بررسی خطرآفرینی خیابان‌های شهر رودهن در زمان یخ‌زدگی

حسن سرپرست، غلامحسین رستگارنسب، مهرداد آقایاری سامیان، احسان فاطمی‌پور
دبیرستان استعدادهای درخشان شهید بهشتی رودهن، آموزش‌وپرورش منطقه رودهن

چکیده

رودهن شهری است واقع در دامنه‌های رشته‌کوه البرز؛ همراه با خیابان‌هایی با شیب تند. در روزهای عادی این شیب تند خطر جدی ایجاد نمی‌کند اما در روزهای سرد زمستانی، که سطح جاده‌ها یخ می‌زند و ضریب اصطکاک ایستایی کاهش می‌یابد، قابلیت خطرآفرینی این جاده‌ها نیز برای خودروها افزایش می‌یابد. در این مقاله سعی شده است تا با تعیین آستانهٔ شیب خطرناک برای جاده‌های یخ‌زده، خطرآفرینی تعدادی از جاده‌های این شهر برای خودروها مورد بررسی قرار گیرد.

کلیدواژه‌ها: نیروی اصطکاک، اصطکاک جنبشی، اصطکاک ایستایی، شیب

مقدمه

شهر رودهن بر روی کوهپایه‌ای از رشته‌کوه البرز واقع شده است، همراه با خیابان‌هایی با شیب تند که عمدهٔ بارش آن در فصل زمستان به صورت برف بوده و بسیاری از روزهای زمستان سطح معابر این شهر یخ‌زده و لغزنده است. شیب تند بسیاری از خیابان‌ها و کوچه‌ها و ضریب اصطکاک ایستایی کوچک بین لاستیک ماشین‌ها و سطح جاده‌ها موجب کاهش ایمنی خودروها و بعضاً بروز حوادث ناخواسته اما قابل پیشگیری می‌گردد.

در این پژوهش سعی شده است با انجام دادن چند آزمایش مختلف و تعیین ضریب اصطکاک ایستایی بین لاستیک اتومبیل و سطح جاده یخ‌زده و محاسبه شیب زمین، میزان خطرآفرینی این جاده‌ها را بررسی کنیم و به این پرسش پاسخ دهیم که: «چه تعداد از جاده‌های مورد بررسی رودهن (که به‌صورت نمونه انتخاب شده‌اند) در مقابل یخ‌زدگی معابر ناامن هستند؟»

شرح مسئله

به منظور بررسی میزان خطرآفرینی جاده‌های یخ‌زده و ضریب اصطکاک ایستایی بین لاستیک اتومبیل‌ها و سطح یخ‌زدهٔ جاده‌ها باید ابتدا عوامل مؤثر و نیز غیرمؤثر بر ضریب اصطکاک ایستایی مشخص و سپس با انتخاب یک نمونه لاستیک و سطح یخی نمونه حد یا آستانهٔ خطرناکی این جاده‌ها توسط آزمایش تعیین شود. سپس با بررسی‌ها و اندازه‌گیری‌های میدانی درصد جاده‌های ناامن مورد بررسی مشخص شود.

بررسی رابطهٔ ضریب اصطکاک ایستایی به جرم جسم و سطح تماس جسم نشان می‌دهد که ضریب اصطکاک ایستایی به جرم جسم و سطح تماس جسم بستگی چندانی ندارد.[۱]

همچنین با توجه به رابطهٔ نیروی اصطکاک ایستایی بیشینه (f_{s_Max}) و نیروی عمودی سطح (N) یعنی رابطه زیر:

$$f_{s\text{-}Max} = \mu_S N \qquad (۱)$$

در می‌یابیم که مقدار نیروی اصطکاک ایستایی با نیروی عمودی سطح رابطه مستقیم دارد.

بررسی رابطهٔ ضریب اصطکاک ایستایی و شیب سطحی که جسم روی آن قرار دارد نشان می‌دهد ضریب اصطکاک ایستایی به شیب خط بستگی دارد و با آن برابر است:

[۲] و [۳] و [٤]

$$\mu_s = \tan\alpha \qquad (۲)$$

ضریب اصطکاک ایستایی بین سطح جاده و سطح لاستیک به عوامل زیر بستگی دارد.

۱. شیب متغیر جاده در قسمت‌های مختلف آن (عدم یکنواختی شیب سطح آسفالت)

۲. وضعیت ظاهری جاده (شامل نوع آسفالت یا نوع یخ یا برف روی آن)

۳. لاستیک ماشین (شامل نوع لاستیک، شکل آج‌ها، درصد ساییدگی آن‌ها و...)

٤. جهت قرار گرفتن اتومبیل روی سطح قسمت‌های مختلف جاده. (نحوهٔ درگیری آج لاستیک اتومبیل با سطح یخی)

۵. میزان فشار هوای داخل تایر اتومبیل

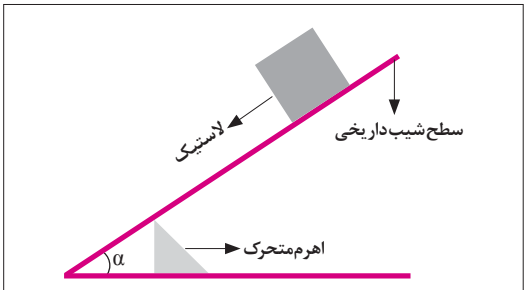
در این مقاله سعی شد تا با تعیین ضریب اصطکاک ایستایی بیشینهٔ بین یک نمونه لاستیک رادیال ایرانی از نوع کویر تایر با حدود ۶۰ درصد آج (نمونه) و سطح یخی (نمونه) که با انجماد آب در فریزر یخچال تشکیل شده است (نه یخ ناشی از برف تحت فشار)، ابتدا آستانه یا حد خطرآفرینی جاده با تعیین حداکثر شیب مجاز مشخص گردد و سپس مرحله میدانی انجام گیرد، این مقادیر با طراحی و انجام آزمایش زیر به‌دست آمد.

آزمایش

عنوان آزمایش: تعیین ضریب اصطکاک ایستایی بین لاستیک (نمونه) و یخ (نمونه)

وسایل مورد نیاز: یک قالب یخ ـ یک تکه لاستیک اتومبیل برش خورده (نمونه) ـ اهرم متحرک ـ خط‌کش میلی‌متری

نحوهٔ انجام آزمایش: ظرف حاوی یخ را روی سطح کاملاً افقی می‌گذاریم و زیر آن گوه‌ای چوبی به‌عنوان اهرم متحرک قرار می‌دهیم تا به آسانی بتواند زیر ظرف جابه‌جا شود.



شکل ۱. تصویر ساده‌ای از نحوهٔ بررسی ضریب اصطکاک ایستایی

نقطه‌ای ثابت به فاصلهٔ ۲۶۴ میلی‌متر از زیر ظرف یخ مشخص و آن را به‌عنوان مبنای ثابت برای تعیین ضلع افقی و ارتفاع یک نقطهٔ ثابت علامت خورده روی سطح شیب‌دار از این نقطه را در هر بار انجام آزمایش تعیین و درون جدولی درج می‌کنیم.

جدول شماره ۱: ضریب اصطکاک ایستایی بین لاستیک و یخ

شماره آزمایش	ضلع افقی (mm)	ضلع عمودی (mm)	$\tan\alpha$	اندازهٔ زاویهٔ α	ضریب اصطکاک ایستایی (μ_s)
۱	۲۶۴	۴۲	۰/۱۵۹	۹/۰۳۴	۰/۱۵۹
۲	۲۶۴	۳۶	۰/۱۳۶	۰/۷۴۵	۰/۱۳۶
۳	۲۶۴	۳۷	۰/۱۴۰	۷/۹۷۰	۰/۱۴۰
۴	۲۶۴	۳۶	۰/۱۳۶	۷/۷۴۵	۰/۱۳۶
میانگین					۰/۱۴۳

شکل ۲. چگونگی تعیین ضریب اصطکاک ایستایی بین سطح لاستیک (نمونه) و سطح یخی (نمونه)

نتیجهٔ جدول بالا نشان می‌دهد در صورتی که شیب جاده‌ای از ۰/۱۴۳ بیشتر یعنی زاویهٔ آن بیشتر از ۸/۱۳۸ درجه باشد، آن جاده خطرناک و غیرایمن خواهد بود.

برای بررسی عملی سراغ اندازه‌گیری‌ها و محاسبات میدانی رفته و شیب تعدادی از جاده‌ها را اندازه می‌گیریم.

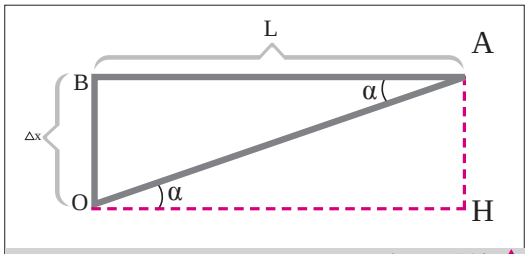
اندازه‌گیری‌ها و محاسبات میدانی

به منظور اندازه‌گیری شیب جاده‌ها و تعیین جاده‌های با شیب خطرناک، پس از آماده‌سازی وسایل و ابزار مورد نیاز و انتخاب چند جاده، کوچه و خیابان نسبتاً پرتردد از شهر رودهن، به سطح شهر مراجعه کردیم و براساس نظریهٔ ارائه شده به اندازه‌گیری میدانی در سطح شهر پرداختیم. برای انجام کار به وسایل زیر نیاز داشتیم.

وسایل مورد نیاز: یک تخته بلند (حداقل ۲ متری)ـ متر نواری (خط‌کش میلی‌متری) ـ تراز (بنایی) ـ چند قطعه چوب با قطرهای متفاوت ـ ترازوی فنری ـ جک آزمایشگاهی

تئوری کار

مطابق شکل شماره ۳ و ۴، شیب جاده برابر $\tan\alpha$ و برابر $\frac{AH}{OH}$ است. چون تعیین مقدار AH عملاً بسیار دشوار است، (زیرا امکان کندن زمین و اندازه‌گیری AH در هر نقطه مورد بررسی وجود ندارد) پس مثلثی شبیه مثلث AOH (که در زیر زمین تشکیل می‌شود) به‌وسیله تخته چوب به‌طول L و پایه در روی سطح زمین ایجاد کردیم (مثلث AOB). که در آن تخته چوب را موازی سطح افقی زمین قرار دادیم.



شکل ۳. شیب جاده

با فرض: $\Delta X = OB$: با چیدن آجر یا قرار دادن پایه یا جک آزمایشگاهی در زیر تخته به‌دست می‌آید.

$L = AB$ طول تخته چوبی

و با توجه به اینکه AB موازی OH و خط OA مورب است پس:

$$B\hat{A}O = A\hat{O}H = \alpha \qquad (۳)$$

$$\tan\alpha = \frac{\Delta x}{L} = \frac{OB}{AB}$$

رابطهٔ بالا نحوهٔ اندازه‌گیری شیب جاده را نشان می‌دهد.

شکل ٤. نحوهٔ اندازه‌گیری شیب جاده

با انتخاب چند نمونه از جاده‌ها و خیابان‌های (نسبتاً پرتردد مطابق جدول شمارهٔ ۲) شهر رودهن، شیب آن‌ها اندازه گرفته شد و نتایج حاصل، در جدول شماره ۲ درج گردید.

جدول شماره ۲ــ شیب تعدادی از جاده‌ها و معابر شهر رودهن (سطرهای خاکستری نشان‌دهندهٔ جاده‌های با شیب خطرناک است)

آدرس جاده	L (mm)	ΔX (mm)	tanα	α(o)
جادهٔ اصلی ـ بالاتر از شهرداری ـ جنب مجتمع سران (قسمت بالا)	۱۲۱۲	۱۸۰	۰/۱٤۸٥	۸/٤٤۷
جادهٔ اصلی ـ بالاتر از شهرداری ـ جنب مجتمع سران (قسمت پایین)	۱۲۱۲	۲۸٦	۰/۲۳٦۰	۱۳/۲۷۹
انتهای بلوار لاله صحرا	۱۲۱۲	۳۹	۰/۰۳۲۲	۱/۸٤٤
بلوار لاله صحرا (مقابل گلبرگ ۱۱)	۱۲۱۲	۱٤٥	۰/۱۱۹٦	٦/۸۲۰
بلوار لاله صحرا (روبه‌روی گلبرگ ۱٤)	۱۲۱۲	۷۱	۰/۰٥۸٦	۳/۳٥٤
بلوار لاله صحرا (روبه‌روی پارک امیرکبیر)	۱۲۱۲	۱۱۸	۰/۰۹۷٤	٥/٥٦۳
بلوار لاله صحرا (نرسیده به گلبرگ ۳)	۱۲۱۲	۱٦٦	۰/۱۳۷۰	۷/۸۰۱
بلوار لاله صحرا (روبه‌روی خیابان چمران)	۱۲۱۲	۸٦	۰/۰۷۱۰	٤/۰٦۱
خیابان چمران ـ کوچه ایمان (مقابل مدرسه سجادیان)	۱۲۱۲	۲۷٥	۰/۲۲٦۹	۱۲/۷۸٤
بلوار امامت (روبه‌روی کوچه امام علی (ع))	۱۲۱۲	۱۰٦	۰/۰۸۷٥	٥/۰۰۱
بلوار امامت (روبه‌روی مدرسهٔ شهید بهشتی)	۱۲۱۲	۹٥	۰/۰۷۸٤	٤/٤۸۳
بلوار امامت (مقابل امامت ۱٤)	۱۲۱۲	۸۰	۰/۰٦٦۰	۳/۷۷٦
بلوار امامت (مقابل امامت ٥)	۱۲۱۲	۷٥	۰/۰٦۱۹	۳/٥٤۲
کوچه متصل‌کنندهٔ گلبرگ ۱٤ و گلبرگ ۱٦	۱۲۱۲	۱۷۲	۰/۱٤۱۹	۸/۰۷٦
انتهای بلوار امیرکبیر	۱۲۱۲	۱۷۰	۰/۱٤۰۳	۷/۹۸٦
بلوار امیرکبیر (مقابل گلبرگ ٦)	۱۲۱۲	۷۰	۰/۰٥۷۸	۳/۳۰۸
خیابان چمران (بالاتر از مدرسه)	۱۲۱۲	۲۱۰	۰/۱۷۳۳	۹/۸۳۲
خیابان چمران (محل اتصال با بلوار لاله صحرا)	۱۲۱۲	۱۹٦	۰/۱٦۱۷	۹/۱۸٥
بلوار لاله صحرا گلبرگ ۱٤	۱۲۱۲	۸۰	۰/۰٦٦۰	۳/۷۷٦

برای تعیین شیب جاده‌ها در جدول شماره۲ مراحل زیر به ترتیب طی شده است.

۱. تخته چوب بلندی با اندازه ثابت و مشخص ($L = ۱۲۱۲$ mm) روی زمین گذاشته شد و روی آن تراز قرار گرفت.

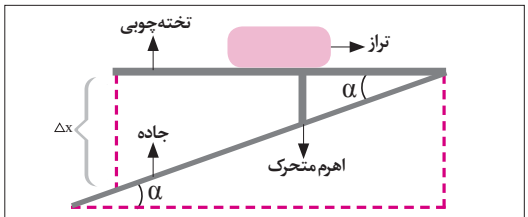
۲. تکه چوبی به عنوان اهرم متحرک به منظور تراز کردن سطح افقی تخته چوب، زیر آن قرار گرفت.

۳. آن قدر اهرمِ زیر تختهٔ چوبی جابه‌جا شد تا تختهٔ چوبی با سطح افق کاملاً تراز شد.

٤. به‌وسیلهِ خط‌کش میلی‌متری، Δx اندازه گرفته شد.

٥. چون شیب جاده برابر است با $\frac{\Delta x}{L}$ مقدار شیب جاده در هر مورد تعیین و در جدول شماره ۲ درج شد.

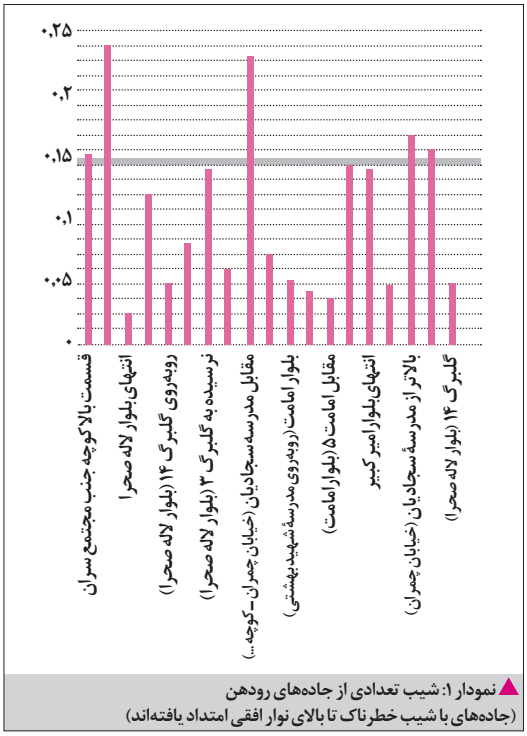
٦. مقدار زاویهٔ α نیز با توجه به جدول مقادیر مثلثاتی تعیین و در جدول ثبت شد.



شکل٥. نحوهٔ اندازه‌گیری شیب جاده

مقایسهٔ نتیجهٔ آزمایش انجام شده برای تعیین ضریب اصطکاک ایستایی بیشینه (که آن را معادل ۰/۱٤۳ به‌دست آوردیم) به همراه محاسبات مربوط به تعیین شیب جاده‌های رودهن (در جدول شماره ۲) مشخص نمود که از بین ۱۹ مورد جاده و خیابان انتخاب شده به‌صورت نمونه در شهر رودهن ٥ مورد آن‌ها دارای شیبی بیشتر از ۰/۱٤۳ هستند (سطرهای خاکستری رنگ در جدول ۲ و میله‌های بلندتر از خط افقی در نمودار ۱)، یعنی حدود ۲٦ درصد از جاده‌های پرترددی که به‌صورت نمونه انتخاب شده‌اند، به‌عنوان جاده‌های غیرایمن و خطرآفرین در روزهای سرد و یخزده تشخیص داده شدند.

چون ضریب اصطکاک جنبشی سطح یخی کمتر از ضریب اصطکاک ایستایی بیشینه است (این موضوع در طی آزمایش‌های مربوط به اندازه‌گیری ضریب اصطکاک ایستایی بیشینه بین لاستیک و سطح یخی بسیار تکرار شد زیرا اندک افزایش نیروی جلو برنده که موجب غالب آمدن نیروی جلوبرنده بر نیروی اصطکاک ایستایی بیشینه می‌شد موجب حرکت قطعه لاستیک روی سطح یخی و افزایش سرعت آن می‌شد که نشان‌دهندهٔ کوچک‌تر بودن ضریب اصطکاک جنبشی بین سطح لاستیک و سطح یخی نسبت به ضریب اصطکاک ایستایی بیشینه است). عبارت بالا بدان معناست که اگر در زمان یخزدگی این معابر پر خطر، اتومبیلی در این جاده‌ها متوقف یا حتی کنار آن پارک شده باشد، کوچک‌ترین



نمودار ۱: شیب تعدادی از جاده‌های رودهن (جاده‌های با شیب خطرناک تا بالای نوار افقی امتداد یافته‌اند)

لـرزش موجب حرکت آن‌ها می‌شـود و امکان متوقف کردن آن‌ها نیز میسـر نخواهد بود و همچنین ورود وسایل نقلیه‌ای که (با توجه به شرایط تعیین شده) ضریب اصطکاک ایستایی بین لاستیک آن‌ها و سطح یخی کمتر از ۰/۱۴۳ باشد به این جاده‌ها، بسـیار خطرناک و توقف آن‌ها غیرممکن خواهد بود. نکته حائز اهمیت در تمامی این محاسبات و اندازه‌گیری‌ها آن اسـت که همواره فرض شده است که سطح آسفالت جاده‌ها کاملاً پوشـیده از یخ باشـد با این فرض به‌نظر می‌رسـد نوع پوشـش آسـفالت جاده زیر یخ تأثیر چندانی بر نوع پوشش یخی روی آن نداشـته باشد. همچنین هر چند در این مقاله حـد یا آسـتانهٔ خطر آفرینی جـادهٔ یخزده (شـیب ۰/۱۴۳) از طریق انجام آزمایش، شبیه‌سـازی و تعیین شـده است و فرض‌های عدم بستگی ضریب اصطکاک ایستایی به مساحت سـطح تماس و جرم جسـم (یا اتومبیل) اعمال شده است و بـا این فرض، آزمایـش، با یک قطعه لاسـتیک (نمونه) جلو رفته اسـت و به عدد ۰/۱۴۳ برای آسـتانهٔ شـیب خطرناک جادهٔ یخزده رسـیده است و عوامل بسیار دیگری نظیر میزان فشـار باد داخل لاستیک، نوع پوشـش واقعی یخ روی سطح جـاده، اثر هیدروپلانینـگ (آب پیمایـش) و... نادیده گرفته شـده اسـت (که هر یک از آن‌ها می‌تواند جزء خطاهای این آزمایش و دسـتیابی به نتیجهٔ قابل استناد برای محاسبات و اندازه‌گیری‌های میدانی بعدی باشد)، با وجود این نویسندگان مقاله سعی کرده‌اند تا با بررسی موضوع در حالتی خاص (برای نوع خاصی از لاستیک، نوع خاصی از یخزدگی، شرایط خاص هوایی و سـطح جادهٔ یخزده و...) از تأثیر عوامل بالا در خطای محاسبات تا حد امکان کم کنند تا اعتبار کلی مقاله همچنان محفوظ بماند.

نتیجه‌گیری

برای جسمی که روی یک سطح شیب‌دار در وضعیت آستانه حرکت قرار گرفته است، بین ضریب اصطکاک ایستایی سطح و شیب سطح رابطهٔ زیر برقرار است:

$$\mu_S = \tan\alpha \qquad (۲)$$

که در آن μ_S نشان‌دهندهٔ ضریب اصطکاک ایستایی بین جسم و سطح و α زاویهٔ شیب سطحی است که جسم روی آن قرار دارد. کاربرد رابطهٔ بالا برای تعیین ضریب اصطکاک ایستایی یخ نتایج زیر را به همراه دارد:

الف. بررسی ضریب اصطکاک ایستایی بین سطح یخی نمونه و یک قطعه لاستیک نمونه (تعیین شده توسط آزمایش) نشان می‌دهـد ضریب اصطکاک ایسـتایی بین سـطح یخی و قطعه لاستیک نمونه انتخابی (براساس جدول شماره ۱) برابر ۰/۱۴۳ است که این مقدار می‌تواند به‌عنوان آستانه یا حد شیب خطرناک برای سطح جاده‌های یخزده مورد استناد قرار گیرد.

ب. همچنین رابطهٔ ۲ در بالا نشان می‌دهد در صورتی که بتوان مقدار شیب سطحی که جسـم روی آن در آستانهٔ حرکت قرار گرفته است را به شیوه‌ای تعیین کرد، در واقع مقدار به‌دست آمده برابر ضریب اصطکاک ایستایی بیشینه مربوط به آن سطح خواهد بود. بر این اساس با تعیین شیب هر جادهٔ فرضی (در شهر رودهن یا هر شهر و نقطهٔ دیگر) و مقایسهٔ آن با ضریب اصطکاک ایستایی بین یخ و لاستیک (نمونهٔ انتخابی) به ایمن بودن آن جاده برای توقف یا حرکت اتومبیل‌ها و خودروها پی‌برد.

پ. نتایـج حاصل از اندازه‌گیری شـیب تعـدادی از جاده‌های رودهن و مقایسهٔ آن با ضریب اصطکاک ایستایی بین سطح یخزدهٔ این جاده‌ها و لاسـتیک (نمونه و انتخابی) نشان می‌دهد (طبق نمودار ۱) حدود ۲۶ درصد از جاده‌های پرتردد مورد بررسـی (۵ مورد از ۱۹ مورد) دارای شیبی بیش از ۰/۱۴۳ (ضریب اصطکاک ایستایی بیشینه یخ و سطح لاستیک نمونه) هستند و امکان تداوم حالت سکون برای خودروهایی که روی این سطوح هستند وجود ندارد و با اندک لرزش یا ضربه‌ای شروع به حرکت خواهند کرد و علاوه بر این با توجه به کوچک‌تربودن ضریب اصطکاک جنبشی از ضریب اصطکاک ایسـتایی، امکان توقف خودروهای در حال تردد بر روی این سطوح نیز وجود نخواهد داشت.

ت. چون در بسـیاری از موارد تعیین یا برآورد شـیب جاده به روش مشاهده‌های عینی مشکل یا غیر ممکن است، می‌توان با مشخص کردن جاده‌های خطرناک و ثبت‌داده‌ها و نتایج حاصل، اطلاعات را در اختیار شهرداری‌ها قرار داد تا مأموران شهرداری‌ها با نصب تابلوهای هشداردهنده در ورودی‌های این معابر رانندگان را از وضعیت شیب و احیاناً خطرآفرین بودن آن مسیر مطلع و با معرفی مسیرهای جایگزین، از بروز حادثه و وقوع سانحه در زمان یخزدگی معابر جلوگیری کنند.

منابع

۱. پورقاضی؛ اعظم، شیوایی؛ سیدمهدی، عزیزی؛ حسن، محمود زاده؛ غلامعلی، **فیزیک ۲ و آزمایشگاه نظری (رشته‌های علوم تجربی ـ ریاضی فیزیک)**، نشر راندگار نوین، (۱۳۸۷)، ۸۶ ـ ۸۱.

۲. احمدی؛ احمد، پورقاضی؛ اعظم، خلیلی بروجنی؛ روح‌الله، زال‌پور؛ ابوالقاسم، شیوایی؛ سیدمهدی، فراهانی؛ شیرین، عزیزی؛ حسن، محمودزاده؛ غلامعلی، **فیزیک (۱) و (۲) ـ دورهٔ پیش‌دانشگاهی، رشتهٔ علوم ریاضی**، شرکت چاپ و نشر کتاب‌های درسی ایران، (۱۳۸۳)، ۴۹ ـ ۳۸.

3. Halliday; David, Resnick; Robert, Fundamentals of physics, John Weily & Sons Inc, Vol. l, (1981), 79 - 83

4. Jones; Edvin, Childers; Richard,contemporary college physics, McGraw - Hill companies Inc., (1999), 123 - 127.