

تهیه دستورالعملی برای نصب حفاظ بر روی خاکریز و مقایسه اقتصادی آن در مقابل ملایم کردن شیب خاکریزها در راههای اصلی دو خطه ایران

اسماعیل آیتی و مهدی شهیدیان

چکیده: شاخصهای تعداد و شدت تصادفات ترافیکی در ایران بسیار بالا بوده و ضایعات اقتصادی ناشی از آنها سنگین است. در این میان تصادفات ناشی از انحراف وسیله نقلیه از مسیر، که منجر به برخورد با اشیاء ثابت کنار راه گردیده و یا منجر به واژگونی وسیله می شود درصد بالایی در حدود ۲۵ تا ۳۰ درصد تصادفات فوتی را شامل می شود. از طرفی علیرغم حاد بودن مشکل، منابع موجود برای برخورد با آن بسیار محدود بوده و ضرورت استفاده بهینه از منابع محدود بسیار بالا است. نرم افزار RSAP جدیدترین و نیرومندترین مدلی است که در این زمینه در سال ۲۰۰۳ در اختیار پژوهشگران قرار گرفته است. این نرم افزار قادر است که با بهره گیری از مدول های فرعی یعنی مدول انحراف، مدل پیش بینی تصادف و مدول پیش بینی شدت و در نظر گرفتن مشخصه های هندسی راه و ترافیک و شاخصهای اقتصادی، شرایط پیچیده تصمیم گیری را تجزیه و تحلیل نموده و با پیش بینی ریسک انحراف و محاسبه شدت برخورد، بهترین راه حل های اقتصادی را در وضعیت های مختلف مشخص کند. در این تحقیق، با در نظر گرفتن شرایط خاص ایران و پردازشهای مدل RSAP، نمودارهایی تهیه شده است که بر اساس آن طراحان و برنامه ریزان مسؤول در بخشهای ساخت و نگهداری راههای ایران می توانند بین گزینه های نصب حفاظ و یا ملایم نمودن شیب خاکریزها از نظر اقتصادی تصمیم گیری عملی نموده و شدت تصادفات آتی را نیز پیش بینی کنند. نتایج حاصله می تواند در تصحیح و تکمیل استانداردهای فعلی ایران نیز مورد استفاده قرار گیرد.

واژه های کلیدی: گاردریل، خاکریز، تصادف، ایران، نرم افزار RSAP.

۱. مقدمه

یکی از مواردی که استفاده از حفاظ ایمنی را ضرورت می بخشد وجود خاکریزهای با شیب تند و ارتفاع زیاد در کنار راه است. مطالعات و بررسی های به عمل آمده نشان داده است که استفاده از حفاظ ایمنی، در خاکریزهای با شیب تند و ارتفاع زیاد، اثر مثبت دارد و از شدت ضایعات حاصل از تصادفات می کاهد، این اثر، در خاکریزهای ملایم و کوتاه، منفی است. خود حفاظ، مانع و عامل خطری در کنار راه است و وجود آن، حفاظت و ایمنی را فقط به صورت نسبی فراهم می کند. بنابراین حتی در حالتی که بررسی مقطع معینی از راه، استفاده از حفاظ ایمنی را، بر اساس شیب و ارتفاع خاکریز توجیه نماید، قبل از تصمیم گیری نهایی، باید براساس یک تحلیل اقتصادی امکان ملایم کردن شیب و کم کردن ارتفاع

خاکریز را مورد مطالعه قرار داد و حتی المقدور از راه حل حذف حفاظ ایمنی استفاده کرد.

هزینه های سنگین اجتماعی ناشی از تصادفات کناری راه از یک طرف، کمبود منابع مالی و هزینه بالای نصب حفاظها از طرف دیگر، لزوم برنامه ریزی برای تخصیص بهینه منابع محدود را دوچندان نموده است.

در این تحقیق با استفاده از نرم افزار^۱ RSAP و با در نظر گرفتن مسایل ایمنی و اقتصادی، دستورالعملی برای نصب حفاظ و ملایم نمودن شیب کناره های راه، برای راههای ایران تهیه گردیده است.

۲. مروری بر تحقیقات گذشته

تحقیقات Zegeer و Council نشان می دهد که ملایم نمودن شیب های کناری راه تاثیر قابل توجهی بر کاهش تعداد تصادفات -

مقاله در تاریخ ۱۳۸۲/۷/۲۹ دریافت شده و در تاریخ ۱۳۸۳/۴/۲۰ به تصویب نهایی رسیده است.

دکتر اسماعیل آیتی دانشیار دانشکده مهندسی عمران دانشگاه فردوسی مشهد،

esmaeel@ayati.co.uk

مهدی شهیدیان کارشناس ارشد راه و ترابری، m_shahidian@yahoo.com

^۱ مدل RSAP (Roadside Safety Analysis Program) به عنوان یکی از کاملترین و نیرومندترین نرم افزارهای تحلیل تصادفات کناری راه در سال ۲۰۰۳ توسط AASHTO در کشور آمریکا ارائه شده است.

$E(AC)$: هزینه تصادف مورد انتظار؛

V : متوسط ترافیک روزانه؛

$P(E)$: احتمال یک انحراف؛ هنگامی که یک وسیله نقلیه خارج از کنترل، لبه‌سواره‌رو را قطع کند و به سمت شانه سواره‌رو کشیده شود، یک انحراف رخ داده است.

$P(A|E)$: احتمال یک تصادف به شرط رخ دادن یک انحراف؛

I_i : شاخص شدت تصادف

$P(I_i|A)$: احتمال تصادف با شدت صدمه I_i به شرط وقوع تصادف؛

$C(I_i)$: هزینه تصادف با شدت صدمه I_i ؛

n : تعداد سطوح شدت صدمه (از صفر تا ۱۰)؛

برای تخمین هزینه تصادفات، سه مدول انحراف، پیش‌بینی تصادف و شدت تصادف باید محاسبه شود که در ادامه، روش محاسبه این مدولها آورده شده است.

۳-۱-۱. مدول انحراف

مدول انحراف، با توجه به حجم ترافیک و خصوصیات هندسی راه مانند، قرارگیری افقی مسیر، قرارگیری قائم مسیر، عرض خط عبور و تعداد خطوط عبور، فراوانی انحراف وسایل نقلیه از سواره‌رو - $V \times P(E)$ - را تخمین می‌زند.

۳-۱-۲. مدول پیش‌بینی تصادف

هر انحراف وسیله نقلیه از سواره‌رو، منجر به تصادف نمی‌شود. مدول پیش‌بینی تصادف، $P(A|E)$ احتمال تصادف وسیله نقلیه منحرف شده از سواره‌رو را تخمین می‌زند. برای تخمین مدول پیش‌بینی تصادف از تکنیکهای آماری و شبیه‌سازی‌های کامپیوتری استفاده می‌شود. هر انحراف، در هر لحظه با توجه به موقعیت وسیله نقلیه در طول راه، جهت انحراف، نوع وسیله نقلیه، سرعت و زاویه وسیله نقلیه، و طول جانبی خط انحراف شبیه‌سازی می‌شود [6,7].

۳-۱-۳. مدول پیش‌بینی شدت

مدول پیش‌بینی شدت، $P(I_i|A)$ شدت هر تصادف را بر اساس نوع خطر یا مانع کناری، نوع وسیله نقلیه، سرعت برخورد، زاویه برخورد و جهت وسیله نقلیه تخمین می‌زند [6,7].

در برخورد وسیله نقلیه با حفاظ، یکی از سه حالت زیر ممکن است پیش‌آید:

- حفاظ طولی، وسیله نقلیه را با موفقیت به سمت سواره‌رو برگرداند.

- وسیله نقلیه در حفاظ نفوذ کند.

- وسیله نقلیه واژگون شود.

بسته به این که کدامیک از حالت‌های فوق رخ دهد، شدت صدمه بسیار متفاوت خواهد بود و برنامه این توانایی را دارد که با توجه به شرایط برخورد، وضعیت پس از برخورد را پیش‌بینی کند.

به ویژه تصادفاتی که فقط یک وسیله نقلیه در آن دخیل است - دارد. کاهش شیب کناری راه از ۳:۱ به ۷:۱ یا شیب ملایمتر، تعداد تصادفات را به طور یکنواخت کاهش می‌دهد. اما کاهش شیب، از ۲:۱ به ۳:۱ تعداد تصادفات را به میزان کمی کاهش می‌دهد [1].

Zegeer و همکارانش، اثر افزایش عرض آزاد جانبی و همچنین تاثیر ملایم نمودن شیب کناری راه در قوسها را بر کاهش میزان تصادفات بررسی کردند [1].

Zegeer و همکارانش برای اولویت‌بندی مکانهای نیازمند به گاردریل از روش رتبه‌بندی استفاده کرد [2].

Sicking و Wolford نمودارهای ساده‌ای را برای نصب گاردریلهای موجی شکل و کابلی، با در نظر گرفتن هندسه خاکریز و حجم ترافیک برای حفاظت خاکریزها تهیه کرده‌اند [3].

بر اساس ضوابط موجود در ایران، اگر شیب شیروانی خاکریز برابر یا ملایمتر از شیب‌های تعیین شده در جدول ۱ باشد، شیروانی خاکریز مانع خطرناک به حساب نمی‌آید، و به حفاظ نیاز ندارد [4]. در این جدول هیچ اشاره‌ای به حجم ترافیک، سرعت طرح و طول خاکریز نشده است، در حالی که در نظر گرفتن عوامل فوق ضروری است. نصب حفاظ در راههای با حجم ترافیک پایین و یا خاکریزهای با طول کوتاه عملاً غیر اقتصادی است [5].

۳. معرفی برنامه RSAP

چندین برنامه تحلیل سود - هزینه، برای ارزیابی تجهیزات ایمنی کناری راه تهیه شده، که جدیدترین آن نرم‌افزار RSAP می‌باشد که توسط آشتو (AASHTO) طراحی شده است. RSAP، از روش تحلیل هزینه-کارایی^۱، که مبتنی بر روش سود-هزینه است؛ استفاده می‌کند. نسبت سود-هزینه، B/C ، در RSAP به صورت زیر تعریف می‌شود [6, 7, 8]:

$$B / C_{2-1} = \frac{AC_1 - AC_2}{DC_2 - DC_1} \quad (1)$$

B/C : نسبت سود به هزینه گزینه ۲ نسبت به گزینه ۱

AC_1 و AC_2 : هزینه سالیانه تصادفات گزینه‌های ۱ و ۲

DC_1 و DC_2 : هزینه مستقیم سالیانه گزینه‌های ۱ و ۲

منافع، شامل تقلیل هزینه‌های ناشی از کاهش تعداد و شدت تصادف است. هزینه‌های مستقیم، شامل هزینه‌های نصب، تعمیر و نگهداری تجهیزات ایمنی می‌باشد.

۳-۱. مدل پیش‌بینی تصادف RSAP

مدل RSAP، با استفاده از معادله روبرو هزینه تصادفات را تخمین می‌زند [6, 7, 8]:

$$E(AC) = \sum_{i=1}^n V \times P(E) \times P(A|E) \times P(I_i|A) \times C(I_i) \quad (2)$$

¹ Cost-Effectiveness Analysis

جدول ۱. حداکثر ارتفاع مجاز خاکریز بدون استفاده از حفاظ [۴]

حداکثر ارتفاع مجاز خاکریز	۱:۱/۵	۲:۱	۱:۲/۵	۳:۱ یا میلایمتر
شیب شیروانی خاکریز	۱ متر	۲ متر	۳ متر	نامحدود

ترافیکی برون شهری ایران برای هر تصادف فوتی، جرحی و خسارتی به ترتیب، ۸۱۰، ۶۷ و ۵ میلیون ریال است [9]. نتایج تحلیل صورت گرفته با RSAP در نمودارهای ۴، ۵، ۶ و ۷ خلاصه شده است. مطابق این نمودارها، نصب حفاظ بر روی خاکریز با شیب ۳:۱ فقط در راههای با حجم ترافیک بسیار بالا مقرون به صرفه است و اصولاً چنین راههایی وجود ندارد. علت این امر، نزدیکی شاخص شدت گاردریل و خاکریز است. نتیجه این قسمت از تحلیل با جدول ۱، که نصب حفاظ بر روی خاکریز با شیب ۳:۱ یا میلایمتر را توصیه نمی‌کند، منطبق است.

نمودارهای ۴ و ۵، به ترتیب ضرورت استفاده یا عدم استفاده از حفاظ بر روی خاکریزهای با شیب ۱/۵:۱ و ۲:۱ را در راههای مستقیم و مسطح، نشان می‌دهد. نحوه استفاده از این نمودارها بدین شکل است که با توجه به ارتفاع خاکریز و متوسط ترافیک روزانه طرح یک نقطه بر روی نمودار مشخص می‌شود حال اگر این نقطه بالاتر از منحنی مربوط به شیب آن خاکریز قرار گرفت نشان می‌دهد که نصب حفاظ اقتصادی است.

این نمودارها نشان می‌دهد که نصب حفاظ در راههای با حجم ترافیک پایین، بر روی خاکریزهای با طول کوتاه اقتصادی نیست. قرارگیری مسیر در شیب و قوس، احتمال تصادف وسیله نقلیه با موانع کنار راه را افزایش می‌دهد. نمودارهای ۶ و ۷ ضرورت نصب حفاظ بر روی خاکریز با شیب ۱/۵:۱ و ۲:۱ را در یکی از شرایط زیر نشان می‌دهد.

قرارگیری مسیر در قوس افقی خارجی با درجه قوس ۴ یا قوس افقی داخلی با درجه قوس ۶ به بالا.

قرارگیری مسیر در شیب طولی بیش از ۶ درصد.

مقایسه نمودارهای ۴ و ۵ با ۶ و ۷ نشان می‌دهد که نیاز به نصب حفاظ در مسیرهای قوس‌دار و شیب دار به مراتب بیشتر از مسیرهای مستقیم و مسطح می‌باشد، و نصب حفاظ در حجم‌های ترافیک به مراتب پایین‌تر ضرورت می‌یابد به طوریکه:

در شرایط مشابه از لحاظ هندسه و طول خاکریز، اگر در یک مسیر مستقیم و مسطح، نیاز به نصب حفاظ در حجم ترافیک ADT ضرورت یابد، در مسیر قوس‌دار با درجه قوس خارجی ۴ یا قوس داخلی با درجه ۶، این حجم تقریباً یک چهارم و در مسیر شیب‌دار (شیب طولی ۶٪ به بالا) نصف می‌شود.

شدت تصادف، توسط کمیتی به نام شاخص شدت I_i ، تعریف می‌شود. شاخص شدت، یک مقیاس نسبی برای بیان شدت صدمه است که از صفر شروع و به ۱۰ ختم می‌شود [6,7].

هزینه تعمیر حفاظهای ایمنی، برحسب مدول پیش بینی شدت، تخمین زده می‌شود. برنامه، هزینه‌های تعمیر را با توجه به انرژی برخورد محاسبه می‌کند.

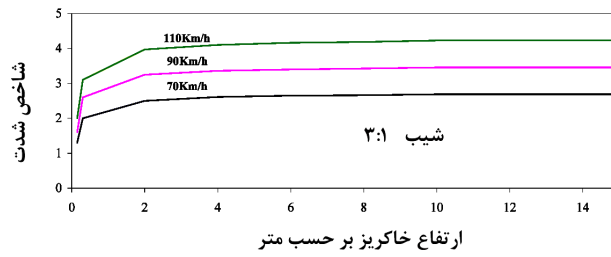
۴. محاسبه شاخص شدت خاکریزها

نصب حفاظ ایمنی، فقط زمانی ضرورت پیدا می‌کند که برخورد با آن صدمه کمتری نسبت به برخورد با اشیاء ثابت یا خروج از بستر راه داشته باشد. بنابراین، برای نصب حفاظ لازم است که شدت صدمه وارد به وسیله نقلیه در اثر برخورد با اشیاء کناری راه مشخص شود. بدین منظور، با استفاده از نرم‌افزار RSAP، متوسط شاخص شدت برای خاکریز تخمین زده شده است. شکل‌های ۱، ۲، ۳ شاخص شدت خاکریزهای مختلف را نشان می‌دهد. شاخص شدت برای گاردریل w شکل در سرعت ۱۱۰ کیلومتر در ساعت ۳/۵ بدست آمد.

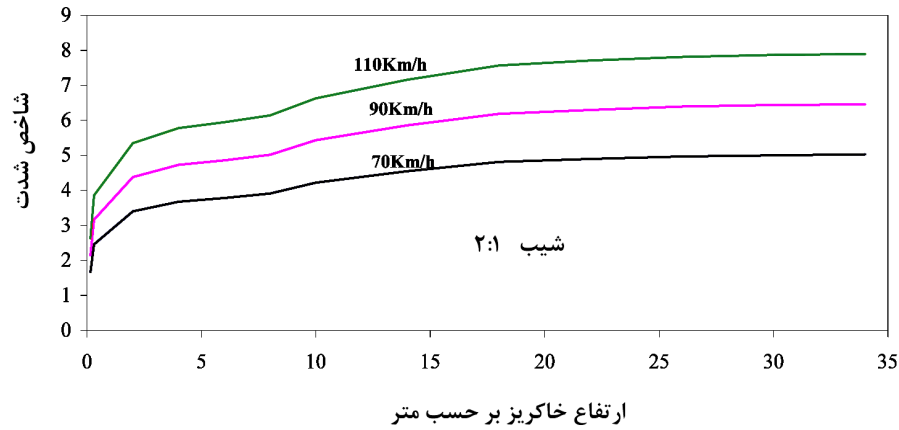
۵. تهیه نمودار راهنمای نصب حفاظ

در صورت وجود بودجه کافی، منطقی است که در هر مورد شاخص شدت برخورد با حفاظ کمتر از شاخص تصادم با مانع باشد، آن مانع توسط حفاظ ایمنی حفاظت شود. اما با توجه به کمبود بودجه، الزامی است که از بودجه تخصیص یافته با بیشترین سوددهی استفاده نمود. در این قسمت سعی بر این است که با توجه به هر دو مسأله ایمنی و اقتصاد ضوابطی را برای نصب حفاظ بر روی خاکریزها تعیین کرد.

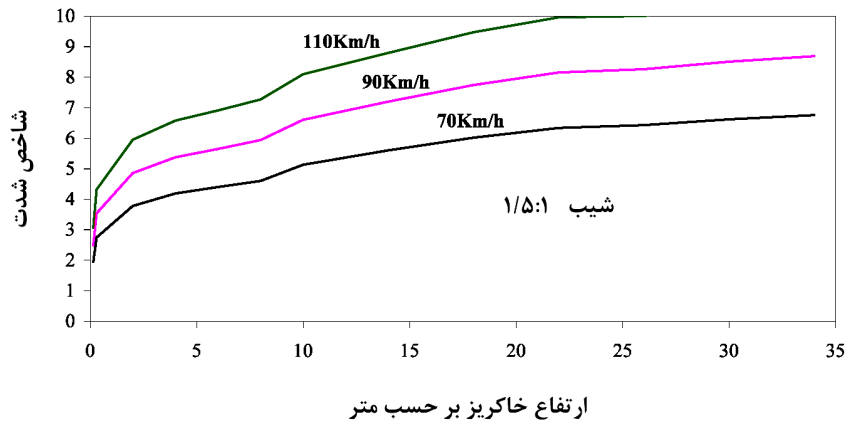
برای تهیه نمودارهای راهنمای نصب حفاظ، بیش از ۶۰۰ گزینه، شامل ترکیبات مختلف حجم ترافیک، طول، شیب و ارتفاع خاکریز در نظر گرفته شده و با استفاده از نرم‌افزار RSAP، گزینه‌ای که در آن نسبت سود به هزینه برابر با یک باشد، انتخاب شده است. در تحلیل، عمر طرح ۲۵ سال، نرخ تورم ۱۲٪، نرخ بهره (سود اوراق مشارکت) ۱۷٪، هزینه نصب هر متر گاردریل ۱۵۰ هزار ریال، نوع راه اصلی دو خطه برون شهری، عرض خط عبور ۳/۶ متر، عرض شانه راه ۱ متر، فاصله خاکریز از لبه سواره رو ۲ متر، فاصله حفاظ از لبه سواره رو ۱ متر، ترافیک غالب وسیله نقلیه سواری و محدوده سرعت ۱۰۰ کیلومتر در ساعت تعیین شده است. متوسط هزینه تصادفات



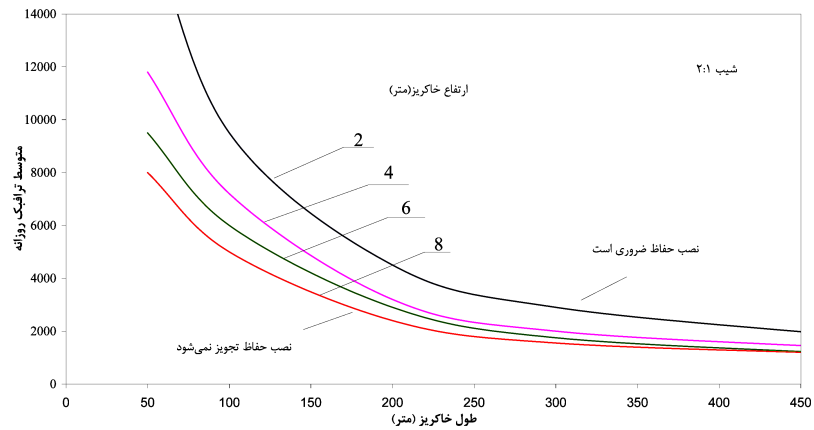
شکل ۱. شاخص شدت برای خاکریز با شیب ۳:۱



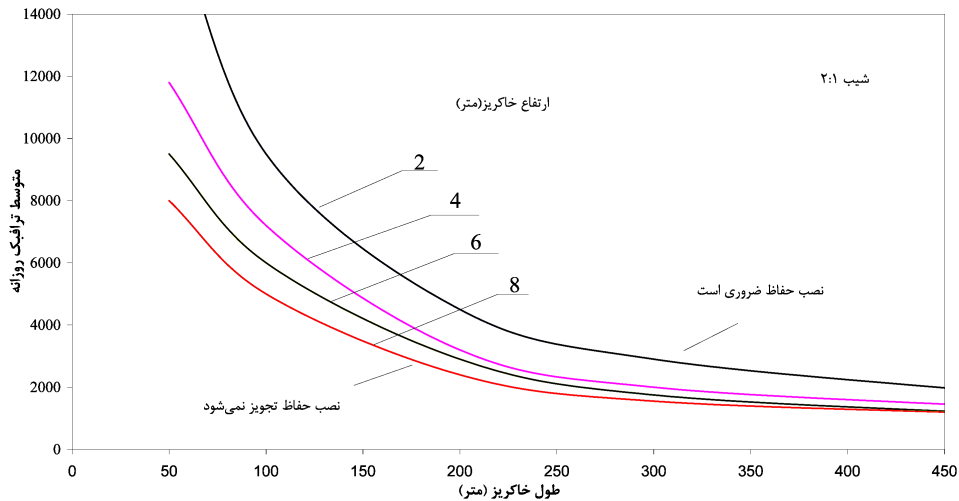
شکل ۲. شاخص شدت برای خاکریز با شیب ۲:۱



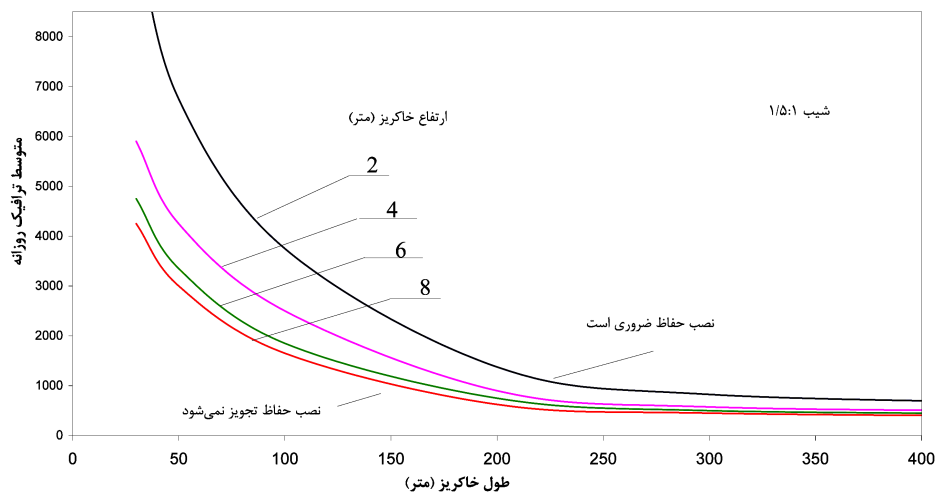
شکل ۳. شاخص شدت برای خاکریز با شیب ۱/۵:۱



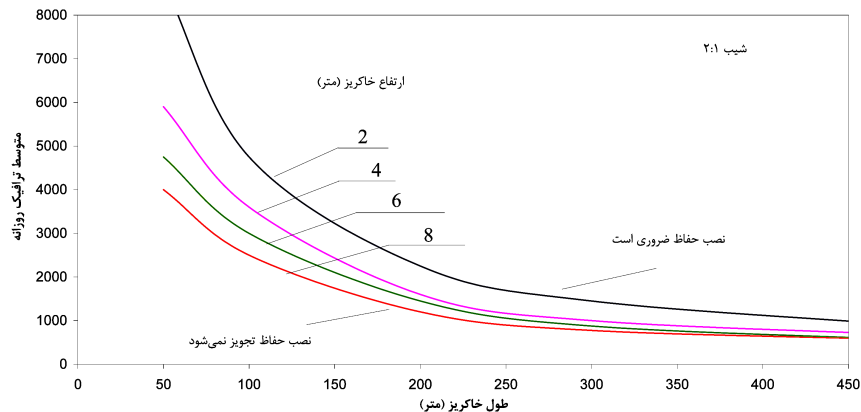
شکل ۴. نمودار راهنمای نصب حفاظ بر روی خاکریز با شیب ۱/۵:۱



شکل ۵. نمودار راهنمای نصب حفاظ بر روی خاکریز با شیب ۲:۱



شکل ۶. نمودار راهنمای نصب حفاظ بر روی خاکریز با شیب ۱/۵:۱ در قوس داخلی با ۶ درجه و قوس خارجی با ۴ درجه



شکل ۷. نمودار راهنمای نصب حفاظ بر روی خاکریز با شیب ۲:۱ در راه با شیب طولی ۶٪

و حتی المقدور از راه‌حل حذف حفاظ ایمنی استفاده کرد. تحقیقات نشان می‌دهد، وقتی که عرض آزاد جانبی راه بیشتر از ۹ متر و شیب آن کمتر از ۱:۱۰ باشد حدود ۸۰ درصد رانندگان قادر خواهند بود وسایل نقلیه منحرف شده خود را متوقف و یا به سمت جاده هدایت کنند. بنابراین حداقل عرض آزاد جانبی در راههای با سرعت بالا (بیش از ۷۰ کیلومتر در ساعت) ۹ متر می‌باشد [5].

۶. ملایم نمودن شیب کنار راه

حتی در حالتی که بررسی مقطع معینی از راه، استفاده از حفاظ ایمنی راه، براساس شیب و ارتفاع خاکریز توجیه نماید، قبل از تصمیم‌گیری نهایی، باید براساس یک تحلیل اقتصادی امکان ملایم‌کردن شیب و کم‌کردن ارتفاع خاکریز را مورد مطالعه قرار داد

برای روشن شدن مطلب حالت خاص زیر را در نظر می‌گیریم:
یک راه دوخطه اصلی جدا نشده برون شهری با متوسط ترافیک روزانه ۵۰۰۰ وسیله نقلیه در دوره طرح، سرعت طرح ۱۰۰ کیلومتر در ساعت، عرض خط عبور ۳/۶ متر، عرض شانه راه ۱ متر و هزینه عملیات ملایم نمودن شیب ۱۵ هزار ریال بر مترمکعب. پنج گزینه زیر را برای ارتقاء ایمنی راه در نظر می‌گیریم و در چهار گزینه ارتقاء ایمنی، ۹ متر عرض آزاد جانبی فراهم می‌کنیم:

A1: شرایط فعلی (انجام هیچ کار)

A2: تبدیل شیب ۳:۱ به ۴:۱

A3: تبدیل شیب ۳:۱ به ۶:۱

A4: تبدیل شیب ۳:۱ به ۸:۱

A5: تبدیل شیب ۳:۱ به ۱۰:۱

هزینه سالانه تصادفات، هزینه همسنگ تسطیح سالانه و نسبت‌های منفعت به هزینه در جدول ۲ آورده شده است. مشاهده نسبت‌های منفعت به هزینه ممکن است به انتخاب گزینه A2 بینجامد. زیرا نسبت مربوط به آن بیشترین مقدار را دارد. گزینه درست را باید با استفاده از اصل تحلیل سرمایه‌گذاری اضافی انتخاب کرد. در این حال، هزینه‌های اضافی در صورتی از نظر اقتصادی مطلوب هستند که منافع اضافی حاصل از آنها، بیشتر از مخارج اضافی باشد. برای مقایسه نسبت منفعت به هزینه سرمایه‌گذاری اضافی در گزینه‌های مختلف، باید آنها را به ترتیب صعودی هزینه مرتب کرد. استفاده از این قواعد تصمیم‌گیری برای گزینه‌های بیان شده در جدول ۲ نشان می‌دهد که مطلوبترین گزینه A5 است نه A2. محاسبات نسبت‌های منفعت به هزینه اضافی در جدول ۳ خلاصه شده است.

حال به محاسبات لازم برای دستیابی به نتایج جدول ۳ می‌پردازیم. از آنجا که گزینه هیچ کار به عنوان یک گزینه امکان‌پذیر در نظر گرفته شده است، اولین مقایسه بین گزینه دارای کمترین هزینه با گزینه A1 انجام می‌شود. بنابراین ابتدا باید A2 را با A1 مقایسه کرد:

$$BC_{A2-A1} = \frac{15408 - 8971}{1736 - 0} = 3.71 \quad (3)$$

از آنجا که این نسبت منفعت به هزینه بزرگتر از ۱ است، گزینه A2 بر گزینه A1 برتری دارد. بنابراین گزینه هیچ کار حذف، و گزینه A2 به عنوان بهترین گزینه فعلی در نظر گرفته می‌شود. سپس، باید تعیین کنیم که آیا در صورت انجام گزینه A3، منافع اضافی حاصل از آن، مخارج اضافی را توجیه می‌نماید یا نه؟ بنابراین گزینه A3 را با گزینه A2 به صورت زیر مقایسه می‌کنیم:

$$BC_{A3-A2} = \frac{8971 - 5548}{3447 - 1736} = 2 \quad (4)$$

نسبت منفعت به هزینه اضافی بیشتر از ۱ است؛ بنابراین گزینه A2 حذف و گزینه A3 به عنوان بهترین گزینه فعلی باقی می‌ماند.

هزینه عملیات ملایم نمودن شیب بسیار متغیر و تابع شرایط محل، جنس خاک و هزینه حمل و نقل خاک می‌باشد. در این قسمت بر آنیم، با توجه به حجم ترافیک، شیب و ارتفاع خاکریز، بر اساس قیمت‌های سال ۱۳۸۲ حداکثر هزینه تمام شده تسطیح عملیات یک متر مکعب شیب را به نحوی محاسبه کنیم که نسبت سود به هزینه در دو گزینه زیر برابر با یک شود:

- نصب حفاظ در یک متری لبه سواره رو، برای حفاظت از خاکریزی که ۲ متر از لبه سواره رو فاصله دارد.

- گسترش عرض جانبی از ۲ متر به ۹، در واقع در این گزینه بدون نصب حفاظ، فقط قسمتی از شیب تسطیح شده است.

قابل ذکر است که تحلیل با RSAP صورت گرفته است.

نمودارهای ۸ و ۹، حداکثر هزینه تسطیح عملیات یک متر مکعب شیب را برای خاکریزهای با شیب ۲:۱ و ۱:۱/۵ را نشان می‌دهد. برای نمونه، اگر در راهی با حجم ترافیک ۶۰۰۰ وسیله نقلیه در روز، هزینه عملیات تسطیح یک مترمکعب شیب کمتر از ۱۰۶۰۰۰ ریال باشد، می‌توان به جای نصب حفاظ بر روی خاکریز با شیب ۱:۲ و ارتفاع ۲ متر، عرض آزاد جانبی را گسترش داد. قابل ذکر است که رقم ۱۰۶۰۰۰ ریال برای هر مترمکعب شیب رقم بسیار بالایی است و در بسیاری از مکانها، هزینه تسطیح شیب بسیار ارزانتر تمام می‌شود. بنابراین در خاکریزهای با ارتفاع کم، تسطیح شیب، سودمندتر از نصب حفاظ است.

حال تحلیل خود را با این فرض ادامه می‌دهیم که هزینه نصب حفاظ و هزینه تسطیح شیب یکسان باشد. در واقع ما به دنبال این هستیم که نسبت منفعت به هزینه را در دو حالت زیر تعیین کنیم:

حالت اول:

- شرایط موجود: خاکریز با شیب ۱:۱/۵ و ارتفاع ۲ متر که در فاصله ۲ متری از لبه سواره رو قرار گرفته است.

- گزینه اصلاحی: گسترش فاصله آزاد جانبی از ۲ به ۹ متر.

حالت دوم:

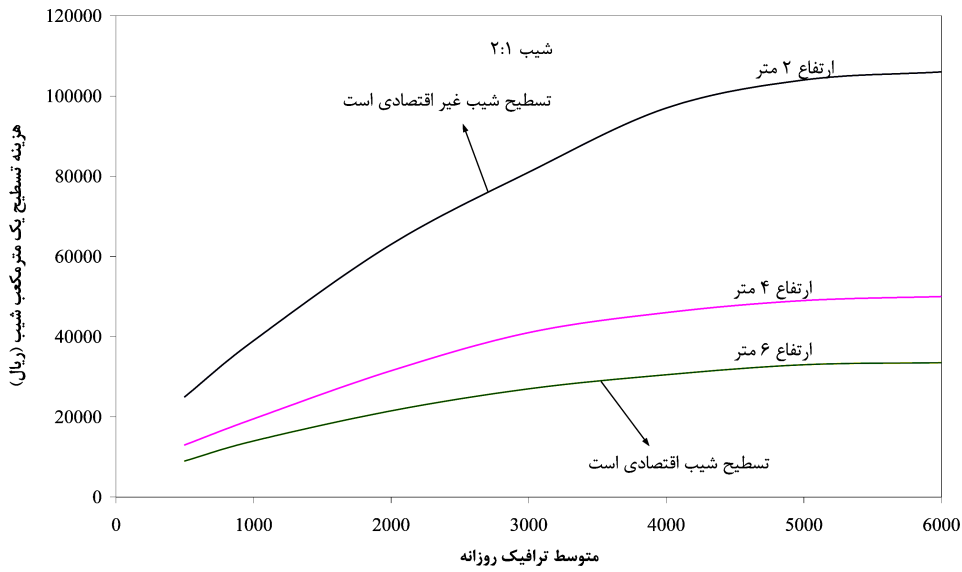
- شرایط موجود: خاکریز با شیب ۱:۱/۵ و ارتفاع ۲ متر که در فاصله ۲ متری از لبه سواره رو قرار گرفته است.

- گزینه اصلاحی: نصب گاردریل.

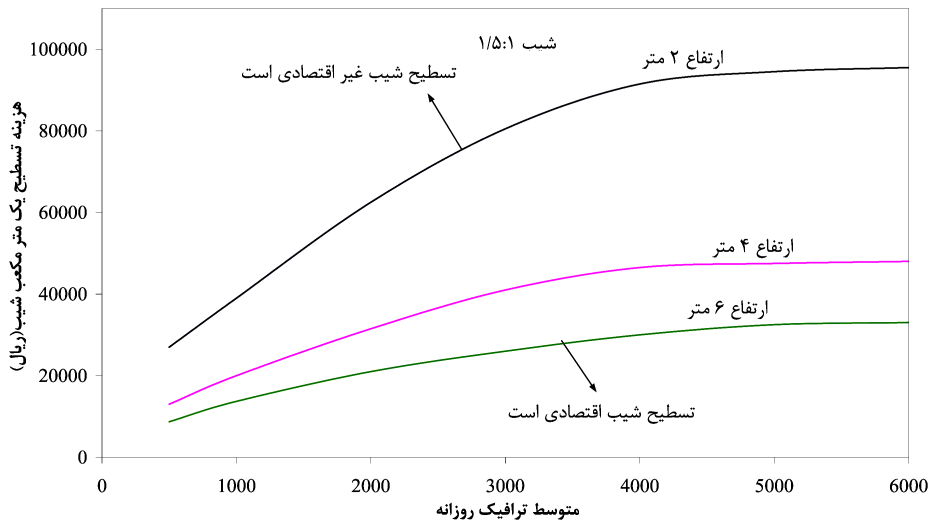
شکل ۱۰، نسبت منفعت به هزینه را در دو حالت فوق نشان می‌دهد. نسبت منفعت به هزینه در حالت اول به مراتب بالاتر است و با توجه به این که هزینه‌های نصب حفاظ و تسطیح شیب را یکسان در نظر گرفته‌ایم، تسطیح شیب، نسبت به نصب حفاظ هزینه تصادفات را حدود ۲/۵ برابر بیشتر کاهش می‌دهد.

نتایج بدست آمده در قسمت قبل نشان داد که نصب حفاظ ایمنی بر روی خاکریزهای با شیب ۳:۱ یا ملایمتر غیر اقتصادی است. حال به دنبال امکان ملایم کردن اقتصادی این شیب‌ها هستیم.

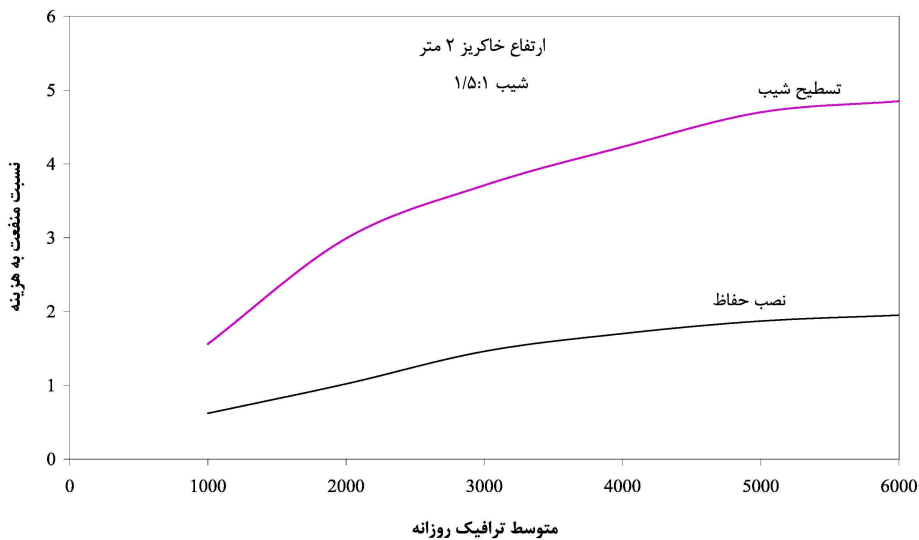
اکنون به دنبال این هستیم که بهینه‌ترین شیبی را که شیب ۳:۱ می‌تواند به آن تبدیل شود، پیدا کنیم.



شکل ۸. نمودار راهنمای تسطیح شیب ۲:۱



شکل ۹. نمودار راهنمای تسطیح شیب ۱/۵



شکل ۱۰. مقایسه نسبت منفعت به هزینه در دو گزینه نصب حفاظ و تسطیح شیب

جدول ۲. نسبت‌های منفعت - هزینه برای چهار گزینه

گزینه	هزینه سالانه تصادفات (هزار ریال)	هزینه تسطیح همسنگ سالانه (هزار ریال)	نسبت منفعت- هزینه
A1	۱۵۴۰۸	۰	-
A2	۸۹۷۱	۱۷۳۶	۳/۷۱
A3	۵۵۴۸	۳۴۴۷	۲/۸۶
A4	۴۳۸۲	۴۳۳۷	۲/۵۴
A5	۳۷۷۸	۴۸۷۷	۲/۳۸

جدول ۳. نسبت‌های منفعت - هزینه اضافی

گزینه	منافع افزایشی سالانه (هزار ریال)	هزینه‌های افزایشی سالانه (هزار ریال)	نسبت منفعت- هزینه	تصمیم
A1-A2	۶۴۳۷	۱۷۳۶	۳/۷۱	انتخاب A2
A2-A3	۳۴۲۳	۱۷۱۱	۲	انتخاب A3
A3-A4	۱۱۶۶	۸۹۰	۱/۳۱	انتخاب A4
A4-A5	۶۰۴	۵۴۰	۱/۱۲	انتخاب A5

- شیب ۴:۱، اگر هزینه تمام شده یک مترمکعب تسطیح شیب ۲۹۶۰۰ تا ۵۶۰۰۰ ریال باشد.
نمودار ۱۲ انتخاب شیب بهینه را برای مسطح کردن شیب ۴:۱ میسر می‌سازد.

۷. نتیجه گیری

در این تحقیق دستورالعملی برای نصب حفاظ و ملایم نمودن شیب کناره‌های راه، با در نظر گرفتن مسایل ایمنی و اقتصاد، برای راههای ایران تهیه گردید. بر اساس نتایج بدست آمده، می‌توان مکانهای نیازمند به حفاظ را اولویت بندی کرد. خلاصه نتایج بدست آمده از این تحقیق عبارت است از:

- نصب حفاظ در راههای با حجم ترافیک پایین، بر روی خاکریزهای با طول کوتاه اقتصادی نیست.
- نیاز به نصب حفاظ در مسیرهای قوس‌دار و شیب دار به مراتب بیشتر از مسیرهای مستقیم و مسطح می‌باشد. در شرایط مشابه از لحاظ هندسه و طول خاکریز، اگر در یک مسیر مستقیم و مسطح، نیاز به نصب حفاظ در حجم ترافیک ADT ضرورت یابد، در مسیر قوس‌دار با درجه قوس خارجی ۴ یا قوس داخلی با درجه ۶، این حجم تقریباً یک چهارم و در مسیر شیب‌دار (شیب طولی ۶٪ به بالا) نصف می‌شود.
- در بسیاری از مکانها، مخصوصاً خاکریزهای با ارتفاع کم، ملایم نمودن شیب خاکریزها، سودمندتر از نصب حفاظ می‌باشد. بنابراین،

سپس، گزینه A4 را با گزینه A3 به صورت زیر مقایسه می‌کنیم:

$$BC_{A4-A3} = \frac{5548 - 4382}{4337 - 3437} = 1.31 \quad (۵)$$

در این حالت نسبت منفعت به هزینه اضافی بیشتر از ۱ است؛ بنابراین گزینه A4 بر گزینه A3 برتری دارد. گزینه A4 به عنوان بهترین گزینه فعلی باقی می‌ماند.

حال گزینه A5 را با گزینه A4 مقایسه می‌کنیم:

$$BC_{A5-A4} = \frac{4382 - 3778}{4877 - 4337} = 1.12 \quad (۶)$$

از آنجا که نسبت منفعت به هزینه اضافی برای این مقایسه، بزرگتر از ۱ است، گزینه A5 برتر از گزینه A4 است. بنابراین گزینه A5 به عنوان بهترین گزینه فعلی در نظر گرفته می‌شود.

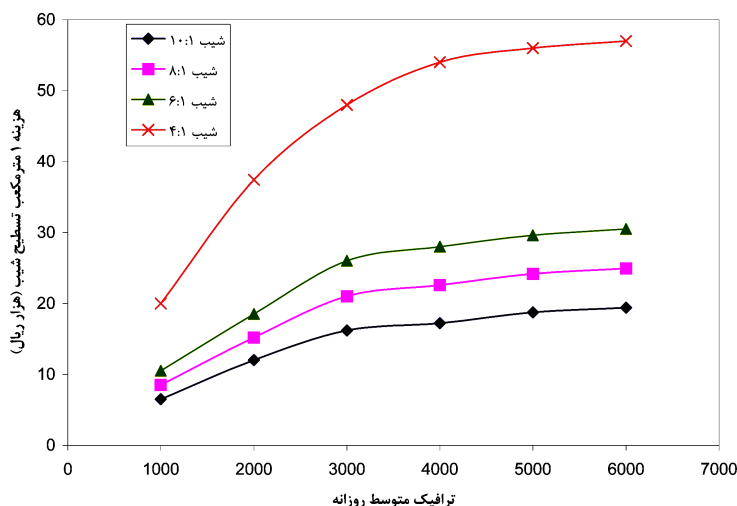
نتیجه بدست آمده در بالا برای یک حالت خاص بود، اکنون، شیب بهینه را برای هزینه‌ها و حجم‌های مختلف ترافیک پیدا می‌کنیم. با انجام مراحل بالا برای هزینه‌ها و حجم‌های ترافیک مختلف، نمودار ۱۱ بدست می‌آید.

به عنوان مثال، اگر متوسط ترافیک روزانه ۵۰۰۰ وسیله نقلیه باشد، شیب بهینه یکی از گزینه‌های زیر است:

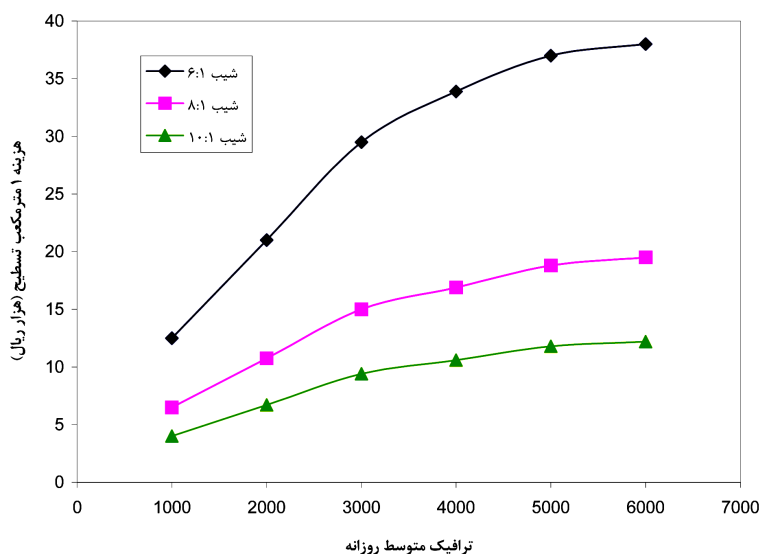
- شیب ۱۰:۱، اگر هزینه تمام شده یک مترمکعب تسطیح شیب کمتر از ۱۸۷۵۰ ریال باشد.

- شیب ۸:۱، اگر هزینه تمام شده یک مترمکعب تسطیح شیب ۱۸۷۵۰ تا ۲۴۱۷۰ ریال باشد.

- شیب ۶:۱، اگر هزینه تمام شده یک مترمکعب تسطیح شیب ۲۴۱۷۰ تا ۲۹۶۰۰ ریال باشد.



شکل ۱۱. انتخاب شیب بهینه کنار راه با ملایم کردن شیب ۳:۱



شکل ۱۲. انتخاب شیب بهینه کنار راه با ملایم کردن شیب ۴:۱

[۴] آیین‌نامه طراحی راه‌های شهری، بخش ۱۲، تجهیزات ایمنی راه، وزارت مسکن و شهرسازی، ۱۳۷۵.

[5] *Roadside Design Guide*, AASHTO, Washington, D.C., 2002.

[6] King K.Mak And Dean L.Sicking, "Roadside Safety Analysis Program Engineer's Manual", NCHRP 492, Transportation Research Board, Washington D.C.2003.

[7] King K.Mak, Dean L.Sicking, and Karl Zimmerman, "Roadside Safety Analysis Program A Cost-Effectiveness Analysis Procedure", TRB, 1647, 1998.

[8] Snehmay Khasnabis and Kenneths. Opiela, "Roadside Safety Analysis Program as a Tool for Economic Evaluation of Roadside Safety Projects", TRB, 1690, 1999.

حتی در حالتی که بررسی مقطع معینی از راه، استفاده از حفاظ ایمنی راه، براساس شیب و ارتفاع خاکریز توجیه نماید، قبل از تصمیم‌گیری نهایی، باید براساس یک تحلیل اقتصادی امکان ملایم‌کردن شیب و کم‌کردن ارتفاع خاکریز را مورد مطالعه قرار داد و حتی‌المقدور از راه‌حل حذف حفاظ ایمنی استفاده کرد.

مراجع

[1] Zegeer C.V and Council FM, "Safety Effectiveness of Highway Design Features". Volume 3, Cross Sections. 23p. (FHWA. Washington, D.C).

[2] Zegeer, C.V., J. Hummer, D. Reinfurt, L. Herf, and W. Hunter, *Safety Effects of Cross Section Design for Two-Lane Roads*, Report No. FHWA/RD-87/008, 1987.

[3] Wolford Dan and L.Sicking Dean, "Guardrail Need Embankments and Culverts", TRB, 1599, 1997.

[9] Ayati. E and Young .W, “*Estimation of The Cost of Rural Road Crashes in a Developing Country*”, Traffic Engineering