e^{-0/5(D/D_c)^2} \right) \quad (25)$$

$$\frac{dF}{dD} = 0 \Rightarrow D = D_c \quad (26)$$

$$C = \frac{S_f D_c}{\sqrt{e}} \quad (27)$$

در نتیجه‌ی روابط فوق، ظرفیت به صورت رابطه (۲۸) قابل ارائه است:

$$C = 50.1(1 - \exp(-0.25PSR)) \quad (28)$$

$$(y = a + bx)$$

ب- مدل خطی

$$S_f = a + b(PSR) \quad (29)$$

کاهش ظرفیتی را ارائه می دهد که می تواند مکمل ضرایب تصحیح HCM باشد.

الف- مدل نمایی منفی

بر اساس مدل نمایی منفی به دست می آید:

$$S_f = a[1 - \exp(-b(PSR))] \quad (12)$$

با استفاده از ضرایب به دست آمده

$$S_f = 82.61(1 - \exp(-0.99PSR)) \quad (13)$$

طبق رابطه گرینشیلد:

$$S = S_f \left( 1 - \frac{D}{D_j} \right) \quad (14)$$

$$C = F_{\max} = \frac{S_f * D_j}{4} \quad (15)$$

در جریانهای ترافیکی که رابطه تفسیر کننده گرینشیلد است، با جاگذاری رابطه (۱۳) در رابطه (۱۵) به دست می آید:

$$C = 20.65[1 - \exp(-0.99PSR)] \quad (16)$$

درشرایطی که بهترین مفسر جریان ترافیکی مدل اندروود باشد:

$$S = S_f e^{-D/D_g} \quad (17)$$

$$F = S * D \quad (18)$$

با جاگذاری رابطه (۱۷) در رابطه (۱۸):

$$F = S_f e^{-D/D_j * D} \quad (19)$$

جدول ۴ - ضریب تصحیح شرایط روسازی (FD) برای کل داده ها و مدل خطی

S <sub>f</sub>	۹۵/۳	۹۳/۲	۹۱/۱	۸۹/۰	۸۶/۹	۸۴/۸	۸۲/۶	۸۰/۵	۷۸/۴	۷۶/۳	۷۴/۲	۷۲/۱	۷۰/۰	۶۷/۹	۶۵/۸	۶۳/۶	۶۱/۵
F <sub>D</sub>	۱	۰/۹۸	۰/۹۶	۰/۹۳	۰/۹۱	۰/۸۹	۰/۸۷	۰/۸۴	۰/۸۲	۰/۸	۰/۷۸	۰/۷۶	۰/۷۳	۰/۷۱	۰/۶۹	۰/۶۶	۰/۶۴
PSR	۵				۴				۳				۲				۱

جدول ۵ - ضریب تصحیح شرایط روسازی (FD) برای کل داده ها و مدل نمایی منفی

S <sub>f</sub>	۸۰/۹	۸۰/۹	۸۰/۹	۸۰/۹	۸۰/۸	۸۰/۸	۸۰/۷	۸۰/۶	۸۰/۵	۸۰/۳	۸۰/۰	۷۹/۵	۷۸/۷	۷۷/۴	۷۵/۴	۷۲/۴	۶۷/۵
F <sub>D</sub>	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۹۸	۰/۹۷	۰/۹۶	۰/۹۳	۰/۸۹	۰/۸۳
PSR	۵				۴				۳				۲				۱

$$C = C_j N_f W_f H_V F_p \quad (34)$$

در این پژوهش براساس شاخص خدمت دهی راه رابطه‌ای بین کیفیت روسازی و ظرفیت راهها در جریان ترافیکی پیوسته ارائه شد.

اعتبارسنجی مدل‌های ارائه شده، مدل خطی را بهترین مفسر اثر کیفیت روسازی بر سرعت نشان داد و با توجه مطالعات انجام شده در کشور که مدل گرینشیلد را منطبقترین مدل برای تفسیر جریان ترافیکی نشان می‌دهد، ضریب تصحیح اثر کیفیت روسازی بر ظرفیت (F<sub>D</sub>) به دست آمد. با مقایسه F<sub>D</sub> و ضرایب تصحیح عرض روسازی (F<sub>w</sub>) ارائه شده در HCM نتایج جالبی قابل دست یابی است.

این مقایسه نشان می‌دهد که رسیدن کیفیت روسازی (PSR) به ۴ در آزاد راههای ۴ خطه معادل کاهش عرض هر خط به میزان ۰/۶۵ متر و رسیدن کیفیت روسازی به ۳ در همان آزادراهها معادل کاهش عرض هر خط به میزان یک متر است. در PSR=۱/۲۵ ضریب F<sub>D</sub> از تمامی ضرایب F<sub>w</sub> و F<sub>p</sub> بزرگتر است، در نتیجه باید فاکتور کیفیت روسازی به عنوان فاکتوری مهم و کاملاً قابل توجه به مجموع ضرایب HCM افزوده شود و هزینه های ناشی از تقلیل ظرفیت در تعیین PSR بحرانی لحاظ شود.

طبق ضریب به دست آمده

$$S_f = 26.16 + 13.8(PSR) \quad (30)$$

با جاگذاری در مدل گرینشیلد

$$C = [(6.54 + 3.45(PSR))] D_j \quad (31)$$

با جاگذاری در مدل اندروود

$$C = [9.62 + 5.07(PSR)] D_j \quad (32)$$

با جاگذاری در مدل منحنی زنگی شکل می

$$C = [15.85 + 8.4(PSR)] D_c \quad (33)$$

روند مشابهی را می‌توان در مورد کل داده ها اعمال کرد.

با توجه به روابط فوق الذکر مقادیر تصحیح ظرفیت براساس وضعیت روسازی (F<sub>D</sub>) برای کل داده‌ها در جدولهای (۴) و (۵) ارائه گردیده است. برای مقادیر F<sub>D</sub> با جایگزینی PSR در روابط خطی و نمایی منفی، C متناظر با هر PSR تعیین می‌شود. نسبت C متناظر با هر مقدار PSR به C در حالت PSR برابر ۵، ضریب تصحیح شرایط روسازی (F<sub>D</sub>) را به دست خواهد داد.

## ۶- نتیجه گیری

HCM ظرفیت آزاد راهها را در شرایط متداول با رابطه زیر تعریف می‌کند.

- |                                  |                                |                              |
|----------------------------------|--------------------------------|------------------------------|
| 1. highway capacity manual       | 6. interrupted flow            | 11. pavement user rating     |
| 2. present serviceability rating | 7. one dimensional fluid state | 12. pavement condition index |
| 3. present serviceability index  | 8. pavement performance        | 13. quarter car system       |
| 4. international roughness index | 9. rating panel                |                              |
| 5. uninterrupted flow            | 10. riding comfort index       |                              |

## مراجع

1. *Highway Capacity Manual*, Special Report 209, TRB, National Research Council, Washington D.C., 1985.
2. *Highway Capacity Manual*, Special Report 209: Third Edition, TRB, National Research Council, Washington, D.C., 1994.
3. Zhang, Z., "Comprehensive Ranking Index for Flexible Pavement Using Fuzzy Set Model," *Transportation Research Record*, 1397, Transportation Research Board Washington, D.C., pp. 96-101, 1994.
4. Haas, R., and Hudson, W.R. *Pavement Management Systems*, McGraw-Hill, 1986.
5. Eads, B.S. Roupail N.M. May A.D., and Hall, F. "Freeway Facility Methodology in HCM 2000," *Transportation Research Record*, 1710
6. عامری، م.، افتخارزاده، س. ف.،. مدیریت روسازی برای راهها، فرودگاهها و پارکینگها، نشر دانشگاه علم و صنعت ایران - ۱۳۷۸.
7. Hutchinson, B.G., "Principles of Subjective Rating Scale Construction," HRB, *Research Record No. 46*, 1964.
8. Mc shane, W, R. and Roess, R.P., *Traffic Engineering*, Prentice Hall, 1990 .
9. Dowiong, R. C. "Accuracy and Performance of Improved Speed-Flow Curves," *Transportation Research Record 1646*, Transportation Research Board Washington, D.C., pp. 9-17, 1998.
10. Vaziri, M., "Traffic Flow Characteristics For Iranian Freeways," Presented at International Conference on New Horizons in Road and Road Transport. University of Roorkee. 1995
11. Dowling, R.G., Kittelson, W. Skabardonis, A., and Zengeer, J. "Techniques for Estimating Speed and Service Volumes for Planing Applications," *NCHRP Report 387*, TRB National Research Council Washington D.C., 1997.
12. Alomari, and Darter, M., "Relationships Between International Roughness Index and Present Serviceability Rating," *Transportation Research Record 1435*, Transportation Research Board Washington, D.C., pp. 130-136, 1994.
13. Brilon, W., and Ponzlet, M. "Variability of Speed Flow Relationships on German Autobahns," *Transportation Research Record 1555*, Transportation Research Board Washington D.C., pp. 91-98. 14, 1996.
14. Van Aered, M., "Analysis of Temporal and Special Variability of Free Speed Along a Freeway Segment," *Transportation Research Record 1494*, Transportation Research Board Washington, D.C. pp. 1-10, 1995.
15. Gulen, S., "Correlation of Present Serviceability Rating with International Roughness Index," *Transportation Research Record 1435*, Transportation Research Board Washington, D.C., pp. 27-37, 1994.