ISSN 2783-2805

نشریه مهندسی عمران فردوسی

فصلنامه علمی

شماره پیاپی ۳۶

پیش‌بینی ایمنی ترافیک با استفاده از روش بهینه‌سازی گروه ذرات و ماشین راهنمای -پشتیبان ۱
محمود عامری- حمید بیگدلی راد - حمید شاکر - امیرحسین عامری
سید امیر سعادتجو - سعید فاطمی - سید علی ضیائی

کاربرد زمین آمار در شناسایی محل‌های با پتانسیل بالای فرار آب در سد تنگاب ۱۵
رضا دهشیبی - رضا جهانشاهی - مرتضی مظفری - امین عصاری

ارزیابی خواص مکانیکی مخلوط‌های آسفالتی حاوی مواد افزودنی ضد عریان‌شدگی گریپر، تراگریپ و وتمول۹۵۰- ۳۱
افشار یوسفی عباسعلیلو - وشیار محمدحسن - علیرضا سقایی
پویان ایار - محمود عامری

ارائه مدل جریان عبوری عابران‌پیاده در تسهیلات پیاده شهری با استفاده از الگوریتم‌های فراابتکاری (مطالعه موردی: شهر رشت) ۴۵
سیدابراهیم عبدالمنافی- ترمه ودادی گرگری
سید امیر سعادتجو - سعید فاطمی - سید علی ضیائی

بررسی رفتار چرخه‌ای دیوار برشی فولادی با شیارهای شیبدار ۵۵
احسان نعیمی حامی صفار- هاشم شریعتمدار

ارائه مدل پیش‌بینی شاخص وضعیت روسازی با استفاده از مقادیر شاخص بین‌المللی ناهمواری مطالعه موردی آزادراه‌های منتخب ایران ۶۹
سیدعظیم حسینی- مسعود صبائی - سید امیر سعادتجو
سید سعید فاطمی - سید علی ضیائی

سال ۳٤، شماره ٤
زمستان، ۱٤۰۰

نشریه مهندسی عمران فردوسی

ISSN : 2008-7454

سردبیر : محمدرضا اصفهانی

مدیر مسئول: فریدون ایرانی

صاحب امتیاز : دانشگاه فردوسی مشهد

هیئت تحریریه :

دکتر محمدرضا اصفهانی	استاد، دانشگاه فردوسی مشهد، گروه مهندسی عمران
دکتر فریدون ایرانی	استاد، دانشگاه فردوسی مشهد، گروه مهندسی عمران
دکتر کاظم بدو	استاد، دانشگاه ارومیه، دانشکده مهندسی
دکتر جعفر بلوری بزاز	دانشیار، دانشگاه فردوسی مشهد، گروه مهندسی عمران
دکتر احمد پویا	استاد، Ecole des Ponts Paris tech
دکتر سید محمود حسینی	استاد، دانشگاه فردوسی مشهد، گروه مهندسی عمران
دکتر ناصر حافظی مقدس	استاد، دانشگاه فردوسی مشهد، دانشکده علوم پایه
دکتر سیداحسان سیدی حسینی نیا	دانشیار، دانشگاه فردوسی مشهد، گروه مهندسی عمران
دکتر شهناز دانش	دانشیار، دانشگاه فردوسی مشهد، گروه عمران
دکتر غلامرضا رخشنده رو	استاد، دانشگاه شیراز، دانشکده راه و ساختمان
دکتر محمدحسین سبط	استاد، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، دانشکده مهندسی عمران
دکتر فرزاد شهابیان مقدم	استاد، دانشگاه فردوسی مشهد، گروه مهندسی عمران
دکتر امیر کاووسی	استاد، دانشگاه تربیت مدرس، دانشکده مهندسی، گروه راه و ترابری
دکترحسین گنجی دوست	استاد، دانشگاه تربیت مدرس، دانشکده مهندسی، گروه راه و ترابری
دکتر محمود فغفور مغربی	استاد، دانشگاه فردوسی مشهد، گروه مهندسی عمران
دکتر فریدون مقدس نژاد	استاد، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، دانشکده مهندسی عمران
دکتر محمدرضا کیانوش	استاد، University of Ryerson

ویراستار ادبی : دکتر یوسف بینا

مسئول دفتر نشریه : تکتم هوشمند

ویرایش و صفحه آرایی : سیده عاطفه نوعی باغبان-تکتم هوشمند

این نشریه در کتابخانه منطقه‌ای علوم و تکنولوژی شیراز (ISC) نمایه می‌شود. http://www.srlst.com

نشانی: مشهد- دفتر نشریه - دانشکده مهندسی - دانشگاه فردوسی مشهد - صندوق پستی : ۱۱۱۱-۹۱۷۷۵

تلفاکس : ۳۸۸۰۶۰۲۴-۰۵۱ پست الکترونیکی : **ejour@um.ac.ir** وب سایت : **http://civil-ferdowsi.um.ac.ir**

چاپ : چاپخانه دانشگاه فردوسی مشهد

فهرست مطالب

پیش‌بینی ایمنی ترافیک با استفاده از روش بهینه‌سازی گروه ذرات و ماشین راهنمای پشتیبان	محمود عامری- حمید بیگدلی راد حمید شاکر - امیرحسین عامری سید امیر سعادتجو - سعید فاطمی سید علی ضیائی	۱
کاربرد زمین آمار در شناسایی محل‌های با پتانسیل بالای فرار آب در سد تنگاب	رضا دهشیبی - رضا جهانشاهی مرتضی مظفری - امین عصاری	۱۵
ارزیابی خواص مکانیکی مخلوط‌های آسفالتی حاوی مواد افزودنی ضد عریان‌شدگی گریپر، تراگریپ و وتمول-۹۵۰	افشار یوسفی عباسعلیلو - وشیار محمدحسن - علیرضا سقایی پویان ایار - محمود عامری	۳۱
ارائه مدل جریان عبوری عابران‌پیاده در تسهیلات پیاده شهری با استفاده از الگوریتم‌های فراابتکاری (مطالعه موردی: شهر رشت)	سیدابراهیم عبدالمنافی- ترمه ودادی گرگری سید امیر سعادتجو سعید فاطمی - سید علی ضیائی	٤٥
بررسی رفتار چرخه‌ای دیوار برشی فولادی با شیارهای شیبدار	احسان نعیمی حامی صفار هاشم شریعتمدار	٥٥
ارائه مدل پیش‌بینی شاخص وضعیت روسازی با استفاده از مقادیر شاخص بین‌المللی ناهمواری مطالعه موردی آزادراه‌های منتخب ایران	سیدعظیم حسینی- مسعود صبائی سید امیر سعادتجو - سید سعید فاطمی سید علی ضیائی	٦٩

DOI: 10.22067/jfcei.2022.73920.1092

پیش‌بینی ایمنی ترافیک با استفاده از روش بهینه‌سازی گروه ذرات و ماشین راهنمای پشتیبان*

مقاله پژوهشی

محمود عامری[۱] حمید بیگدلی راد[۲] حمید شاکر[۳] امیرحسین عامری[٤] سید امیر سعادتجو [٥] سعید فاطمی [٦] سید علی ضیائی[۷]

چکیده *تصادفات جاده‌ای و تلفات ناشی از آن یکی از چالش‌های کنونی جوامع بشری است که هزینه‌های اقتصادی زیادی را بر اقتصاد کشورها تحمیل نموده است. با توجه به اطلاعات مربوط به ایمنی ترافیک در مطالعات پیشین، تعیین برنامه‌ریزی ایمنی ترافیک با پیش‌بینی افزایش تصادفات رانندگی، بسیار حائز اهمیت می‌باشد. مدل های شبکه عصبی استفاده شده در این زمینه دارای خلاءهایی همچون ضعف در نقاط با تعداد تصادفات صفر و تفاوت نتایج در هر بار آزمایش می‌باشند، در این مطالعه به‌منظور حل مشکلات شبکه عصبی پس انتشار، یک روش جدید که ترکیب بهینه‌سازی گروه ذرات و ماشین راهنمای پشتیبان (PSO-SVM) می‌باشد با هم ترکیب می شوند تا به منظور پیش‌بینی ایمنی ترافیک مورد استفاده قرار گیرد. ابتدا عوامل مؤثر بر ایمنی ترافیک و شاخص‌های ارزیابی مورد تجزیه‌وتحلیل قرار می‌گیرند، سپس مدل پیش‌بینی ایمنی ترافیک توسط بهینه سازی گروه ذرات و ماشین راهنمای پشتیبان باتوجه به عوامل مؤثر ایجاد می شود. در نهایت، داده‌های مربوط به ایمنی ترافیک از سال ۱۳۷٦ تا ۱۳۹۷ برای تحقیق در مورد توانایی پیش‌بینی روش پیشنهادی بکار گرفته می شوند. نتایج تجربی نشان می‌دهد که پیش‌بینی ایمنی ترافیک توسط بهینه سازی گروه ذرات و ماشین راهنمای پشتیبان برتر از شبکه عصبی پس انتشار است. مقادیر میانگین مطلق خطا برای پیش‌بینی تعداد تصادفات توسط بهینه‌سازی گروه ذرات و ماشین راهنمای پشتیبان و شبکه عصبی پس انتشار به ترتیب مقادیر ۰/۰۲۸۱ و ۰/۰٤۹۸ را به خود اختصاص دادند. مدل‌های ساخته شده در این مطالعه دارای نوسانات بیشتری نسبت به داده‌های مشاهده می‌باشند، بنابراین می‌توان به‌منظور تنظیم مدل‌های مذکور، مدل‌های دقیق‌تری ایجاد نمود. میزان خطا در مدل های مربوط به تعداد مجروحین کمتر از داده‌های تعداد تصادفات و تلفات می‌باشد، که می‌توان علت این موضوع را به تعداد داده‌های بیشتر مربوط دانست.*

واژه‌های کلیدی شبکه عصبی، بهینه‌سازی گروه ذرات و ماشین راهنمای پشتیبان، ایمنی ترافیک، پس انتشار.

مقدمه

در سال‌های اخیر پیشرفت وسایل نقلیه موتوری در حمل‌ونقل جاده‌ای، تغییراتی را ایجاد نموده و منافع بی‌شماری برای جوامع بشری به ارمغان آورده‌اند، اما این منافع با خسارت‌های سنگین مربوط به کشته و مجروح شدن انسان‌ها در جاده‌ها همراه بوده است. تصادفات رانندگی هم‌زمان با پیشرفت صنعت خودرو باعث افزایش مشکلات اقتصادی و به دنبال آن آسیب‌های جسمی، روحی و روانی و معلولیت انسان‌های بی‌شماری می‌گردد [1,2]. تصادفات و تلفات انسانی ازجمله عوارض ناخوشایند، توسعه ناموزون تکنولوژی حمل‌ونقل می‌باشند. لازمه موفقیت سیاست‌های ایمنی و تضمین‌کننده کارایی اقدامات پیشگیرانه، به‌کارگیری نتایج مطالعات و تحقیقات علمی در خصوص ایمنی راه می‌باشد. ازجمله ابزارهای مؤثر و مفید در این زمینه مدل‌های فراابتکاری می‌باشند. مدل از یک‌سو ابزاری است جهت توصیف، توضیح و یا پیش‌بینی یک پدیده معین و از سوی دیگر می‌تواند جهت ترکیب و یکپارچه‌سازی اثرات متغیرهای تصمیم‌گیری بکار گرفته شود. تصادفات جاده‌ای در ایران رو به افزایش است و سالانه خسارات مالی، جانی و اجتماعی سنگین و در بسیاری از موارد غیرقابل جبرانی بر دوش جامعه و مردم قرار می‌دهد. با پیشرفت سریع تکنولوژی، پایگاه داده‌هایی با صدها و هزاران ویژگی در زمینه‌های شناسایی الگو، داده‌کاوی، یادگیری ماشین و غیره به وجود آمده است [3]. SVM یکی از روش‌های یادگیری

* تاریخ دریافت مقاله۱٤۰۰/۹/۸ و تاریخ پذیرش آن ۱٤۰۰/۱۰/۲۹ می‌باشد.

(۱) نویسنده مسئول: استاد، گروه راه و ترابری، دانشکده عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران.
Email: ameri@iust.ac.ir
(۲) دانشجوی دکتری حمل و نقل، دانشکده عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران.
(۳) دانشجوی دکتری راه و ترابری، دانشکده عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران.
(٤) دانش آموخته کارشناسی ارشد راه و ترابری، دانشکده عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران.
(٥) دانشجوی دکتری راه و ترابری، دانشکده عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران.
(٦) دانشجوی دکتری راه و ترابری، دانشگاه فردوسی مشهد.
(۷) استادیار، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد.

با نظارت (برچسب گذاری شده) است که از آن برای طبقه‌بندی استفاده می‌کنند. این روش ازجمله روش‌های نسبتاً جدیدی است که در سال‌های اخیر کارایی خوبی نسبت به روش‌های قدیمی‌تر ازجمله شبکه‌های عصبی پرسپترون داشته است. مبنای کاری دسته‌بندی کننده SVM (Support Vector Machine) دسته‌بندی خطی داده‌ها است و در تقسیم خطی داده‌ها سعی می شود خطی انتخاب شود که حاشیه اطمینان بیشتری داشته باشد [4]. روش بهینه‌سازی ازدحام ذرات یک روش محاسباتی می‌باشد که مسئله را با تلاش‌های مکرر، جهت بهبود یک‌راه حل کاندید با توجه به معیار کیفیت مفروض، بهینه می‌کند. PSO یک مسئله را با داشتن مجموعه‌ای از راه‌حل‌های کاندید، بهینه می‌کند و این ذرات را درون یک فضای جستجو توسط فرمول‌های ریاضی ساده برای محاسبه موقعیت و سرعت ذره، حرکت می‌دهد. حرکت هر ذره تحت تأثیر بهترین موقعیت شناخته‌شده محلی می‌باشد، که درعین‌حال به سمت بهترین موقعیت‌های شناخته‌شده در کل فضای جستجو (که با پیدا شدن موقعیت‌های بهتر توسط ذرات، جایگزین می‌شوند) هدایت می‌شود. این روند موجب حرکت گروه به سمت بهترین راه‌حل‌ها می‌گردد[5] . این ذرات در فضای پاسخ حرکت می‌کنند و نتایج حاصله بر مبنای «ملاک شایستگی» پس از هر بازه زمانی محاسبه می‌شود. باگذشت زمان، ذرات به سمت ذراتی که دارای ملاک شایستگی بالاتری هستند و در گروه ارتباطی یکسانی قرار دارند، شتاب می‌گیرند [6, 7]. زمانی که موقعیت‌های بهتر کشف می‌شوند، به هدایت حرکات گروه می‌پردازند. این فرایند تکراری ادامه می یابد و با انجام آن می‌توان به نتیجه مطلوب امید داشت، اما نمی‌توان این مقوله را تضمین کرد، که یک‌راه حل مناسب بدست آید [8].

با توجه به پژوهش های انجام یافته در زمینه پیش بینی ایمنی ترافیک، امروزه اکثر روش های پیش بینی ایمنی ترافیک به روش های پارامتری، غیرپارامتری و ترکیبی تقسیم می شوند. در اغلب روش‌های پیش‌بینی پارامتری با استفاده از مدل های رگرسیون، مدل حداکثر شباهت و مدل‌های سری زمانی داده‌های گذشته مدل شده و ایمنی ترافیک چند گام بعد پیش بینی می‌گردد[9]. از مزایای این روش‌ها می توان به ساده بودن مدل پیش‌بین اشاره نمود و بزرگ‌ترین عیب اغلب این روش‌ها وابستگی آنها به میزان بسیار زیاد داده‌های تاریخی و همچنین عملکرد ضعیف آنها در حضور خطا، اغتشاش و تغییرات شدید و ناگهانی تصادفات ترافیکی است[10]. در روش های پیش بینی غیر پارامتری وقایع خاص ترافیکی مثل تراکم یا وقوع تصادف در جاده، با دقت بیشتری قابل پیش بینی می باشند. پیچیده بودن مدل و وابستگی شدید آنها به حجم زیاد داده از معایب عمده این روش ها هستند. از مشهورترین روش های غیر پارامتری که برای پیش‌بینی ایمنی ترافیک مورد استفاده قرار گرفته است می‌توان به شبکه‌های عصبی، مدل نزدیک‌ترین همسایه و مدل SVM اشاره کرد. معمولاً هرکدام از روش های فوق فقط در شرایط خاصی از ترافیک جواب خوبی را ارائه می‌کنند و درصورت تغییر شرایط ترافیکی، نسبت به این تغییرات غیرمقاوم بوده و بازدهی بالایی در پیش‌بینی جریان ترافیک نخواهند داشت [11]. در سال های اخیر محققان برای افزایش دقت پیش‌بینی که خلاء مطالعات می‌باشد، از ترکیب خطی و یا غیرخطی روش‌های پیش‌بینی پارامتری و غیرپارامتری استفاده نموده و روش‌های پیش‌بینی ترکیبی را ابداع نموده اند [12] که میزان دقت آنها بستگی به نوع عملیات ترکیب و نوع روش‌های پارامتری و غیرپارامتری استفاده شده دارد. از جمله روش‌های ترکیبی در ایمنی ترافیک روش PSO-SVM (Partial Swarm Optimization) بوده که در حوزه‌های مختلف مهندسی ترافیک از جمله ایمنی ترافیک استفاده شده است [13].

در سال‌های گذشته، با بهبود وضعیت ساخت جاده و افزایش حضور خودروهای امدادی سیار و استفاده از مسیرهای مختلف، میزان تصادفات رانندگی روندی نسبتا نزولی داشته است [14-17]. این امری مهم است که برنامه‌ریزی ایمنی ترافیک توسط پیش‌بینی تصادفات رانندگی بر اساس داده‌های ایمنی در سال‌های گذشته تعیین شود [18-20]. شبکه‌های عصبی مصنوعی، به‌ویژه شبکه عصبی پس انتشار، روش‌های رایج پیش‌بینی ایمنی ترافیک هستند. بااین‌حال خلاء موجود در مطالعات پیشین آن است که روش شبکه عصبی پس انتشار، به دلیل اشکالات ذاتی این روش، مانند به دام افتادن در نقاط بهینه‌سازی محلی، دچار مشکل خواهد شد[21-24] . ماشین راهنمای پشتیبان (SVM) یک نوع روش یادگیری ماشین است که می‌تواند برای حل مشکل پیش‌بینی با نمونه‌های کوچک و غیرخطی استفاده شود [25, 26]. بزرگ‌ترین مشکلی که در ساخت مدل SVM اتفاق می‌افتد این است که چگونه مقادیر پارامتر آموزشی روش SVM انتخاب شود و همچنین این موضوع که تنظیمات پارامتر نامناسب منجر به پیش‌بینی ضعیف می‌شوند[27-29]. حال مسئله اساسی تحقیق آن است که به چه روشی می‌توان این خلاء ها را پر و نقایص را

مرتفع نمود. بنابراین به دنبال پاسخ آن در ادامه مطالعه می‌باشیم. اگر اثر قابل‌توجهی از پارامترها بر روی عملکرد کلی روش SVM را در نظر بگیرید؛ از بهینه‌سازی گروه ذرات برای جستجوی پارامترهای SVM در فضای جهانی استفاده می‌شود [30]. این تکنیک از رفتارهای اجتماعی مانند مهاجرت پرندگان و پرورش ماهی گرفته‌شده است که می‌تواند به‌طور مؤثری راه‌حل‌های بهینه یا نزدیک به بهینه را در فضاهای جستجو پیدا کند [31, 32]. در این مطالعه هدف آن است که با ترکیب PSO – SVM به عنوان روشی نوین ضعف شبکه های عصبی پوشش داده شود و دقت محاسبات افزایش داده شود. لذا در این مطالعه روش موردنظر برای نخستین بار بر روی حجم بالایی از داده ها در ایران انجام گرفت و البته این مدل برای هر ۳ مورد تعداد تصادفات، تعداد تلفات و تعداد مجروحین پیاده سازی شده است. از جمله عوامل موثر در مدل مذکور مطابق با مطالعات محققین دیگر عبارتند از دوربین های کنترل سرعت [33]، تعداد مراکز امداد جاده‌ای [34]، جمعیت [35]، نفر-کیلومتر جابجا شده [36] و نسبت خودروهای مسافری به باری [37].

روش تحقیق

در این مطالعه رویکرد جدید که بهینه‌سازی گروه ذرات و ماشین بردار پشتیبان (PSO - SVM) را ترکیب می‌کند، برای پیش‌بینی ایمنی ترافیک ارائه‌شده است. ابتدا، عوامل مؤثر بر ایمنی ترافیک $\{(x_i, y_i)\}_i^n$ و شاخص‌های ارزیابی مورد تجزیه‌وتحلیل قرار می‌گیرند، سپس مدل پیش‌بینی ایمنی ترافیک توسط PSO - SVM با توجه به عوامل مؤثر ایجادشده است. داده‌های مربوط به ایمنی ترافیکی در کشور (شامل تعداد تصادفات، تلفات و مجروحین) از ۱۳۷۶ تا ۱۳۹۷ برای تحقیق بر روی توانایی پیش‌بینی روش پیشنهادی، که در آن داده‌های مربوط به سال‌های ۱۳۷۶ تا ۱۳۹۰ به‌عنوان داده‌های آموزشی مورداستفاده قرار می‌گیرند و داده‌های مربوط به سال‌های ۱۳۹۱ تا ۱۳۹۷ به‌عنوان داده‌های آزمایش مورداستفاده قرار می‌گیرند. مجموعه‌ای از داده‌ها را در نظر بگیرید که در آن x_i متغیر ورودی، y_i مقدار تابع هدف متناظر [38, 39] می باشد. تابع $f(x)$ با استفاده از یک تابع خطی در فضای ویژگی نشان داده‌شده است:

$$f(x) = N.q(x) + k \qquad (۱)$$

که در آن N بردار وزن و k نشان‌دهنده میزان تمایل است.

مسئله بهینه‌سازی حل‌شده توسط SVM می‌تواند به‌صورت رابطه‌ی (۲) فرموله شود:

$$\min \quad \frac{1}{2}\|N\|^2 + C\sum_{i=1}^{N}(\delta_i + \delta_i^*) \qquad (۲)$$

$$\text{s.t.} \quad y_i - N.q(x) - k \le \varepsilon + \delta_i$$

$$N.q(x) + k - y_i \le \varepsilon + \delta_i^*$$

$$\delta_i \ge 0, \quad \delta_i^* \ge 0$$

که در آن C>۰ است و مبادله بین ریسک تجربی و دوره تناوب را تعیین می‌کند. δ و δ^* دو متغیر منقطع مثبت هستند که انحراف $(y_i - f(x_i))$ از مرزهای منطقه غیر حساس ε را اندازه‌گیری می‌کنند.

با ایجاد تابع لاگرانژ، مسئله دوگانه را می‌توان به‌صورت رابطه‌ی (۳) به دست آورد:

$$\max \quad -\frac{1}{2}\sum_{ij=1}^{N}(L_i + L_i^*)(L_j + L_j^*)\,k(x_i, x_j) + \sum_{i=1}^{N} y_i(L_i + L_i^*) - \varepsilon\sum_{i=1}^{N}\varepsilon(L_i + L_i^*) \qquad (۳)$$

$$\text{s.t.} \quad \sum_{i=1}^{N}(L_i + L_i^*) = 0$$

$$L_i \ge 0, \quad L_i^* \le C$$

که در آن L_i و L_i^* ضرایب لاگرانژ هستند که با حل مسئله بهینه‌سازی دوگانه از روش ماشین بردار پشتیبان به دست می‌آیند، و $K(x_i,x_j)= q(X_i)\, q(X_j)$ تابع کرنل هستند.

در نهایت، تابع رگرسیون عملکرد مطابق رابطه‌ی (٤) به دست می‌آید:

$$f(x) = \sum_{ij=1}^{N}(L_i + L_i^*)\,k(x_i, x) + k \qquad (٤)$$

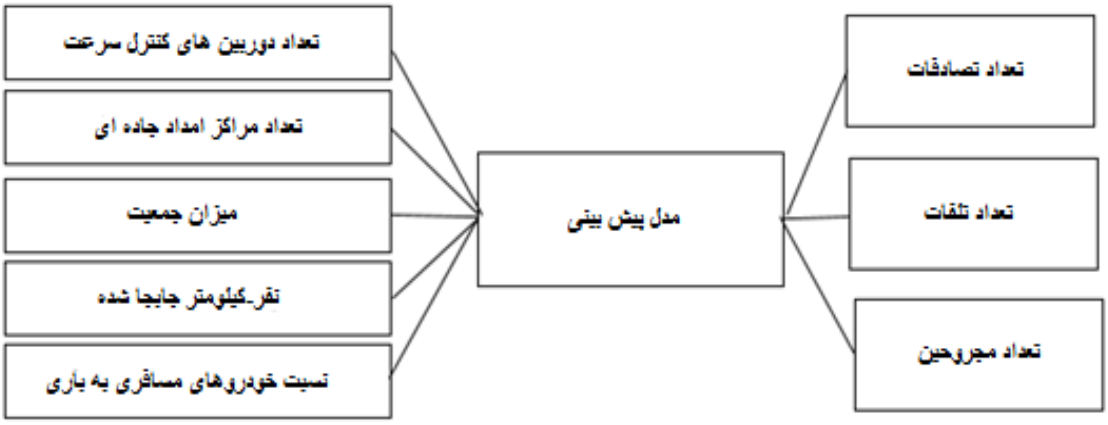
پیش‌بینی ایمنی ترافیک توسط PSO-SVM

انتشار مجموعه‌های آزمایشی

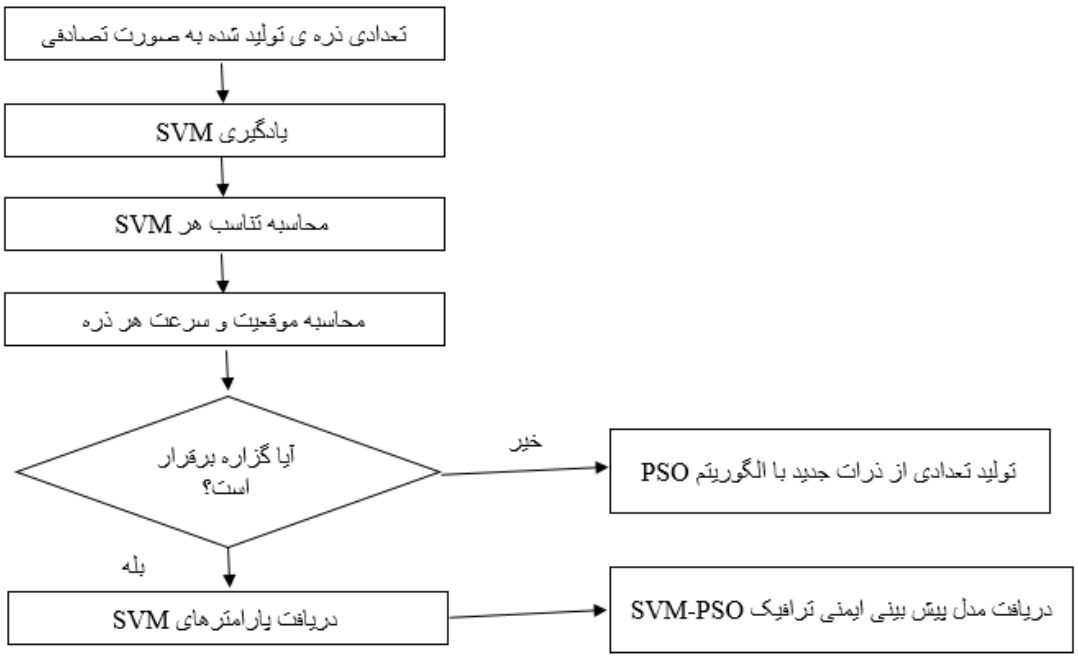
پیش‌بینی ایمنی ترافیک، نوعی مدل پیش‌بینی غیرخطی بر اساس عوامل تأثیرگذار است. شاخص‌های ارزیابی ایمنی ترافیک عمدتاً شامل تعداد تصادفات، تعداد فوت و تعداد تصادفات جرحی می‌شود و عوامل مؤثر بر ایمنی ترافیک عمدتاً شامل تعداد دوربین‌های کنترل سرعت، تعداد مراکز امداد جاده‌ای، جمعیت، نفر-کیلومتر جابجا شده و نسبت خودروهای مسافری به باری

می‌باشد. پنج عامل تأثیرگذار در ایمنی ترافیک، بردار ورودی مدل پیش‌بینی را تشکیل داده و سه شاخص ارزیابی ایمنی ترافیک به‌عنوان مقادیر خروجی مدل پیش‌بینی استفاده می‌شوند. سپس مجموعه‌های آموزشی ایجاد می‌شوند، که در شکل (۱) نشان داده‌شده‌اند.

در جداول (۱) تا (۳) داده های اخذ شده از سازمان راهداری و مقادیر خروجی مدل ها و خطای آن ها مرقوم شده است. این داده ها مربوط به جاده های برون شهری می باشد. جدول (۱) مربوط به پیش بینی تعداد تصادفات می باشد. دو مدل SVM و BPNN (Back Propagation Neural Network) مقایسه شده و خطای آن ها در سال های مختلف متفاوت می باشند. به همین ترتیب جدول (۲) به بررسی تعداد کشته شدگان پرداخته و جدول (۳) هم تعداد جراحات ناشی از تصادفات رانندگی را پیش بینی نموده است و همچنین نتایج و خطاها نیز گزارش شده اند. همانطور که مشاهده شد در تعداد بیشتری از سال ها مدل SVM خطای کمتری نسبت به BPNN داشته است.



شکل ۱ آموزش مدل پیش‌بینی ایمنی ترافیک



شکل ۲ فرآیند ماشین راهنمای پشتیبان با بهینه‌سازی انبوه ذرات بهینه‌سازی

جدول ۱ پیش‌بینی تعداد تصادفات

تاریخ	شمارش شده			مقادیر به‌دست‌آمده		خطا مقادیر به‌دست‌آمده	
	تعداد	میانگین در روز	انحراف معیار	SVM	BPNN	SVM	BPNN
۱۳۹۱	۱۱۶٤۰۳	۳۱۹	۸۱	۱۲۱۳۵۸	۱۳۱۰۵۸	۰/۰۱۶۱	۰/۰٤۱۸
۱۳۹۲	۱۱۲۱۱٤	۳۰۸	۷۵	۱۲٤۹۱٤	٤۰٥٤۷۸	۰/۰۱۸۳	۰/۰٥۲٦
۱۳۹۳	۱۰۲۲۷٥	۲۸۱	۷۹	۹۸۳٦٥	۱۰٦۳٦۹	۰/۰۳۸۱	۰/۰۱۰۳
۱۳۹٤	۱۰۱۱٦۱	۲۷۸	٦۲	۱۰٥۲۸۲	۹٦٥۸۷	۰/۰۰۸۹	۰/۰۳۷۱
۱۳۹٥	۱۰۱۷۹۲	۲۷۹	۸۸	۹٥۰۱٥	۹۱۲٥۸	۰/۰٦۱۹	۰/۰٤۲٥
۱۳۹٦	۱۲۱۱۰۸	۳۳۲	٤۹	۱۱۷۸٥٤	۱٤٤۲٦٥	۰/۰۲٥۸	۰/۰٥۷۱
۱۳۹۷	۱٥۱۸٤۰	٤۱٦	٦۸	۱٥۰٦٥۷	۱٥۲۳٦٤	۰/۰۲۳۸	۰/۰۱۲٤

جدول ۲ مقادیر پیش‌بینی آمار کشته‌شدگان

تاریخ	شمارش شده			مقادیر به‌دست‌آمده		خطا مقادیر به‌دست‌آمده	
	تعداد	میانگین در روز	انحراف معیار	SVM	BPNN	SVM	BPNN
۱۳۹۱	۱۹۰۸۹	٥۳	۱٦,۲۱	۱۸۲٤۱	۱۹۹٥۸	۰/۰۲٤۱	۰/۰٤٤۸
۱۳۹۲	۱۷۹۹٤	٥۰	۱٥,٦۲	۱٦۹۸۷	۱٦٥۲۱	۰/۰۳۷۲	۰/۰٥۳۷
۱۳۹۳	۱٦۸۷۲	٤۷	۱٤,۳٦	۱۷۸۲٥	۱٦۳۳۱	۰/۰۲٦۱	۰/۰۷۱٤
۱۳۹٤	۱٦٥۸٤	٤٦	۱٤,۸۲	۱٥٦۸۷	۱٦۹۸۲	۰/۰٦۲۲	۰/۰٤۱۱
۱۳۹٥	۱٥۹۳۲	٤٤	۱۲,۲۸	۱٥۰۱٥	۱٥۰٥۱	۰/۰۲۷۸	۰/۰۲۳۹
۱۳۹٦	۱٦۲۰۱	٤٥	۱۳,۱٤	۱٦۹۱٥	۱۷۲۸۰	۰/۰۲۳٤	۰/۰٦۲۸
۱۳۹۷	۱۷۱۸۳	٤۸	۱٤,۰۲	۱۸۲۹۳	۱۸۰۲۹	۰/۰۳٥۸	۰/۰٤۹۲

جدول ۳ پیش‌بینی تعداد جراحت

تاریخ	شمارش شده			مقادیر به‌دست‌آمده		خطا مقادیر به‌دست‌آمده	
	تعداد	میانگین در روز	انحراف معیار	SVM	BPNN	SVM	BPNN
۱۳۹۱	۳۱۸۸۰۲	۸۷٤	۱۲۸	۳۱٦۲٥٤	۳۰۸٦۹۷	۰/۰۰۹٥	۰/۰۳٥٤
۱۳۹۲	۳۱٥۷۱۹	۸٦٥	۱٤۱	۳۰۹۱٤٥	۳۰۲٥۸۷	۰/۰۲٥۷	۰/۰٤۸٥
۱۳۹۳	۳۰٤٤۸٥	۸۳٥	۱۳۳	۳۱۳۹۱۰	۳۳٥۲۹۲	۰/۰۱٥۸	۰/۰٥۲۹
۱۳۹٤	۳۱۳۰۱۷	۸٥۸	۱۲٥	۳۱۰۲٥۱	۳۳٥۲٦۹	۰/۰۱٥۱	۰/۰٤۷۸
۱۳۹٥	۳۳۳۰٦٦	۹۱۳	۲۸۹	۳۱۸٥۲۷	۳۱۷۹۳٦	۰/۰۳٤۹	۰/۰۳٦۸
۱۳۹٦	۳۳٥۹۹٥	۹۲۱	۳۱۲	۳٤۰۷٤٤	۳۱٥٤۷۸	۰/۰۲۸٤	۰/۰٤٥۱
۱۳۹۷	۳٦۷٤٤۰	۱۰۰۷	۳۳٦	۳٤۸۲٦۹	۳۷۸٤۹٦	۰/۰٤٥۸	۰/۰۳۹۹

بهینه‌سازی گروه ذرات

این تکنیک از رفتارهای اجتماعی مانند مهاجرت پرندگان و پرورش ماهی گرفته می‌شود که در آن افراد به‌عنوان ذرات تعریف می‌شوند. ذرات موقعیت خود را مطابق با تناسب در هر تکرار ارزیابی می‌کنند [40, 41]. در فضای یک‌بعدی، ذره i به‌صورت $X_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{in})$ نشان داده‌شده است، سرعت آن به‌صورت $V_i = (v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{in})$ نشان داده‌شده است و بهترین موقعیت آن به‌صورت $G_i = (g_{i1}, g_{i2}, \dots, g_{in})$ نشان داده‌شده

است. بهترین حالت در میان تمام ذرات به‌صورت $G_g = (g_{g1}, g_{g2}, \dots, g_{gn})$ نشان داده‌شده است. سرعت و موقعیت ذره به شرح روابط (۵) و (٦) محاسبه می‌شوند:

$$v_{ir}(t+1) = v_{ir}(t) + s_1.m_1.\left(g_{ir}(t) - g_{ir}(t)\right) + s_2.m_2.(G_{jr} - x_i(t)) \quad (۵)$$

$$x_{ir}(t+1) = x_{ia}(t) + v_{ir}(t+1) \quad (٦)$$

که G_{ir} بهترین موقعیت قبلی i را نشان می‌دهد، G_{jr} بهترین موقعیت در میان تمام ذرات است. S_1 پارامتر شناختی را نشان می‌دهد و S_2 بیانگر پارامتر اجتماعی است. m_1 و m_2 اعداد تصادفی بین ۰ و ۱ هستند، t نشان‌دهنده تعداد تکرار فعلی است.

ماشین بردار پشتیبان بهینه‌سازی شده توسط گروه ذرات

پارامترهای نامناسب، C، k و ε SVM می‌توانند منجر به بیش برازش شوند. تأثیر قابل‌توجه پارامترها بر عملکرد کلی PSO-SVM، در این زمینه بسیار حائز اهمیت می باشد [41] که در شکل (۲) آورده است. فرآیند بهینه توسط بهینه‌سازی انبوه ذرات به شرح زیر توصیف می‌شود:

مرحله ۱: پارامترهای اولیه بهینه‌سازی انبوه ذرات شامل تعداد نسل تکاملی، اندازه جمعیت، وزن اینرسی، و به‌طور تصادفی یک جمعیت متشکل از ذرات شامل ε و c.

مرحله ۲: استفاده از پارامترهای انتخاب‌شده برای آموزش یک مدل SVM. نمونه‌های آزمایشی برای اندازه‌گیری قابلیت پیش‌بینی مدل SVM استفاده می‌شوند. کارایی مدل توسط برازش به‌عنوان میانگین مطلق خطا اندازه‌گیری می‌شود: $\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\left|\frac{y_i-\hat{y}_i}{y_i}\right|_1$ که در آن y_i مقدار حقیقی، و $\hat{y}_i$ مقدار پیش‌بینی است.

مرحله ۳: سرعت و موقعیت هر ذره با معادلات (۵) و (٦) محاسبه شود.

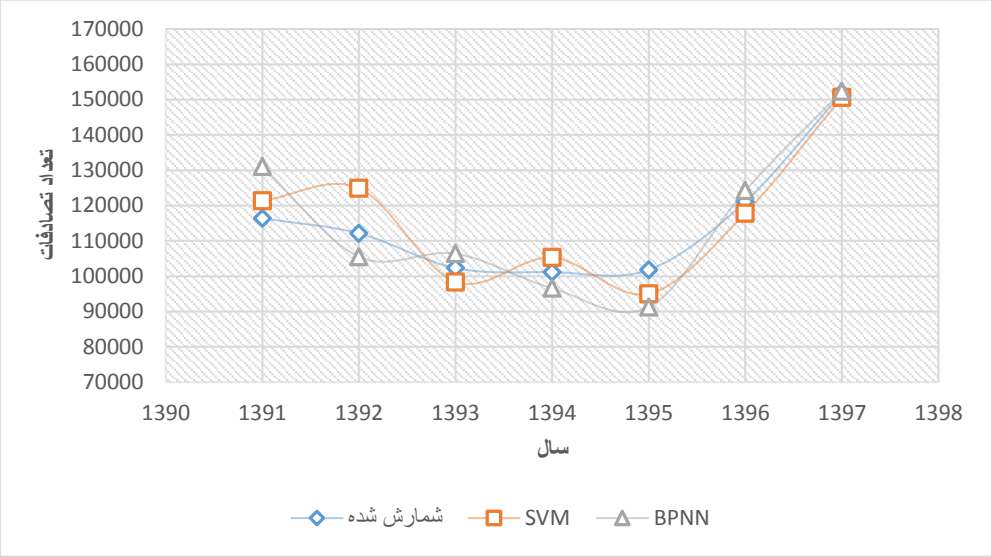
مرحله ٤: اگر معیار اتمام (میزان ε) برقرار باشد، الگوریتم متوقف شده و بهترین پاسخ SVM به دست می‌آید. در غیر این صورت، با توجه به معادلات (۵) و (٦)، ذره جدید تولید می‌شود.

نتایج

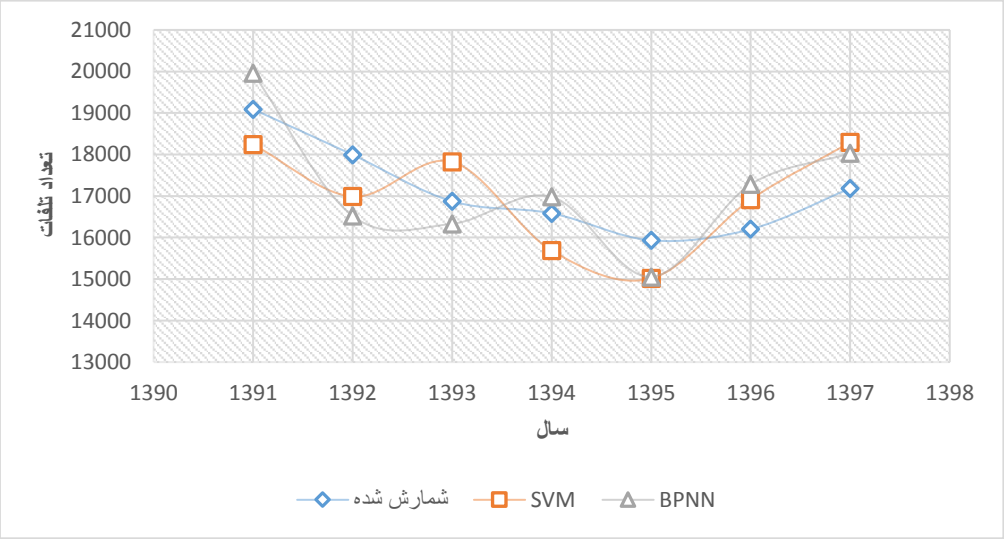
در این مطالعه داده‌های مربوط به ایمنی ترافیک از ۱۳۷٦ تا ۱۳۹۷ به‌منظور بررسی توانایی پیش‌بینی روش پیشنهادی استفاده می‌شوند. به این ترتیب داده‌های مربوط به سال‌های ۱۳۷٦ تا ۱۳۹۰ به‌عنوان داده‌های آموزش الگوریتم و داده‌های مربوط به سال‌های ۱۳۹۱ تا ۱۳۹۷ به‌عنوان داده‌های تست الگوریتم استفاده می‌شوند. پارامترهای "تعداد دوربین‌های کنترل سرعت"، "تعداد مراکز امداد جاده‌ای"، "جمعیت"، "نفر-کیلومتر جابجا شده" و "نسبت خودروهای مسافری به باری" که از مرور ادبیات بدست آمده اند، به‌عنوان ورودی مدل PSO - SVM استفاده می‌شود. ویژگی‌های تصمیم‌گیری شامل تعداد تصادفات، تعداد فوت و تعداد آسیب است که به‌عنوان خروجی مدل PSO - SVM استفاده می‌شود. مقادیر پیش‌بینی تعداد تصادفات، تعداد فوت و تعداد مجروحین توسط مدل PSO - SVM در جدول (۳-۱) به نمایش درآمده است. مقایسه مقادیر پیش‌بینی بین شبکه PSO - SVM و شبکه عصبی پس انتشار در شکل‌های (۳) تا (۵) ارائه‌شده است. و جدول (٤) مقایسه‌ای بین میانگین درصد خطای مطلق (MAPE) بین PSO-SVM و شبکه عصبی پس‌انتشار را نشان می‌دهد که مقادیر میانگین مطلق خطا برای تعداد تصادفات با روش PSO-SVM و شبکه عصبی پس‌انتشار عبارت‌اند از ۰/۰۲۸۱ و ۰/۰٤۹۸. همچنین تعداد تلفات گزارش‌شده توسط مدل PSO-SVM و شبکه عصبی پس‌انتشار عبارت‌اند از ۰/۰۳۳٤ و ۰/۰۵٦۱۰، و مقدار میانگین مطلق خطا برای تعداد مجروحین گزارش‌شده توسط مدل PSO-SVM و شبکه عصبی به ترتیب عبارتند از ۰/۰۲٦۱ و ۰/۰٤۵۲ که نشان‌دهنده این مطلب است که ایمنی ترافیک که توسط PSO-SVM گزارش‌شده دارای دقت بیشتری نسبت به شبکه عصبی پس انتشار است.

همان‌طور که در شکل (۳) مشاهده می‌شود، مقادیر پیش‌بینی تعداد تصادفات روش PSO-SVM و شبکه عصبی پس‌انتشار مقایسه شده‌اند. روند کلی از سال ۹۱ تا ۹۵ به‌صورت نزولی بوده اما متأسفانه تا سال ۹۷ تعداد تصادفات افزایش‌یافته است. آنچه مشخص است آن است که ماهیت تصادفی بودن داده‌های تصادفات در هر دو روش دیده می‌شود و نمی‌توان اظهار کرد که یکی از مدل‌ها همواره مقادیری کمتر یا بیشتر از داده‌های شمارش‌شده را گزارش می‌کنند. مطابق شکل (٤) این مطلب بیان می‌شود که روند تغییرات تلفات تقریباً مشابه تعداد تصادفات

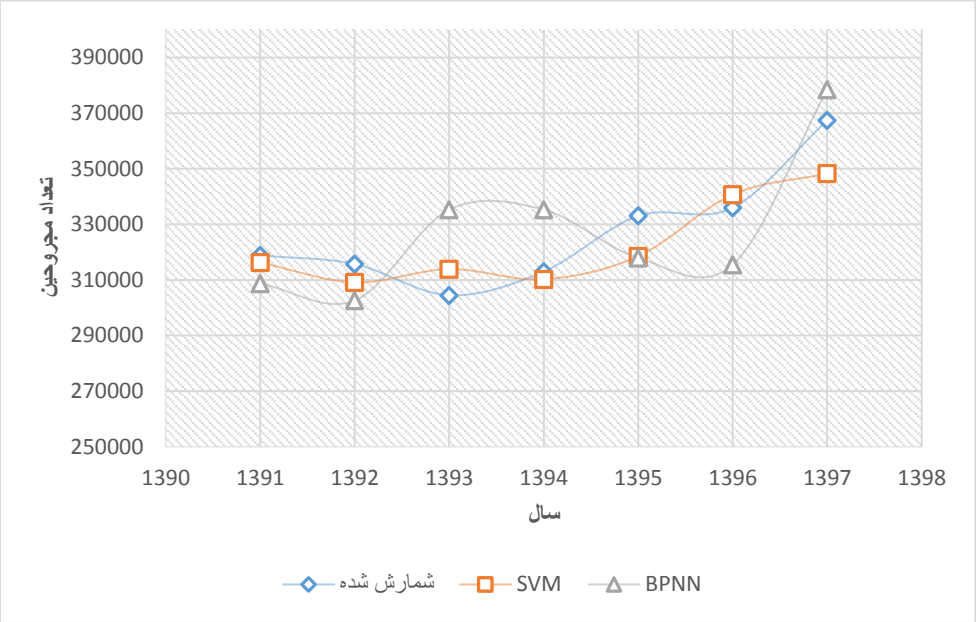
می‌باشد اما در شکل ۵ تعداد مجروحین تا سال ۹۵ تقریباً ثابت بوده و پس‌ازآن روندی صعودی به خود می‌گیرد. در شکل‌های (۳) تا (۵) می‌توان برتری مدل PSO-SVM را نسبت به شبکه عصبی مشاهده نمود که مقادیر نمودار نارنجی‌رنگ به آبی نزدیک‌تر است تا نمودار طوسی‌رنگ. به طور مثال در شکل (۳) در سال ۱۳۹۱ خروجی SVM تعداد ۱۲۰۰۰۰ تصادف را گزارش می‌کند که مقذار شمارش شده هم ۱۱۸۰۰۰ می باشد این در حالی است که شبکه عصبی ۱۳۰۰۰۰ تصادف را معرفی می‌کند که تفاوت نسبت به مقادیر مشاهده شده ملموس می‌باشد. نکته دیگری که می‌توان به آن اشاره کرد آن است که مدل‌ها نوسانات بیشتری نسبت به داده‌های مشاهده را نشان می‌دهند. می‌توان با تنظیم مدل‌های مذکور و کاهش نوسانات، مدل‌های با دقت بالاتری ایجاد نمود. با توجه به آن‌که مقدار خطا در داده‌های مربوط به تعداد مجروحین کمتر از داده‌های تعداد تصادفات و تعداد تلفات می‌باشد، می‌توان این مقوله را ناشی از تعداد داده‌های بیشتر دانست. مدل‌ها هرچقدر دارای داده‌های بیشتر باشند می‌توانند تطبیق بهتری با مقادیر شمارش‌شده داشته باشند.



شکل ۳ مقایسه مقادیر پیش‌بینی تعداد تصادفات بین PSO-SVM و شبکه عصبی پس‌انتشار



شکل ٤ مقایسه مقادیر پیش‌بینی تعداد تلفات بین PSO-SVM و شبکه عصبی پس‌انتشار



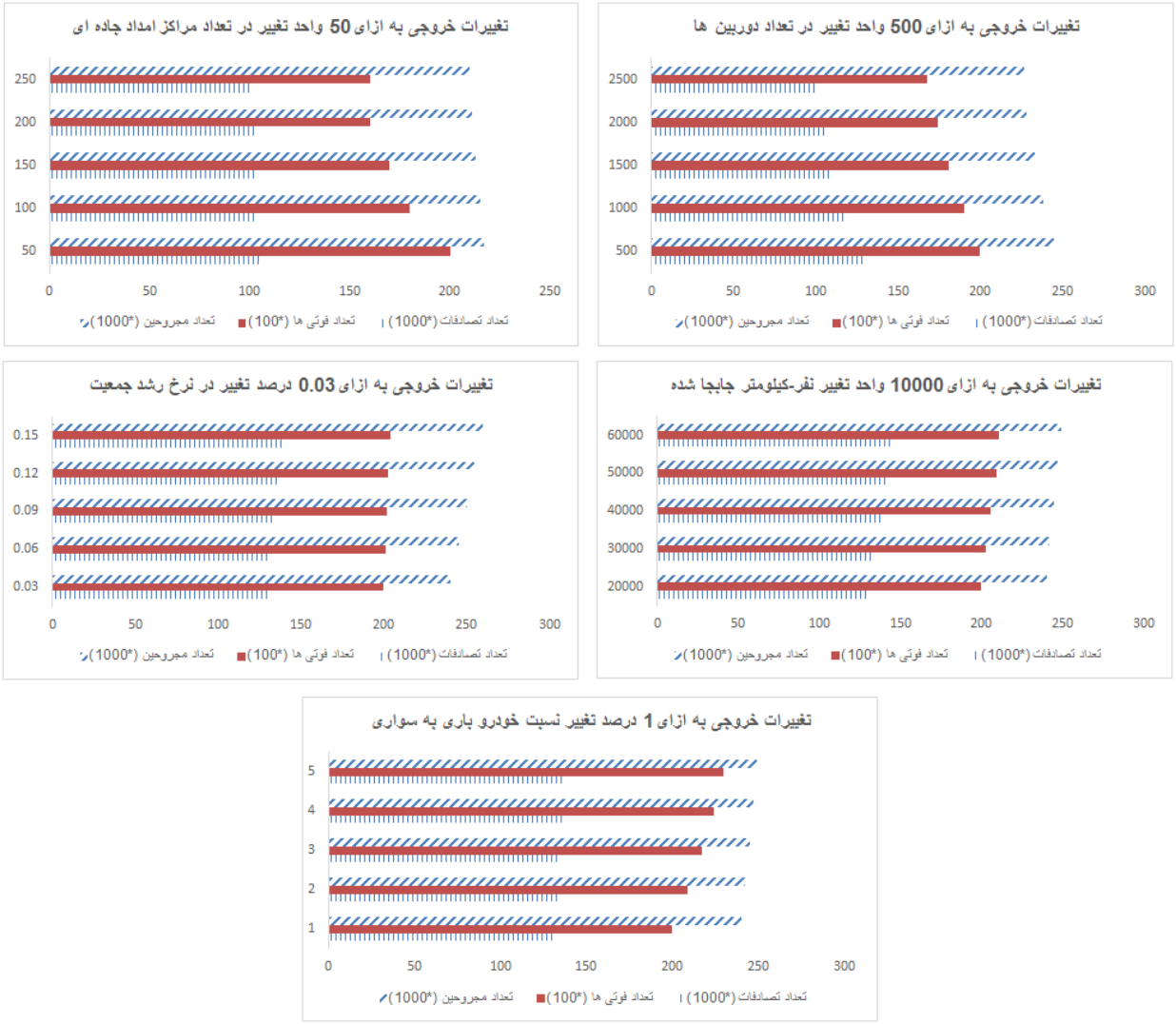
شکل ۵ مقایسه مقادیر پیش‌بینی تعداد مجروحین بین PSO-SVM و شبکه عصبی پس‌انتشار

جدول ٤ مقایسه میانگین مطلق خطا شبکه عصبی PSO - SVM و شبکه عصبی پس‌انتشار

	میانگین مطلق خطا	
	PSO	BPNN
تعداد تصادفات	۰/۰۲۸۱	۰/۰٤۹۸
تعداد تلفات	۰/۰۳۳٤	۰/۰٥٦۱
تعداد مجروحین	۰/۰۲٦۱	۰/۰٤٥۲

مطابق شکل (٦) ارتباط تعداد تصادفات، تعداد فوتی ها و تعداد مجروحین با عوامل موثر بر آنها به تصویر کشیده شده است. در این نمودار میزان حساسیت خروجی های مدل PSO-SVM نسبت به تغییر در مقادیر هر یک از پارامترها به نمایش درآمده است. تحلیل حساسیت به این موضوع اشاره دارد که با هر واحد تغییر در میزان متغیرها، مقدار خروجی به چه میزان تغییر می کند. به این ترتیب تغییر در هر یک از متغیرها روند تغییر در خروجی ها را به تصویر کشیده است.

در بخش تحلیل حساسیت این نتیجه حاصل شد که با افزایش هر ۵۰ واحد در تعداد مراکز امداد جاده ای، تعداد فوتی ها نسبت به تعداد مجروحین با شدت بیشتری کاهش می یابد. علت این امر سرعت رسیدگی این ارگان به مجروحین و کاهش مرگ و میر می باشد. به ازای هر ۵۰۰ واحد تغییر در تعداد دوربین ها، هر سه دسته خروجی نرخ کاهشی پیدا می کنند که امری منطقی و مطلوب می باشد. به ازای هر ۰٫۰۳ درصد تغییر در نرخ رشد جمعیت تعداد مجروحین با سرعت بیشتری نسبت به سایر خروجی ها افزایش می‌یابد. همچنین به ازای هر ۱۰۰۰۰ واحد افزایش در نفر-کیلومتر جابجا شده، هر سه خروجی روندی افزایشی می‌گیرند با این تفاوت که سرعت رشد تعداد تصادفات بیشتر می باشد. در نهایت به ازای هر واحد (درصد) رشد در نسبت خودروهای باری به سواری تعداد فوتی ها با شیب بیشتری افزایش می یابد که این امر حاکی از آن است که وسایل نقلیه باری تصادفات مرگ بار تری را ایجاد می‌نمایند.



شکل ٦ تحلیل حساسیت متغیرهای موثر بر خروجی ها

نتیجه‌گیری

در این مطالعه به منظور پیش‌بینی ایمنی ترافیک یک روش جدید که بهینه‌سازی گروه ذرات و ماشین بردار پشتیبان را باهم ترکیب می‌کند، ارائه‌شده است. متغیرهای "تعداد دوربین‌های کنترل سرعت"، "تعداد مراکز امداد جاده‌ای"، "جمعیت"، "نفر-کیلومتر جابجا شده" و "نسبت خودروهای مسافری به باری" است که به‌عنوان ورودی مدل PSO - SVM استفاده می‌شود. ویژگی‌های تصمیم‌گیری شامل تعداد تصادفات، تعداد فوت و تعداد آسیب است که به‌عنوان خروجی مدل PSO - SVM استفاده می‌شود. اطلاعات مربوط به ایمنی ترافیکی از سال ١٣٧٦ تا ١٣٩٧ به منظور ارزیابی توانایی پیش‌بینی روش پیشنهادی بکار گرفته شد. به این ترتیب داده‌های مربوط به سال‌های ١٣٧٦ تا ١٣٩٠ به‌عنوان داده‌های آموزش الگوریتم و داده‌های مربوط به سال‌های ١٣٩١ تا ١٣٩٧ به‌عنوان داده‌های تست الگوریتم استفاده می‌شوند. مقادیر میانگین مطلق خطا برای پیش‌بینی تعداد تصادفات توسط شبکه PSO - SVM و شبکه عصبی پس انتشار به ترتیب ٠/٠٢٥١ و ٠/٠٤٩٨ است. همچنین مقادیر میانگین مطلق خطا برای پیش‌بینی تعداد فوتی‌ها توسط شبکه PSO - SVM و شبکه عصبی پس-انتشار به ترتیب ٠/٠٣٣٤ و ٠/٠٥٦١ می‌باشد. درنهایت مقادیر میانگین مطلق خطا برای پیش‌بینی تعداد جراحت‌ها توسط شبکه عصبی PSO - SVM و شبکه عصبی پس انتشار به ترتیب ٠/٠٢٨١ و ٠/٠٤٥٢ به دست آمد. نتایج تجربی نشان می‌دهد که پیش‌بینی ایمنی ترافیک توسط PSO - SVM برتر از شبکه عصبی پس انتشار است. همان‌طور که بیان شد، روند تغییرات تلفات تقریباً

مشابه تعداد تصادفات می‌باشد اما تعداد مجروحین تا سال ۹۵ تقریباً ثابت بوده و پس‌ازآن روندی صعودی به خود می‌گیرد. نکته دیگری که می‌توان به آن اشاره کرد آن است که مدل‌ها نوسانات بیشتری نسبت به داده‌های مشاهده را نشان می‌دهند. می‌توان به تنظیم مدل‌های مذکور و کاهش نوسانات مدل‌های با دقت بالاتری ایجاد نمود. با توجه به آن که مقدار خطا در داده‌های مربوط به تعداد مجروحین کمتر از داده‌های تعداد تصادفات و تعداد تلفات می‌باشد، می‌توان این مقوله را ناشی از تعداد داده‌های بیشتر دانست. مدل‌ها هرچقدر دارای داده‌های بیشتر باشند می‌توانند تطبیق بهتری با مقادیر شمارش‌شده داشته باشند. با مشاهده شکل های (۱) تا (۳) این نکته حاصل می شود که تعداد تصادفات از سال ۹۱ تا ۹۷ برآیندی صعودی دارد. اما در مورد تعداد تلفات مشاهده شده چنین نبوده و تعداد تلفات گزارش شده در سال ۹۷ کمتر از سال ۹۱ می باشد و تعداد مجروحین نیز روندی صعودی را ثبت کرده است. این امر بیانگر آن است که با وجود افزایش تعداد تصادفات از شدت آن ها کاسته شده است که می توان علل آن را در عواملی همچون کیفیت هندسی جاده، کیفیت خودروها و خطاهای منجر به فوت انسانی جستجو نمود. مفهوم این بخش آن است که خطاها و تصادفات منجر به فوت کم شده اند اما تصادفات جزئی افزایش داشته‌اند. نکته دیگر آن است که در سال ۹۵ کمترین تعداد تصادفات و تلفات گزارش شده اما تعداد مجروحین در کمترین مقدار خود نیست. مدل PSO-SVM در مورد تعداد تصادفات و تعداد تلفات مقادیر بالاتری را نسبت به داده های مشاهده شده نشان داده که این نتیجه را بیان می‌کند که مدل PSO-SVM روندی بدبینانه را در پیش می گیرد که طبیعتا می تواند توجه مسئولین و طراحان را بیشتر به خود جلب کرده تا در نهایت تعداد تصادفات و تلفات کاسته شود. این در حالی است که در نمودار تعداد مجروحین این سخت گیری توسط مدل PSO-SVM کمتر بوده است. در انتها پیشنهاد می شود که در مطالعات آتی از داده های بیشتر استفاده شود تا دقت مدل ها بیشتر شود. همچنین به منظور مقایسه بهتر می توان روش یادگیری عمیق را پیاده‌سازی و با روش PSO-SVM مقایسه نمود. در ضمن چنانچه نوع تسهیلات (درجه‌بندی راه) وارد مدل شود، قطعا می تواند تفکیک بهتری ایجاد نموده و کارایی سیستم را افزایش دهد. عوامل انسانی از دیگر متغیرهای تاثیر گذار هستند که می‌توانند در مطالعات آتی در مدل ها مدنظر قرار گیرند. در نهایت این نتایج حاصل شد که با افزایش هر ۵۰ واحد در تعداد مراکز امداد جاده ای، تعداد فوتی ها نسبت به تعداد مجروحین با شدت بیشتری کاهش می یابد. علت این امر سرعت رسیدگی این ارگان به مجروحین و کاهش مرگ و میر می باشد. به ازای هر ۵۰۰ واحد تغییر در تعداد دوربین ها، هر سه دسته خروجی نرخ کاهشی پیدا می کنند که امری منطقی و مطلوب می باشد. به ازای هر ۰٫۰۳ درصد تغییر در نرخ رشد جمعیت تعداد مجروحین با سرعت بیشتری نسبت به سایر خروجی ها افزایش می‌یابد. همچنین به ازای هر ۱۰۰۰۰ واحد افزایش در نفر-کیلومتر جابجا شده، هر سه خروجی روندی افزایشی می‌گیرند با این تفاوت که سرعت رشد تعداد تصادفات بیشتر می‌باشد. در نهایت به ازای هر واحد (درصد) رشد در نسبت خودروهای باری به سواری تعداد فوتی ها با شیب بیشتری افزایش می‌یابد که این امر حاکی از آن است که وسایل نقلیه باری تصادفات مرگ بار تری را ایجاد می‌نمایند.

مراجع

1. Ameri, A., Bigdeli Rad, H., Shaker, H., & Ameri, M., "Cellular Transmission and Optimization Model Development to Determine the Distances between Variable Message Signs", *Journal of Transportation Infrastructure Engineering*, 7(1), (2021).
2. Rad, V. B., Najafpour, H., Ngah, I., Shieh, E., Rashvand, P., & Rad, H. B., "What Are The Safety Factors Associating with Physical Activity in Urban Neighborhoods?(A Systematic Review)", *Journal of Applied Environmental and Biological Sciences*, Vol. 5(3), pp. 259-266, (2015).
3. Abdi, A., Mosadeq, Z., & Bigdeli Rad, H., "Prioritizing Factors Affecting Road Safety Using Fuzzy Hierarchical Analysis", *Journal of Transportation Research*, Vol. 17(3), pp. 33-44, (2020).

4. Xiao, J., "SVM and KNN ensemble learning for traffic incident detection. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications", Vol. 517, pp. 29-35, (2019).
6. Huang, J., Zhou, J., Wang, Z., wang, Q., & Peng, Y., "Network Anomaly Traffic Classification and Optimization Based on PSO-SVM", *In Proceedings of the 2nd International Conference on Artificial Intelligence and Advanced Manufacture*, Vol. 9, pp. 173-180, October, (2020).
7. Duan, M., "Short-time prediction of traffic flow based on PSO optimized SVM", *In 2018 international conference on intelligent transportation, big data & smart city (ICITBS)*, Vol. 34, pp. 41-45, IEEE, January, (2018).
8. Radja, D. I. A. F., TOLBA, C., & Moh, A. N. S., "Traffic Urban Control Using an Intelligent PSO Algorithm Based on Integrated Approach", (2020).
9. Ali, E. M., Ahmed, M. M., & Wulff, S. S., "Detection of critical safety events on freeways in clear and rainy weather using SHRP2 naturalistic driving data: Parametric and non-parametric techniques", *Safety Science*, Vol. 119, pp. 141-149, (2019).
10. Rovšek, V., Batista, M., & Bogunović, B., "Identifying the key risk factors of traffic accident injury severity on Slovenian roads using a non-parametric classification tree", *Transport*, Vol. 32(3), pp. 272-281, (2017).
11. Duo, M., Qi, Y., Lina, G., & Xu, E., "A short-term traffic flow prediction model based on EMD and GPSO-SVM", In 2017 IEEE 2nd Advanced Information Technology, *Electronic and Automation Control Conference (IAEAC)*, Vol. 15, pp. 2554-2558, IEEE, March, (2017).
12. Shaker, H., & Bigdeli Rad, H., "Evaluation and Simulation of New Roundabouts Traffic Parameters by Aimsun Software", *Journal of Civil Engineering and Materials Application*, Vol. 2(3), pp. 146-158, (2018).
13. Sarkar, S., Vinay, S., Raj, R., Maiti, J., & Mitra, P., "Application of optimized machine learning techniques for prediction of occupational accidents", *Computers & Operations Research*, Vol. 106, pp. 210-224, (2019).
14. Bener, A., Al Maadid, M. G. A., zkan, T., Al-Bast, D. A. E., Diyab, K. N., & ajunen, T., "The impact of four-wheel drive on risky driver behaviours and road traffic accidents", *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, Vol. 11(5), pp. 324–333, (2008).
15. Bonnet, E., Lechat, L., & Ridde, V., "What interventions are required to reduce road traffic injuries in Africa? A scoping review of the literature", *PLoS One*, Vol. 13(11), e0208195, (2018).
16. Aldegheishem, A., Yasmeen, H., Maryam, H., Shah, M. A., Mehmood, A., Alrajeh, N., & Song, H., "Smart road traffic accidents reduction strategy based on intelligent transportation systems (tars)", *Sensors*, Vol. 18(7), pp. 1983, (2018).
17. Marusin, A., Marusin, A., & Ablyazov, T., "Transport infrastructure safety improvement based on digital technology implementation", *In International Conference on Digital Technologies in Logistics and Infrastructure (ICDTLI 2019)*, pp. 348-352, Atlantis Press, September, (2019).
18. Najaf, P., Isaai, M. T., Lavasani, M., & Thill, J. C., "Evaluating traffic safety policies for developing countries based on equity considerations", *Journal of Transportation Safety & Security*, 9(sup1), pp. 178-203, (2017).
19. Lee, J.-Y., Chung, J.-H., & Son, B., "Analysis of traffic accident size for Korean highway using structural equation models", *Accident Analysis and Prevention*, Vol. 40(6), pp. 1955–1963, (2008).

20. Kweon, K. S., Moon, J. M., Kyung-Kyu, K. I. M., Chang, Y. B., & Jung, J. S., U.S. Patent No. 10,163,342. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office, (2018).
21. Yilma, H., Rimal, R., & Ryskulova, N., "Road Traffic Behaviors by Gender in Serbia", *Health Science Research commons*, Vol. 2, pp.214-223, (2017).
22. Zheng, X. I. A. O., Ye, T. I. A. N., Dongsheng, C. A. O., & ZHANG, Z., "Road Traffic Risk Safety Prediction Based on BP Neural Network", *In 2020 IEEE 9th Joint International Information Technology and Artificial Intelligence Conference (ITAIC)*, Vol. 9, pp. 527-533, IEEE, December, (2020).
23. Wu, D., & Wang, S., "Comparison of road traffic accident prediction effects based on SVR and BP neural network", *In 2020 IEEE International Conference on Information Technology, Big Data and Artificial Intelligence (ICIBA)*, Vol. 1, pp. 1150-1154, IEEE, November, (2020).
24. Goniewicz, K., Goniewicz, M., Pawłowski, W., & Fiedor, P., "Road accident rates: strategies and programmes for improving road traffic safety", *European journal of trauma and emergency surgery*, Vol. 42(4), pp. 433-438, (2016).
25. Mallia, L., Lazuras, L., Violani, C., & Lucidi, F., "Crash risk and aberrant driving behaviors among bus drivers: the role of personality and attitudes towards traffic safety", *Accident Analysis & Prevention*, Vol. 79, pp. 145-151, (2015).
26. Pedrycz, W., Park, B. J., & Pizzi, N. J., "Identifying core sets of iscriminatory features using particle swarm optimization", *Expert Systems with Applications*, Vol. 36(3), pp. 4610–4616, (2009).
27. Jun, C., Congying, L., & Guangming, D., "Traffic safety assessment of freeway based on BP neural network", *Journal of Tongji University Natural Science*, 7, Vol. 36, pp. 83-92, (2008).
28. Gang, R., & Zhuping, Z., "Traffic safety forecasting method by particle swarm optimization and support vector machine", *Expert Systems with Applications*, Vol. 38(8), pp. 10420-10424, (2011).
29. Cui, J., Zhang, H., Zhao, J., & Zhang, Y., "Research on SVM-Based Highway Traffic Safety Evaluation Model", *In International Conference on Green Intelligent Transportation System and Safety*, pp. 799-809, Springer, Singapore, July, (2017).
30. Doğan, A. A. E., & ANgüngör, A. P., "Estimating road accidents of Turkey based on regression analysis and artificial neural network approach", *Advances in transportation studies*, Vol. 16, 11Y22, (2008).
31. Afandi, Z. S., Bigdeli, R. H., & Shaker, H. (2019). Using optimization and metaheuristic method to reduce the bus headway (Case study: Qazvin Bus Routes).
32. Yasin Çodur, M., & Tortum, A., "An artificial neural network model for highway accident prediction: A case study of Erzurum", *Turkey. PROMET-Traffic&Transportation*, Vol. 27(3), pp. 217-225, (2015).
33. Graham, D. J., Naik, C., McCoy, E. J., & Li, H., "Do speed cameras reduce road traffic collisions?", *PLoS one*, Vol. 14(9), e0221267, (2019).
34. Chokotho, L., Mulwafu, W., Singini, I., Njalale, Y., Maliwichi-Senganimalunje, L., & Jacobsen, K. H., "First responders and prehospital care for road traffic injuries in Malawi", *Prehospital and disaster medicine*, Vol. 32(1), pp. 14, (2017).
35. Anstey, K. J., Eramudugolla, R., Ross, L. A., Lautenschlager, N. T., & Wood, J., "Road safety in an aging population: risk factors, assessment, interventions, and future directions", *International Psychogeriatrics*, Vol. 28(3), pp. 349-

356, (2016).

36. Linder, A., & Svensson, M. Y., "Road safety: the average male as a norm in vehicle occupant crash safety assessment", *Interdisciplinary Science Reviews*, Vol. 44(2), pp. 140-153, (2019).
37. Castillo-Manzano, J. I., Castro-Nuño, M., & Fageda, X., "Can cars and trucks coexist peacefully on highways? Analyzing the effectiveness of road safety policies in Europe", *Accident Analysis & Prevention*, Vol. 77, pp. 120-126, (2015).
38. Jain, P., Rahman, I., & Kulkarni, B. D., "Development of a soft sensor for a batch distillation column using support vector regression techniques", Chemical, (2007).
39. Tasgetiren, M. F., Liang, Y.-C., Sevkli, M., & Gencyilmaz, G., "A particle swarm optimization algorithm for makespan and total flowtime minimization in the permutation flowshop sequencing problem", *European Journal of Operational Research*, Vol. 177(3), pp. 1930–1947, (2007).
40. Nobile, M. S., Besozzi, D., Cazzaniga, P., Mauri, G., & Pescini, D., "A GPU-based multi-swarm PSO method for parameter estimation in stochastic biological systems exploiting discrete-time target series", *In European Conference on Evolutionary Computation*, Machine Learning and Data Mining in Bioinformatics, pp. 74-85, Springer, Berlin, Heidelberg, April, (2012).
41. Deng, W., Yao, R., Zhao, H., Yang, X., & Li, G., "A novel intelligent diagnosis method using optimal LS-SVM with improved PSO algorithm", *Soft Computing*, Vol. 23(7), pp. 2445-2462, (2019).
42. Hu, W., Yan, L., Liu, K., & Wang, H., "A short-term traffic flow forecasting method based on the hybrid PSO-SVR", *Neural Processing Letters*, Vol. 43(1), pp. 155-172, (2016).

نشریهٔ مهندسی عمران فردوسی (۳۰-۱۵)
DOI:10.22067/jfcei.2022.73443.1075
سال سی و چهار، شمارهٔ چهار، ۱۴۰۰

کاربرد زمین آمار در شناسایی محل‌های با پتانسیل بالای فرار آب در سد تنگاب*

مقاله پژوهشی

رضا دهشیبی[۱] رضا جهانشاهی[۲] مرتضی مظفری[۳] امین عصاری[۴]

چکیده *سد تنگاب در فاصله ۹۰ کیلومتری جنوب شیراز و ۱۲ کیلومتری شمال غربی شهر فیروزآباد بر روی رودخانه فیروزآباد احداث شده است. این سد در زون زاگرس و بر روی تاقدیس آهکی پودنو قرار دارد. محاسبات بیلان نشان داده است که در این سد احتمال فرار آب از مخزن و تکیه‌گاه‌های وجود دارد. در این پژوهش تحلیل اکتشافی-مکانی داده‌ها شامل بررسی نقشه‌های موقعیت مکانی، پارامترهای آماری، نمودار فراوانی و تغییرنما بر روی متغیرهای شاخص کیفیت سنگ، لوژان و متغیرسیمان‌خوری صورت گرفته است و جهت شناسایی زون‌های تراوا از روش‌های شبیه‌سازی زمین‌آماری استفاده‌شده است. متغیرهای مذکور در ترازهای ارتفاعی مختلف، تغییرات زیادی داشته است. پیوستگی مکانی سیمانخوری بر مبنای تغییرنمای بدون جهت، ۱۰۰ متر بدست آمده است. در حالیکه این پیوستگی در متغیرهای شاخص کیفیت سنگ و لوژان بر اساس تغییرنمای جهت دار، به ترتیب بین ۴۰۰-۲۰۰ و ۱۶۰-۴۰ متر متغیر است. درنهایت با توجه به نقشه‌های شبیه سازی سه متغیر لوژان، شاخص کیفیت سنگ و سیمان‌خوری و تجزیه و تحلیل نقشه‌های احتمال و عدم قطعیت متغیرهای مذکور در منطقه موردمطالعه، مشاهده شد در دو محل واقع در مرکز مخزن و شمال غربی سد، مناطقی با نفوذپذیری بالا وجود دارد. لذا پتانسیل فرار آب نیز در این مکان‌ها بیشتراست. بررسی گسل‌های منطقه موردمطالعه نیز نشان داد تراکم گسل‌ها بیشتر در جناح راست سد بوده و این می‌تواند سبب افزایش نفوذپذیری در این منطقه باشد.*

واژه‌های کلیدی سیمان‌خوری، شاخص کیفیت سنگ، لوژان، مدل‌سازی زمین‌آمار.

مقدمه

در مطالعات ساختگاه سدها، بررسی وضعیت نفوذپذیری و درزه‌ها و رفتار هیدروژئومکانیکی، یکی از ملزومات اساسی مراحل اکتشافی به شمار می‌رود. به‌دلیل پیچیده بودن شرایط زمین‌شناسی، اندازه‌گیری داده‌های هیدروژئولوژیکی مثل قابلیت انتقال و هدایت هیدرولیکی ممکن است عدم قطعیت قابل‌توجهی را نشان دهند. بر این اساس، تخمین و شبیه‌سازی داده‌های هیدروژئولوژیکی با روش‌های مختلفی انجام می‌شود. روش‌های زمین‌آمار به‌طور گسترده‌ای در تخمین پارامترهای هیدرولیکی آبخوان و بررسی عدم قطعیت پارامترهای هیدروژئولوژیکی و ژئوتکنیکی استفاده‌شده‌اند.

یکی از روش‌های مدل‌سازی هندسه لایه‌های تراوا، استفاده از روش شبیه‌سازی زمین‌آماری است. این روش در مدل‌سازی سیستم شکستگی‌ها به‌منظور مطالعه جریانات سیالات در درون سنگ‌ها استفاده می‌شود [1]. در این روش پس از تجزیه‌وتحلیل داده‌های مکانی، بر اساس پارامترهای آماری به‌دست‌آمده شبیه‌سازی متغیرها انجام می‌پذیرد [2]. مطالعات متعددی در سطح ایران و جهان با استفاده از زمین‌آمار و مدل‌سازی در خصوص نفوذپذیری، زمین شناسی، هیدرولوژی و هیدروژئولوژی انجام‌شده است که ازجمله می‌توان به [3]، [4]، [5]، [۶]، [۷]، [۸]، [9]، [10]، [11]، [12]، [۱۳]،[14]،[۱۵]، [22]، [23] ، [24]، [25] ، [26] و [27] اشاره کرد.

تغییرنما اساسی‌ترین ابزار در زمین‌آمار است که برای تشریح ارتباط مکانی یک متغیر به کار می‌رود. تغییرنما، کمیتی برداری که درجه همبستگی مکانی و شباهت بین نقاط اندازه‌گیری شده را برحسب مربع تفاضل مقدار دونقطه و با توجه به جهت و فاصله آن‌ها نشان می‌دهد معمولاً تغییرنما را با علامت $\gamma(h)$ نشان می‌دهند و از رابطه‌ی (۱) محاسبه می‌شود[28] .

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)}\sum\left(z(x_i + h) - z(x_i)\right)^2 \qquad (1)$$

* تاریخ دریافت مقاله ۱۴۰۰/۸/۱۴ و تاریخ پذیرش آن ۱۴۰۰/۱۰/۱۹ می‌باشد.

(۱) دانشجوی کارشناسی ارشد آب شناسی، دانشگاه سیستان و بلوچستان
(۲) نویسنده مسئول: دانشیار گروه زمین شناسی، دانشگاه سیستان و بلوچستان.
(۳) استادیار دانشکده زمین شناسی، دانشگاه تهران.
(۴) دکتری آب‌شناسی، دفتر تحقیق و توسعه، معدن سنگ آهن گهرزمین، سیرجان.

Email: jahanshahireza@science.usb.ac.ir

که در آن N(h)، تعداد جفت نمونه‌های به‌کاررفته در محاسبه که در فاصله h از یکدیگر قرار دارند؛ Z(xi)، مقدار مشاهده شد متغیر موردنظر و Z(xi+h)، مقدار مشاهده شد متغیر موردنظر که به فاصله h از Z(xi) قرار دارد، است (حسنی پاک و شرف‌الدین، ۱۳۸٤). اگر در محاسبه تغییرنما به ازای هر لگ معین، بردار h نظیر آن لگ در فضا در هر جهتی بتواند قرار گیرد، در این صورت تغییرنمای حاصل را تغییرنمای بدون جهت می‌نامند [۲۹]. این‌گونه تغییرنماها برای بیان تغییرنمای کلی منطقه مناسب می‌باشند و در مواردی که تعداد نقاط اندک باشد این‌گونه تغییرنماها اطلاعات کلی‌تری در مورد منطقه به دست می‌دهند [۳۰]. پس‌ازآنکه یک‌روند و ساختار مشخص برای تغییرنمای بدون جهت محاسبه گردید، در مرحله بعدی می‌توان تغییرنمای جهت‌دار و ناهمسانگردی را محاسبه نمود. تغییرنمای جهت‌دار را می‌توان این‌گونه تعریف نمود. اگر در محاسبه تغییرنما فقط از زوج نقاطی که بردار h آن‌ها (برداری که دونقطه را به هم وصل می‌کند) در امتداد معین و معلومی قرار داشته باشد، استفاده شود، در این صورت آن تغییرنما را تغییرنمای جهت‌دار می‌گویند [۲۹]. معمولاً در مطالعات زمین‌شناسی با توجه به هدف موردمطالعه که بیشتر اوقات بررسی ویژگی‌های زمین‌شناسی و به‌ندرت باهدف بررسی ویژگی‌های آماری است، نمونه‌ها به‌صورت منظم برداشت نمی‌شوند، درنتیجه استراتژی‌های نمونه‌برداری سبب شده است که در مناطقی مقادیر بالای یک متغیر متمرکزشده باشند. هرچند این مناطق ممکن است اطلاعات مفیدی به دست بدهند ولی نماینده سایر نقاط باقیمانده نیستند. برای به دست آوردن یک تخمین مناسب از میانگین داده‌های جامع می‌باید نمونه‌های موجود به‌گونه‌ای وزن دهی شوند که داده‌های کلاستره شده اثر بیش‌ازحدی را بر روی تخمین میانگین نگذارند .برای دکلاستره نمودن داده‌ها دو روش دکلاسترینگ چندضلعی و دکلاسترینگ سلولی وجود دارد. پیوستگی مکانی در بسیاری از متغیرهای موردبررسی در داده‌های علوم زمین وجود دارد. به‌طوری‌که بین داده برداشته‌شده در یک نقطه و داده‌های برداشته‌شده در نقاط دیگر که به فاصله معینی از یکدیگر قرار دارند، یکسری مشابهت‌ها و تفاوت‌هایی وجود دارد. دو داده برداشته‌شده در فاصله کم، عمدتاً مشابهت بیشتری نسبت به دو داده برداشته‌شده در فاصله بیشتر دارند. اگرچه بررسی تعدادی از نمودارهای پراکندگی برداری ، توصیفی نسبتاً کامل را از پیوستگی مکانی یک متغیر ارائه می‌دهند، ولی این نمودارها حاوی اطلاعات کمی می‌باشند و نیاز به‌نوعی پارامتر خلاصه کننده دارند. سه تابع خلاصه کننده پیوستگی مکانی یک متغیر، ازجمله توابع ضریب همبستگی ، توابع کوواریانسی و تغییر نماها . تمامی این توابع از یکسری پارامترهای آماری برای خلاصه نمودن نمودارهای پراکندگی برداری و ارائه آن، به صورتی که نشان‌دهنده تغییرات پیوستگی مکانی یک متغیر بافاصله و جهت باشد، بهره می‌برند. از بین آن‌ها تغییر نما مهم‌ترین ابزار برای بررسی پیوستگی مکانی بین داده‌هاست [۳۰].

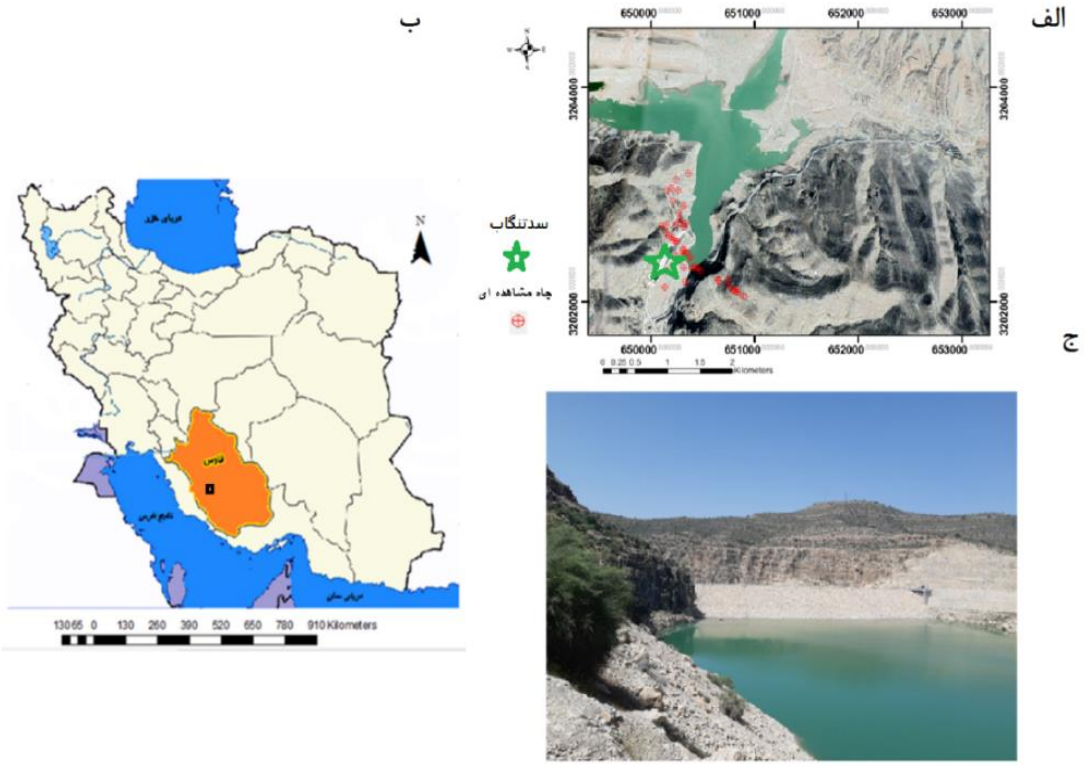
در استان فارس، سد مخزنی تنگاب بخشی از آب آبیاری دشت فیروزآباد را تأمین می‌نماید. محاسبات بیلان توسط شرکت آب منطقه ای استان فارس و مطالعات قبلی نشان می‌دهد بخش زیادی از آب مخزن از طریق قسمت‌هایی از تکیه‌گاه‌های سد فرار می‌کند. لذا پرسشی که ایجاد می‌شود این است که ازنظر زمین‌شناسی در چه مناطقی در اطراف این سد، پتانسیل فرار آب بالا است. بنابراین در این پژوهش سعی شده است تا با استفاده از بررسی پیوستگی مکانی داده‌های متغیرهای لوژان، شاخص کیفیت سنگ و سیمان‌خوری گمانه‌های اکتشافی درنهایت شبیه‌سازی‌های زمین‌آماری متغیرهای ذکرشده در منطقه موردمطالعه به این پرسش پاسخ داده شود. لازم به ذکر است پیش‌ازاین تحقیق، در محدوده‌ی مطالعاتی پژوهش‌های هیدروژئولوژی و مدل‌سازی نیز انجام‌شده است [۱٦]. در مطالعه‌ای احتمال فرار آب در سد تنگاب را با استفاده از ردیاب‌های رنگی بررسی کرده است. مشاهدات نشانگر وجود ارتباط هیدروژئولوژی بین ساختگاه سد و چشمه‌های محدوده تنگاب (روستای آتشکده) است. بر اساس رفتار رنگ نمودهای به‌دست‌آمده، این ارتباط از طریق یک سیستم کارستی تک مجرایی برقرار گردیده است. در پژوهشی دیگر [17]. در منطقه سد تنگاب، با استفاده از بررسی سری زمانی پارامترهای هیدرو شیمی چشمه‌ها، به شناسایی منبع چشمه‌ها و ارتباط آن‌ها با یکدیگر پرداختند. بخشی از آبخوان توسط ۲۳ چشمه در سمت جنوب تخلیه می‌شود. یون‌های اصلی، هدایت الکتریکی، دما و pH این چشمه‌ها اندازه‌گیری شدند. این پارامترها نشان می‌دهد که منابع چهار چشمه، احتمالاً در قسمت‌های جنوبی قرار دارند و منابع دیگر چشمه‌ها هم در طرف‌های جنوبی و شمالی هستند. این بدان معنی است که همه این چشمه‌ها یک منبع مشترک و

یک حوضه آبریز مشترک دارند [18]. از نتایج تست لوژان، برای ارزیابی تخلخل مؤثر و توسعه کارست در سد تنگاب استفاده کرده‌اند. در این تحقیق رفتار آبخوان کارستی، نقش منطقه اپی کارستی، نقش تغذیه در آبخوان‌های کارستی و اثر آن بر هیدرو گراف چشمه، مورد ارزیابی قرار گرفت و ارتباط کارستی شدن بر میزان نفوذپذیری (لوژان) بررسی‌شده است. در این پژوهش مشخص شد که یکی از مؤثرترین عوامل تأثیرگذار بر هیدرو گراف و تغییرات نوسان آب، طول مجرای اصلی کارستی است [۱۹]. نشت در جناح راست سد تنگاب را موردبررسی قرارداده اند. این تحقیق بر مبنای مدل عددی با استفاده از نرم‌افزار seep/w درزمینه جریان آب در خاک انجام‌شده است. نتیجه پیش‌بینی پژوهش نشان داده است عمده نشت از طریق مناطق کارستی و درزه و شکاف‌ها رخ‌داده است.

مواد و روش‌ها

منطقه موردمطالعه

سد تنگاب در استان فارس، در فاصله ۹۰ کیلومتری جنوب شیراز (۱۲ کیلومتری شمال غربی شهر فیروزآباد، در مسیر فیروزآباد – کوار) بر روی رودخانه فیروزآباد واقع‌شده است (شکل –۱)، این سد در زون زاگرس چین‌خورده و بر روی تاقدیس پودنو قرار دارد. این تاقدیس عمدتاً از سازند آهکی آسماری (الیگومیوسن) تشکیل‌شده است و از بالا به‌وسیله سازند مارنی رازک و از زیر به‌وسیله سازند مارنی پابده گورپی (پالئوسن–الیگوسن) محصورشده است [۲۰]. سازند رازک در محدوده مخزن گسترش دارد و به دلیل اینکه از مارن و تبخیری‌ها تشکیل یافته‌اند از قابلیت نفوذ و آبگذری قابل‌توجهی برخوردار نیستند. لـذا تنهـا، محـدوده سـازند آسماری که دیواره دره ساختگاه سد را می‌سازد قابلیت آبگذری دارد. آهـک های سازند آسماری از استعداد کارست شدگی بالایی برخوردار بوده و وجود میان لایه‌های مـارنی و مـارن آهکـی باعـث توسـعه کارسـت در اطـراف این لایه‌ها شده است. این پدیده‌های کارستی در امتداد درزه‌ها و گسل‌های عمده که شیبی نزدیک به قائم دارند و توسط مواد ریزدانه پرشده‌اند توسعه بیشتری دارند [۲۱].



شکل ۱ (الف) تصویر ماهواره‌ای از موقعیت سد، (ب) موقعیت سد تنگاب در استان فارس و (ج) نمایی از سد تنگاب، جهت نگاه به جنوب غرب

روش کار

در این پژوهش، مطالعات زمین آماری بر روی داده های لوژان، شاخص کیفیت سنگ و سیمان خوری چاههای اکتشافی در محدوده سد تنگاب انجام شده است که شامل موارد: تحلیل اکتشافی–مکانی داده‌ها، دکلاستره نمودن داده‌ها، -بررسی هیستوگرام یا نمودارهای جعبه‌ای متغیرهای مختلف، بررسی تغییرات متغیرها درترازهای ارتفاعی مختلف، بررسی رابطه احتمالی بین متغیرهای مختلف با استفاده از نمودارهای پراکندگی، تهیه نقشه‌های تغییرنما و بررسی وجود و یا عدم وجود آنایزوتروپی احتمالی، مدل‌سازی زمین‌آمار (با استفاده از نرم افزار زمین آماری ایساتیس) شامل: ایجاد شبکه جهت انجام شبیه‌سازی گاوسی، انجام شبیه‌سازی گاوسی، تعیین حد آستانه‌های مختلف و بررسی تغییرات متغیرها در منطقه موردمطالعه، پردازش شبیه‌سازی‌های انجام‌شده و کمی سازی عدم قطعیت و در نهایت شناسایی زون‌های تراوا می باشد.

به‌کارگیری اصل توالی تحت مدل چند گوسی توابع تصادفی را شبیه‌سازی گوسی متوالی می‌گویند. این الگوریتم برای شبیه‌سازی یک مشخصه واحد با استفاده از مقادیر واحد و سپس به دست آوردن اطلاعات ثانویه و شبیه‌سازی مشترک چندین مشخصه وابسته، معرفی‌شده است. این الگوریتم برای انجام شبیه‌سازی به داده‌های نرمال استاندارد نیاز دارد. برای شبیه‌سازی پیوستگی مشخصه z در N گره در شبکه مشروط به مجموعه داده $z(ua), a = 1, \dots, n\}$ است. مراحل شبیه‌سازی گوسی متوالی به‌صورت زیر است:

۱. اولین گام برر سی کردن صحت مدل چند گو سی ا ست که نیاز به‌رسم هیستوگرام برای داده‌های اولیه و نرمال کردن داده‌ها و تبدیل z-data به y-data با یک تابع توزیع تجمعی (cdf) استاندارد نرمال است.

۲. اگر مدل چند گوسی برای متغیر y حفظ شد، در این حالت می‌توان شبیه سازی گو سی متوالی را به صورت مراحل زیر برای y-data انجام داد:

- ترسیم تغییرنما با استفاده از داده‌های نرمال شده.
- انتخاب م سیر ت صادفی برای انجام شبیه سازی به‌طوری‌که هر گره شبکه فقط یک‌بار شبیه‌سازی می‌شود.
- در هر گره u' پارامترهای میانگین و واریانس تابع توزیع تجمعی گوسی تعیین می‌گردند و سپس با انجام کریجینگ ساده با استفاده از مدل تغییرنمای داده‌های نرمال شده، تخمین داده‌ها بر روی شبکه صورت می‌گیرد.
- بیرون کشیدن مقدار شبیه‌سازی‌شده از تابع توزیع تجمعی و اضافه کردن آن به مجموعه داده‌ها.
- رفتن به گره بعدی در طول مسیر تصادفی و تکرار دو مرحله قبلی.
- تکرار کلیه مراحل بالا تا اینکه N گره شبیه سازی شوند و کل شبکه دارای عدد شود [28].
- شبیه‌سازی گوسی متوالی یک‌راه سریع و ساده برای انجام شبیه‌سازی زمین‌آماری است؛ زیرا برای مدل‌سازی گوسی در هر مکان نیاز به حل کردن تنها یک سیستم کریجینگ در آن مکان است. اما درعین‌حال توانایی نشان دادن پیوستگی مکانی برای طبقات مختلف مقادیر را ندارد و همچنین امکان شبیه‌سازی مقادیر انتهایی بزرگ را فراهم نمی‌کند.

نتایج و بحث

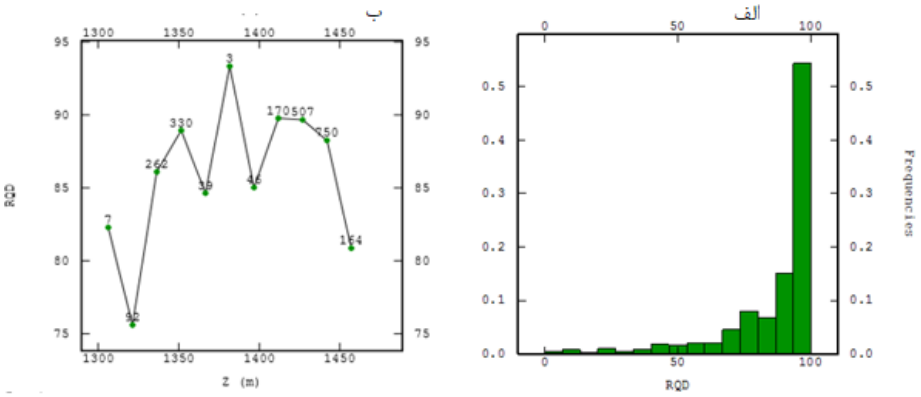
تحلیل اکتشافی- مکانی

بررسی آمار مقدماتی بر روی ۲۳۷۰ داده شاخص کیفیت سنگ، ۱۱۷۷ داده لوژان و ۱۱۸٤ داده سیمان خوری گمانه‌های اکتشافی حفرشده در تکیه‌گاه‌های سد تنگاب انجام‌شده است؛ میانگین، واریانس و انحراف معیار متغیر شاخص کیفیت سنگ به ترتیب برابر با ۸۷/۳۸، ۳٦٤/۱۳ و ۱۹/۰۸ است (جدول ۱). نمودار هیستوگرام فراوانی آن (شکل ۲) نشان‌دهنده چولگی منفی و عدم نرمال بودن داده‌ها است. ازآنجایی‌که دامنه تغییرات آن دارای مقادیر بالاست، این موضوع نشان‌دهنده وجود مقادیر بالا در کنار مقادیر پایین شاخص کیفیت سنگ در ترازهای مختلف ارتفاعی است. همان‌طور که اشاره شد داده‌ها از توزیع نرمال پیروی نمی‌کنند و جهت انجام شبیه‌سازی یا تخمین و محاسبات زمین‌آماری نیاز به نرمال کردن داده‌ها است.

شکل (۲–ب) نشان می‌دهد که میانگین متغیر شاخص کیفیت سنگ درترازهای مختلف (بین تراز های ۱۲۹۸ تا ۱٤۵۰ متر از سطح دریا) داری نوسان است و ازآنجایی‌که دامنه تغییرات و پراکندگی داده‌ها زیاد است؛ لذا میانگین نمی‌تواند معیار خوبی جهت مقایسه این متغیر درترازهای مختلف باشد.

جدول ۱ آمار مقدماتی شاخص کیفیت سنگ، لوژان و سیمانخوری بدون تخصیص وزن

متغیر	تعداد	کمینه	بیشینه	میانگین	انحراف معیار	واریانس	چولگی	کشیدگی	دامنه تغییرات	ضریب تغییرات
شاخص کیفیت سنگ	۲۳۷۰	۰	۱۰۰	۸۷/۳۸	۱۹/۰۸	۳٦٤/۱۳	-۲/۱٦	۷/۸۳	۱۰۰	۰/۲۲
لوژان	۱۱۷۷	۰	۲۱۱/۲	٦/۱۵	۱۸/۰۹	۳۲۷/۳۳	۵/٦۹	٤٤/۷۹	۲۱۱/۲	۰/۵۸
سیمان‌خوری	۱۱۸٤	۰	۳٤۷۱۸/٦	۳۳۸/٦	۱٦۸۲/۸	۲۸۳۱۸۰۸	۱۲/٦۰	۲۱۱/۰۱	۳٤۷۱۸/٦	٤/۹٦

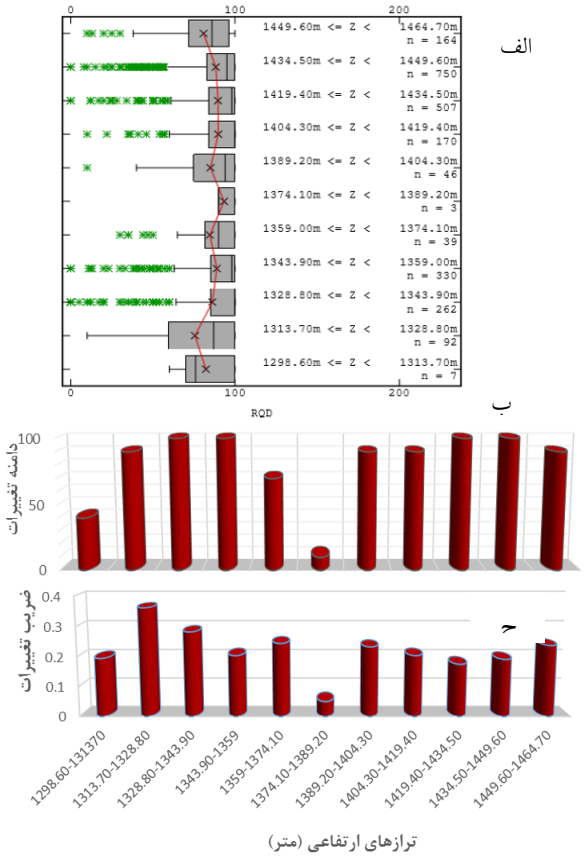


شکل ۲ هیستوگرام مقادیر شاخص کیفیت سنگ و تغییرات میانگین آن در ترازهای ارتفاعی مختلف

در نمودار جعبه‌ای (شکل۳–الف) تغییرات متغیر شاخص کیفیت سنگ در ترازهای مختلف ارتفاعی نشان می‌دهد مقدار میانگین شاخص کیفیت سنگ در بیشتر ترازها از مقدار میانه کمتر است؛ که این موضوع نشان‌دهنده چولگی منفی در اکثر ترازها بوده و متغیر به سمت مقادیر کمتر میل کرده است. در تراز ارتفاعی ۱۲۹۸/٦۰–۷۰/ ۱۳۱۳ متر از سطح دریا مقدار میانگین بیشتر از مقدار میانه بوده که بیانگر چولگی مثبت در این تراز بوده است. نمودار میله‌ای دامنه تغییرات در مقابل ترازهای ارتفاعی مختلف (شکل ۳–ب) نشان می‌دهد در تراز ارتفاعی ۱۳۷٤/۱۰– ۱۳۸۹/۲۰. (متر از سطح دریا) کمترین دامنه تغییرات وجود دارد و اختلاف بین بیشترین و کمترین مقدار متغیر برابر ۱۰ است. در رتبه دوم، تراز ارتفاعی٦۰/ ۱۲۹۸ تا ۱۳۱۳/۷۰ متر است که اختلاف مقادیر بیشینه و کمینه آن برابر ٤۰ است. وجود مقادیر بالا در دامنه تغییرات، در بعضی از ترازهای ارتفاعی، پراکندگی شدید داده‌ها را در ترازهای مختلف نشان می‌دهد و به این معناست که در هر تراز مقادیر بالای متغیر می‌تواند در کنار مقادیر پایین قرار داشته باشد. لذا معمولاً جهت مقایسه و بررسی تغییرات متغیر در ترازهای مختلف مقدار ضریب تغییرات برای هر تراز محاسبه می‌شود. هرچه مقدار ضریب تغییرات بیشتر باشد نشان‌دهنده تغییرات شدیدتر متغیر در آن تراز ارتفاعی است. با توجه آمار مقدماتی متغیر شاخص کیفیت سنگ در ترازهای مختلف بدون تخصیص وزن، مشاهده‌شده است که بیشترین مقدار انحراف معیار در تراز ارتفاعی ۱۳۱۳/۷۰–۱۳۲۸/۸۰ (مترازسطح دریا) و برابر با ۲۷/۵٦ است. با توجه به محاسبه ضریب تغییرات متغیر در ترازهای ارتفاعی، بیشترین تغییرات در تراز ارتفاعی ۱۳۲۸/۸۰– ۱۳۱۳/۷۰ (متر) قرار دارد و ضریب تغییرات آن برابر ۰/۳٦ است و کمترین مقدار ضریب تغییرات مربوط به تراز ۱۳۷٤/۱۰ تا ۱۳۸۹/۲۰ (مترازسطح دریا) است که مقدار آن ۰/۰۵ است (شکل۳–ج). همان‌طور که پیش‌ازاین اشاره شد با توجه به هیستوگرام، متغیر شاخص کیفیت سنگ از توزیع نرمال پیروی نمی‌کند و بدین منظور، داده‌ها با روش تبدیل نرمال گاوسی به نرمال تبدیل‌شده است.

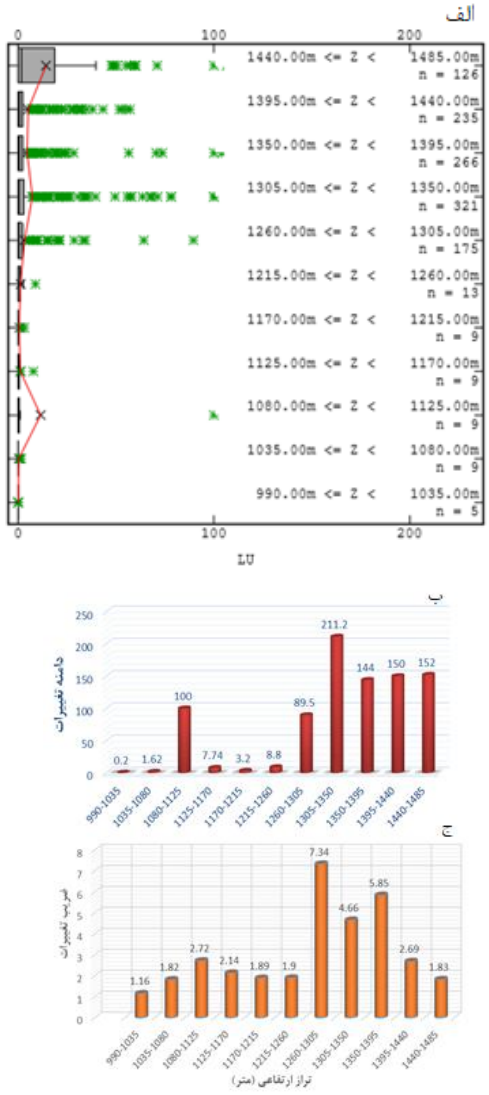
نتایج آمار مقدماتی متغیر لوژان بدون تخصیص وزن (دکلاسترینگ) در جدول (۱) نشان می‌دهد که مقادیر میانگین و چولگی به ترتیب برابر با ٦/۱۵ و ۵/٦۹ است. با بررسی میزان دامنه تغییرات برابر با ۲۱۱/۲ و شاخص‌های پراکندگی مشخص است که مقادیر لوژان در ترازهای مختلف در نوسان بوده است و بیانگر تغییرات این متغیر در ترازهای مختلف است. ازآنجایی‌که

دامنه تغییرات داده‌ها زیاد بوده و اختلاف میان بزرگ‌ترین و کوچک‌ترین داده لوژان در هر تراز مقدار بالایی را نشان می‌دهد؛ میانگین نمی‌تواند معیار خوبی جهت مقایسه لوژان در ترازهای مختلف باشد. تغییرات لوژان در تراز ارتفاعی مختلف در نمودار جعبه‌ای شکل (٤)،نشان می‌دهد در بیشتر ترازها مقدار میانگین بزرگ‌تر از مقدار میانه است؛ که نشان‌دهنده چولگی مثبت در توزیع این متغیر است. مقدار دامنه تغییرات لوژان در برابر ترازهای ارتفاعی مختلف در نمودار میله‌ای شکل (٤–ب) نشان می‌دهد کمترین دامنه تغییرات لوژان در تراز ارتفاعی ۱۲۱۵–۱۱۷۰ متر از سطح دریا، و بیشترین ضریب تغییرات در ترازهای ارتفاعی ۱۲٦۰–۱۳۰۵۰ و ۱۳۵۰ تا ۱۳۹۵ (متر از سطح دریا) قرار دارد (شکل٤–ج). همچنین نتایج آمار مقدماتی میزان سیمان خوری در گمانه‌های اطراف سد (جدول ۱) ، نشان می‌دهد توزیع این پارامتر به‌صورت نرمال نبوده و چولگی مثبت، نشان‌دهنده عدم تقارن داده‌ها است.



شکل ۳ نمودار جعبه‌ای (الف)، دامنه تغییرات (ب) و ضریب تغییرات (ج) شاخص کیفیت سنگ درترازهای ارتفاعی مختلف

همان‌طور که قبلاً بیان شد، عدم توزیع یکنواخت مکانی داده‌ها، به‌شدت پارامترهای آماری را تحت تأثیر قرار می‌دهد. به همین منظور لازم است قبل از تحلیل آماری داده‌ها، وزن مناسب برای هر داده تعیین گردد. در این مطالعه از روش دکلاسترینگ سلولی در کلاستره نمودن متغیرهای شاخص کیفیت سنگ و لوژان استفاده‌شده است. مقدار میانگین متغیر شاخص کیفیت سنگ و لوژان قبل از دکلاسترینگ به ترتیب ۸۷/۳۸ و ٦/۱۵ بوده است که پس از اعمال وزن دهی به ۹۱/۸۷ و ۵/۹۱ تغییر یافته است. بنابراین اعمال وزن دکلاسترینگ بر روی‌داده‌ها تأثیر چندان زیادی بر مقدار میانگین نداشت که نشان‌دهنده توزیع مکانی نسبتاً یکنواخت داده‌ها است.



شکل ٤ نمودارهای جعبه‌ای متغیر لوژان، (الف) نمودارمیله‌ای دامنه تغییرات (ب) نمودارمیله‌ای ضریب تغییرات درترازهای مختلف(ج)

مدل‌سازی تغییرنما

جهت انجام شبیه‌سازی و آنالیزهای زمین‌آماری نیاز به نرمال کردن داده‌ها و ترسیم تغییرنمای مقادیر نرمال شده و برازش مدل‌های مختلف بر تغییرنما تجربی مدل است. ازاین‌جهت در این مرحله پیوستگی مکانی بر اساس تغییرنمای بدون جهت و جهت‌دار مقادیر نرمال شده متغیر شاخص کیفیت سنگ، لوژان و سیمان‌خوری موردبررسی قرارگرفته است. در شکل (۵–الف)، تغییرنمای بدون جهت متغیر شاخص کیفیت سنگ مشاهده می‌شود. دو مدل اثر قطعه‌ای و توانی به تغییرنمای تجربی برازش یافته است. دامنه مدل توانی ۲۱/۲۹ و مدل اثر قطعه‌ای با مقدار ۰/۵۹ بالاترین سهم از واریانس کل را دارا است. تغییرنمای مقادیر نرمال شاخص کیفیت سنگ در سه جهت مختلف محاسبه و مدل‌سازی شده است که به شرح زیر است:

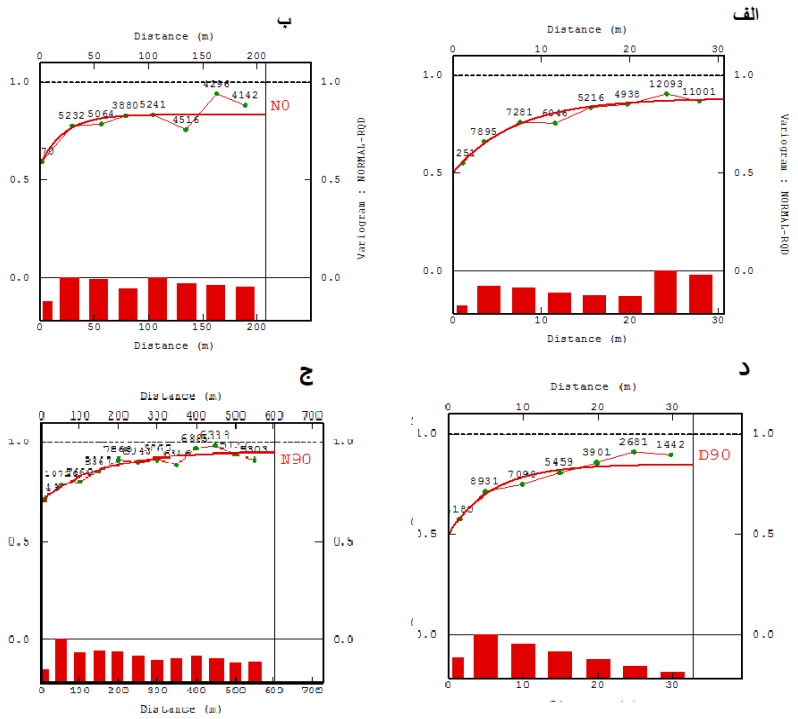
۱. تغییرنمای مقادیر نرمال برای شیب و آزیموت صفر در شکل (۵–ب): با توجه به این شکل، مدل توانی به تغییرنمای تجربی برازش شده است. دامنه مدل توانی و دامنه مدل ٦٦/۳۰ متر است و مدل اثر قطعه‌ای با مقدار ۰/۷ بالاترین سهم از واریانس کل را شامل می‌شود.

۲. تغییرنمای مقادیر نرمال برای شیب صفر و آزیموت ۹۰ در شکل (۵–ج): دو مدل اثر قطعه‌ای و توانی به تغییرنمای تجربی برازش شده است. سهم اثر قطعه‌ای از واریانس کل برابر ۰/۷۵و سهم مدل توانی ۰/۲۵ است و دامنه مدل توانی برابر ٤۳۷/٥۲ متر است.

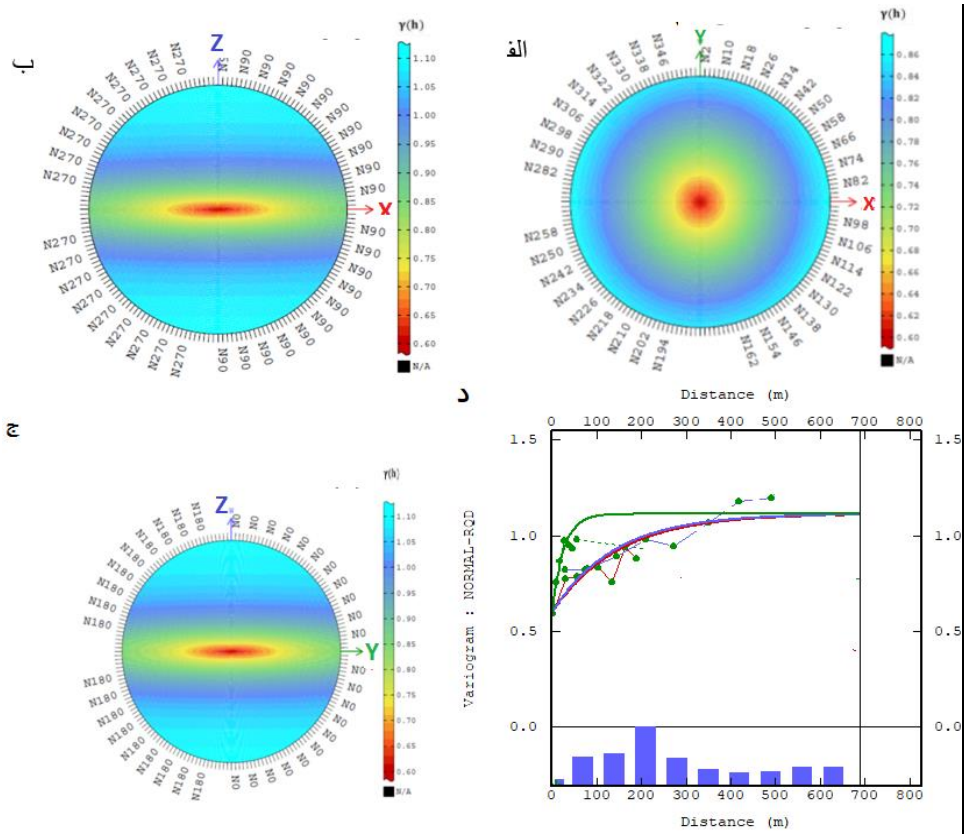
۳. تغییرنمای مقادیر نرمال برای شیب ۹۰ در شکل (۵–د): دو مدل اثر قطعه‌ای و توانی به تغییرنمای تجربی برازش شده است و اثر قطعه‌ای با مقدار ۰/٦۱ بالاترین سهم از واریانس کل را شامل می‌شود. مجموع دامنه مدل برازش یافته به این تغییرنمای تجربی برابر ۱۷/۸۷متر است.

اشکال (٦– الف و ب) تغییرنمای سه‌بعدی به ترتیب در صفحات XY و XZ را نشان می‌دهد. از شکل مذکور می‌توان دریافت پیوستگی مکانی در امتداد محور شرقی–غربی بیشتر از پیوستگی مکانی در امتداد محور Z راستای گمانه‌ها است.

شکل (٦– ج) تغییرنمای سه‌بعدی در صفحه YZ را نشان می‌دهد. با توجه به شکل مذکور پیوستگی مکانی در جهت Y بیشتر از جهت Z است. همچنین سه مدل تغییرنمای جهت‌دار مقادیر نرمال شده متغیر شاخص کیفیت سنگ نیز با یکدیگر تلفیق و به‌صورت یک مدل واحد ارائه‌شده است (شکل ٦–د).



شکل ۵ (الف) مدل برازش یافته تغییرنمای شاخص کیفیت سنگ بدون جهت، (ب) تغییرنما در جهت آزیموت صفر و شیب صفر، (ج) تغییرنما برازش یافته در جهت آزیموت ۹۰ و شیب صفر، (د) تغییرنما برازش شده در جهت شیب نود



شکل. ٦ (الف) تغییرنمای سه‌بعدی شاخص کیفیت سنگ در صفحه XY ، (ب) صفحه XZ ، (ج) صفحه YZ و (د) تغییرنمای تجربی به همراه مدل واحدبرازش یافته درامتدادمحورهای سه بعدی ناهمسانگردی

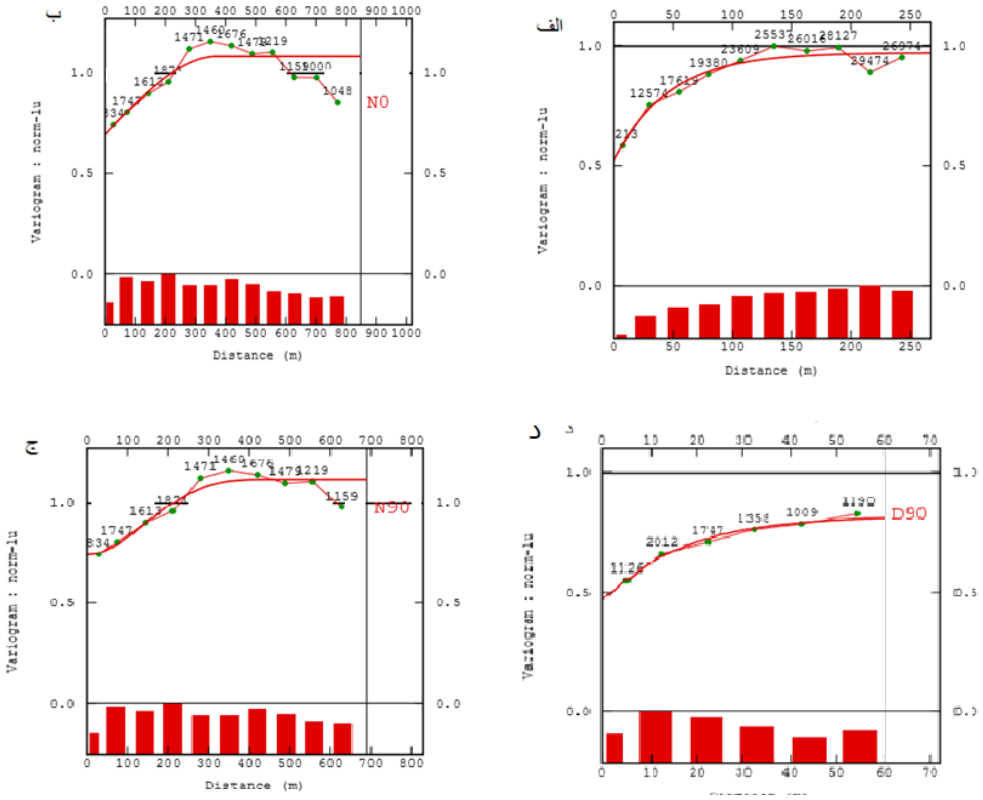
تغییرنمای تجربی جهت‌دار و بدون جهت مقادیر نرمال متغیر لوژان به همراه مدل کروی توانی و کوبیک بر مدل تجربی برازش یافته در شکل (۷) ارائه‌شده است. همان‌طور که در شکل مشاهده می شود دامنه مدل توانی ۱۳٦/۸۰ متر و مدل اثر قطعه‌ای با مقدار ۰/٥٤ بالاترین سهم از واریانس کل را دارا است. همچنین نتایج محاسبه مدل‌سازی و تغییرنمای لوژان در سه جهت مختلف عبارت است از:

٤. تغییرنمای شیب و آزیموت صفر در شکل (۷–الف): دو مدل کروی و اثر قطعه‌ای به تغییرنمای تجربی برازش شده است. دامنه مدل کروی به برابر ۳۷۱/۲٤ متر است و اثر قطعه‌ای مقدار ۰/٦٤ بالاترین سهم از واریانس کل را شامل می‌شود.

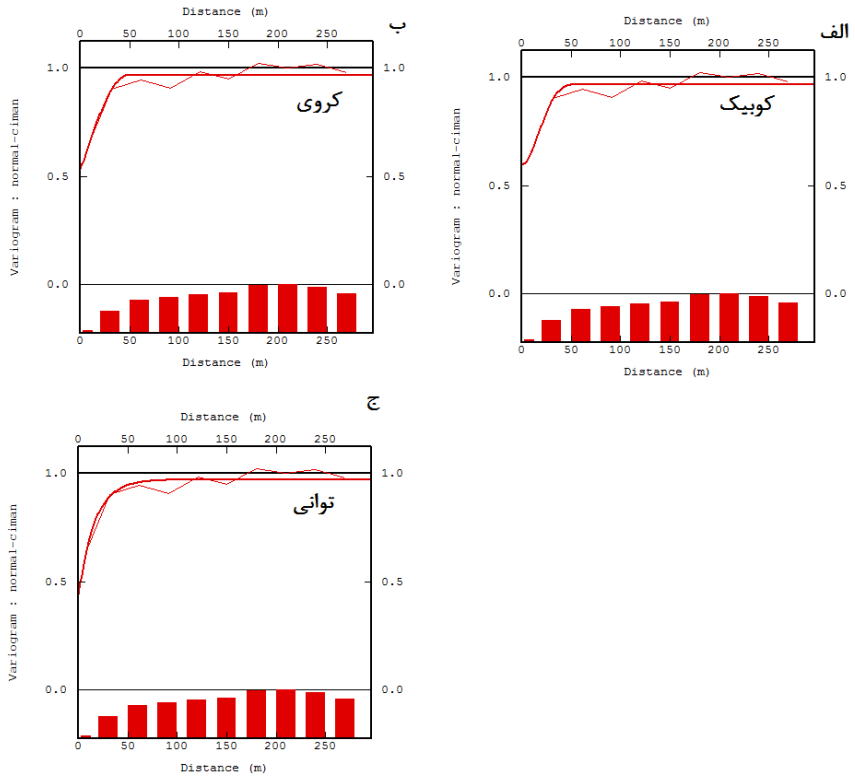
۵. تغییرنمای مقادیر نرمال برای شیب صفر و آزیموت ۹۰ در شکل (۷–ج): دو مدل اثر قطعه‌ای وکوبیک بر تغییرنمای تجربی برازش شده است. سهم اثر قطعه‌ای از واریانس کل برابر ۰/٦٦و سهم مدل کوبیک ۱۰/۳۳است و دامنه مدل توانی برابر با ٤٦۳/۲۹ متر می‌باشد.

٦. تغییرنمای مقادیر نرمال در شیب ۹۰ در شکل (۷–د): دو مدل توانی و اثر قطعه‌ای به تغییرنمای تجربی برازش شده است. اثر قطعه‌ای با مقدار ۰/٥٦ بالاترین سهم از واریانس کل را شامل می‌شود. مجموع دامنه مدل برازش یافته به این تغییرنما برابر ٥۲/۳٤ متر است. با تلفیق سه مدل تغییرنمای جهت‌دار مقادیر نرمال لوژان، یک مدل واحد ارائه‌شده است.

بعد از نرمال‌سازی داده‌های سیمان‌خوری، نمودار تغییرنمای تجربی مقادیر نرمال سیمان‌خوری، به همراه برازش مدل‌های کروی و توانی و کوبیک تهیه‌شده است (شکل ۸). بررسی تغییرنما در جهات مختلف نشان داد هیچ روندی در پیوستگی مکانی سیمان‌خوری مشاهده نمی‌شود و به همین دلیل تغییرنمای بدون جهت محاسبه گردیده است. با توجه به این تغییرنما پیوستگی مکانی این متغیر حدود ۱۰۰ متر بوده است.



شکل ۷ (الف) مدل برازش یافته تغییرنمای لوژان بدون جهت، (ب) تغییرنما در جهت آزیموت صفر و شیب صفر، (ج) تغییرنما برازش یافته در جهت آزیموت ۹۰ و شیب صفر و (د) تغییرنما برازش شده در جهت شیب نود

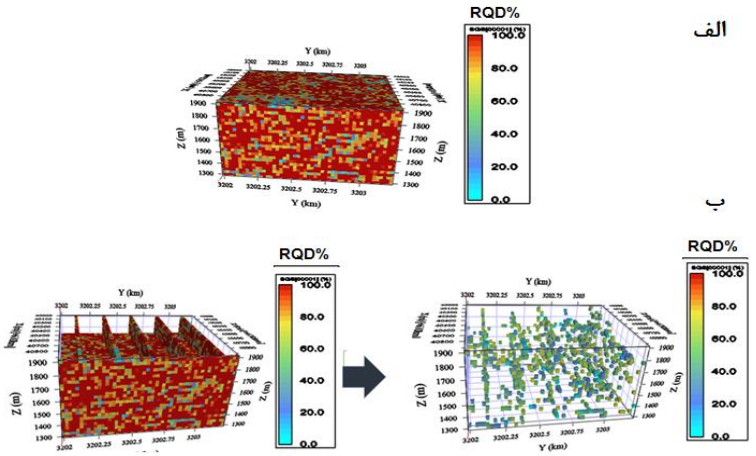


شکل ۸ تغییرنما برازش داده‌شده بر مقادیر نرمال سیمان‌خوری (مدل کروی، کوبیک و توانی)

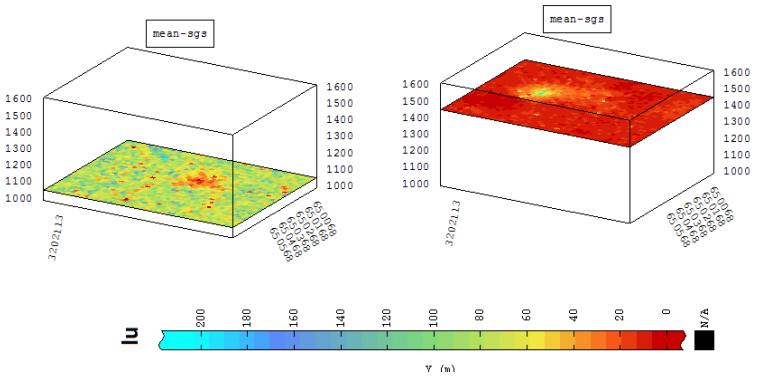
شبیه‌سازی زمین آماری

با کمک تغییرنماها، شبیه‌سازی گاوسی متوالی متغیرهای شاخص کیفیت سنگ، لوژان و سیمان‌خوری، مدل‌سازی گردید. جهت نمایش این شبیه‌سازی به‌عنوان مثال شکل (۹-الف)، نمایی سه‌بعدی از بلوک شاخص کیفیت سنگ می‌باشد و شکل (۱۰-ب)، حد آستانه در ترازهای مختلف آن مشخص‌شده است به‌گونه‌ای که فقط مقادیر بالا یا پایین از یک حد آستانه مشخص را در ترازهای مختلف نشان می‌دهد که در این شکل برای شاخص کیفیت سنگ مقدار کوچک‌تر از ٦۰ درصد درنظرگرفته شده است.

بررسی مقادیر متغیرها در سه بعد و در تمامی خروجی‌های شبیه‌سازی کاری دشوار است و نیازمند به احاطه کامل بر تمامی نتایج شبیه‌سازی است؛ لذا لازم است تا شبیه‌سازها در هر سلول و یا هر منطقه معین به‌صورت خلاصه‌شده به نحوی تعیین شود. بدین سبب نتایج صد شبیه‌سازی هرکدام از سه متغیر شاخص کیفیت سنگ، لوژان و سیمان‌خوری برهم منطبق شدند و مقادیر میانگین و احتمال کوچک یا بزرگ‌تر از مقادیر خاص برای هر سلول محاسبه و در نظر گرفته‌شده است. شبکه شبیه‌سازی‌شده متغیرها در راستای گمانه‌ها (جهت Z)، شامل ۲۵ سلول با اندازه‌ای برابر با ۱۰ متر است که درواقع ۲۵۰ متر شبیه‌سازی در راستای گمانه‌ها انجام‌شده است. در هر تراز ارتفاعی، کمترین شاخص کیفیت سنگ و بیشترین لوژان و سیمان‌خوری در مناطق معینی متمرکزشده است که در این مناطق میزان خردایش و نفوذپذیری بیشتر و احتمال دارای تراوایی بیشتر خواهد بود. لذا می‌توان مکان‌های مناسب را جهت تزریق سیمان در مرحله تکمیلی جهت جلوگیری از فرار آب را پیشنهاد دهد. هرچند در این نقشه‌ها مقادیر احتمال متفاوت است؛ اما روند کلی تغییرات در تمامی این نقشه‌ها یکسان خواهد بود. به‌عنوان‌مثال میانگین تغییرات مکانی لوژان حاصل از شبیه‌سازی گوسی به‌عنوان نمونه در چندین ترازهای مختلف ارتفاعی در شکل (۱۰) نمایش داده‌شده است.



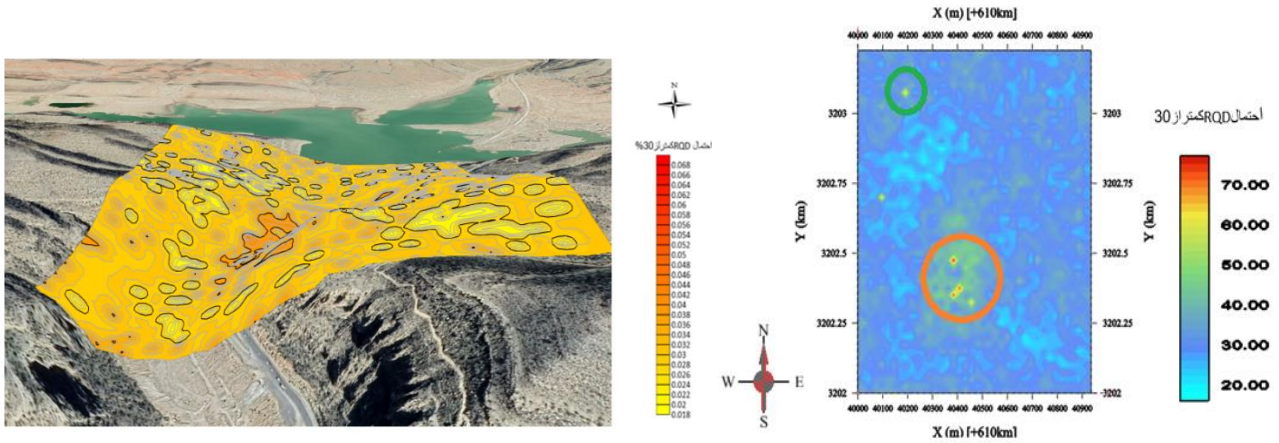
شکل ۹ (الف) نتایج بلوک سه‌بعدی شاخص کیفیت سنگ حاصل از شبیه‌سازی گاوسی در شبکه ایجادشده، (ب) نتایج شبیه‌ساز گوسی درترازهای مختلف با تغییر راستاهای (X,Y.Z)



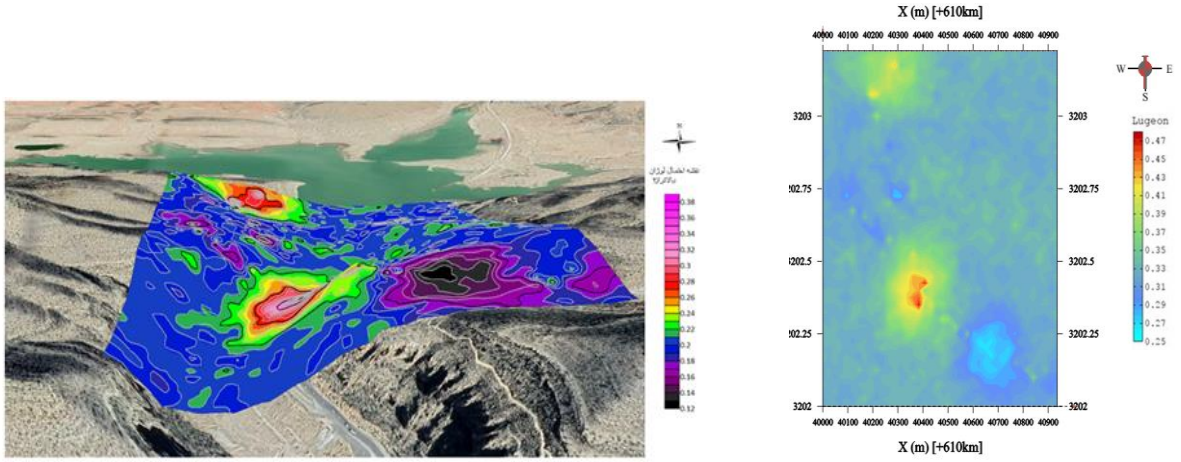
شکل ۱۰- نقشه پلان میانگین حاصل از ۱۰۰ شبیه‌سازی گاوسی لوژان در چند تراز ارتفاعی مختلف

در راستای ارزیابی عدم قطعیت مقادیر شبیه‌سازی‌شده متغیرها، شبیه‌سازی‌ها بر روی یکدیگر منطبق شده و احتمال بزرگ یا کوچک‌تر از یک آستانه محاسبه‌شده است. با توجه به اینکه تشخیص زون‌های تراوا با مقادیر شاخص کیفیت سنگ پایین، مقادیر بالای لوژان و سیمان‌خوری مدنظر است؛ نقشه‌های احتمال کوچک‌تر بودن مقادیر شاخص کیفیت سنگ از مقدار حد آستانه ۳۰ درصد، بالاتر بودن لوژان و سیمان‌خوری از مقادیر حد آستانه به ترتیب ۲ و ۱۰۰ کیلوگرم در واحد طول تهیه‌شده است. از این نقشه‌ها می‌توان در تعیین عدم قطعیت در راستای تعیین نقاط مناسب جهت تزریق سیمان و جلوگیری از فرار آب استفاده نمود. جهت شناسایی بهتر نقاط بهتر است نقشه متغیر را در ترازهای مختلف ارتفاعی ترسیم و با یکدیگر مقایسه کرد. در اشکال (۱۱)، (۱۲) و (۱۳) چند نمونه از نقشه احتمال مقادیر سه متغیر شاخص کیفیت سنگ، لوژان و سیمان‌خوری کوچک‌تر یا بزرگ‌تر از یک حد آستانه ترازهای مختلف مشاهده می‌شود. با توجه به این نقشه‌ها مشاهده می‌شود در محدوده‌ی مخزن و کمی جناح راست سد احتمال مقادیر شاخص کیفیت سنگ کوچک‌تر از ۳۰، احتمال بالاتر از ۲ و ۱۰۰ برای متغیرهای لوژان و سیمان‌خوری وجود دارد. به‌منظور بررسی رابطه بین گسل‌ها، نقشه‌های حاصل از میانگین احتمال شاخص کیفیت سنگ کمتر از۳۰ با نقشه گسل‌های موجود در منطقه تطبیق داده‌شده است (شکل ۱٤)، نتایج نشان‌دهنده این است که در بدنه مخزن و جناح راست سد در نزدیکی و در محل تلاقی گسل‌ها احتمال فرار آب در اثر وجود مناطق با تراوایی بالا افزایش‌یافته است. اگر نقشه‌ی حاصل از احتمال مقادیر لوژان بالاتر از ۲، نقشه احتمال شاخص کیفیت سنگ پایین‌تر از ۳۰ و نقشه احتمال سیمان خوری جهت مقادیر بزرگ‌تر ۱۰۰ کیلوگرم بر متر با یکدیگر مقایسه شود، می‌توان دریافت که در دو محل مرکز مخزن سد و شمال غربی آن انطباق خوبی بین مقادیر پایین شاخص کیفیت سنگ، مقادیر بالای سیمان خوری و لوژان وجود دارد. درحالی‌که در بعضی از نقاط ازجمله نواحی شمال شرق مخزن، روند تغییرات مقادیر احتمال شاخص کیفیت سنگ و لوژان با یکدیگر سازگاری کمی نشان می‌دهند. البته از آنجاییکه همراه با برداشت داده های لوژان، شاخص کیفیت سنگ و سیمانخوری، اطلاعات لیتولوژی و درزه برداری ثبت نشده است؛ نمیتوان بطور دقیق مشخص کرد که آیا لوژانهای بالا یا شاخص کیفیت سنگ پایین مرتبط با سازنده‌های آهکی (کارستی) یا درزه و شکاف های واحدهای سنگی هستند.

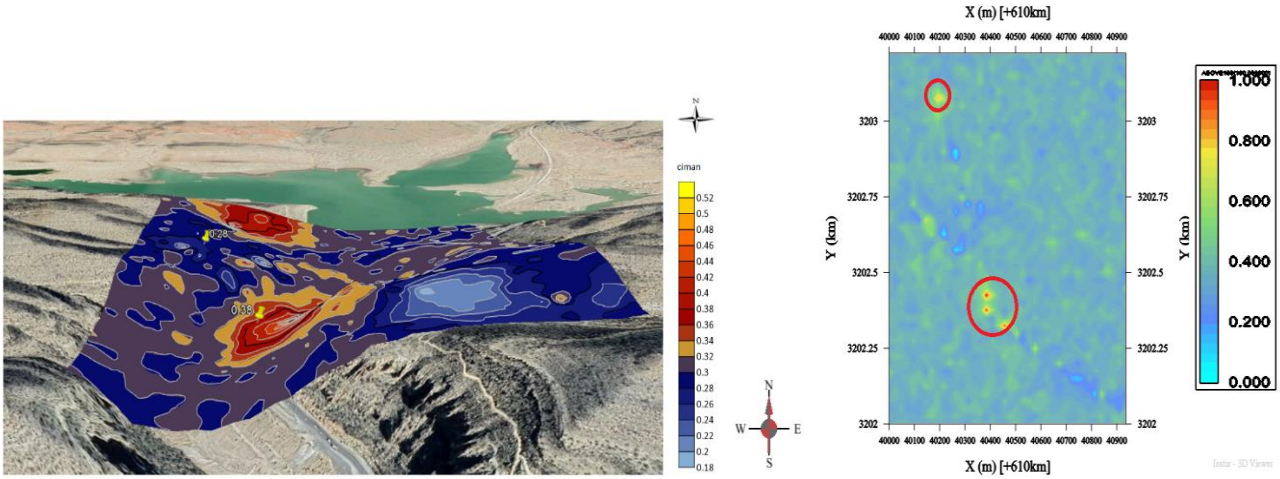
قابل‌ذکر است نتایج شبیه‌سازی هنگامی قابل‌قبول‌اند که قادر به دوباره‌سازی پارامترهای آماری و زمین‌آماری داده‌های اکتشافی باشند. بدین منظور نمودار فراوانی نمای به‌دست‌آمده از نتایج شبیه‌سازی ونمودارهیستوگرام داده‌های واقعی داده (داده‌های گمانه‌های اکتشافی) در نظر گرفته شد (شکل ۱۵). ملاحظه می‌شود که میانگین حاصله از نتایج شبیه‌سازی با میانگین حاصله از تحلیل آماری داده‌های گمانه‌های اکتشافی تقریباً برابر است درنتیجه نتایج حاصل از شبیه‌سازی به‌خوبی قادر به تولید مجدد پارامترهای آماری داده بوده است و از این لحاظ دارای اعتبار هستند.



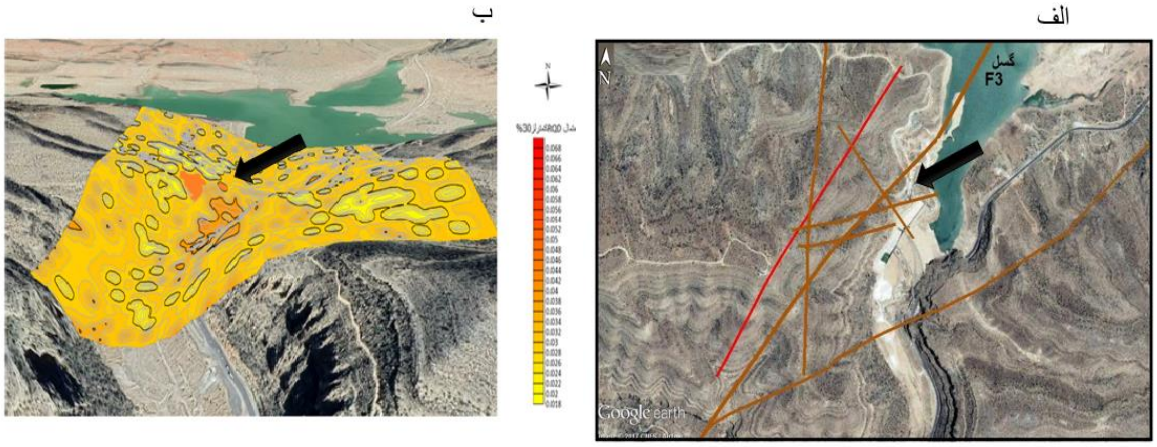
شکل ۱۱– نقشه پلان احتمال متغیر شاخص کیفیت سنگ با مقادیر کمتر از ۳۰ درصد (دوایر رنگی جهت نشان دادن مکان هایی که درآن ها متغییر مورد نظر مقادیر احتمال بالاتری را دارد)



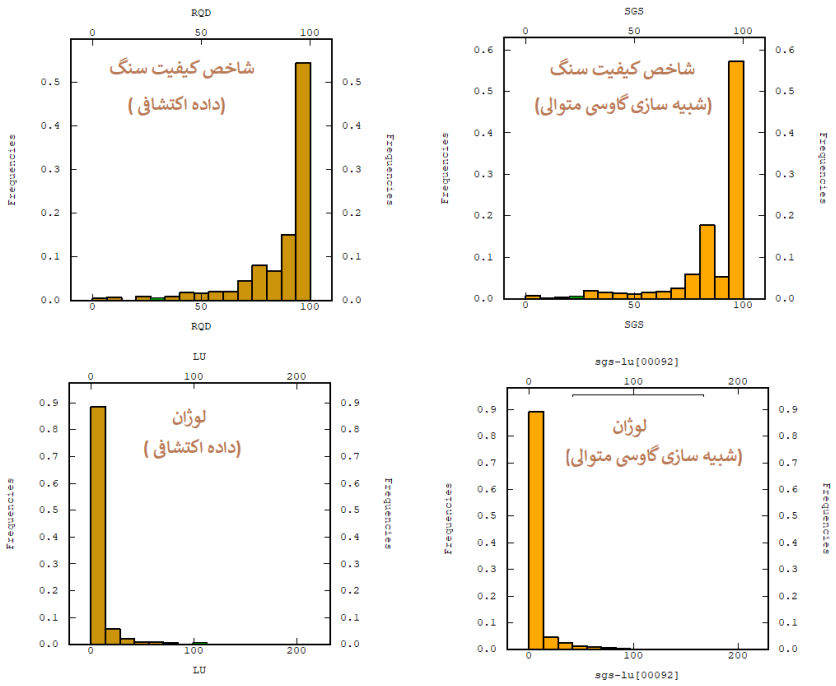
شکل ۱۲ نقشه پلان احتمال مقادیر لوژان با مقادیر بالاتر ازحد آستانه ۲



شکل ۱۳ نقشه پلان احتمال سیمان‌خوری برای مقادیر با حد آستانه بالاتر از ۱۰۰کیلوگرم بر متر (دوایر رنگی جهت نشان دادن مکان هایی که درآن ها متغییر مورد نظر مقادیر احتمال بالاتری را دارد)



شکل ۱٤ (الف) نمایش گسل‌ها در اطراف سد و (ب) نمایش مقادیر احتمال شاخص کیفیت سنگ کمتر از۳۰ بر روی سطح زمین



شکل ۱۵ نمودار هیستوگرام مقادیر داده‌های اکتشافی برداشت از گمانه‌ها ومقادیرشبیه سازی شده

نتیجه‌گیری

در این پژوهش مناطق دارای پتانسیل فرار آب درسدتنگاب با استفاده از شبیه‌سازی گاوسی متوالی موردبررسی قرار گرفت. با توجه به نقشه‌های شبیه‌سازی سه متغیر لوژان، شاخص کیفیت سنگ و سیمان‌خوری در دو محل واقع در مرکز مخزن و شمال غربی سد، مناطق با نفوذپذیری بالا شناسایی‌شده است. لذا در این مکان‌ها پتانسیل فرار آب وجود دارد. بررسی گسل‌های منطقه موردمطالعه نیز نشان داد تراکم گسل‌ها بیشتر در جناح راست سد بوده به همین دلیل وجود گسل‌ها می‌تواند سبب افزایش نفوذپذیری واحدهای سنگی شده باشد. بااین‌وجود در بعضی از نقاط به‌ویژه جناح چپ مخزن سد، ارتباط و همپوشانی بین مقادیر حداکثر لوژان و حداقل شاخص کیفیت سنگ، دیده نشده است که می‌تواند به دلیل ماهیت متفاوت و نحوه اندازه‌گیری دو متغیر شاخص کیفیت سنگ و لوژان،باشد و همچنین یکسان نبودن عمق گمانه‌ها و برخورد گمانه‌ها در ترازهای مختلف ارتفاعی با لایه‌هایی با خصوصیات مختلف را نیز می‌توان از دلایل این موضوع ذکر کرد.درنهایت پیشنهاد می‌گردد تلفیق اطلاعات زمین‌آمار با اطلاعات ژئوالکتریک در شبیه‌سازی زمین‌آماری انجام شود و در مطالعات مشابه، در هنگام اندازه‌گیری داده‌های شاخص کیفیت سنگ داده‌برداری درز و شکاف مغزه‌های سنگ انجام شود و مطالعات و تفسیرهای شاخص سنگ کیفیت بر اساس درز و شکاف صورت گیرد. همچنین باید اشاره کرد محل پیزومترها، تزریق ماده رنگی و برداشت نمونه های رنگی و هیدروشیمیایی در مطالعات قبلی در مناطق دورتر از موقعیت چاه های مشاهده ای و چاههای ژئوتکنیک کنونی قرار داشتند و در حال نیز آن پیزومترهای یا تخریب شده اند و یا سطح ایستابی آنها برداشت نمی شود. لذا در مطالعات پیشین، درمورد مسیر حرکت آب زیرزمینی و نقاط با نفوذپذیری بالا و یا کم در محدوده مطالعاتی این تحقیق، نتایجی نداشته اند که بتوان مقایسه ای در خصوص نتایج داشت.

مراجع

1. Jaquet, O., Siegel, P., Klubertanz, G., Benabderrhamane, H., "Stochastic discrete model of karstic networks", *Advances in Water Resources*, Vol. 27 (7), pp. 751–760, (2004).
2. Issaks, E. H., Srivastava, R. M., "Applied Geostatistics", Newyork, Oxford University Press, (1989).

3. Huysmans, M., Dassargues, A., "Application of multiple-point geostatistics on modelling groundwater flow and transport in a cross-bedded aquifer (Belgium)", *Hydrogeology Journal*, Vol. 17(8), pp. 1901– 1911, (2009).
4. Madani Esfahani, N., Asghari, O., "Fault detection in 3D by sequential Gaussian simulation of Rock Quality Designation (RQD)", *Arabian Journal of Geosciences*, Vol. 6(10), pp. 3737–3747, (2012).
5. Marache, A., Breysse, D., Piette, C., Thierry, P., "Geotechnicalmodeling at the city scale using statistical and geostatistical tools: the Pessac case (France)", *Engineering Geology*, Vol. 107(3-4), pp. 67-76, (2009).

٦. ساسانی نیا، ندا.، بهرام حبیب نیا، و حسین قبادی، "تخمین تخلخل و توزیع فضایی تراوایی با استفاده از مدل زمین‌آماری دریکی از میدان‌های نفتی جنوب غربی ایران"، کنفرانس بین‌المللی علوم و مهندسی، امارت-دبی، موسسه ایده پرداز پایتخت ویرا، (١٣٩٤).

٧. عالی‌انوری، علی.، همایون کتیبه، و حمید محمودآبادی، "تخمین نفوذپذیری معادل در امتداد محور تونل امیرکبیر با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی"، دومین کنفرانس مهندسی معدن تهران، دانشگاه تهران، (١٣٨٧).

٨. مشرفی فر، محمدرضا.، کاظم برخورداری، و حمید موسوی، "ارزیابی خصوصیات ژئوتکنیکی و زمین‌شناسی مهندسی سد مخزنی ایوشان"، دومین کنفرانس ملی مهندسی عمران، معماری و توسعه شهری بابل، مؤسسه علمی تحقیقاتی کومه علم آوران دانش، (١٣٩٥).

9. Lu, L., Kashiwaya, K., Koike, K., "Geostatistics-based regional characterization of groundwater chemistry in a sedimentary rock area with faulted setting", *Environmental Earth Sciences*, Vol. 75, pp. 829, (2016).
10. Assari, A., Mohammadi , Z., "Analysis of rock quality designation (RQD) and Lugeon values in a karstic formation using the sequential indicator simulation approach, Karun IV Dam site, Iran", *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, Vol. 76(2), pp. 1–12, (2016).
11. Yu, Y., "Geostatistical Interpolation and Simulation of RQD Measurements, M.Sc Dissertation", University of British Columbia (Vancouver), (2010).
12. Wuing , Liu, Ch., Shin, Jang, Ch., Min Liao, Ch., "Evaluation of arsenic contamination potential using indicator kriging in the Yun-Lin aquifer (Taiwan)", *Science of the Total Environment*, Vol. 321(1-3), pp. 173–188, (2004).

١٣. عصاری، امین.، و ضرغام محمدی، "شبیه سازی ضریب آبگذری بااستفاده‌از روش‌های زمین‌آماری باهدف تعیین محل چاه‌های پمپاژ مطالعه موردی معدن گل‌گهر"، اولین کنفرانس ملی مهندسی اکتشاف منابع زیرزمینی دانشگاه شاهرود، (١٣٩٢).

14. Ahmdi, SH., Sedghamiz, A., "Geostatistical Analysis of Spatial and Temporal Variations of Groundwater Level", *Environmental Monitoring and Assessment*, Vol. 129 (1-3), pp. 277–294, (2007).

١٥. نخعی بهشته.، "استفاده از روش‌های شبیه سازی استوکاستیک جهت تعیین زون‌های تراوا در سازند سخت پیت معدن گهر زمین، استان کرمان"، ایران، پایان‌نامه کارشناسی ارشد زمین‌شناسی-آب‌شناسی، دانشگاه سیستان و بلوچستان، (١٣٩٧).

١٦. اسدی، ناصر.، "بررسی مسئله فرار آب از سد تنگاب فیروزآباد بااستفاده‌از ردیاب رنگی"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد آب شناسی-زمین شناسی، دانشگاه شیراز، (١٣٧٧).

17. Karimi, H., Raeisi, E., Zare, M., "Physicochemical time series of karst springs as a tool to differentiate the source of spring water", *Carbonates and Evaporites*, Vol. 20(2), pp. 138–147, (2005).
18. Akhondi, M., Mohammadi, Z., "Preliminary analysis of spatial development of karstusing a geostatistical simulation approach", *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, Vol. 73(4), pp. 1037–1047, (2014).

١٩. محمودی، امین.، "محمد صدقی اصل.، منصور پرویزی، و ارسلان مهرکی، بررسی زشت در جناح راست سد خاکی مطالعه موردی سد خاکی تنگاب فیروزآباد"، اولین کنفرانس ملی مهندسی ژئوتکنیک اردبیل، دانشگاه محقق اردبیلی، (١٣٩٢).

۲۰. کریمی، حاجی.، عزت‌ا... رئیسی، و محمد زارع، "بررسی رابطه بین تغییرات سطح آب نفوذپذیری لایه‌های زمین‌شناسی بااستفاده‌از شبکه پیزومتری"، اولین کنفرانس زمین‌شناسی مهندسی و محیط‌زیست تهران، انجمن زمین‌شناسی مهندسی ایران، دانشگاه تربیت‌معلم، (۱۳۷۸).

۲۱. جاور، حسن.، و علی‌محمد حسین نژاد، "آب‌بندی سد تنگاب فیروزآباد فارس با خروج مواد ریزدانه از تشکیلات رسوبی و سنگی و طراحی گمانه‌های متقاطع"، دومین کنفرانس ملی نیروگاه‌های آبی کشور، شرکت توسعه منابع آب و نیروی ایران، (۱۳۸۷).

22. Boufekane, A., Yahiaoui, S., Meddi, H., Meddi, M., Busico, G., “Modified DRASTIC index model for groundwater vulnerability mapping using geostatistic methods and GIS in the Mitidja plain area (Algeria)”, *Environmental Forensics*, (2021), doi.org/10.1080/15275922.2021.1913674.

23. Faria, P. H., Coimbra, Leite Costa J. F., Arcari Bassani, M. A., “Multivariate geostatistical simulation with PPMT: an application for uncertainty measurement”, *Applied Earth Science*, Vol. 130(3), pp 174-184. (2021).

24. Jalili, Pirani F., Modarres, R., “Geostatistical and deterministic methods for rainfall interpolation in the Zayandeh Rud basin, Iran”, *Hydrological Sciences Journal*, Vol. 65(16), pp, 2678-2692. (2020).

25. Mallik, S., Bhowmik, T., Mishra, U., Paul, N., “Mapping and prediction of soil organic carbon by an advanced geostatistical technique using remote sensing and terrain data”, Geocarto International, (2020). doi.org/10.1080/10106049.2020.1815864.

26. Narjary, B., Kumar, S., Meena, M., Kamra, S.K., Sharma, D. K., “Spatio-temporal mapping and analysis of soil salinity: An integrated approach through Electromagnetic induction (EMI), multivariate and geostatistical techniques”, Geocarto International, (2021). doi.org/10.1080/10106049.2021.2002952.

27. Zhang, W., Wang, S., Song, S., Tan, C., Ma, Z., Shan, B., Xu, P., “Determination of representative volume element with consideration of linear anisotropy using geostatistics approach”, *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, (2020). doi.org/10.1080/19648189.2020.1815588.

28. Issaks, E. H., Srivastava, R. M., “Applied Geostatistics, Newyork”, Oxford University Press, (1989).

۲۹. حسنی پاک، علی‌اصغر.، محمد شرف‌الدین، "تحلیل داده‌های اکتشافی"، انتشارات دانشگاه تهران، (۱۳۸٤).

۳۰. مدنی، حسن.، "مبانی زمین‌آمار"، دانشگاه صنعتی امیرکبیر تهران، (۱۳۹۱).

نشریهٔ مهندسی عمران فردوسی (٤٤-۳۱)
سال سی و چهار، شمارهٔ چهار، ۱٤۰۰
DOI: 10.22067/jfcei.2022.72939.1070

ارزیابی خواص مکانیکی مخلوط‌های آسفالتی حاوی مواد افزودنی ضد عریان‌شدگی گریپر، تراگریپ و وتمول-۹۵۰ *

مقاله پژوهشی

افشار یوسفی عباسعلیلو[۱] وشیار محمدحسن[۲] علیرضا سقایی[۳] پویان ایار[٤] محمود عامری[۵]

چکیده *در این تحقیق به ارزیابی تأثیر استفاده از افزودنی‌های گریپر، تراگریپ و وتمول-۹۵۰ به‌عنوان مواد افزودنی ضد عریان شدگی بر خواص مکانیکی مخلوط‌های آسفالتی داغ پرداخته‌شده است. بدین منظور از آزمایش‌های مکانیکی مختلف نظیر خزش دینامیکی، آزمایش مدول برجهندگی در دمای ۲۵ درجه‌ی سانتی‌گراد، آزمایش کشش غیرمستقیم و آزمایش خمش نیم دایره‌ای در دمای ۲۵ درجه‌ی سانتی‌گراد استفاده گردید. نتایج آزمایش‌های مکانیکی نشان داد که همه‌ی افزودنی‌های مورداستفاده در این تحقیق مقاومت در برابر حساسیت رطوبتی، مقاومت در برابر شیار شدگی و مقاومت در برابر ترک‌خوردگی مخلوط‌های آسفالتی را افزایش دادند. به‌طوری‌که مخلوط آسفالتی حاوی افزودنی تراگریپ نسبت به بقیه‌ی افزودنی‌های مورداستفاده در این تحقیق، با افزایش ٤۳ درصدی مقاومت در برابر شیار شدگی و ٤۹/٦ درصدی مقاومت در برابر ترک‌خوردگی بیشترین مقاومت را در برابر ترک‌خوردگی و شیار شدگی از خود نشان داده است. همچنین مخلوط آسفالتی حاوی وتمول-۹۵۰ با ۲۵ درصد افزایش مقاومت در برابر خرابی رطوبتی بیشترین مقاومت در برابر حساسیت رطوبتی را از بین افزودنی‌های مختلف این تحقیق نشان داده است. از طرف دیگری نتایج آنالیز همبستگی بین نتایج آزمایش‌های عملکردی مخلوط‌های آسفالتی نشان داد که بین برخی آزمایش‌های انجام شده همبستگی و ارتباط بیشتری وجود دارد. به‌طوری‌که ضریب همبستگی بین پارامتر نسبت مقاومت کششی غیرمستقیم و نسبت مدول برجهندگی در حالت تر و خشک (TSR و RMR) با ۰/۹۷٤ بیشترین همبستگی را بین پارامترهای مختلف آزمایش‌های عملکردی دارد.*

واژه‌های کلیدی مخلوط آسفالتی داغ، افزودنی‌های ضد عریان شدگی، خزش دینامیکی، مدول برجهندگی، آزمون خمش نیم‌دایره‌ای.

مقدمه

به‌منظور ارزیابی عریان شدگی و حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی از روش‌ها و آزمایش‌های متعددی از قبیل: لاتمن اصلاح‌شده (AASHTO T283)، آزمایش ویل ترک (Wheel Tracking Test)، مدول برجهندگی، روش‌های انرژی بر پایه نظریه انرژی آزاد سطحی(Surface Free Energy) بین قیر و سنگدانه استفاده می‌شود [5–1]. حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی می‌تواند تحت تأثیر عوامل مختلفی نظیر نوع قیر و خصوصیات شیمیایی قیر، میزان پیرشدگی قیر، نوع مصالح سنگی، دانه‌بندی مصالح سنگی و دمای اختلاط و دمای تراکم مخلوط‌های آسفالتی و سایر اجزای تشکیل‌دهنده‌ی مخلوط‌های آسفالتی قرار بگیرد [10–6]. نفوذ رطوبت به مخلوط آسفالتی می‌تواند باعث کاهش دوام و عریان شدگی، جمع شدگی و چاله‌شدگی روسازی‌های آسفالتی شده و خرابی‌های نظیر شیار شدگی و ترک‌های ناشی از خستگی را نیز به وجود بیاورد [11,12]. همواره به‌منظور افزایش دوام و مقاومت در برابر حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی، استفاده از افزودنی‌های ضد عریان شدگی، آهک هیدراته و پلیمر بیشتر موردتوجه بسیاری از محققان صنعت آسفالت قرارگرفته است [16–13]. افزودنی مایع ضد عریان شدگی با تغییر خواص سطح مصالح سنگی و بهبود چسبندگی بین قیر و مصالح سنگی باعث افزایش مقاومت در برابر حساسیت رطوبتی و عریان شدگی مخلوط‌های آسفالتی می‌شوند [17,18].

عامری و همکارانش در سال ۲۰۱۸ به بررسی تأثیر

* تاریخ دریافت مقاله ۱٤۰۰/۷/۱۵ و تاریخ پذیرش آن ۱٤۰۰/۱۰/۱۸ می‌باشد.

(۱) کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران.
(۲) کارشناسی ارشد، مهندسی عمران، دانشگاه آزاداسلامی واحد علوم و تحقیقات، تهران.
(۳) کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران.
(٤) نویسندهٔ مسئول، استادیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران.
(۵) استاد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران.
Email: ayar@iust.ac.ir

زایکوترم (Zycotherm) و ایوانیک (Evonik) و آهک هیدراته به‌عنوان افزودنی‌های ضد عریان شدگی بر خواص مکانیکی مخلوط‌های آسفالتی با استفاده از آزمایش‌های لاتمن اصلاح‌شده و آب جوشان، آزمایش خزش دینامیکی و مدول برجهندگی پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که افزودنی‌های مختلف مورداستفاده در این تحقیق تأثیر مثبتی بر حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی داشته و مقاومت در برابر حساسیت رطوبتی را افزایش داده است. به‌طوری‌که استفاده از زایکوترم نسبت به بقیه‌ی افزودنی‌ها بیشترین تأثیر بر مقاومت در برابر حساسیت رطوبتی را داشته است. همچنین نتایج این تحقیق نشان داد که استفاده از آهک هیدراته بیشترین تأثیر بر مقاومت در برابر شیار شدگی مخلوط‌های آسفالتی را داشته است [19]. نخعی و همکارانش نیز در سال ۲۰۱۸ به ارزیابی مقاومت مخلوط‌های آسفالتی حاوی وکس‌های اتیلن بی استارآمید (Ethylene-Bis-Stearamide) و پلی‌اتیلن(Polyethylene) در برابر حساسیت رطوبتی با مصالح سنگی مختلف و در دمای تولید مختلف با استفاده از آزمایش لاتمن اصلاح‌شده پرداختند. نتایج نشان داد که اتیلن بی استارآمید مقاومت مخلوط‌های آسفالتی را در برابر حساسیت رطوبتی بهتر کرده است. از طرفی همچنین نتایج نشان داد که تأثیر پلی‌اتیلن بر حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی بستگی به دمای تولید مخلوط‌های آسفالتی داشته است. به‌طوری‌که در دماهای بالای تراکم، تأثیر عکسی بر حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی داشته است [20]. کاراهانسر و همکارانش به ارزیابی حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی حاوی ۳ و ۵ درصد وزن قیر خالص از آلومینیم اکسید (Al_2O_3) و ۰٫۳ و ۰٫۵ درصد پودر نانو سیلیکا (SiO_2NP) با استفاده از آزمایش لاتمن اصلاح‌شده پرداختند. نتایج نشان داد که از بین مخلوط‌های انتخاب‌شده، مخلوط آسفالتی ساخته‌شده با ۰٫۳ درصد نانو سیلیکا و ۳ درصد آلومینیم اکسید بیشترین مقاومت در برابر حساسیت رطوبتی را داشته و افزایش درصد استفاده از این افزودنی‌ها، مقاومت در برابر عریان شدگی مخلوط‌های آسفالتی را کاهش داده است [21]. در سال ۲۰۱۹ ارباب پور بیگدلی و همکارانش به‌منظور ارزیابی تأثیر تراشه بتن، فیلر آهکی، سیمان پرتلند و پودر سنگ سیلیسی به‌عنوان مصالح فیلر در مخلوط‌های آسفالتی بر حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی تحت سیکل‌های ذوب و یخ متعدد (۱، ۳، ٦، ۱۰)، از آزمایش‌های مدول بر جهندگی و تنش کششی غیرمستقیم به‌عنوان آزمایش‌های مکانیکی و آزمایش انرژی آزاد سطحی به‌عنوان رویکرد ترمودینامیکی استفاده کردند. نتایج این تحقیق نشان داد که مخلوط‌های آسفالت حاوی فیلر از نوع سیمان پرتلند نسبت به سایر فیلر های مورداستفاده در این تحقیق ازنظر مقاومت در برابر حساسیت رطوبتی در تمام سیکل‌های ذوب و یخ عملکرد بهتری را نشان می‌دهند [22]. همچنین در سال ۲۰۲۰ عامری و همکارانش با استفاده از رویکرد انرژی آزاد سطحی و پارامترهای ترمودینامیکی تأثیر افزودنی‌های زایکوترم، وتمول-۹۵۰ ، گریپر، اوونیک و تراگریپ را بر خرابی رطوبتی مخلوط‌های اسفالتی را ارزیابی کردند. نتایج این تحقیق نشان داد که افزودنی‌های مورداستفاده با افزایش مقدار انرژی لازم برای پیوستگی و چسبندگی بین قیر و مصالح سنگی مقاومت در برابر خرابی رطوبتی را افزایش داده است که از بین افزودنی‌های مورداستفاده زایکوترم و وتمول-۹۵۰ بیشترین مقاومت در برابر خرابی رطوبتی را نسبت به سایر افزودنی‌های مورداستفاده داشته است [23].

هرچند استفاده از افزودنی‌های ضد عریان شدگی می‌تواند مقاومت مخلوط‌های آسفالتی را در برابر عریان شدگی افزایش دهد ولی می‌تواند بر بقیه‌ی پارامترها و خواص مکانیکی مخلوط‌های آسفالتی تأثیرهای مختلفی داشته باشد. بنابراین شناخت و درک رفتار افزودنی ضد عریان شدگی در مخلوط‌های آسفالتی و تأثیر آن‌ها بر خواص مکانیکی یک پیش‌نیاز اساسی جهت ساخت مخلوط‌های آسفالتی مقاوم در برابر خرابی عریان شدگی و سایر خرابی‌های نظیر شیار شدگی و مقاومت در برابر ترک‌خوردگی هست.

در این پژوهش، تأثیر سه نوع افزودنی ضد عریان شدگی مختلف (گریپر، تراگریپ و وتمول-۹۵۰) بر خواص مکانیکی مخلوط‌های آسفالتی با استفاده از آزمایش‌های مدول برجهندگی، خزش دینامیکی، آزمایش مکانیک شکست، و تنش کششی غیرمستقیم مورد ارزیابی قرارگرفته و با یکدیگر مقایسه شده‌اند.

مصالح مصرفی در ساخت مخلوط‌های آسفالتی

در این قسمت، مصالح مورداستفاده در این تحقیق شامل مصالح سنگی، قیر و مواد افزودنی ضد عریان شدگی مورداستفاده معرفی می‌شوند.

مصالح سنگی. در این پژوهش از مصالح سلیسی تهیه‌شده از کارخانه آسفالت شرکت هادپی واقع در شهر تهران با حداکثر

اندازه‌ی اسمی ۱۹ میلی‌متر استفاده گردیده است. ویژگی‌های مصالح با معیارهای آیین‌نامه روسازی آسفالتی ایران (نشریه ۲۳٤) کنترل شد.

دانه‌بندی مصالح سنگی. در این پژوهش مصالح سنگی مخلوط‌های آسفالتی با توجه به استاندارد و محدودیت‌های طرح اختلاط روسازی ممتاز مطابق SHRP A-407, SHRP A-410 و با حداکثر اندازه‌ی اسمی برابر با ۱۹ میلی‌متر انتخاب‌شده‌اند همچنین در این مطالعه از مصالح عبوری از الک شماره ۲۰۰ همین مصالح به‌عنوان فیلر انتخاب گردیده است [24, 25].

قیرمصرفی. در این پژوهش از قیر ٦۰/۷۰ شرکت نفت پاسارگاد برای ساخت نمونه‌های آسفالتی استفاده‌شده است.

افزودنی ضد عریان شدگی. در این پژوهش از ۳ نوع از افزودنی ضد عریان شدگی مختلف (گریپر، تراگریپ و وتمول-۹۵۰) به‌منظور بهبود خواص مکانیکی مخلوط آسفالتی به‌خصوص مقاومت در برابر خرابی ناشی از حساسیت رطوبتی مورداستفاده قرارگرفته است.

گریپر یک استر آلی با ساختار RCO_2R' است که در آن R و ´R هیدروکربن‌های موجود در استر هستند. این افزودنی با ایجاد یک پیوند کووالانسی قوی بین قیر و مصالح سنگی باعث افزایش نیروی پیوستگی و چسبندگی بین قیر و مصالح سنگی‌شده و از عریان شدگی مخلوط آسفالتی جلوگیری می‌کند. از طرفی تراگریپ و وتمول، عامل‌های دارای آلکیل آمید و پلی آمین هستند که به دلیل ایجاد واکنش قوی با سطح اسیدی بخصوص مصالح سنگی سلیسی یک سطح آب‌گریز در سطح مصالح سنگی ایجاد کرده و باعث افزایش مقاومت در برابر حساسیت رطوبتی می‌شوند[26]. زنجیر هیدروکربنی بلند موجود در آمین‌ها سازگار با قیر بوده و با ایجاد یک یون آمینی $R\text{-}NH_3$ با بار مثبت (کاتیونی) در حضور آب می‌تواند نقش یک پل ارتباطی بین سنگدانه های آب‌دوست و قیر آب‌گریز را برای ایجاد پیوند قوی بین آن‌ها داشته باشد[27]. پس از بررسی پژوهش‌های انجام‌شده و پیشنهادهای شرکت‌های تولیدکننده‌ی مواد، مقدار استفاده از هر نوع افزودنی‌ها تعیین گردید. در جدول (۱) خواص فیزیکی و مقادیر استفاده از مواد ضد عریان شدگی بیان‌شده است.

جدول ۱ خواص فیزیکی افزودنی‌های استفاده‌شده

نوع افزودنی	درصد استفاده (نسبت به وزن کل قیر)	خواص فیزیکی
گریپر (GRIPPER® L)	٪۰/٤	حالت فیزیکی: مایع
		رنگ: زرد
		ویسکوزیته (20°C): ۲,۵ پاسکال ثانیه
		چگالی (gr/cm^3at 20°C): ۱,۰۲
		نقطه نرمی: بیشتر از ۱۵۰
تراگریپ (TeraGrip)	٪۰/٤	حالت فیزیکی: مایع
		رنگ: عسلی
		چگالی (gr/cm^3at 20°C): ۰,۹٤-۰,۹٦
		نقطه نرمی: بیشتر از ۱۵۰
وتمول-۹۵۰ (WETMUL-950)	٪۰/۵	حالت فیزیکی: مایع
		رنگ: قهوه‌ای
		چگالی (gr/cm^3at 20°C): ۰,۹٤-۰,۹٦
		حلالیت در آب: قابلیت حلالیت ندارد.
		حلالیت در هیدروکربن: محلول

تعیین درصد قیر بهینه و ساخت مخلوط‌های آسفالتی

در این پژوهش، به‌منظور آماده کردن قیرهای اصلاح‌شده با افزودنی‌های ضد عریان شدگی، افزودنی‌ها در مدت ۱۵ دقیقه به قیر خالص با دمای ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد اضافه گردید. پس از اصلاح قیر با افزودنی‌های ضد عریان شدگی، به‌منظور تعیین میزان قیر بهینه در مخلوط آسفالت از روش طرح اختلاط روسازی ممتاز با سطح ۱ و با درنظرگرفتن ترافیک بیش از ۱۰ میلیون و کمتر از ۳۰ میلیون (سطح ۵ از سطوح ترافیک) و حداکثر دمای ٤۱–۳۹ درجه سانتی‌گراد استفاده‌شده است. وزن مصالح سنگی موردنظر، ۱۲۰۰ گرم و دارای درصد قیرهای ٤/۵ تا ٦ درصد (با اختلاف مقدار ۰/۵ درصد) بودند که از هرکدام سه نمونه تهیه‌شده است. قبل از ساخت نمونه‌های آسفالتی مصالح سنگی به مدت ۲٤ ساعت در دمای ۱۵۵ درجه سانتی‌گراد و قیر به مدت ۱ ساعت در دمای ۱٤۵ درجه‌ی سانتی‌گراد در آون قرارداده شدند. به‌منظور تراکم نمونه‌های ساخته‌شده از دستگاه متراکم کننده ژیراتوری بجای روش تراکم مارشال با واردکردن همزمان یک نیروی استاتیکی و نیروهای برشی ناشی از دوران قالب حول راستایی قائم، عمل ورز دادن و تراکم مخلوط آسفالتی استفاده‌شده است. مقدار دوران طرح (N_d) برای تراکم نمونه‌ها با استفاده از دستگاه متراکم کننده ژیراتوری بر اساس سطح ترافیک و حداکثر دمای هفت روز در محل اجرای پروژه روسازی برابر ۱۲۱ انتخاب‌شده است [25].

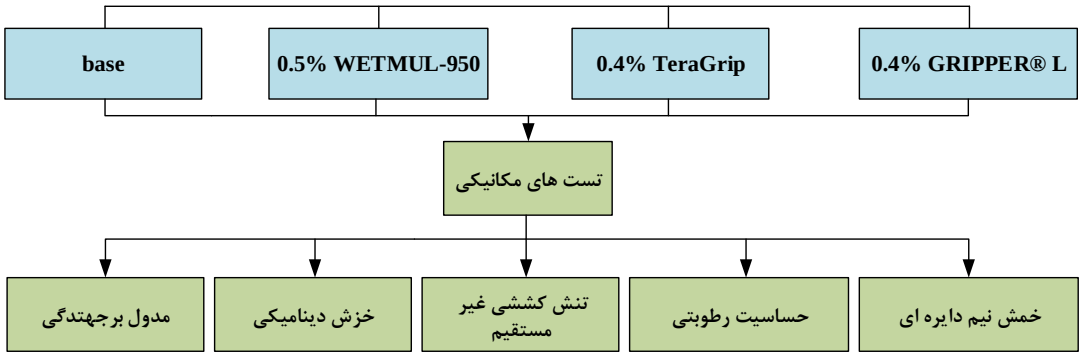
قیر بهینه برای هر یک از مخلوط‌های آسفالتی موردنظر بر اساس استاندارد روسازی ممتاز (AASHTO M323)، جهت تعیین میزان ، درصد قیر استفاده‌شده در مخلوط آسفالتی که در آن درصد فضای خالی مخلوط در تعداد دوران طرح مخلوط (که در این تحقیق، تعداد دوران برابر ۱۲۱ در نظر گرفته‌شده است) برابر ٤ درصد بوده و شرایط لازم طبق آیین‌نامه روسازی ممتاز برای مقدار درصد فضای خالی مصالح سنگی (VMA) و درصد فضای خالی پرشده با قیر (VFA) و نسبت گردوخاک (Dust proportion) را داشته باشد، به‌عنوان درصد بهینه قیر مخلوط آسفالتی تعریف می‌شود [24,28]. در جدول (۲) نتایج پارامترهای حجمی برای مخلوط آسفالتی حالت پایه بیان‌شده است.

جدول ۲ نتایج پارامترهای حجمی برای مخلوط‌های آسفالتی

پارامترهای حجمی مخلوط آسفالتی	نتایج	محدوده روسازی ممتاز
V_a (%)	٤	٤
Pb (%)	۵/۳۰	---
VMA (%)	۱٦/۳۳	>۱۳٪
VFB (%)	٦۹/۲۰	٦۵٪–۷۵٪
نسبت گردوخاک	۱/۱۷	۰/۱–٦/۲
Gmm (g/cm^3)	۲/۳۱٦	–

برنامه‌ی آزمایشگاهی

به‌منظور ارزیابی خواص مکانیکی مخلوط‌های آ سفالتی، آزمایش تنش کششی غیرمستقیم، نسبت تنش‌های کششی غیرمستقیم در حالت تر و خشک، مدول برجهندگی در حالت تر و خشک و آزمایش شکست خمش نیم دایره‌ای در دمای متوسط انجام گرفت. که در شکل (۱) برنامه آزمایشگاهی این تحقیق نشان داده‌شده است.



شکل ۱ برنامه آزمایشگاهی مورداستفاده در این پژوهش

خزش دینامیکی

در این تحقیق از آزمایش خزش دینامیکی و پارامتر عدد جریان به‌عنوان یکی از مهم‌ترین خروجی‌های آزمایش خزش دینامیکی برای ارزیابی تأثیر افزودنی‌های ضد عریان شدگی بر شیار شدگی مخلوط‌های آسفالتی استفاده‌شده است. به‌منظور انجام این آزمایش از دستگاه UTM -5P و بارگذاری برابر با ٤١٤ کیلو پاسکال به‌صورت سینوسی و سیکل ۰/۵ و ۱/۵ ثانیه بارگذاری و باربرداری بر روی نمونه‌های صورت گرفت. قبل از انجام آزمایش نمونه‌های آزمایش خزش دینامیکی به مدت ۵ ساعت در دمای ٥٤/٤ درجه‌ی سانتی‌گراد قرارداده شدند.

نمودار تعداد سیکل بارگذاری به مقدار کرنش تجمعی به‌عنوان خروجی دستگاه آزمایش خزش دینامیکی که در شکل (۲) نمایش داده‌شده است از سه ناحیه‌ی مشخص ناحیه‌ی اولیه (۱) ثانویه (۲) ناحیه سوم (۳) تشکیل‌شده است که افزایش سریع مقدار کرنش تجمعی در ناحیه‌ی اول رخ‌داده و با ورود به ناحیه‌ی دوم از مقدار سرعت افزایش کرنش تجمعی کاسته شده و نمودار شیب ثابتی به خود می‌گیرد. سپس با ورود به ناحیه‌ی سوم دوباره مقدار کرنش تجمعی افزایش می‌یابد که به تعداد سیکلی که نمودار در آن تعداد سیکل به ناحیه سوم وارد می‌شود به‌عنوان عدد روانی(Flow Number) به‌حساب می‌آید. در این پژوهش برای به دست آوردن عدد روانی طبق رابطه زیر از مدل فرانکین استفاده‌شده است [29].

$$\varepsilon_p = An^B + C(e^{Dn} - 1) \qquad (۱)$$

در این رابطه ε_p برابر با مقدار کرنش تجمعی در سیکل‌های بارگذاری مختلف بوده و ضرایب A, B, C,D نیز ضرایب ثابتی هستند.

مقدار عدد روانی برای نمونه‌های مختلف مخلوط آ سفالتی با دو بار مشتق‌گیری از معادله‌ی فرانکین و تعداد سیکل بارگذاری که در آن مشتق دوم معادله‌ی فرانکین از منفی به مثبت تغییر کند طبق روابط زیر به دست می‌آید:

$$\frac{d\varepsilon_p}{dn} = ABn^{B-1} + CDe^{Dn} \qquad (۲)$$

$$\frac{d^2\varepsilon_p}{dn^2} = AB(B-1)n^{B-2} + CD^2e^{Dn} \qquad (۳)$$

$$ITS = \frac{2P}{\pi.D.t} \qquad (٤)$$

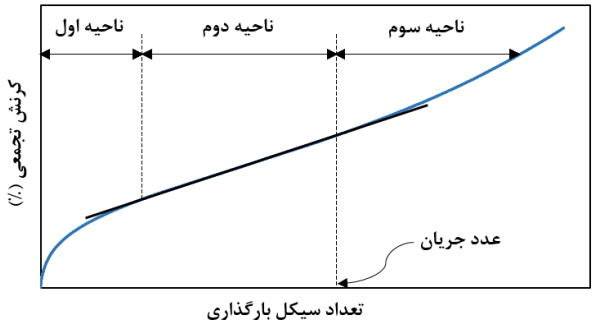
تنش کششی غیرمستقیم و حساسیت رطوبتی

به‌منظور ارزیابی مقاومت در برابر حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی، از آزمایش تنش کششی غیرمستقیم طبق استاندارد AASHTO T 283 استفاده می‌گردد. مقاومت کششی غیرمستقیم آن‌ها طبق رابطه زیر محاسبه می‌شود.

در این رابطه‌ی P برابر با حداکثر نیروی وارد بر نمونه (kN)، t و D برابر باضخامت و قطر نمونه‌های آسفالت برحسب mm هستند.

نسبت تنش کششی غیرمستقیم نیز از تقسیم متوسط مقدار تنش کششی غیرمستقیم حالت تر به خشک طبق رابطه‌ی زیر به دست می‌آید.

$$TSR = \frac{ITS_{\text{تر}}}{ITS_{\text{خشک}}} \times 100 \qquad (۵)$$



شکل ۲ نمودار تعداد سیکل بارگذاری- کرنش تجمعی نمودار خزش دینامیکی [29]

مدول برجهندگی و نسبت مدول برجهندگی Resilient (Modulus Ratio)

به‌منظور طراحی و تعیین ضخامت روسازی‌های آسفالتی از نتایج آزمایش مدول برجهندگی استفاده می‌شود. هر چه مقدار مدول برجهندگی برای یک مخلوط آسفالتی بیشتر باشد. مقدار، ضخامت محاسبه‌شده برای روسازی کمتر خواهد بود. این آزمایش طبق آیین‌نامه ASTM D4123 و در دمای ۲۵ درجه‌ی سانتی‌گراد و تحت فرکانس ۱ هرتز و بارگذاری سینوسی بر روی نمونه‌ها انجام می‌گیرد. مقدار مدول برجهندگی نمونه‌ها آسفالت طبق رابطه‌ی (٦) محاسبه می‌شود.

$$M_R = \frac{(v+0.2734)P}{tH} \qquad (٦)$$

در این رابطه v, P, t و H به ترتیب ضخامت نمونه‌ها برحسب میلی‌متر، نیروی وارد بر نمونه‌ها، نسبت پواسون و میزان تغییر شکل برگشت‌پذیر است که در این تحقیق مقدار پواسون برابر ۰/۳۵ و مقدار بار وارده برابر ٤۰۰ نیوتون در نظر گرفته‌شده است.

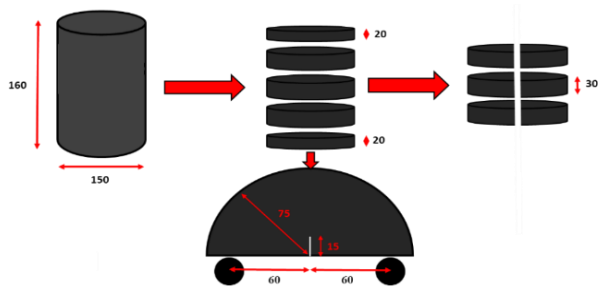
همچنین در این پژوهش طبق رابطه‌ی زیر از نسبت مدول برجهندگی در حالت تر و خشک نیز برای ارزیابی حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی استفاده‌شده است. شرایط عمل‌آوری نمونه‌های حالت تر آزمایش مدول برجهندگی دقیقاً مانند شرایط عمل‌آوری نمونه‌های تر آزمایش مقاومت کششی غیرمستقیم بوده است.

$$RMR = \frac{M_{تر}}{M_{خشک}} \times 100 \qquad (۷)$$

خمش نیم‌دایره‌ای (SCB)

ترک‌خوردگی به‌عنوان یکی از مهم‌ترین خرابی‌های روسازی آسفالتی در دمای متوسط و پایین است. در این تحقیق از آزمایش خمش نیم دایره‌ای به‌عنوان یکی از ساده‌ترین روش‌های ارزیابی مقاومت مخلوط‌های اسفالتی در برابر ترک‌خوردگی در دمای متوسط استفاده‌شده است [29–32]. نمونه‌های خمش نیم دایره‌ای دارای قطر ۱۵۰ میلی‌متر و ضخامت ۳۰ میلی‌متر است. برای تهیه‌ی نمونه‌های SCB ابتدا نمونه‌های استوانه‌ای با ارتفاع ۱٦۰ میلی‌متر و قطر ۱۵۰ میلی‌متر طبق آیین‌نامه‌ی ASTM D 8044-16 تهیه‌شده و سپس نمونه‌های دیسکی به ضخامت ۳۰ میلی‌متر از آن برش داده می‌شود. سپس نمونه‌های دایره‌ای به‌دست‌آمده به دو نمونه‌ی نیم دایره‌ای برش داده‌شده و در وسط آن ترکی به طول ۱۵ میلی‌متر و ضخامت ۲ میلی‌متر ایجاد می‌شود. در شکل (۳) و (٤) به ترتیب مراحل آماده سازی و و نحوه ی قرارگیری نمونه SCB نشان داده شده است.

برای انجام آزمایش خمش نیم دایره‌ای از دستگاه UTM با نرخ بارگذاری ۳ میلی‌متر بر دقیقه استفاده شده است [31,33]. تاکنون برای ارزیابی مقاومت در برابر ترک‌خوردگی مخلوط‌های آسفالتی از پارامترهای مختلفی استفاده‌شده است که در این تحقیق از شاخص‌های انرژی لازم برای شکست مخلوط‌های آسفالتی و شاخص انعطاف‌پذیری برای ارزیابی مقاومت در برابر ترک‌خوردگی مخلوط‌های آسفالتی استفاده‌شده است.



شکل ۳ مراحل آماده‌سازی نمونه‌های SCB

شکل ٤ نحوه قرارگیری نمونه در دستگاه یونیورسال

انرژی لازم برای شکست (Fracture Energy). در این تحقیق به‌منظور ارزیابی ظرفیت کلی مخلوط‌های آسفالتی برای مقاومت در برابر ترک‌خوردگی از شاخص مقدار انرژی لازم برای شکست استفاده‌شده است که طبق رابطه‌ی زیر از تقسیم سطح زیر منحنی نمودار جابه‌جایی – نیرو به سطح مقطع ترک‌خورده به دست می‌آید.

$$G_f = \frac{W_f}{A} = \int (P)du/A \qquad (۸)$$

در این رابطه G_f برابر با مقدار انرژی لازم برای شکست، W_f برابر باکار لازم برای شکست مخلوط‌های آسفالتی (J) و A سطح مقطع ترک‌خورده نمونه‌ی نیم‌دایره‌ای برحسب (m^2) است.

شاخص انعطاف‌پذیری (Flexibility Index). با توجه به اشاره‌ی تعدادی از پژوهشگران به کافی نبودن پارامتر انرژی لازم برای شکست مخلوط‌های آسفالتی برای ارزیابی مقاومت در برابر ترک‌خوردگی مخلوط‌های آسفالتی، در این تحقیق علاوه بر انرژی لازم برای شکست مخلوط‌های آسفالتی از پارامتر شاخص انعطاف‌پذیری به‌عنوان شاخصی برای ارزیابی تردی مخلوط‌های آسفالتی استفاده‌شده است [29,34].

$$FI = 0.01 * \frac{G_f}{|m|} \qquad (۹)$$

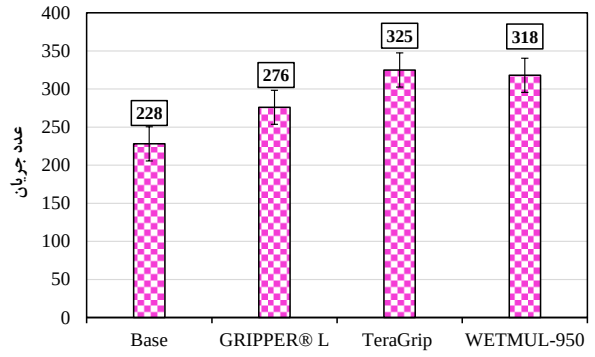
که در این رابطه G_f برابر با مقدار انرژی لازم برای شکست مخلوط‌های اسفالتی (J/m^2)، m برابر با شیب در نقطه‌ی عطف در قسمت دوم منحنی نیرو جابه‌جایی و A ضریب تبدیل واحد و ضریب مقیاس‌گذاری است که در این تحقیق برابر ۰/۰۱ در نظر گرفته‌شده است.

نتایج و بحث

در این تحقیق خواص مکانیکی و دوام مخلوط‌های آسفالتی (شامل یک مخلوط آسفالتی گرم بدون افزودنی ضد عریان شدگی و ۳ نوع مخلوط آسفالت گرم اصلاح‌شده با افزودنی ضد عریان شدگی مختلف) با استفاده از آزمایش‌های مدول برجهندگی، تنش کشش غیرمستقیم، حساسیت رطوبتی، خزش دینامیکی و آزمایش خمش نیم دایره‌ای مورد ارزیابی قرار گرفت. در ادامه، نتایج خواص مکانیکی هر یک از مخلوط‌های آسفالتی بیان‌شده است.

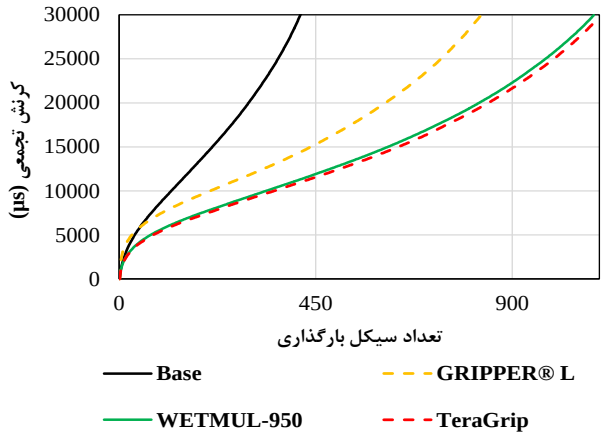
خزش دینامیکی

برای ارزیابی تأثیر افزودنی‌های مختلف بر شیار شدگی مخلوط‌های آسفالتی، از آزمایش خزش دینامیکی استفاده‌شده است. نتایج آزمایش خزش دینامیکی برای مخلوط‌های اسفالتی مختلف در شکل (۵) نشان داده‌شده است. با توجه به نتایج شکل (۵) می‌توان گفت که افزودن عامل‌های ضد عریان شدگی مقدار عدد روانی مخلوط‌های آسفالتی را افزایش داده و مقاومت در برابر شیار شدگی را افزایش داده است. به‌طوری‌که افزودن گریپر مقدار عدد روانی را حدود ۲۱٪ افزایش داده که می‌تواند ناشی از ایجاد پیوند کووالانسی قوی بین قیر و مصالح سنگی و افزایش نیروی چسبندگی بین قیر و مصالح سنگی باشد. از طرفی تراگریپ و وتمول-۹۵۰ به‌عنوان عامل‌های دارای خاصیت پلی آمینی با ایجاد یک سطح آب‌گریز در سطح مصالح سنگی سلیسی مقدار عدد روانی را به ترتیب در حدود ۴۳ و ۴۰ درصد افزایش داده‌اند.



شکل ۵ نتایج آزمایش خزش دینامیکی برای مخلوط‌های اسفالتی مختلف

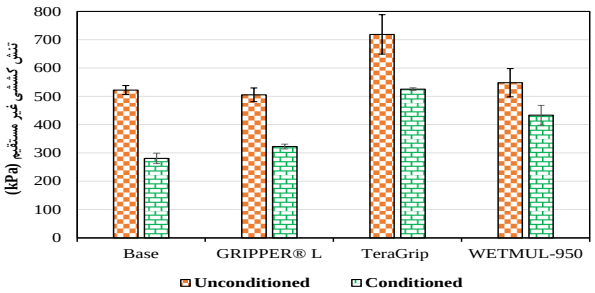
شکل (۶) نمودار کرنش تجمعی- تعداد سیکل بارگذاری برای مخلوط‌های آسفالتی مختلف را نشان می‌دهد. با توجه به شکل می‌توان گفت که به ازای تعداد سیکل بارگذاری یکسان، مقدار کرنش تجمعی برای مخلوط‌های آسفالتی حاوی افزودنی ضد عریان شدگی کمتر شده است. مخلوط آسفالتی حاوی تراگریپ کمترین کرنش تجمعی را در بین افزودنی‌های مختلف از خود نشان داده است. جالب است که مخلوط‌های آسفالتی حاوی تراگریپ و وتمول -۹۵۰ با توجه به پایه شیمیایی یکسانی که دارند روند تقریباً مشابهی در نمودار تعداد سیکل بارگذاری- کرنش تجمعی از خود نشان داده‌اند.



شکل ۶ نمودار خزش دینامیکی مخلوط‌های آسفالتی مختلف تحت تنش ۴۰۰kPa و دمای ۵۴٫۴ درجه‌ی سانتی‌گراد

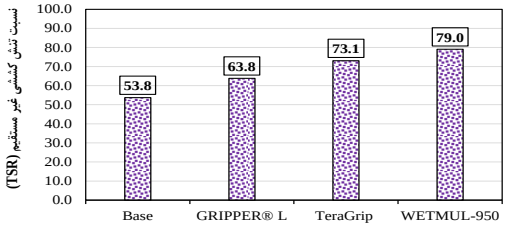
تنش کششی غیرمستقیم و حساسیت رطوبتی

مقدار تنش کششی غیرمستقیم مخلوط‌های آسفالتی حاوی افزودنی‌های ضد عریان شدگی در حالت تر و خشک در شکل (۷) نشان داده‌شده است. با توجه به شکل می‌توان گفت که استفاده از افزودنی ضد عریان شدگی مقدار تنش کشش غیرمستقیم مخلوط‌های آسفالتی را در حالت تر افزایش داده است که این افزایش برای تراگریپ به دلیل واکنش قوی با سطح اسیدی بخصوص مصالح سنگی سیلیسی و ایجاد یک سطح آب‌گریز در سطح مصالح سنگی می‌باشد. اضافه کردن افزودنی‌های تراگریپ و وتمول-۹۵۰ برعکس افزودنی گریپر، مقدار تنش کشش غیرمستقیم مخلوط‌های آسفالتی را در حالت خشک نیز افزایش داده است. بیشترین مقدار افزایش تنش کشش غیرمستقیم برای مخلوط آسفالتی در حالت تر و خشک مربوط به مخلوط آسفالتی حاوی تراگریپ به ترتیب با ۸۶/۶٪ و ۷۳/۵٪ درصد افزایش است.



شکل ۷ مقدار تنش کششی غیرمستقیم مخلوط‌های آسفالتی حاوی افزودنی‌های ضد عریان شدگی در حالت تر و خشک

مقدار نسبت تنش کششی غیرمستقیم مخلوط‌های آسفالتی حاوی افزودنی ضد عریان شدگی در شکل (۸) نشان داده‌شده است. با توجه به شکل می‌توان گفت همان‌طوری که انتظار می‌رفت استفاده از همه‌ی افزودنی‌های مورداستفاده در این پژوهش با توجه به مکانیسم معرفی‌شده در قسمت معرفی افزودنی‌ها، مقدار TSR را افزایش داده است. به عبارت دیگری استفاده از افزودنی‌های گریپر، تراگریپ و وتمول -۹۵۰ به‌عنوان افزودنی ضد عریان شدگی، مقاومت در برابر حساسیت رطوبتی را افزایش داده است. بیشترین افزایش مقدار نسبت تنش کششی غیرمستقیم برای مخلوط آسفالتی حاوی وتمول-۹۵۰ برابر با ۲۵/۲ است. طبق مطالعات قبلی، به‌منظور ارزیابی حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی مختلف، مقدار TSR برابر ۸۰ درصد را به‌عنوان حد مرزی معرفی کرده‌اند[11]. شکل (۸) نشان می‌دهد که مقدار TSR برای ترکیب‌های مختلف مخلوط‌های آسفالتی به مقدار ۸۰ درصد نرسیده و همه‌ی مخلوط‌های آسفالتی مورداستفاده در این پژوهش هنوز مقاومت لازم در برابر حساسیت رطوبتی را ندارند. البته ذکر این نکته نیز مهم است که عوامل مختلفی از قبیل نوع و منبع قیر خالص و مصالح سنگی مورداستفاده می‌تواند نقش مهمی در حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی داشته باشد [7,35–38].



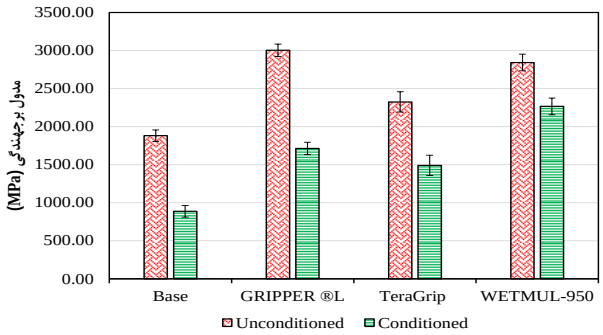
شکل ۸ مقدار نسبت تنش کششی غیرمستقیم مخلوط‌های آسفالتی حاوی افزودنی ضد عریان شدگی

مدول برجهندگی و نسبت مدول برجهندگی

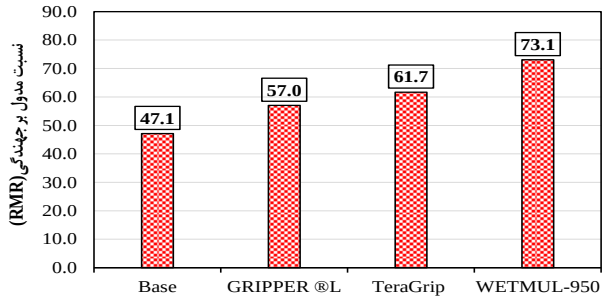
شکل (۹) مدول برجهندگی مخلوط‌های حاوی افزودنی‌های مختلف را در حالت تر و خشک نشان می‌دهد. با توجه به شکل می‌توان گفت که استفاده از افزودنی‌های ضد عریان شدگی، به دلیل ایجاد پیوند شیمیایی قوی بین قیر و مصالح سنگی و ایجاد یک سطح آب‌گریز با افزایش مقدار نیروی لازم برای چسبندگی و گسیختگی مقدار مدول برجهندگی را در حالت تر و خشک افزایش داده است. این افزایش مقدار مدول برجهندگی برای مخلوط‌های آسفالتی حاوی افزودنی ضد عریان شدگی در حالت خشک برای مخلوط حاوی گریپر و در حالت تر برای مخلوط حاوی وتمول -۹۵۰ به ترتیب با ۵۹/۷ و ۱۵۶درصد افزایش بیشترین مقدار را داشته است.

شکل (۱۰) نسبت مدول برجهندگی برای مخلوط‌های آسفالتی حاوی افزودنی‌های ضد عریان شدگی مختلف را نشان می‌دهد. با توجه به این شکل می‌توان گفت نسبت مدول برجهندگی (RMR) با نسبت تنش کششی غیرمستقیم (TSR) روند مشابهی دارند. به‌طوری‌که اضافه کردن افزودنی ضد عریان شدگی به مخلوط‌های آسفالتی با توجه به خواص شیمیایی آن‌ها مقدار نسبت مدول برجهندگی را افزایش داده و تأثیر مثبتی بر مقاومت در برابر حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی داشته

است. بیشترین افزایش مقدار نسبت مدول برجهندگی با ۵۵/۲ درصد برای مخلوط حاوی وتمول-۹۵۰ است. افزودنی‌های گریپر و تراگریپ نیز مقدار نسبت مدول برجهندگی مخلوط‌های آسفالتی را به ترتیب ۲۱ و ۳۱ درصد افزایش داده‌اند. همچنین بسیاری از محققان به‌منظور ارزیابی مقاومت در برابر حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی، مقدار ۷۰ درصد را به‌عنوان حد مرزی برای نسبت مدول برجهندگی در نظر گرفته‌اند. بطوریکه هر چه مقدار نسبت مدول برجهندگی از ۷۰ درصد بیشتر باشد، مقاومت در برابر حساسیت رطوبتی بیشتر خواهد بود. شکل (۱۰) نشان می‌دهد از بین مخلوط‌های آسفالتی مختلف، مخلوط آسفالتی حاوی افزودنی وتمول-۹۵۰ دارای نسبت مدول برجهندگی بالای ۷۳/۱ درصد بوده و مقاومت لازم در برابر حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی را داراست.



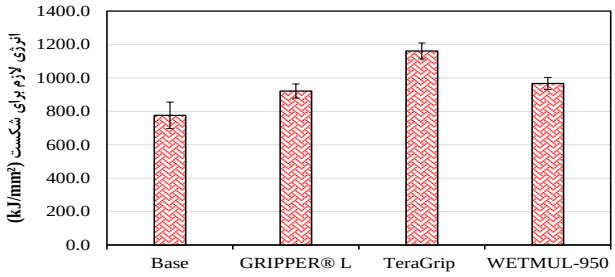
شکل ۹ مدول برجهندگی مخلوط‌های آسفالتی حاوی افزودنی‌های ضد عریان شدگی



شکل ۱۰ نسبت مدول برجهندگی مخلوط‌های آسفالتی حاوی افزودنی‌های ضد عریان شدگی

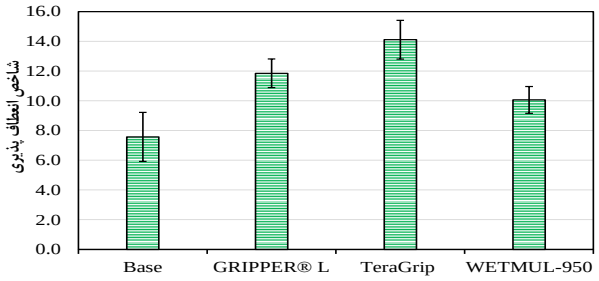
انرژی لازم برای شکست

مقدار انرژی لازم برای شکست مخلوط‌های آسفالتی حاوی افزودنی‌های ضد عریان شدگی در شکل (۱۱) نشان داده‌شده است. همان‌طور که شکل (۱۱) نشان می‌دهد با اضافه کردن افزودنی‌های ضد عریان شدگی، با افزایش مقدار انرژی چسبندگی و پیوستگی بین قیر و مصالح سنگی به دلیل خواص شیمیایی آن‌ها مقدار انرژی لازم برای شکست نمونه‌های ساخته‌شده با این افزودنی‌ها را افزایش داده که برای افزودنی‌های گریپر، تراگریپ و وتمول -۹۵۰ به ترتیب ۱۸/۷، ٤۹/٦و ۲٤/٦ درصد افزایش‌یافته است. از طرفی نتایج آزمایش شکست نشان داد که تراگریپ به دلیل داشتن زنجیر هیدروکربنی بلند در ساختار خود، سازگاری بیشتری با قیر داشته و باعث بهبود چسبندگی بین قیر و مصالح سنگی‌شده و درنتیجه منجر به افزایش مقدار انرژی لازم برای شکست و مقاومت در برابر ترک‌خوردگی مخلوط‌های آسفالتی شده است.



شکل ۱۱ مقدار انرژی لازم برای شکست مخلوط‌های آسفالتی حاوی افزودنی‌های ضد عریان شدگی

شکل (۱۲) شاخص انعطاف‌پذیری را برای مخلوط‌های آسفالتی حاوی افزودنی ضد عریان شدگی مختلف نشان می‌دهد. طبق این شکل، اصلاح قیر با عامل‌های ضد عریان شدگی انعطاف‌پذیری قیرهای اصلاح‌شده را افزایش داده بطوریکه گریپر و تراگریپ و وتمول-۹۵۰ مقدار این شاخص را به ترتیب ۵۵/۳، ۸۵/۵ و ۳۲/۹ درصد افزایش داده‌اند که این افزایش می‌تواند ناشی از خواص شیمیایی خاص ذکرشده برای هر یک از عامل‌های مورداستفاده در این پژوهش باشد. به عبارتی در این تحقیق استفاده از افزودنی‌های ضد عریان شدگی، مقدار شاخص انعطاف‌پذیری و مقاومت در برابر ترک‌خوردگی مخلوط‌های آسفالتی را افزایش داده است.



شکل ۱۲ شاخص انعطاف‌پذیری برای مخلوط‌های آسفالتی حاوی افزودنی‌های ضد عریان شدگی

همبستگی بین نتایج آزمایش‌های عملکردی

به‌منظور شناسایی و بررسی رابطه بین نتایج آزمایش‌های مختلف انجام‌گرفته با یکدیگر، می‌توان از شاخص‌هایی مانند کوواریانس و همبستگی استفاده کرد که در این تحقیق از ضریب همبستگی به‌منظور بررسی همبستگی بین نتایج آزمایش استفاده‌شده است. شاخص همبستگی بین دو متغیر همواره عددی بین ۱ و ۱- است. هرچقدر این ضریب به عدد ۱ و ۱- نزدیک‌تر باشد نشان می‌دهد که دو متغیر باهم رابطه‌ی بیشتری داشته و در هم تنیدگی داده‌ها بیشتر است (در حالت مثبت رابطه مستقیم و در حالت منفی رابطه معکوس دارند). به عبارت دیگری اگر ضریب همبستگی بین دو پارامتر موردبررسی عددی مثبت باشد بدین معناست که با افزایش پارامتر اول، پارامتر دوم هم افزایش خواهد یافت و بالعکس. منفی بودن ضریب همبستگی بین دو پارامتر نیز نشان می‌دهد که با افزایش مقدار یک پارامتر مقدار پارامتر دوم کاهش خواهد یافت. همچنین درصورتی‌که این مقدار به صفر نزدیک باشد، آنگاه می‌توان گفت رابطه معناداری بین دو متغیر وجود ندارد. در جدول (۳) ضرایب همبستگی بین نتایج آزمایش‌های مخلوط‌های آسفالتی مختلف (پارامترهای خروجی آزمایش‌های مکانیکی صورت گرفته: نسبت مقاومت کششی غیرمستقیم (TSR)، نسبت مدول برجهندگی (RMR)، عدد روانی (FN)، انرژی لازم برای شکست (FE) و شاخص انعطاف‌پذیری (FI)) بررسی‌شده است. همان‌طوری که جدول (۳) نشان می‌دهد، بین نتایج آزمایش‌های انجام‌شده برای حالت مختلف مخلوط آسفالتی، ضرایب همبستگی عددی غیر صفر بوده است که به‌طورکلی نشان‌دهنده‌ی همبستگی بیشتر بین آزمایش‌های انجام‌شده در مخلوط‌های آسفالتی مختلف می‌باشد. ضریب همبستگی بین پارامتر TSR و RMR با ۰/۹۷٤ بیشترین مقدار را داشته و بیشترین همبستگی بین این دو آزمایش می‌باشد. از طرفی همبستگی بین آزمایش نسبت مدول برجهندگی و شاخص انعطاف‌پذیری با ۰/۳۸٤ کمترین ضریب همبستگی رابین پارامترهای مختلف داشته است.

جدول ۳ نتایج تحلیل همبستگی بین پارامترهای مکانیکی مخلوط‌های آسفالتی مختلف

	FN	TSR	RMR	FE	FI
FN	۱				
TSR	۰/۹۵۷۸۵۲	۱			
RMR	۰/۸۷۲٦۰٤	۰/۹۷٤	۱		
FE	۰/۹۰۵۱٦۵	۰/۷٤۸۲۳۲	۰/۵۸۲٦۰۳	۱	
FI	۰/۷۵۸۲۸۵	۰/۵٤۹٦٤	۰/۳۸٤۱۷۲	۰/۹۱۹٤۱۳	۱

نتیجه‌گیری

در این پژوهش به ارزیابی تأثیر استفاده از افزودنی‌های گریپر، تراگریپ و وتمول-۹۵۰ به‌عنوان مواد افزودنی ضد عریان شدگی بر خواص مکانیکی مخلوط‌های آسفالتی داغ پرداخته‌شده است. بدین منظور از آزمایش‌های مکانیکی مختلف نظیر خزش دینامیکی در دمای ٥٤/٤ درجه‌ی سانتی‌گراد، آزمایش مدول برجهندگی در دمای ۲۵ درجه‌ی سانتی‌گراد، آزمایش کشش غیرمستقیم و آزمایش خمش نیم‌دایره‌ای در دمای ۲۵ درجه‌ی سانتی‌گراد استفاده گردید. در ادامه خلاصه نتایج عملکرد نمونه‌های مختلف بیان‌شده است:

۱. مطابق نتایج آزمایش خزش دینامیکی، افزودنی‌های مورداستفاده در این تحقیق با افزایش مقدار عدد روانی و کاهش کرنش تجمعی به ازای سیکل بارگذاری یکسان، مقاومت مخلوط‌های آسفالتی اصلاح‌شده را در برابر شیار شدگی افزایش داده‌اند.
۲. نتایج آزمایش مدول برجهندگی و مقاومت کششی غیرمستقیم نشان داد به‌طورکلی افزودنی‌های ضد عریان شدگی مقدار مدول برجهندگی و مقاومت کشش غیرمستقیم مخلوط‌های آسفالتی اصلاح‌شده را در حالت تر و خشک افزایش داده است.
۳. به‌طورکلی اصلاح مخلوط‌های آسفالتی با افزودنی‌های مورداستفاده در این پژوهش با افزایش مقدار TSR مخلوط‌های آسفالتی، مقاومت در برابر خرابی حساسیت رطوبتی را افزایش

داده است. بطوریکه از بین افزودنی‌های مختلف، وتمول-۹۵۰ با ۲۵/۲ درصد افزایش بیشترین تأثیر بر مقاومت در برابر حساسیت رطوبتی را داشته است.

٤. مقایسه نسبت مدول برجهندگی برای مخلوط‌های آسفالتی مختلف نشان داد نسبت مدول برجهندگی (RMR) با نسبت تنش کششی غیرمستقیم (TSR) روند مشابهی داشته و افزودنی‌های ضد عریان شدگی تأثیر مثبتی بر مقاومت در برابر حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی دارند.

۵. مطابق نتایج آزمایش خمش نیم دایره‌ای، اصلاح مخلوط‌های آسفالتی با استفاده از افزودنی‌های ضد عریان شدگی گریپر، تراگریپ و وتمول -۹۵۰ مقدار انرژی لازم برای شکست و شاخص انعطاف‌پذیری مخلوط‌های اسفالتی اصلاح‌شده را افزایش داده است.

٦. آنالیز همبستگی بین نتایج آزمایش‌های عملکردی مخلوط‌های آسفالتی نشان داد بین مدول برجهندگی، عدد روانی، مقاومت کششی غیرمستقیم، انرژی لازم برای شکست و شاخص انعطاف‌پذیری مخلوط‌های آسفالتی، همبستگی و ارتباط بیشتری وجود دارد. به‌طوری‌که ضریب همبستگی بین پارامتر TSR و RMR با ۰/۹۷٤ بیشترین همبستگی رابین پارامترهای مختلف آزمایش‌های عملکردی دارند.

مراجع

1. Ameri, M., Kouchaki, S., Roshani, H., "Laboratory evaluation of the effect of nano-organosilane anti-stripping additive on the moisture susceptibility of HMA mixtures under freeze–thaw cycles", *Construction and Building Materials*, Vol. 48, pp. 1009–1016, (2013).
2. Ameri, M., Vamegh, M., Farhad, S., Naeni, C., Molayem, M., "Moisture susceptibility evaluation of asphalt mixtures containing Evonik , Zycotherm and hydrated lime", *Construction and Building Materials*, Vol. 165, pp. 958–965, (2018).
3. Ameri, M., Ziari, H., Yousefi, A., Behnood, A., "Moisture Susceptibility of Asphalt Mixtures: Thermodynamic Evaluation of the Effects of Antistripping Additives", *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol. Eng. 33(2), 4020457, (2021).
4. Behnood, A., "A review of the warm mix asphalt (WMA) technologies: Effects on thermo-mechanical and rheological properties", *Journal of Cleaner Production*, Vol. 259, 120817, (2020).
5. Behnood, A., Modiri Gharehveran, M., "Morphology, rheology, and physical properties of polymer-modified asphalt binders", *European Polymer Journal*, Vol. 112, pp. 766–791, (2019).
6. Behnood, A., Modiri Gharehveran, M., Gozali Asl, F., Ameri, M., "Effects of copper slag and recycled concrete aggregate on the properties of CIR mixes with bitumen emulsion, rice husk ash, Portland cement and fly ash", *Construction and Building Materials*, Vol. 96, pp. 172–180, (2015).
7. Bhasin, A., Masad, E., Little, D., Lytton, R., "Limits on adhesive bond energy for improved resistance of hot-mix asphalt to moisture damage", *Transportation Research Record*, Vol. 1970(1), pp. 2–13, (2006).
8. Bidgoli, M.A., Naderi, K., Nejad, F.M., "Effect of Filler Type on Moisture Susceptibility of Asphalt Mixtures Using Mechanical and Thermodynamic Properties", *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol. 31(4), pp. 1–10, (2019).
9. Buss, A., Cascione, A., Williams, R.C., "Evaluation of warm mix asphalt containing recycled asphalt shingles", *Construction and Building Materials*, Vol. 61, pp. 1–9, (2014).
10. Cominsky, R.J., Huber, G.A., Kennedy, T.W., Anderson, M., "The Superpave mix design manual for new

construction and overlays", No. SHRP-A-407, Washingtom, DC: Strategic Highway Research Program, (1994).

11. Fakhri, M., Azami, A., "Evaluation of warm mix asphalt mixtures containing reclaimed asphalt pavement and crumb rubber", *Journal of Cleaner Production*, Vol. 165, pp. 1125–1132, (2017).
12. Gorkem, C., Sengoz, B., "Predicting stripping and moisture induced damage of asphalt concrete prepared with polymer modified bitumen and hydrated lime", *Construction and Building Materials*, Vol. 23, pp. 2227–2236, (2009).
13. Guo, N., You, Z., Zhao, Y., Tan, Y., Diab, A., "Laboratory performance of warm mix asphalt containing recycled asphalt mixtures", *Construction and Building Materials*, Vol. 64, pp. 141–149, (2014).
14. Haghshenas, H.F., Rea, R.C., Reinke, G., Yousefi, A., Haghshenas, D.F., Ayar, P., "The Effect of Recycling Agents on the Resistance of Asphalt Binders to Cracking and Moisture Damage", *Journal of Materials in Civil Engineering*, 33(10), p.04021292, (2021).
15. Hamedi, G. H., Moghadas Nejad, F., & Oveisi, K., "Road Materials and Pavement Design Investigating the effects of using nanomaterials on moisture damage of HMA", *Road Materials and Pavement Design*, Vol. 37–41, (2015).
16. Kakar, M.R., Hamzah, M.O., Akhtar, M.N., Woodward, D., "Surface free energy and moisture susceptibility evaluation of asphalt binders modified with surfactant-based chemical additive", *Journal of Cleaner Production*, Vol. 112, pp. 2342–2353, (2016).
17. Karahancer, S., Eriskin, E., Saltan, M., Terzi, S., Akbas, M.Y., Cengizhan, A., "Moisture Susceptibility of Nano-Al2O3 and SiO2 Modified Asphalt Mixtures, in: Airfield and Highway Pavements 2019: Testing and Characterization of Pavement Materials", *American Society of Civil Engineers Reston*, VA, pp. 127–135, (2019).
18. Kavussi, A., Qorbani, M., Khodaii, A., Haghshenas, H.F., "Moisture susceptibility of warm mix asphalt: a statistical analysis of the laboratory testing results", *Construction and Building Materials*, Vol. 52, pp. 511–517, (2014).
19. Kennedy, T.W., Huber, G.A., Harrigan, E.T., Cominsky, R.J., Hughes, C.S., Von Quintus, H., Moulthrop, J.S., "Superior performing asphalt pavements (Superpave): The product of the SHRP asphalt research program", (1994).
20. Khodaii, A., Kazemi Tehrani, H., Haghshenas, H.F., "Hydrated lime effect on moisture susceptibility of warm mix asphalt", *Construction and Building Materials*, Vol. 36, pp. 165–170, (2012).
21. Kok, B.V., Yilmaz, M., "The effects of using lime and styrene–butadiene–styrene on moisture sensitivity resistance of hot mix asphalt", *Construction and Building Materials*, Vol. 23(5), pp. 1999–2006, (2009).
22. Little, D.N., Jones, D.R., "Chemical and mechanical processes of moisture damage in hot-mix asphalt pavements", National Seminar on Moisture Sensitivity of Asphalt Pavements, Vol. pp. 37–70, (2003).
23. Mirzababaei, P., "Effect of zycotherm on moisture susceptibility of Warm Mix Asphalt mixtures prepared with different aggregate types and gradations", *Construction and Building Materials*, Vol. 116, pp. 403–412, (2016).
24. Nakhaei, M., Naderi, K., Akbari, A., Timm, D.H., "Moisture resistance study on PE-wax and EBS-wax modified warm mix asphalt using chemical and mechanical procedures Moisture resistance study on PE-wax and EBS-wax modified warm mix asphalt using chemical and mechanical procedures", *Construction and Building Materials*, Vol. 189, (November), pp. 882–889, (2018).

25. Ozer, H., Al-Qadi, I.L., Lambros, J., El-Khatib, A., Singhvi, P., Doll, B., "Development of the fracture-based flexibility index for asphalt concrete cracking potential using modified semi-circle bending test parameters", *Construction and Building Materials*, Vol. 115, pp. 390–40, (2016).
26. Pirmohammad, S., Khanpour, M., "Fracture strength of warm mix asphalt concretes modified with crumb rubber subjected to variable temperatures", *Road Materials and Pavement Design*, Vol. 1–19, (2020).
27. Shafabakhsh, G.H., Faramarzi, M., Sadeghnejad, M., "Use of Surface Free Energy method to evaluate the moisture susceptibility of sulfur extended asphalts modified with antistripping agents", *Construction and Building Materials*, Vol. 98, pp. 456–464, (2015).
28. Sobhi, S., yusefi, A., hesami, S., Ameri, M., "An investigation of factors affecting the moisture sensitivity of warm mix asphalt (WMA) ", *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, Vol. 52(1), pp. 187–212, (2020).
29. Wang, W., Wang, L., Xiong, H., Luo, R., "A review and perspective for research on moisture damage in asphalt pavement induced by dynamic pore water pressure", *Construction and Building Materials*, Vol. 204, pp. 631–642, (2019).
30. Xiao, F., Zhao, W., Gandhi, T., Amirkhanian, S.N., "Influence of antistripping additives on moisture susceptibility of warm mix asphalt mixtures", *Construction and Building Materials*, Vol. 22(10), pp. 1047–1055, (2010).
31. Yousefi, Afshar, Behnood, A., Nowruzi, A., Haghshenas, H., "Performance evaluation of asphalt mixtures containing warm mix asphalt (WMA) additives and reclaimed asphalt pavement (RAP) ", *Construction and Building Materials*, Vol. 121200, (2020).
32. yousefi, A., Nowruzi, A, yousefi, Y., Sobhi, S., "Evaluation of the effect of loading rate of Semicircular Bending test on different fracture mechanical parameters of asphalt mixtures at intermediate temperature", *Journal of Transportation Research*, Vol. 19(1), pp. 163-176, (2020).
33. Yousefi, A, Pirmohammad, S., Sobhi, S., "Fracture Toughness of Warm Mix Asphalts Containing Reclaimed Asphalt Pavement", *Journal of Stress Analysis*, Vol. 5(1), pp. 85–98, (2020).
34. Yousefi, A.A., Sobhi, S., Aliha, M.R.M., Pirmohammad, S., Haghshenas, H.F., "Cracking Properties of Warm Mix Asphalts Containing Reclaimed Asphalt Pavement and Recycling Agents under Different Loading Modes", *Construction and Building Materials*, Vol. 300, 124130, (2021).
35. Zhdanov, S.P., Kosheleva, L.S., Titova, T.I., "IR study of hydroxylated silica", *Langmuir*, Vol. 3(6), 960–967, (1987).
36. Zhu, C., Tang, J., Zhang, H., Duan, H., "Effect of liquid anti-stripping agents on moisture sensitivity of crumb rubber modified asphalt binders and mixtures", *Construction and Building Materials*, Vol. 225, pp. 112–119, (2019).
37. Zumrawi, M.M.E., Edrees, S.A.S.,. "Comparison of Marshall and Superpave asphalt design methods for Sudan pavement mixes", *International Journal of Scientific and Technical Advancements*, Vol. 2(1), pp. 29–35, (2016).
38. Ziari, H., Orouei, M., Divandari, H., Yousefi, A., "Mechanical Characterization of Warm Mix Asphalt Mixtures Made with RAP and Para-fiber additive", *Construction and Building Materials*, Vol. 279, 122456. (2021).

نشریهٔ مهندسی عمران فردوسی (۵۴-۴۵)
DOI: 10.22067/jfcei.2022.73898.1088
سال سی و چهار، شمارهٔ چهار، ۱۴۰۰

ارائه مدل جریان عبوری عابران‌پیاده در تسهیلات پیاده شهری با استفاده از الگوریتم‌های فراابتکاری (مطالعه موردی: شهر رشت)*

مقاله پژوهشی

سیدابراهیم عبدالمنافی[۱] ترمه ودادی گرگری[۲] سید امیر سعادتجو[۳] سعید فاطمی[۴] سید علی ضیائی[۵]

چکیده *رفتار عابران‌پیاده نقش مهمی در طراحی تسهیلات پیاده به خصوص در مناطق پرتردد ایفا می‌کنند. یکی از این خصوصیات رفتاری، سرعت راه رفتن آنان از پیاده‌روها و پیاده‌راه‌ها شده می‌باشد؛ بنابراین مهم‌ترین اقدام قبل از هر چیز شناخت پارامترهای جریان عابران‌پیاده در هنگام عبور از تسهیلات مختلف شهری است. هدف از این پژوهش مدل‌سازی جریان عابران‌پیاده عبور از تسهیلات پیاده مختلف شهری (پیاده‌رو و پیاده‌راه) می‌باشد. از این‌رو با تصویربرداری از یک پیاده‌رو و یک پیاده‌راه، به جمع‌آوری اطلاعات ۱۰۲۱۰ عابرپیاده عبوری پرداخته شد. سپس با استفاده از مدل‌های رگرسیون و روش الگوریتم ژنتیک، روابط جریان عابران‌پیاده از قبیل سرعت، نرخ جریان و چگالی مدل‌سازی شد. نتایج نشان داد که دقت مدل‌ها برای تسهیلات مختلف شامل پیاده‌رو، پیاده‌راه با استفاده از الگوریتم ژنتیک دارای دقت پیش‌بینی بالاتری نسبت به روش رگرسیونی و به ترتیب برابر با ۰/۹۴۵۱ و۰/۹۰۶۲ می‌باشند؛ بنابراین می‌توان در این زمینه الگوریتم ژنتیک را به عنوان یکی از روش‌های فراابتکاری که دارای دقت بیشتری می‌باشد، به عنوان مدل برتر معرفی کرد.*

واژه‌های کلیدی عابرپیاده، سرعت، نرخ جریان، چگالی، رگرسیون، روش الگوریتم ژنتیک

مقدمه

امروزه اغلب این احساس به وجود می‌آید که عابرپیاده در اجرای عملیات ساخت و سازی که ناشی از یک برنامه‌ریزی بر مبنای حرکت سواره است، نقش چندم و بی‌اهمیتی را ایفا می‌کند. وجود این شرایط در تخصیص سطوح کاربری‌های عمومی، واقعیت‌ها را غیر از آنچه که است، نشان می‌دهد[3]. همانند گذشته، امروزه نیز عابران‌پیاده بیشترین سهم را در تردد دارند و به همین دلیل، مهم‌ترین عامل در تردد می‌باشند، اما حوزه قانونی سیستم رفت‌وآمد امروزی، از مرحله پیش‌بینی تا مرحله نتیجه‌گیری، به کلی به سود خودروسواران و در نتیجه به نفع تردد اتومبیل‌ها است. در این روند، توقع و انتظار بیشتری برای ایجاد شرایط بهتر برای خودروها به وجود آمده و ساخت‌وسازهای بعدی نیز این توقعات را جامع عمل پوشانده است. از این‌رو، افزایش سهم پیاده‌روی در حمل‌ونقل شهری، نیازمند حصول شناختی صحیح از انسان و بالطبع آن، برآورده کردن نیازها در جهت نیل به افزایش این سهم است. مدل‌سازی تردد عابران‌پیاده می‌تواند پیش‌زمینه طراحی تسهیلات بهینه، به منظور پیاده‌مدار کردن یک شهر باشد. رفتار عابران‌پیاده تحت تأثیر متغیرهای مستقلی ازجمله سرعت عبور از عرض آن‌ها، چگالی و نرخ جریان عبور قرار دارد که این متغیرها تحت تأثیر سن، جنسیت، وزن، فردی یا گروهی رفتن عابران و حتی نوع پوشش می‌توانند منجر به رفتارهای متفاوت آنان را نتیجه دهد [4]. ازاین‌رو یکی از مهم‌ترین مواردی که در مبحث تسهیلات پیاده و مدل‌سازی عابران‌پیاده مورد بررسی قرار می‌گیرد، شناخت رفتارهای آن‌ها در حالت‌های مختلف است و نحوه هدایت مسیر عابران‌پیاده به سمت مسیرهای مناسب همراه با بروز کمترین برخوردها میان عابران‌پیاده است؛ بنابراین پیش از طراحی تسهیلات عابرین‌پیاده می‌بایست پارامترهای ترافیکی عابران‌پیاده از جمله سرعت، چگالی، نرخ جریان، نحوه حرکت،

* تاریخ دریافت مقاله ۱۴۰۰/۹/۷ و تاریخ پذیرش آن ۱۴۰۰/۱۱/۱۶می‌باشد.

(۱) نویسندهٔ مسئول، استادیار دانشکده عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات.
(۲) کارشناسی‌ارشد عمران گرایش حمل‌ونقل، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران شمال.
(۳) دانشجوی دکتری عمران گرایش راه‌وترابری، دانشگاه علم و صنعت ایران.
(۴) دانشجوی دکتری عمران گرایش راه‌وترابری، دانشگاه فردوسی مشهد.
(۵) استادیار، گروه عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد.
Email: abdolmanafi@srbiau.ac.ir

ظرفیت محدوده مورد نظر و همچنین پارامترهای رفتاری عابران ازجمله نوع پوشش، سن، وزن و میزان تاثیر جنسیت بر رفتار حرکتی و مواردی از این دست مورد بررسی قرار گیرد. بنابراین در این مطالعه همگام با بررسی رفتار عابران‌پیاده و محاسبه‌ی پارامترهای ترافیکی مرتبط با آن از جمله سرعت، چگالی و نرخ جریان به مدل‌سازی تردد عابران‌پیاده در تقاطعات و تسهیلات پیاده پرداخته خواهد شد که بتوان با استفاده از این مدل رفتار عابران‌پیاده را به صورت دقیق‌تر نسبت به دیگر مدل‌ها در نمونه‌های آماری مختلف پیش‌بینی کرد.

مرور بر مطالعات پیشین

حجم شمار مطالعات انجام گرفته در زمینه عابرپیاده در مقایسه با سایر مباحث حمل‌ونقلی بسیار اندک است و از میان این مطالعات، بیشتر به موضوعاتی با محوریت وضعیت معابرپیاده و طراحی سیستم‌های پیاده‌روی و همینطور ایمنی عابران‌پیاده پرداخته شده است و جریان خود عابرپیاده و مفاهیمی از قبیل سرعت، چگالی و حجم در تسهیلات پیاده کمتر مورد توجه قرار گرفته است. با این وجود در کشورهای مختلف تحقیقات ارزنده‌ای انجام گرفته است تا به شناخت هرچه بیشتر جریان عابران‌پیاده و ایجاد امکانات برای این دسته از کاربران راه بینجامد.

هلبینگ و همکاران [5]در مطالعه‌ای بر روی حرکت زائران در شهر مکه در سال ۲۰۰۷، نمودار چگالی عابران‌پیاده را مبتنی بر شبیه‌سازی ارائه کردند. این نمودار مبتنی بر مدل‌سازی حرکت عابران‌پیاده بر اساس مدل نیروی اجتماعی است و از آن برای مقایسه مقادیر چگالی در حالت شبیه‌سازی استفاده نمودند. لیو و همکاران [6] در سال ۲۰۰۸ در پژوهشی پیرامون مدل‌سازی جریان عابران‌پیاده در راه‌پله‌های ایستگاه قطار زیرزمینی شانگهای با جمع‌آوری مشخصات جریان عابران‌پیاده در راه‌پله‌های چند مرکز توزیع عابران‌پیاده در چین از قبیل ایستگاه قطار زیرزمینی شانگهای و ایستگاه قطار شانگهای، با استفاده از تحلیل کیفی، روابط چگالی-سرعت و چگالی-جریان را به صورت توابعی بدست آوردند. همچنین جریان عابران‌پیاده در راه‌پله‌ها را با جریان وسایل نقلیه مقایسه نمودند. هونگ فی و همکاران[7] در سال ۲۰۰۹، با برداشت اطلاعات جریان عابران از روی تصاویر ضبط شده در پایانه مسافربری ژیژمن در چین و تحلیل آماری این اطلاعات، روابط جریان-چگالی و سرعت-چگالی را بدست آوردند. چن، یی و جیان[8] در سال ۲۰۱۰ در مطالعه روابط و ویژگی‌های جریان ترافیک عابرپیاده در معابر محصور به جریان طولی عابران‌پیاده در معابر سرپوشیده پرداختند. پارامترهای جریان پیاده‌روی شامل سرعت، چگالی و نرخ جریان را در شرایط تراکم کم و تراکم زیاد با استفاده از ضبط ویدئویی بدست آوردند و سپس با تجزیه‌وتحلیل اطلاعات به یافتن رابطه بین داده‌ها پرداختند و با استفاده از رگرسیون آماری و سازگاری با واقعیت، مدل جریان ترافیک عابرپیاده در مورد سرعت- چگالی و حجم- چگالی برای استفاده از تمام امکانات مشاهده‌شده تعیین شده است. پلا و همکاران[9] در سال ۲۰۱۱ در مطالعه‌ای پیرامون تعیین مسیر و تجزیه‌وتحلیل چگالی از جریان تداخلی عابران‌پیاده از تصاویر ضبط شده چگالی عابران‌پیاده را مورد بررسی قرار دادند. تانگ و همکارانش[10] در مطالعه بر روی سرعت و چگالی عابران‌پیاده در شرایط چگالی کم و متوسط در محوطه ایستگاه چیبای ژاپن و شانگهای چین سرعت و چگالی عابران‌پیاده را در ژاپن و چین به منظور روشن کردن ویژگی‌های مختلف رفتار عابرپیاده، در زمینه‌های فرهنگی متفاوت مقایسه نمودند و دریافتند که در اوقات فراغت سرعت آهسته و چگالی کم است، در زمان عجله سرعت زیاد و چگالی بالا است، سرعت در معابر پلکانی کندتر از معابر تخت است و در پایان نتیجه بر این شد که در چین مردم برای سریع‌تر به مقصد رسیدن از راه‌های میانبر استفاده می‌کنند اما در ژاپن با سرعت بیشتری حرکت می‌کنند. راستوگی و همکاران[11] در مطالعه مشخصات جریان عابرپیاده برای تسهیلات و موقعیت‌های متفاوت عابران‌پیاده با جمع‌آوری اطلاعات راه‌رفتن عابران‌پیاده، در ۱۹ مکان در ۵ شهر هند و طبقه‌بندی تسهیلات عابران‌پیاده بر اساس عرض دریافتند که رابطه بین سرعت و چگالی در پیاده‌روهایی با عرض‌های متفاوت، یک رابطه نمایی می‌باشد. همچنین اظهار داشتند که کم‌عرض‌تر شدن پیاده‌روها سبب کاهش سرعت جریان آزاد می‌شود. شفابخش و همکاران[12] در سال ۲۰۱۳ طی مطالعه‌ای با تجزیه‌وتحلیل سرعت عابران‌پیاده در پیاده‌روهای ایران (با توجه به سالمندان) به منظور برآورد اثر جمعیت سالمندان در جریان

حرکت عابران‌پیاده در پیاده‌رو با استفاده از روش شبیه‌سازی میکرو اقدام به شبیه‌سازی عابران‌پیاده نمودند. چاندرا و کومار[13] با جمع‌آوری سرعت عبور از عرض و راه‌رفتن عابران‌پیاده از ۷ پیاده‌رو و تقاطع در هند اشاره کردند که سرعت عابران‌پیاده با توجه به سن، جنسیت و مکان تسهیلات عابران‌پیاده متفاوت می‌باشد و اختلاف معناداری بین سرعت راه‌رفتن و عبور از عرض عابران‌پیاده وجود دارد. همچنین آن‌ها بیان کردند که سرعت عابران‌پیاده در پیاده‌روهای عریض به‌طور قابل‌توجهی با دیگر تسهیلات عابرپیاده تفاوت دارد. داس و همکاران[14] با استفاده از آنالیز میکروسکوپی به تعیین بازده ماکروسکوپی برای توسعه مدل‌های جریان عابرپیاده پرداختند. مدل‌های توسعه یافته و مقادیر برآورد شده پارامترهای جریان مانند سرعت و ظرفیت آزاد جریان با داده‌های واقعی مقایسه شده و خطای تخمین زده شده کمتر از ۱۰٪ بود. گل آکیا و همکاران[15] به بررسی تبدیل شریان‌های شهری ٦ خطه به ٤ خطه تحت تأثیر مانورهای جریان عابران‌پیاده پرداختند. در نهایت با استفاده از مدل‌های رگرسیونی به ارائه رابطه ریاضی بین جریان عابران‌پیاده و ظرفیت وسایل نقلیه عبوری پرداختند. رابطه بین عبور متقابل عابرپیاده و افت ظرفیت جریان عبوری می‌باشد و همچنین هنگامی که عبور متقاطع عابران‌پیاده محدود به ۲۰۰ عابرپیاده در ساعت باشد، هیچ تأثیری بر ظرفیت جریان عبوری وسایل‌نقلیه ایجاد نخواهد داشت. با این حال، با افزایش سطح عبور و مرور عابران‌پیاده به ۱۵۵۰ عابر در ساعت؛ ظرفیت ۳۲ درصد کاهش می‌یابد. ژو و همکاران[16] چندین شبیه‌سازی با استفاده از ترکیبات مختلف سرعت عابرپیاده با استفاده از مدل‌های ریاضی را مورد بررسی قرار دادند. همچنین روابط بین سرعت- چگالی در انواع تسهیلات عابرپیاده مورد بررسی قرار گرفت. نتایج آن‌ها نشان داد که جریان عابرپیاده منجر به ایجاد روابط مختلف بین سرعت- چگالی و تراکم جریان را در تسهیلات مختلف عابرپیاده خواهد شد. همچنین عابران‌پیاده با سرعت راه رفتن کمتر، تأثیر معنی‌داری بر میانگین سرعت جریان عابرپیاده دارد. شریفی و همکاران[17] در مطالعه‌ای به ارائه یک مدل چگالی- سرعت برای جریان عابرپیاده در یک مسیر دوطرفه پرداختند و همچنین مدل مورد مطالعه را برای محیط‌های مختلف پیاده با زاویه‌های مختلف تقاطعی (۹۰ درجه، ۱۳۵ درجه و ۱۸۰ درجه) مورد بررسی قرار دادند. نتایج آنان نشان داد که اثرات متقابل با افزایش زاویه تسهیلات پیاده کاهش می‌یابد. علاوه بر این، ظرفیت تسهیلات پیاده با افزایش زاویه جریان پیاده، کاهش می‌یابد. لی و همکاران[18] آزمایش‌های مختلفی را برای مقایسه ویژگی‌های حرکتی عابران از راهروهایی با عرض‌های مختلف عبور می‌کنند، انجام دادند. نتایج آنان نشان داد که ارتباط بین جریان و عرض راهروها با جدا کردن این مسیرها که متأثر از ابعاد بدن و انگیزه‌ها و هدف سفر عابران‌پیاده می‌باشد، منجر به زاویه انحراف عابرپیاده و انحراف در نمودار گاوس خواهد شد و دامنه حرکتی عابران‌پیاده، با افزایش سرعت فردی محدود می‌شود.

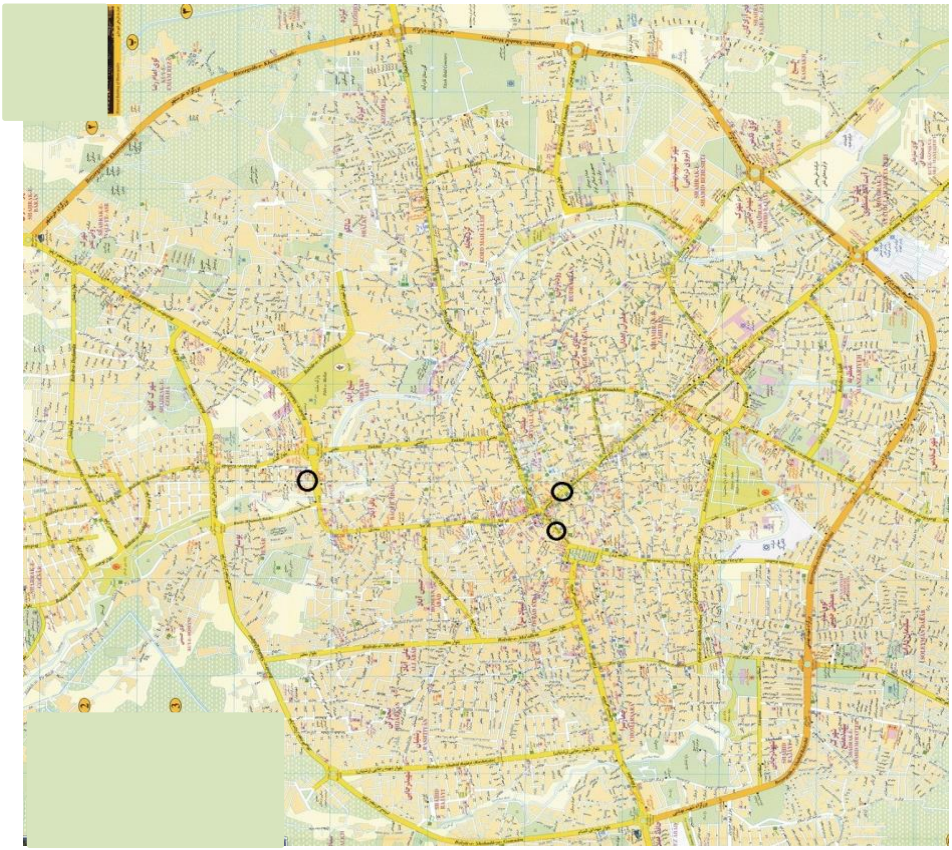
با توجه به برر سی‌های مطالعات پیشین مشخص شد که این مطالعه‌ها در ۳ دسته‌بندی کلان‌نگر، میان‌نگر و خردنگر قرار می‌گیرند و هر کدام از پژوهشگران در دنیا، جریان عابران‌پیاده را تحت تأثیر پارامترهای مشخص مورد ارزیابی و بررسی قرار داده‌اند. از همین‌رو در این مقاله به بررسی و مدل‌سازی کلان‌نگر رفتار عابران‌پیاده پرداخته می‌شود.

روش‌شناسی و روش مدل‌سازی

داده‌های مورد نیاز در پژوهش حاضر در شهر رشت جمع‌آوری شده است که یکی از شهرهای ایران و مرکز استان گیلان است و بزرگ‌ترین و پرجمعیت‌ترین شهر شمال ایران نیز محسوب می‌شود. برای جمع‌آوری اطلاعات عابران‌پیاده جهت مدل‌سازی تردد آنان، مهم‌ترین و شلوغ‌ترین تسهیلات پیاده‌روی شهر انتخاب و اقدام به فیلم‌برداری از تسهیلات موردنظر شد. این تسهیلات از بین بیش از ۵۰ مکان در سطح شهر رشت برگزیده شدند. پیاده‌روها و پیاده‌راه مطالعه حاضر مطابق با شکل (۱) در نقاط مختلف شهر رشت جمع‌آوری شده است که شامل پیاده‌روهای خیابان‌های امام خمینی (ره) و خیابان سعدی می‌باشد. همچنین پیاده راه مورد بررسی نیز واقع در خیابان اعلم‌الهدی شهر رشت می‌باشد. هدف از انتخاب پیاده‌روهای مطالعه حاضر، انتخاب مکان‌هایی با تردد بسیار عابرین‌پیاده و با هدف‌های سفر مختلف از جمله درمانی، آموزشی و خرید بود. همچنین از بین دو پیاده‌راه شهر رشت (شهرداری و اعلم‌الهدی) پیاده‌راه اعلم‌الهدی با توجه به چگالی و نرخ جریان بالاتر

عابرین‌پیاده عبوری انتخاب شد که در نهایت از محل‌های خاص نظیر ساختمان‌های بلند مجاور، پل عابرپیاده و با استفاده از جرثقیل بالابر اقدام به فیلم‌برداری شد[19]. سپس با مشخص کردن مقطعی ثابت به واحد طول (متر) در تصاویر فیلم‌برداری شده و همچنین مدت زمان طی شده هر عابر عبوری در این مقطع مشخص، سرعت راه رفتن هر یک از عابران‌پیاده استخراج گردید. به منظور انجام عملیات آماربرداری، با توجه به اوج عابر عبوری در محل‌های انتخاب شده، ساعت اوج عصر ۱۷ تا ۲۰ در اوایل فصل بهار انتخاب شد. زمان انتخاب شده برای آماربرداری با توجه به روشن بودن هوا، اشباع بودن جریان تردد عابران‌پیاده و زمان اوج تردد عابران‌پیاده بوده است. در نهایت اطلاعات ۱۰۲۱۰ عابرپیاده جهت استفاده به عنوان داده‌های مدل‌سازی آماده گردید.

یکی از روش‌های استفاده شده برای مدل‌سازی در این مطالعه، مدل رگرسیون است. در این مدل‌ها، هدف این است که یک رابطه ریاضی بین یک یا چند متغیر مستقل و یک متغیر وابسته به منظور پیش‌بینی مقدار متغیر وابسته با استفاده از مقدار یا مقادیر متغیرهای مستقل بدست آورده شود. بنابراین در رگرسیون، علاوه بر اینکه همبستگی بین چند متغیر مستقل و یک متغیر وابسته بررسی می‌گردد، نوع و شکل رابطه ریاضی نیز تعیین می‌گردد. رگرسیون پرکاربردترین روش آماری است که برای سنجش و ارائه مدل ارتباط دو متغیر به کار می‌رود. رگرسیون خطی ضرایب معادله خطی که نزدیک‌ترین هماهنگی با داده‌های مشاهده شده را داراست برآورد می‌کند. با استفاده از معادله خط برگشت، امکان پیشگویی مقادیر بعدی نیز امکان‌پذیر می‌شود. در معادله رگرسیون یک متغیر مستقل و یک متغیر وابسته وجود دارد که در معادله رگرسیون چندمتغیره تعداد متغیرهای مستقل بیش از یکی است. در این پژوهش با ترسیم نمودار پراکنش و برازش منحنی، در نرم‌افزارهای اکسل و SPSS و با استفاده روش رگرسیون، معادلات مورد نیاز استخراج شدند[20,21].



شکل ۱ محل‌های مورد مطالعه و برداشت اطلاعات

از طرف دیگر، الگوریتم‌های فراابتکاری، یکی از انواع الگوریتم‌های بهینه‌سازی تقریبی هستند که دارای راهکارهای برون‌رفت از نقاط بهینه محلی هستند و قابلیت کاربرد در طیف گسترده‌ای از مسائل را دارند. روش الگوریتم ژنتیک تکنیک گسترش‌یافته الگوریتم تکاملی بدست آمده از تئوری تکاملی داروین می‌باشد. بطورکلی این روش را می‌توان به عنوان روش ابزاری فراگیر معرفی نمود که به جستجوی فضای مساله به جای فضای داده‌ها می‌پردازد. به عبارتی برنامه‌نویسی ژنتیک نوعی روش بهینه‌سازی و ارائه رگرسیون می‌باشد که با استفاده از اصل انتخاب طبیعی داروین، راه‌حل‌هایی جهت حل مسئله تولید می‌کند. برنامه‌نویسی ژنتیک به صورت تصادفی تعداد بسیار زیادی برنامه کامپیوتری با اندازه و شکل‌های مختلف می‌سازد و این برنامه‌ها به رقابت با هم پرداخته و با کمک عملگرهای ژنتیکی مرحله به مرحله اصلاح شده و گسترش می‌یابند. جمعیت اولیه از درخت‌ها، با استفاده از مجموعه توابع و مجموعه ترمینال‌ها، در ابتدای فرآیند پردازش ساخته می‌شود. به منظور جلوگیری از طولانی شدن زمان حل مساله و نیز طول روابط نهایی، محدودیت‌های اندازه و عمق به درخت‌ها اعمال می‌شود[26-22].

بررسی و تحلیل داده‌ها

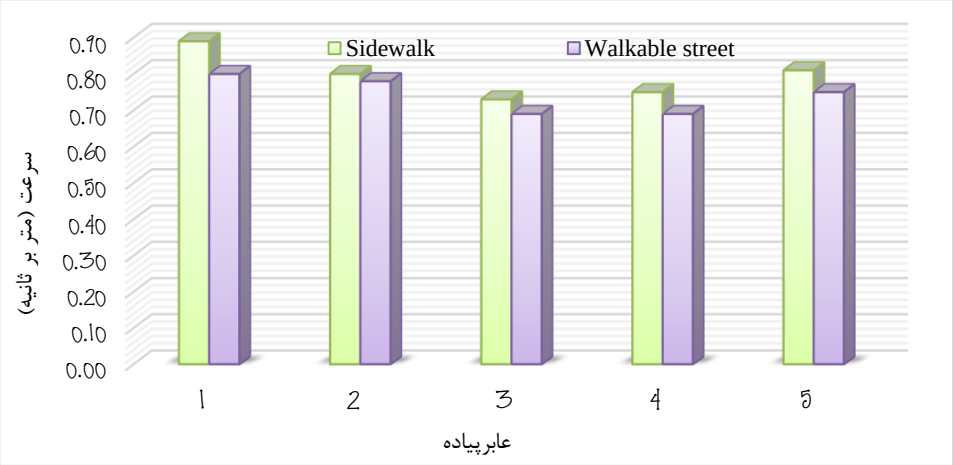
بررسی سرعت تردد عابران‌پیاده

سرعت عبور از عرض و سرعت راه رفتن میانگین و صدک پانزدهم عابران‌پیاده عبوری در تمامی تسهیلات پرتردد پیاده در زمان اوج تردد، به تفکیک جنسیت، پوشش لباس بانوان عبوری، تفکیک تسهیلات، حرکت‌های انفرادی و گروهی و شرایط جوی عادی و بارش باران مطابق جدول (۱) برداشت گردید.

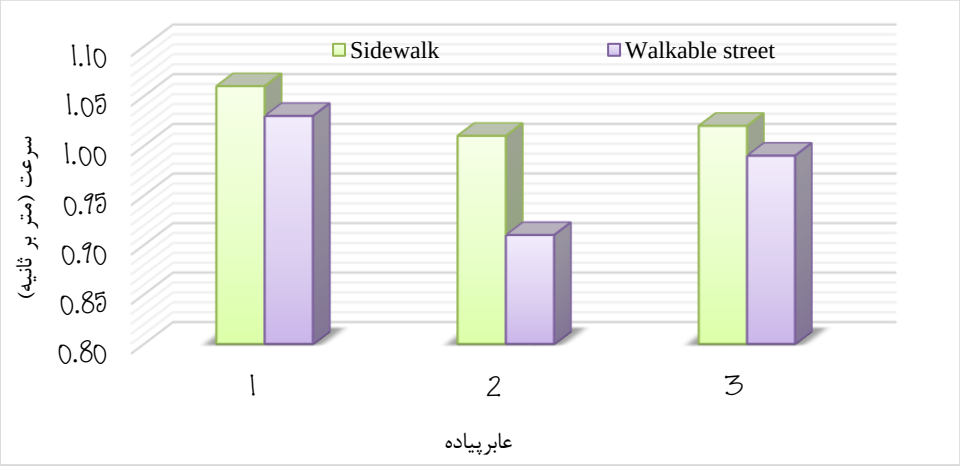
جدول ۱ سرعت عبور از عرض و راه رفتن عابران‌پیاده در شرایط و مکان‌های مختلف

نوع تسهیلات	شرایط هوایی	تقسیم‌بندی	تعداد افراد	میانگین سرعت (متر بر ثانیه)	انحراف معیار	V_{15} (متر بر ثانیه)
پیاده‌رو	عادی	آقایان	۳۰۸۱	۱/۱۰	۰/۱۶۹	۰/۸۹
		بانوان با پوشش معمولی	۲۷۷۵	۱/۰۱	۰/۱۱۲	۰/۸۰
		بانوان با پوشش چادر	۷۶۵	۰/۹۴	۰/۱۸۹	۰/۷۳
		حرکت‌های گروهی	۵۳۴	۰/۹۷	۰/۱۲۳	۰/۷۵
		کلیه عابران	۶۶۲۱	۱/۰۳	۰/۱۳۹	۰/۸۱
	بارش باران	آقایان	۳۵۴	۱/۲۱	۰/۱۸۱	۱/۰۶
		بانوان	۱۷۱	۱/۱۲	۰/۱۳۹	۱/۰۱
		کلیه عابران	۵۲۵	۱/۱۵	۰/۱۴۱	۱/۰۲
پیاده‌راه	عادی	آقایان	۱۱۱۴	۱/۰۴	۰/۱۵۵	۰/۸۰
		بانوان با پوشش معمولی	۱۰۳۶	۰/۹۴	۰/۱۹۲	۰/۷۸
		بانوان با پوشش چادر	۲۰۲	۰/۸۹	۰/۱۳۷	۰/۶۹
		حرکت‌های گروهی	۶۹۹	۰/۸۸	۰/۱۴۵	۰/۶۹
		کلیه عابران	۲۳۵۲	۰/۹۷	۰/۱۷۳	۰/۷۵
	بارش باران	آقایان	۳۴۲	۱/۱۵	۰/۱۹۳	۱/۰۳
		بانوان	۳۷۰	۱/۰۹	۰/۱۱۹	۰/۹۱
		کلیه عابران	۷۱۲	۱/۱۲	۰/۱۷۴	۰/۹۹

بر اساس نتایج بدست آمده و همان‌طور که در شکل‌های (۲) و (۳) نشان داده شده است، بیشترین مقادیر سرعت صدک پانزدهم در هر دو شرایط جوی عادی و بارانی در همه تسهیلات پیاده مربوط به آقایان است و این در حالی است که بانوان و به خصوص بانوان چادری در تمام شرایط با سرعت پایین‌تری راه می‌روند و کمترین مقادیر سرعت صدک پانزدهم مربوط به آنان است. همچنین کمترین سرعت در بین همه تسهیلات پیاده در هر دو شرایط جوی عادی و بارش باران مربوط به پیاده راه می‌باشد و عابران با آرامش بیشتر و با هدف تفریح و خرید از این معابر حرکت می‌کنند. با بررسی مقادیر سرعت شکل (۲) می‌توان درک کرد که در زمان بارش باران عابران میل به افزایش سرعت دارند بطوریکه سرعت آنان در تسهیلات پیاده‌رو بسیار نزدیک به مطالعات مشابه در تقاطع چراغ‌دار می‌باشد[27-29].



شکل ۲ مقایسه سرعت گروه‌های مختلف عابرپیاده در شرایط جوی عادی



شکل ۳ مقایسه سرعت گروه‌های مختلف عابرپیاده در شرایط جوی بارانی

مدل‌سازی جریان عابران‌پیاده

هدف اصلی این پژوهش مدل‌سازی روابط بین پارامترهای مختلف جریان عابران‌پیاده از قبیل سرعت، چگالی و نرخ جریان در تسهیلات پیاده مورد مطالعه می‌باشد. برای تعیین این روابط، ابتدا تعداد افراد عبوری از طول مشخص شده در پیاده‌روها و پیاده‌راه‌ها هر دقیقه از روی تصاویر ضبط شده بدست آمد، به این ترتیب نرخ جریان (v) در هر نوبت آماربرداری در هر کدام از تسهیلات عابرپیاده مشخص شد. سپس با استفاده از کرنومتر، زمان راه‌رفتن افراد از این تسهیلات برای تمامی عابران تعیین گردید که از تقسیم مسافت طی شده به زمان راه‌رفتن، سرعت حرکت افراد (S) بدست آمد. در نهایت با استفاده از رابطه‌ی ($v = S\times D$) مقادیر چگالی (D) برای هر دقیقه محاسبه شد. جهت مدل‌سازی روابط بدست آمده از سه روش رگرسیون خطی و غیرخطی و روش الگوریتم ژنتیک استفاده شد.

مدل‌سازی رگرسیون

مدل‌های بدست آمده بین نرخ جریان- چگالی، سرعت- نرخ جریان و سرعت- چگالی برای شرایط عبور عابران‌پیاده از پیاده‌رو مطابق روابط (۱) تا (٦) ارائه شده است. همچنین نتایج مقادیر $R^۲$ مدل‌های بدست آمده مطابق با جدول (۲) ارائه شده است.

در پیاده‌روها:

$$v = -۲۳/۴۲D^۲ + ۲۴/۷e^{D} - ۰/۹۱ \quad (۱)$$

$$S = -۰/۰۱v^۲ - ۰/۰۳۱v + ۶۳/۱۴ \quad (۲)$$

$$S = -۰/۸۱D^۲ - ۲/۵۹D + ۵۲/۱۱ \quad (۳)$$

در پیاده‌راه‌ها:

$$v = -۱۲/۴۲D^۲ + ۶۰/۱۹D - ۰/۴۲ \quad (٤)$$

$$S = -۰/۰۰۵v^۲ - ۰/۰۲۴v + ۱۳/۶۳ \quad (۵)$$

$$S = -۱/۷۴D^۲ - ۳/۲۴D + ۴۲/۵۲ \quad (٦)$$

که در این رابطه ها، (D) چگالی، (v) نرخ جریان و (S) سرعت جریان عابرپیاده می‌باشد.

جدول ۲ نتایج مدل‌های بدست آمده چگالی با استفاده از روش رگرسیون خطی و غیرخطی

شماره مدل‌ها	مدل	نوع مدل	$R^۲$	Sig.
۱	پیاده‌رو	نرخ جریان- چگالی	۰/۹۰۰۱	۰/۰۰۰
۲		سرعت- نرخ جریان	۰/۸۵۷۲	۰/۰۰۱
۳		سرعت- چگالی	۰/۹۱۰۳	۰/۱٤۱
٤	پیاده‌راه	نرخ جریان- چگالی	۰/۸۳۱٤	۰/۰۲۱
۵		سرعت- نرخ جریان	۰/۷۹۰۱	۰/۰۰۰
٦		سرعت- چگالی	۰/۹۰۸۲	۰/۰۰۱

مدل‌سازی با روش الگوریتم ژنتیک

در مدل‌سازی با روش الگوریتم ژنتیک، با استفاده از متغیرهای مستقل نرخ جریان و چگالی، مدل پیش‌بینی چگالی عابران‌پیاده با استفاده از به کار بردن کدهای مرتبط با روش الگوریتم ژنتیک در نرم‌افزار متلب بدست آمد. نتایج روابط جریان عابران‌پیاده برای تسهیلات پیاده‌رو و پیاده‌راه روابط (۷) و (۸) می‌باشد.

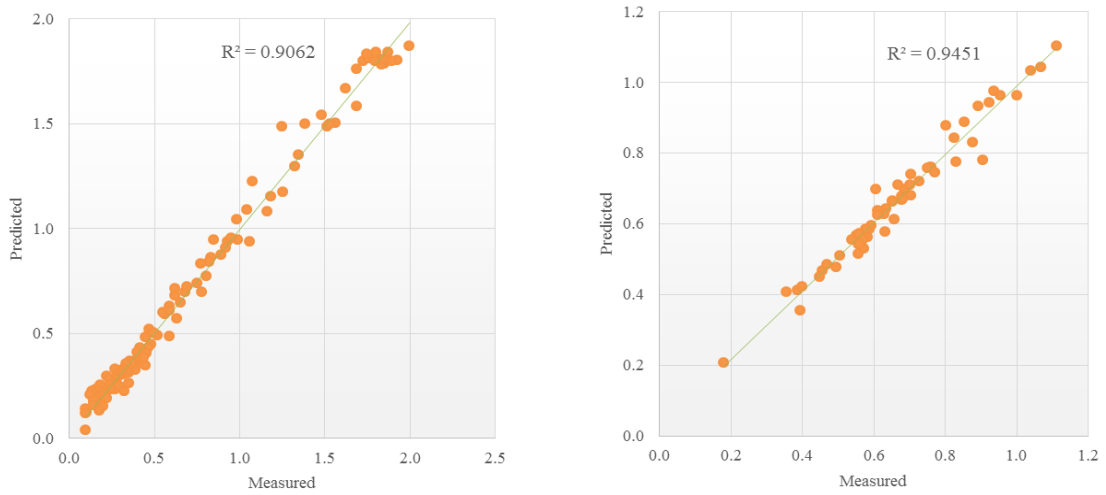
در پیاده‌روها:

$$D = 0.0248v - 0.1837S + 0.4917\sin(\cos(S)) - 0.6141\sin(\sin(\cos(S)) - 0.2846\cos(S) - 0.0011(S-\cos(v))(v + \cos(S)) + 2.284 \quad (۷)$$

در پیاده‌راه‌ها:

$$D = 0.0125v - 0.0816S - 0.022\tanh(3.021\cos(S)) - 0.0229\cos(v-S) + 0.0238e^{\cos(s)} - 0.0209\sin(S^2 \times \cos(S)) + 1.102 \quad (۸)$$

بر اساس مدل‌های ارائه شده، نتایج مقادیر پیش‌بینی شده و واقعی برای مدل‌های چگالی بدست آمده برای تسهیلات مختلف پیاده‌رو و پیاده‌راه در شکل (٤) نشان داده شده است که نتایج دقت پیش‌بینی این مدل‌ها به ترتیب برابر با ۰/۹٤۵۱ و ۰/۹۰٦۲ می‌باشند.



(ب) (الف)

شکل ٤ مقایسه سرعت گروه‌های مختلف عابرپیاده در شرایط جوی بارانی نمودارهای مقادیر واقعی و پیش‌بینی شده با استفاده از روش الگوریتم ژنتیک برای (الف) پیاده‌رو، (ب) پیاده‌راه

مقایسه نتایج

روش‌های مختلف مدل‌سازی جریان عابرین‌پیاده در پیاده‌رو و پیاده‌راه شهر رشت مطابق با جدول (۳) نشان داده شده است. همانطور که از این نتایج مشخص است دقت روش ژنتیک در مقایسه با سایر روش رگرسیونی بالاتر می‌باشد. از همین رو می‌توان بیان کرد الگوریتم‌های متاهیوریستیک دارای دقت بالاترین در مدل‌سازی رفتار عابرین‌پیاده می‌باشند.

جدول ۳ مقایسه نتایج مدل‌سازی مطالعه حاضر

نوع تسهیلات	روش مدل‌سازی	نتایج R^2
پیاده‌رو	رگرسیونی	۰/۹۱۰۳
	ژنتیک	۰/۹٤٥۱
پیاده‌راه	رگرسیونی	۰/۹۰۸۲
	ژنتیک	۰/۹۰٦۲

نتیجه‌گیری

با بررسی مشخصات رفتاری عابران‌پیاده در تسهیلات پیاده، اهم نتایج زیر حاصل شد:

۱. بیشترین مقادیر سرعت صدک پانزدهم در هر دو شرایط جوی عادی و بارانی در همه تسهیلات پیاده مربوط به آقایان است و این در حالی است که بانوان و بخصوص بانوان چادری در تمام شرایط با سرعت پایین‌تری راه می‌روند و کمترین مقادیر سرعت صدک پانزدهم مربوط به آنان است.

۲. سرعت عابران در پیاده‌روها و در هنگام عبور از عرض گذرگاه‌ها با یکدیگر برابر می‌باشد و دارای مقادیر بسیار پایینی نسبت به عبور از تقاطعات می‌باشند. همچنین کمترین سرعت در بین همه تسهیلات پیاده در هر دو شرایط جوی عادی و بارش باران مربوط به پیاده‌راه می‌باشد؛ شاید دلیل این موضوع، طراحی اختصاصی پیاده‌راه‌ها با اولویت عابرپیاده و همچنین قرار گرفتن پیاده‌راه‌ها در مناطق توریستی، تفریحی یا با هدف خاص خرید باشد.

۳. با سطح اطمینان ۹۵ درصد در گروه‌های سنی میان‌سال و مسن با گروه وزنی معمولی اختلاف سرعت بانوان با پوشش چادر و بانوان با پوشش معمولی به لحاظ آماری معنادار است و پوشش چادر بر سرعت افراد اثرگذار بوده، بطوریکه بانوان با پوشش چادر در مقایسه با بانوان با پوشش معمولی، مردان و حرکت‌های گروهی دارای کمترین مقادیر سرعت می‌باشند. بنابراین از آنجاکه پیش‌بینی اینکه چه افرادی با چه نوع پوششی در یک دوره‌ی زمانی از منطقه مورد نظر عبور می‌نمایند، امکان‌پذیر نیست؛ پس بهتر است نوع پوشش برای طراحی تسهیلات پیاده‌روی بانوان در نظر گرفته شود.

٤. در بین مدل‌های مختلف بدست آمده با استفاده از روش رگرسیون خطی و غیرخطی، برای تمامی تسهیلات پیاده، مدل نرخ جریان- چگالی دارای بالاترین دقت پیش‌بینی می‌باشد.

۵. دقت مدل ها برای تسهیلات مختلف، پیاده‌رو، پیاده‌راه، تقاطعات بدون چراغ و چراغ‌دار با استفاده از روش الگوریتم

ژنتیک دارای دقت پیش‌بینی به ترتیب برابراســت با ۰/۹٤٥١، ۰/۹۰٦۲، ۰/۹٦۸۲ و ۰/۹۹۳۸ می‌باشند.

٦. الگوریتم فراابتکاری ژنتیک در همه نوع تسهیلات پیاده دارای دقت بیشتری در پیش‌بینی جریان عابران‌پیاده نسبت به مدل‌سازی رگرسیونی می‌باشد؛ بنابراین می‌توان این روش را به عنوان یکی از روش‌های فراابتکاری که دارای دقت بیشتری می‌باشد به عنوان یکی از بهترین روش‌های مدل‌سازی معرفی کرد.

مراجع

1. Bargegol, I., Amlashi, A. T., and Najafi Moghaddam Gilani, V., "Evaluation average discharge headway at near-side legs of signalized intersections", *Journal UMP Social Sciences and Technology Management*, Vol. 3, pp 670-675, (2015).
2. Trolly, R.S., "Winning back public space", *Sustainable Transport: Planning for Walking and Cycling in Urban Environments. Woodhead, Cambridge*, pp 713-736, (2003).
3. Bargegol, I. and Najafi Moghaddam Gilani, V., "Estimating delay of vehicles in nearside legs of the signalized intersections under expectation method in under-saturation conditions for isolated intersection", *Trends Journal of Sciences Research*, Vol. 2(4), pp 121-125, (2015).
4. Papadimitriou, E., Theofilatos, A. and Yannis, G., "Patterns of pedestrian attitudes, perceptions and behaviour in Europe", *Safety Science*, Vol. 53, pp 114–122, (2013).
5. Helbing, D., Johansson, A. and Al-Abideen, H., "Dynamics of crowd disasters: An empirical study", *Physical Review*, Vol.75, pp. 046109, (2007).
6. Liu, W., Zhou, H. and He, Q., "Modeling Pedestrians Flow on Stairways in Shanghai Metro Transfer Station", *International Conference on Intelligent Computation Technology and Automation*, Vol. 2, pp. 263-267, (2008).
7. Hongfei, J., Lili, Y. and Ming, T., "Pedestrian Flow Characteristics Analysis and Model Parameter Calibration in Comprehensive Transport Terminal", *Journal of Transportation Systems Engineering Aand Information Technology*, Vol. 9(5), pp 117-123, (2009).
8. Chen, X., Ye, J., Jian, N., "Relationships and Characteristics of Pedestrian Traffic Flow on Confined Passageways", TRB, National Research Council, Washington, D.C., (2010).
9. Plaue, M., Chen, M., Bà rwolff, G. and Schwand, H., "Trajectory extraction and density analysis of intersecting pedestrian flows from video recordings", Technische Universität Berlin, (2011).
10. Tang, Sh., Kwal, D. and Kitahara, T., "Study on Pedestrian's Speed and Density under the Mid-low Density: Comparison of Pedestrian Behavior on the Station Square between Chiba, Japan and Shanghai", China 26th annual congress, China, (2012).
11. Rastogi, R., Ilango, T. and Chandra, S., "Pedestrian Flow Characteristics for Different Pedestrian Facilities and Situations", *European Transport*, Vol. 53, pp. 1-5, (2013).
12. Shafabakhsh, Gh., Mohammadi, M. and Mirzanamadi, R., "Analysis of Pedestrians' Walking Speed in Iran's Sidewalks", *Journal of Basic and Applied Scientific Research*, Vol. 3(3), pp 172-182, (2013).
13. Chandra, S., Rastogi, R., Vivek, R.D. and Ilango, T., "Pedestrian behaviour under varied traffic and spatial conditions", *European Transport*, Vol. 56, pp. 45-55, (2014).
14. Das, P., Parida, M. and Katiyar, V.K., "Macroscopic Pedestrian Flow Modelling Using Ssimulation

Technique", *International Journal for Traffic & Transport Engineering,* Vol. 8(2), pp. 166-176, (2018).

15. Golakiya, H.D., Patkar, M. and Dhamaniya, A., "Impact of midblock pedestrian crossing on speed characteristics and capacity of urban arterials", *Arabian Journal for Science and Engineering,* Vol. 10, pp 8675-8689. (2019).
16. Zhou, X., Hu, J., Ji, X. and Xiao, X., "Cellular automaton simulation of pedestrian flow considering vision and multi-velocity", *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications,* Vol. 514, pp 982-992, (2019).
17. Sharifi, M.S., Song, Z., Esfahani, H.N. amd Christensen, K., "Exploring heterogeneous pedestrian stream characteristics at walking facilities with different angle intersections", *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications,* Vol. 540, pp 123112, (2020).
18. Li, H., Zhang, J., Song, W. and Yuen, K.K.R., "A comparative study on the bottleneck pedestrian flow under different movement motivations", *Fire Safety Journal,* Vol. 120, pp. 103014, (2020).
19. Bargegol, I., Gilani, V. N. M., & Farghedayn, S., "Analysis of the effect of vehicles conflict on pedestrian's crossing speed in signalized and un-signalized intersection", *Advances in Environmental Biology,* Vol. 245, pp. 502-510, (2014).
20. Behbahani, H., Najafi Moghaddam Gilani, V., Amini, A., Kamboozia, N. and Hosseinian, S. M., "Fuzzy-neural analysis of pedestrian flow crossing urban intersections", *18th International Conference on Traffic & Transportation Engineering,* (2020).
21. Ahmed, A., Jalal, A. and Kim, K., "A novel statistical method for scene classification based on multi-object categorization and logistic regression", *Sensors,* Vol. 20(14) pp 38-71, (2020).
22. Mullainathan, S., and Spiess, J., "Machine learning: an applied econometric approach", *Journal of Economic Perspectives,* Vol. 31(2), pp 87-106, (2017).
23. Chen, X., "Traffic flow prediction at varied time scales via ensemble empirical mode decomposition and artificial neural network", *Sustainability,* Vol. 12(9): pp. 36-78, (2020).
24. Bargegol, I., Najafi Moghaddam Gilani, V., and Jamshidpour, F., "Modeling pedestrian flow at central business district", *Journal of UMP Social Sciences and Technology Management,* Vol. 3(3), pp. 250-265, (2015).
25. Bargegol, I., Najafi Moghaddam Gilani, V. and Jamshidpour, F., "Relationship between pedestrians' speed, density and flow rate of crossings through urban intersections (case study: Rasht metropolis)", *International Journal of Engineering,* Vol. 30(12), pp 1814-1821 (2017).
26. Liu, W., Wang, Z., Liu, X., Zeng. N., Liu, Y., Alsaadi, F., "A survey of deep neural network architectures and their applications", Neurocomputing, Vol. 234, pp 11-26, (2017).
27. Bargegol, I., and Najafi Moghaddam Gilani, V., "The effect of rainy weather on walking speed of pedestrians on sidewalks", *Buletin Teknol Tanaman,* Vol. 12, pp 217-22, (2015).
28. Bargegol, I., Taghizadeh, N., and Najafi Moghaddam Gilani, V., "Evaluation of pedestrians speed with investigation of un-marked crossing", *Computational Science,* Vol. 12, pp 150-5, (2015).
29. Behbahani, H., Najafi Moghaddam Gilani, V., Samet, M. J., and Salehfard, R., "Analysis of crossing speed of the pedestrians in marked and unmarked crosswalks in the signalized and un-signalized intersections (case study: Rasht city)", *Conference Series: Materials Science and Engineering,* Vol. 245(4), pp 042014, (2017).

نشریهٔ مهندسی عمران (۶۸-۵۵)
DOI: 10.22067/jfcei.2022.73953.1096
سال سی و چهار، شمارهٔ چهار، ۱۴۰۰

بررسی رفتار چرخه‌ای دیوار برشی فولادی با شیارهای شیبدار*

مقاله پژوهشی

احسان نعیمی حامی صفار[۱] هاشم شریعتمدار[۲]

چکیده *یکی از سیستم‌های مقاوم در برابر بار لرزه‌ای سیستم دیوار برشی فولادی شیاردار است. عملکرد این سیستم به گونه‌ای است که با ایجاد شیارهای عمودی در ورق دیوار برشی فولادی معمولی، این ورق به تعدادی نوار خمشی تبدیل می شود که با اعمال بار جانبی با تحمل تغییر شکل‌های پلاستیک انرژی ورودی به سازه را مستهلک می‌کند. در این مجموعه سختی و مقاومت نهایی دیوار برشی فولادی به راحتی با تغییر مشخصات شیارها و ترکیب‌بندی آن‌ها قابل تنظیم است. رفتار شکل‌پذیر و توانایی استهلاک انرژی خوب از دیگر مزایای این نوع دیوار برشی فولادی است. حال چنانچه به جای شیارهای عمودی از شیارهای شیبدار (مایل) در ورق استفاده شود، عملکرد نوارها از حالت خمشی به محوری تغییر کرده و به طور مشابه با تحمل تغییرشکل‌های پلاستیک به عنوان یک میراگر غیرفعال عمل می‌کنند. در این مدل می‌توان با تغییر طول این اعضای محوری، تغییرمکان جاری شدن نوارها و سایر پارامترهای لرزه‌ای مجموعه را تغییر داد. هدف از این پژوهش ارزیابی عددی دیوار برشی فولادی شیاردار با شیارهای مایل و با ترکیب‌بندی شیار و سخت‌کننده‌ی انتهایی متفاوت است. برای این منظور پس از صحت سنجی مدل سازی در نرم‌افزار Abaqus، یک مطالعه پارامتریک بر روی دیوار فولادی با جایگذاری مختلف شیارها و سخت‌کننده‌های انتهایی متفاوت انجام می‌شود و رفتار آن تحت بار رفت و برگشتی مورد بررسی قرار می‌گیرد. همچنین رفتار این نمونه‌ها با یک نمونه‌ی بدون شیار مقایسه می‌شود. مقایسه نتایج دیوار فولادی پیشنهادی با شیارهای شیبدار و دیوار فولادی بدون شیار با همان ابعاد نشان می‌دهد علی‌رغم کاهش مقاومت و سختی اولیه در نمونه شیاردار، این دیوار از رفتار چرخه‌ای مناسب‌تری برخوردار است و توانایی استهلاک انرژی بیشتری دارد و خصوصاً در دریفت‌های بالای ۲ درصد افت مقاومت کمتر و عملکرد بهتری از خود نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهند تنها با تغییر در محل قرارگیری شیارها می‌توان مقاومت نهایی و سختی اولیه را به ترتیب تا ۱۹ و ۲۵ درصد تغییر داد. همچنین برای بالابردن میزان استهلاک انرژی استفاده از سخت‌کننده‌های انتهایی با ممان اینرسی بالاتر یکی از مؤثرترین راه‌هاست؛ به طوری که استفاده از مقطع Box ۱۰۰ به عنوان سخت‌کننده توانسته است استهلاک انرژی را نسبت به نمونه‌ی معیار بیش از ۲ برابر کند. در مجموع عملکرد دیوار برشی با شکل شیار پیشنهادی، مناسب ارزیابی می‌شود.*

واژه‌های کلیدی دیوار برشی فولادی شیاردار، مقاومت نهایی، منحنی چرخه‌ای، استهلاک انرژی.

مقدمه

یکی از اهداف مهم مهندسی عمران یافتن ابزاری نوین و کارآمد برای حفاظت سازه‌ها و تجهیزات درون آن‌ها در برابر نیروهای طبیعی می‌باشد. از طرفی زلزله یکی از رخدادهایی است که با وجود آن که تحقیقات فراوانی روی آن صورت گرفته، هنوز امکان پیش‌بینی دقیق زمان و مکان وقوع آن وجود ندارد. بنابراین به نظر می‌رسد تنها روش مقابله با آن ایمن‌سازی سازه‌هاست. در دهه‌های گذشته محققین بسیاری در سراسر دنیا برای ارائه روش-های مناسب به منظور حفاظت از سازه‌ها در مقابل بارهای جانبی تلاش کرده‌اند. در این میان سیستم دیوار برشی فولادی (Steel Plate Shear Wall) به عنوان یک سیستم مقاوم در برابر بارهای جانبی در سه دهه اخیر به سرعت در دنیا مورد توجه قرار گرفته است. در این پژوهش رفتار و عملکرد دیوار برشی فولادی شیاردار مورد بررسی قرار می‌گیرد. هدف از ایجاد شیار در دیوار برشی فولادی، افزایش استهلاک انرژی و تمرکز خرابی در ورق فولادی و حفظ سایر اعضای حیاتی خصوصاً اعضای باربر ثقلی می‌باشد. به این ترتیب دیوار برشی فولادی عملکرد فیوز را در سازه انجام می‌دهد. یکی از ایرادات وارده به سیستم دیوار برشی فولادی، اعمال نیروهای بزرگ از طرف ورق فولادی به اعضای مرزی در اثر وقوع میدان کششی می‌باشد، که موجب بزرگ شدن مقاطع این اعضا می‌شود. از راه‌حل‌های این مشکل می‌توان استفاده از سوراخ‌های منظم، شیارهایی با اشکال متفاوت و بکارگیری فولاد با ظرفیت پایین‌تر برای ورق را نام برد [1].

* تاریخ دریافت مقاله ۱۴۰۰/۹/۹ و تاریخ پذیرش آن ۱۴۰۰/۱۱/۱۶ می‌باشد.

(۱) دانشجوی دکتری عمران- سازه، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد.
(۲) نویسندهٔ مسئول، استاد گروه عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد.
Email: shariatmadar@um.ac.ir

پژوهش‌های پیشین

در این بخش به تحقیقات انجام گرفته در زمینه دیوار برشی فولادی شیاردار و سیستم‌های مشابه پرداخته می‌شود. برای نخستین بار ایده‌ی استفاده از شیار در دیوار برشی توسط موتو [2] در سال ۱۹٦۸ ارائه شده است. این محقق دیوار برشی بتنی شیاردار را به عنوان سیستم مستهلک‌کننده انرژی معرفی نمود. این دیوار دارای شیارهایی با فواصل یکسان و در وسط ارتفاع دیوار است. شیارها با قطع کامل بتن و آرماتور ایجاد می‌شوند. موتو و همکاران [3] در سال ۱۹۷۳ در پژوهشی دیگر به بررسی رفتار دیوار برشی بتنی شیاردار پرداختند. آن‌ها منحنی بار- تغییرمکان را برای دیوار بتنی معمولی و دیوار بتنی شیاردار با انجام آزمایش‌هایی ترسیم نمودند. دیوار برشی معمولی، مقاومت بیشتری به دست آورد ولی در تغییرمکان نسبی کمتری گسیخته شد. مارتینز [4] در سال ۲۰۰۲ به بررسی رفتار دیوار بتنی شیاردار پرداخت. اگرچه دیوار شیاردار بتنی شکل‌پذیری را افزایش می‌دهند ولی به علت کاهش مقاومت، تعداد دیوار مورد نیاز افزایش‌یافته درنتیجه وزن سازه بیشتر شده و نیروهای جانبی زلزله افزایش می‌یابند. علاوه بر آن بتن مسلح در برابر تغییر شکل‌های پلاستیک چرخه‌ای به‌سرعت تخریب می‌شود. در ادامه این دو دلیل باعث عدم استفاده از شیار در دیوار برشی بتنی گردید. هیتاکا و ماتسوی [5] در سال ۲۰۰۳ بر روی دیوار برشی فولادی شیاردار با شیارهای عمودی مطالعاتی انجام دادند. مطالعات آن‌ها شامل ٤۲ آزمایش بر روی نمونه‌های مختلف بود. پایه و اساس این طرح بر مبنای ایجاد تعدادی جزء خمشی برای تحمل تغییرشکل-های خمشی بزرگ می‌باشد. چهار سری نمونه مورد آزمایش قرار گرفتند. در این آزمایش‌ها به بررسی اثر نسبت عرض به ضخامت، نسبت طول به عرض و تعداد ردیف رابط‌ها (ترکیب‌بندی دیوار)، اثر روش‌های مختلف استفاده از سخت‌کننده برای کمانش خارج از صفحه و رفتار دیوار تحت بارگذاری یکنواخت و چرخه‌ای مورد ارزیابی قرار گرفت. اکثر نمونه‌ها بدون ایجاد ترک و زوال مقاومت تا تغییرمکان نسبی حدود ۳ درصد مورد آزمایش قرار گرفتند. در نمونه‌ای که نسبت عرض به ضخامت آن برابر ده است، تا تغییرمکان نسبی ۲/۵ درصد کمانش خارج از صفحه رخ نداده است. بقیه نمونه‌ها در تغییرمکان نسبی‌های کمتر از ۲ درصد کمانش خارج از صفحه نموده‌اند. کورتس [6] در سال ۲۰۰۹ مطالعه بر روی پارامترهای مختلف در دیوار فولادی شیاردار تحت بار جانبی و ثقلی را انجام داد. نسبت ابعادی عرض به ارتفاع دیوارها ۱:۲ و ۱:٤ است. او متوجه شد که دیوار با نسبت عرض به ارتفاع ۱:٤ رفتار مناسبی را ندارد. دلیل آن تنش‌ها فشاری زیاد در ردیف آخر رابط‌ها و عدم وقوع انحنا دوطرفه است. او با مطالعاتی که انجام داد، روابط مقاومت و سختی ارایه شده توسط هیتاکا و ماتسوی را اصلاح نمود. او توصیه کرد هرچه عرض رابط‌ها کوچک‌تر باشد، رابط‌ها پیوسته‌تر عمل کرده و سختی را افزایش می‌دهد. همچنین هرچه دیوار به وسط دهانه نزدیک‌تر باشد، تنش ناشی از نیروهای ثقلی کاهش می‌یابد. اترتون و همکاران [7] در سال ۲۰۰۸، از فیوز برشی در سیستم بادبند هشتی استفاده نمودند. در این سیستم، قاب مهاربندی‌شده به فنداسیون متصل نیست و توسط کابل‌های پیش‌تنیده متصل گردیده است. زمانی‌که قاب تحت اثر بار جانبی قرار می‌گیرد، دوران در فیوز برشی ایجاد می‌شود. فیوز برشی قبل از دست دادن مقاومت، تغییرمکان‌های نسبی بزرگی را تحمل کرده است. بعد از انجام آزمایش‌های مختلف، آن‌ها از شکل پروانه‌ای استفاده نمودند. ژاکوبسن و همکاران [8] در سال ۲۰۱۰ مطالعه عددی- آزمایشگاهی بر روی ترکیب‌بندی رابط‌ها را انجام دادند. آن‌ها برای بررسی اثر طول رابط‌ها و فاصله این رابط‌ها از یکدیگر بر رفتار دیوار شیاردار، دو نمونه تحت عنوان نمونه‌های اصلاح‌شده مدل نموده و با نمونه معمولی (دارای رابط‌ها با طول و فاصله ثابت) مقایسه کردند. رفتار نمونه با طول متفاوت رابط‌ها، تفاوت چندانی با نمونه معمولی نداشته، درحالی‌که نمونه با فاصله متغیر رابط‌ها، نسبت به نمونه معمولی رفتار مناسب‌تری از خود بروز می‌دهد. خاتمی‌راد و شریعتمدار [9] در سال ۲۰۱۷ با انجام یک پژوهش عددی-آزمایشگاهی به بررسی اثر شکل شیارهای عمودی و سخت‌کننده‌های انتهایی بر رفتار لرزه‌ای دیوار برشی فولادی پرداختند. آن‌ها با بررسی ۳ مدل با شکل شیار متفاوت و ۲ مدل با سخت‌کننده‌های انتهایی مختلف، تأثیر این تغییرات را بر پارامترهایی چون سختی اولیه، مقاومت، رفتار چرخه‌ای و کمانش خارج از صفحه ارزیابی کردند. ضمن آنکه با ارائه‌ی یک شکل نوین برای شیارهای عمودی، رابطه‌سازی روابط آن و انجام آزمایش، عملکرد دیوار برشی شیاردار را بررسی کردند. شکل شیار پیشنهادی موجب کاهش تمرکز تنش و گسترش ناحیه‌ی پلاستیک و در نتیجه افزایش اتلاف انرژی و همچنین استفاده از سخت‌کننده‌ی انتهایی باعث کاهش کمانش دیوار و افزایش

سختی اولیه آن شد. نظیفی و شریعتمدار [10] در سال ۲۰۱۸ اثر اندرکنش قاب و دیوار برشی فولادی شیاردار را بررسی کردند. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش ممان اینرسی تیر سختی قاب و استهلاک انرژی مجموعه افزایش می‌یابد. به عنوان نمونه با ۸ برابر شدن ممان اینرسی تیر سختی قاب حدود ۲۵ درصد افزایش می‌یابد. همچنین آن‌ها برای سختی قاب رابطه‌ای ارائه کردند که نتایج مطلوبی در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی دارد. جین و همکاران [1] در سال ۲۰۱۷ با استفاده از یک ورق فولادی با شیارهای مورب و دو صفحه‌ی پیش‌ساخته‌ی بتنی در دو طرف آن (که نقش مهار جانبی را برای ورق ایفا می‌کنند) و انجام یک پژوهش عددی-آزمایشگاهی رفتار این سیستم را ارزیابی کردند. آن‌ها از دیوار برشی فولادی به عنوان یک سیستم کنترلی غیرفعال یاد کردند و بیان کردند که نوارهای فولادی بین شیارها مشابه اجزای خرپایی عمل کرده و با تحمل تغییرشکل‌های غیرالاستیک رفت و برگشتی باعث اتلاف انرژی می‌شوند. برای تغییر سختی و مقاومت دیوار می‌توان تعداد و عرض نوارها را تغییر داد تا نیروهای اضافه به اعضای مرزی اعمال نشود. نتایج عددی آن‌ها نشان می‌دهد که این سیستم قادر است بدون کاهش ظرفیت برشی دریفت ۲ درصدی را تحمل کند. وانگ و همکاران [11] نیز در سال ۲۰۱۷ با استفاده از دو ورق فولادی که دارای شیارهای مورب و مخالف جهت بودند و با یک حائل لاستیکی از یکدیگر جدا شده بودند، سعی در بهبود رفتار دیوار برشی فولادی کردند. آن‌ها با انجام یک پژوهش عددی رفتار این نوع دیوار فولادی را ارزیابی کردند. علت استفاده از دو ورق به طور همزمان ایجاد مهار جانبی توسط یکی از ورق‌ها که تحت بار جانبی در کشش است برای ورق مجاور (که در فشار است) و جلوگیری از کمانش آن عنوان شده است. ضمن آن‌که مکانیزم عملکردی دیوار فولادی از کشش و فشار همزمان به کشش و یا فشار تک‌محوری تغییر کرده است؛ این موضوع خود باعث جلوگیری از پارگی ورق که عموماً به علت خستگی در بارهای تکرارشونده رخ می‌دهد، می‌شود. دیگر مزیت‌های این سیستم اتلاف انرژی بالا با جاری شدن نوارهای فولادی، انتقال بارهای کمتر به قاب، اطمینان از جاری شدن ورق پیش از اعضای مرزی و امکان تغییر مشخصات دیوار برشی با تغییر عرض و تعداد شیارها عنوان شده است. لو و همکاران [12,13] در سال ۲۰۱۸ با مطالعه عددی و آزمایشگاهی بر روی نمونه‌های دیوار برشی شیاردار سعی در بهبود رفتار این دیوار کردند. این محققین در دو مقاله به صورت جداگانه به بررسی اثر شیارهای با طول نامساوی [12] و شیار با تعداد لایه‌های متفاوت [13] تأثیر این دو عامل را بر رفتار چرخه‌ای دیوارهای برشی شیاردار ارزیابی نمودند. آن‌ها بنابر نتایج به دست آمده دیوار برشی شیاردار با شیارهای با طول نامساوی را به نسبت دیوارهای شیاردار معمولی دارای توانایی اتلاف انرژی خوب، شکل‌پذیری قابل توجه و در عین حال مقاومت و سختی جانبی بالایی توصیف کردند. همچنین استفاده از تعداد ردیف‌های شیار بیشتر موجب تغییر مود شکست از کمانش خارج از صفحه‌ی لینک‌های خمشی به کمانش کلی دیوار فولادی و در نتیجه ظرفیت بالاتر مجموعه می‌شود. احمدی و همکاران [14] نیز در سال ۲۰۲۱ با بهینه‌سازی هندسه‌ی شیارهای قائم از ایجاد مفصل پلاستیک محلی جلوگیری نموده و باعث ایجاد مفاصل پلاستیک به طور همزمان در رابط‌ها شدند.

با بررسی پژوهش‌های مذکور، هدف اصلی در این پژوهش بررسی عددی اثر شکل و موقعیت شیارهای شیبدار بر مقاومت، سختی اولیه و استهلاک انرژی دیوار شیاردار می‌باشد. برای این منظور مدل های عددی با اســتفاده از نرم‌افزار Abaqus تهیه می‌شود.

صحت‌سنجی

در ابتدای کار با هر نرم‌افزار محاسباتی برای اطمینان از صحت مدل‌سازی و درستی نتایج آن می‌بایست خروجی‌های به دست آمده را با نتایج حاصل از پژوهش‌های تحلیلی و یا آزمایشگاهی موجود مقایسه کرد. برای صحت‌سنجی مدل‌سازی دیوار برشی فولادی در نرم‌افزار آباکوس از دو پژوهش آزمایشگاهی که در ادامه معرفی می‌شوند، استفاده شده است. برای مدل‌سازی از نرم افزار Abaqus نسخه ٦/١٤ استفاده شده است. دیوار فولادی شیاردار توسط المان پوسته (S4R) مدل می‌شود. S4R یک المان عمومی چهار نقطه‌ای با انتگرال‌گیری کاهش‌یافته است که هر نقطه دارای سه درجه آزادی انتقالی و سه درجه آزادی دورانی است. این المان قادر است کمانش خارج از صفحه را نیز مدل‌سازی نماید. برای انتخاب اندازه مش در نرم‌افزار، مدل‌های مورد بررسی با اندازه‌های مش ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰ و ۲۵ میلیمتر مدل‌سازی و تحلیل شدند. نتایج نشان می‌دهد که مقادیر مقاومت نهایی نمونه‌ها در مدل‌های با اندازه ۵، ۱۰ و ۱۵ میلیمتر مشابه یکدیگر

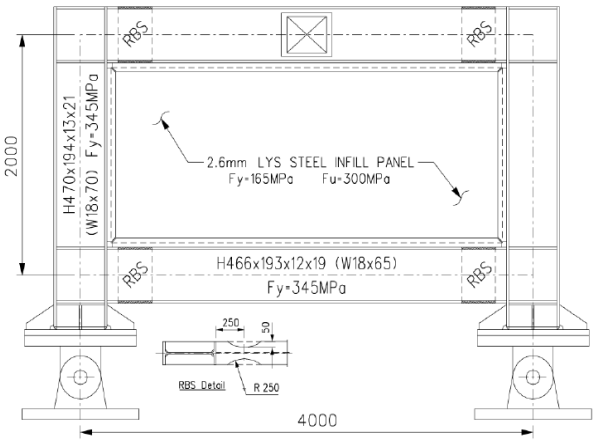
هستند. در نمونه‌های با اندازه‌ی مش ۲۰ و ۲۵ مقدار مقاومت نهایی نسبت به نمونه‌ی آزمایشگاهی افزایش قابل توجهی داشته است. لذا با توجه به توضیحات داده شده و با توجه به افزایش زمان تحلیل با کوچکتر شدن اندازه مش، در این پژوهش از اندازه‌ی مش ۱۵ میلیمتر برای مدل‌سازی و تحلیل نمونه‌ها استفاده شد.

صحت‌سنجی دیوار برشی فولادی سوراخ‌دار

ابتدا نتایج مدل‌سازی عددی با نرم‌افزار Abaqus با نتایج پژوهش ویان و همکاران [14] که سال ۲۰۰۹ چاپ شده است، مقایسه می‌شود. از علل استفاده از این مقاله برای انجام کار صحت سنجی وجود سوراخ در ورق فولادی دیوار بر شی، در دسترس بودن اطلاعات نمونه آزمایش شده و اعتبار مقاله‌ی چاپ شده را می‌توان نام برد. جدول (۱) م شخ صات مکانیکی مصالح، شکل (۱) مشخصات نمونه‌ی مورد آزمایش و شکل (۲) تصویر آن در حین آزمایش را نشان می‌دهند.

جدول ۱ مشخصات مکانیکی مصالح بکار رفته در پژوهش ویان و همکاران [14]

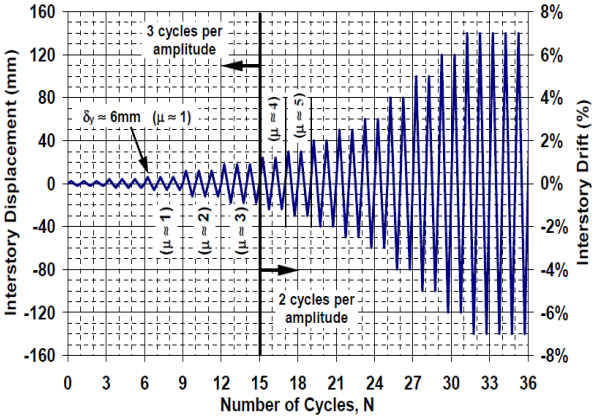
نسبت پواسون	مقاومت نهایی (MPa)	تنش جاری شدن (MPa)	
۰/۳	۳۰۰	۱۶۵	ورق میانی
۰/۳	۵۲۰	۳۴۵	اعضای مرزی



شکل ۱ مشخصات نمونه مورد آزمایش [14]

شکل ۲ تصویر نمونه قبل از انجام آزمایش [14]

بارگذاری چرخه‌ای شبه‌استاتیک مطابق شکل (۳) انجام شده است. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود تا جابجایی ۲۰ میلی‌متر در هر تغییرمکان ۳ سیکل و پس از آن ۲ سیکل برای هر مقدار جابجایی بارگذاری انجام شده است.

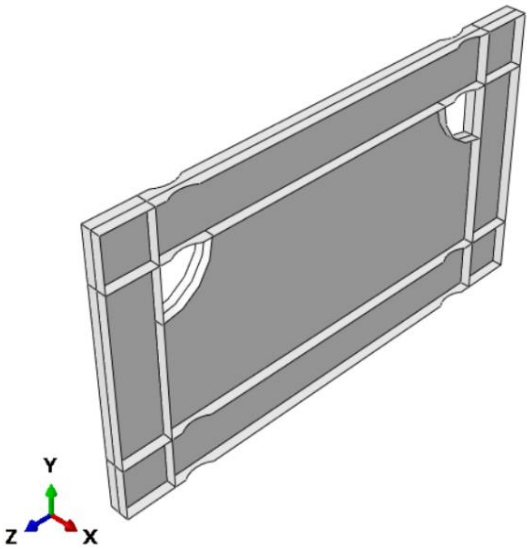


شکل ۳ تاریخچه جابجایی اعمالی در سیکل‌های بارگذاری [14]

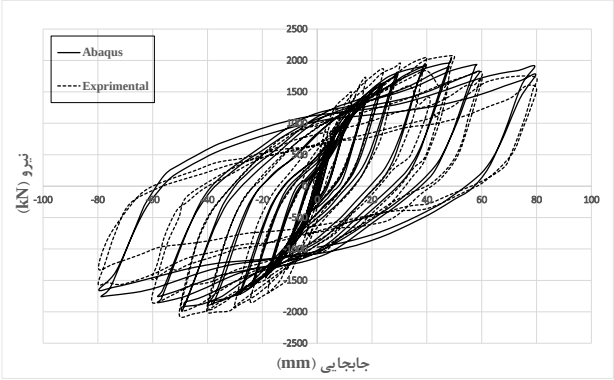
با دا شتن اطلاعات فوق از مقاله نام برده شده مدل سازی نرم‌افزاری در برنامه Abaqus انجام شد. با استفاده از المان Shell به صورت صفحه‌ای، ورق فولادی مدل شده و سوراخ‌ها با ابعاد مورد نظر در گوشه‌های آن ایجاد می‌شوند. تیرها با مقطع کاهش‌یافته مدل‌سازی شده و با سایر اعضا روی‌هم‌گذاری می‌شوند. بارگذاری مطابق الگوی شکل (۳) روی سازه یک‌طبقه یک‌دهانه اعمال شده و نتایج مورد نیاز به عنوان خروجی تعریف

می‌شوند. شکل (٤) مدل نرم‌افزاری ساخته شده را نشان می‌دهد.

پیش از انجام تحلیل رفت و برگشتی با انجام تحلیل کمانشی این مدل، نتایج حاصل ذخیره می‌شوند تا در مرحله اعمال بار چرخه‌ای فراخوانی شوند و مورد استفاده قرار گیرند. سپس تحلیل چرخه‌ای انجام می‌شود. در ادامه نتایج این مدل با نتایج آزمایشگاهی مقایسه می‌شوند. شکل (۵) منحنی‌های چرخه‌ای دو حالت را نشان می‌دهد. از مقایسه دو نمودار در می‌یابیم که نتایج مدل‌سازی عددی انطباق خوبی با نتایج حاصل از آزمایش دارند؛ به طوری که اختلاف برش پایه بیشینه بین دو حالت مذکور در حدود ۲ درصد می‌باشد.



شکل ٤ مدل نرم‌افزاری نمونه مورد آزمایش

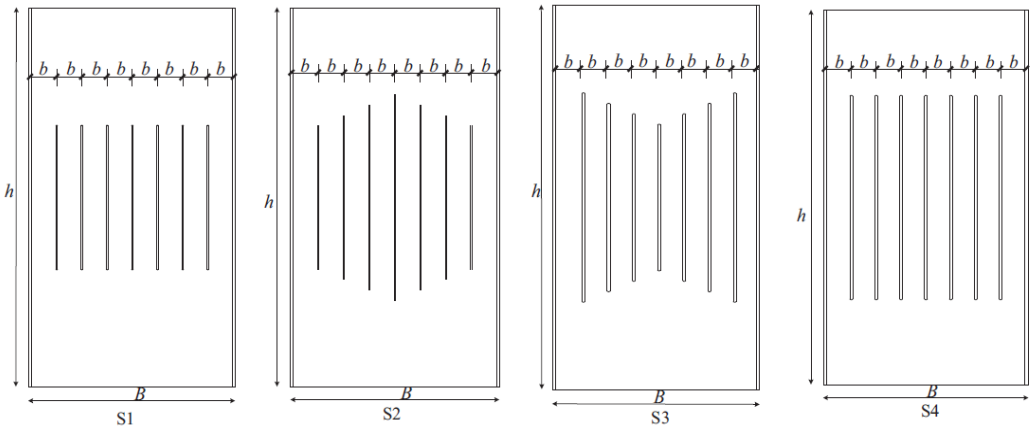


شکل ۵ مقایسه منحنی چرخه‌ای به دست آمده از مدل‌سازی عددی و کار آزمایشگاهی ویان و همکاران [14]

صحت‌سنجی دیوار برشی فولادی شیاردار

دیگر پژوهش مورد استفاده برای صحت‌سنجی مقاله‌ی لو و همکاران [12] است که در بخش قبل به آن اشاره شد. این دیوار فولادی شامل یک ورق فولادی و دو سخت‌کننده انتهایی است. این محققین بنابر نتایج به دست آمده، دیوار برشی شیاردار با شیارهای با طول نامساوی را در مقایسه با دیوارهای شیاردار معمولی دارای توانایی اتلاف انرژی خوب، شکل‌پذیری قابل توجه و در عین حال مقاومت و سختی جانبی بالا توصیف کردند. شکل (٦) نمایی از ٤ نمونه‌ی مورد بررسی آن‌ها را نشان می‌دهد که در این پژوهش، نمونه‌ی S4 برای صحت‌سنجی انتخاب شده است.

شکل (۷) نمونه آزمایشگاهی این پژوهش را نشان می‌دهد. با دقت در این شکل مشاهده می‌شود که دیوار برشی فولادی در راستای خارج از صفحه مقید شده و به بیان دیگر مهار جانبی دارد.



شکل ٦ چهار نمونه‌ی مورد بررسی با چیدمان متفاوت شیارها در پژوهش لو و همکاران [12]

شکل ۷ نمونه آزمایشگاهی بررسی شده [12]

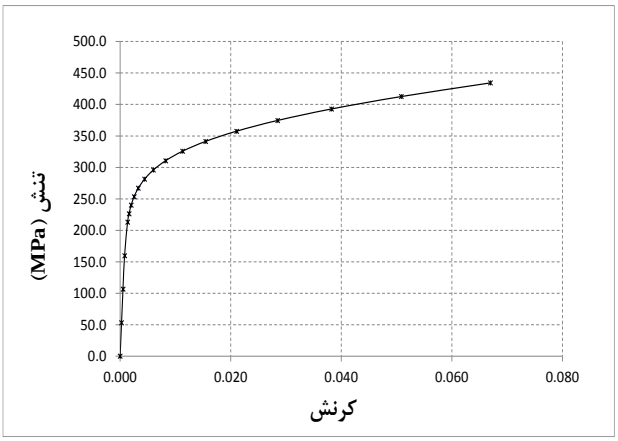
لازم به توضیح است به علت آنکه دیوار برشی فولادی در تغییرمکان‌های کوچکی جاری می‌شود، برای تحلیل از روش کنترل تغییرمکان (و نه کنترل بار) استفاده شده است. برای بارگذاری از یک جک با ظرفیت ۱۰۰۰ kN استفاده شده است. ضمناً مشابه صحت‌سنجی نخست، برای مدل‌سازی کمانش در دیوار فولادی ابتدا نقص اولیه با انجام تحلیل کمانشی اعمال می‌شود. عرض شیارها ٤ mm و عرض نوارها ٦٩ mm در نظر گرفته شده‌اند. مصالح مورد استفاده در این پژوهش فولاد با مقاومت تسلیم ٢٦٦ MPa، ضریب پواسون ۰/۳ و مدول الاستیسیته MPa ۲/۰٦×۱۰۵ می‌باشد. برای اعمال منحنی تنش-کرنش و مشخصات پلاستیک فولاد مصرفی در نرم‌افزار از رابطه‌ی (۱) (رابطه‌ی رامبرگ-اسگود) استفاده می‌شود.

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} + 0.002\left(\frac{\sigma}{F_y}\right)^n \qquad (۱)$$

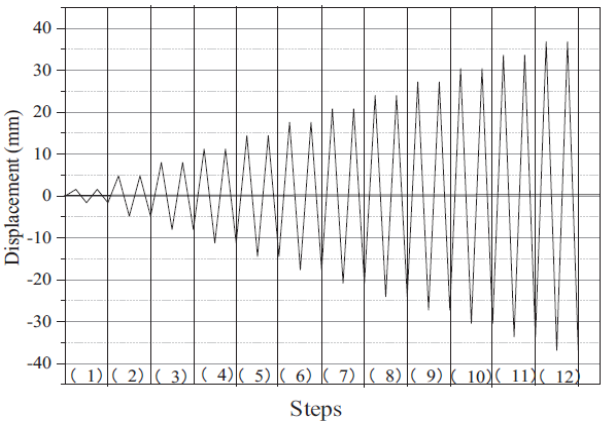
در رابطه (۱) ε نشان‌دهنده‌ی کرنش، σ تنش، E مدول الاستیسیته و F_y تنش تسلیم می‌باشند. شکل (۸) منحنی تنش-کرنش به دست آمده را نشان می‌دهد.

در این آزمایش برای بارگذاری از الگوی بار شـــکل (۹) استفاده شده است.

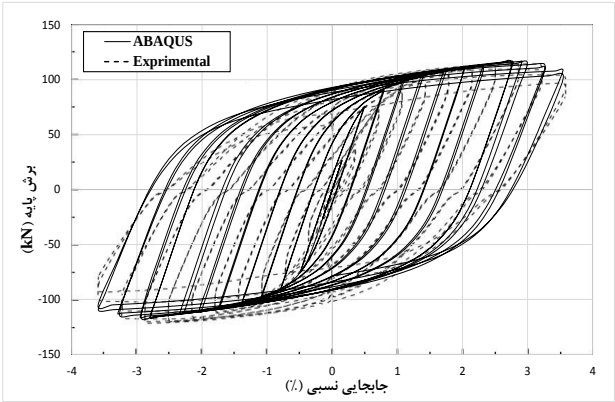
شکل (۱۰) مقایسه منحنی چرخه‌ای استخراج شده از مدل‌سازی با نتایج حاصل از آزمایش پژوهش لو و همکاران [12] را نمایش می‌دهد. اختلاف برش پایه در دو حالت آزمایشگاهی و عددی در حدود ۳ درصد می‌باشد. این مقایسه نشان‌دهنده‌ی تطابق خوب نتایج و صحت مدل‌سازی است. بنابراین با توجه به دو مدل‌سازی صورت گرفته و تطابق خوب نتایج حاصل از تحلیل رفت و برگشتی با روش اجزای محدود و نتایج آزمایشگاهی درج شده در پژوهش‌های مذکور، صحت مدل‌سازی تأیید می‌شود و در ادامه مدل‌های عددی دیگری با اطمینان از نتایج ایجاد می‌شوند.



شکل ۸ منحنی تنش-کرنش فولاد مصرفی



شکل ۹ بارگذاری چرخه‌ای اعمالی [12]



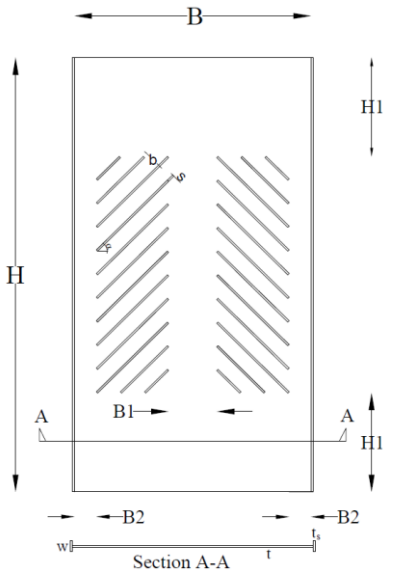
شکل ۱۰ مقایسه منحنی چرخه‌ای به دست آمده از پژوهش عددی به منظور صحت‌سنجی مدل‌سازی و کار آزمایشگاهی لو و همکاران [12]

ایده استفاده از شیار مایل در دیوار برشی فولادی

به طور کلی هدف از این پژوهش مطالعه عددی اثر بکارگیری شیارهای مایل (شیبدار) در دیوار برشی فولادی می‌باشد. ایده‌ی استفاده از شیار مایل با زاویه‌ی ٤٥ درجه در دیوار برشی فولادی پیش‌تر در پژوهش‌های دیگری از جمله دو مقاله‌ی جین و همکاران [1] و وانگ و همکاران [11] مطرح شده است. با توجه به مطالعات انجام شده توسط وانگ و همکاران [11] استفاده از شیارهای مایل نسبت به قائم سبب گستردگی بیشتر سطح تسلیم، استفاده از حداکثر ظرفیت ورق و اتلاف بیشتر انرژی ورودی به واسطه‌ی عمل کردن المان‌های خرپایی در کشش و فشار می‌شود. این موضوع (ایجاد سطح تسلیم و مفصل پلاستیک) در المان‌های خمشی مورد نظر در دیوار برشی فولادی با شیارهای عمودی، عموماً در دو سمت نوار رخ می‌دهد.

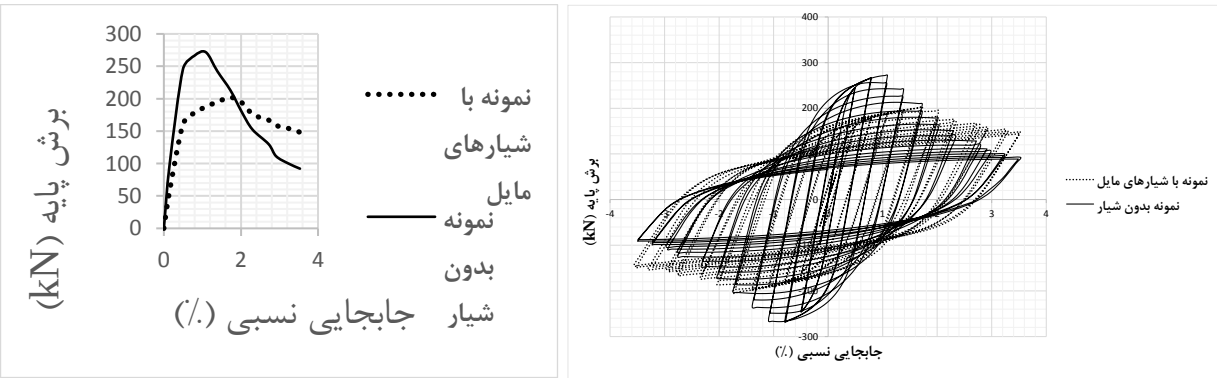
دو نمونه مذکور از دیوار برشی فولادی شیاردار با شیارهای مایل به علت استفاده از ورق فولادی دوگانه و یا صفحه بتنی از منظر ساخت دشوار و پرهزینه به نظر می‌رسند. بنابراین ارائه یک مدل ساده و عاری از پیچیدگی‌ها که هم قادر به تأمین سختی و مقاومت مورد نیاز باشد، هم شکل‌پذیری قابل قبول و توانایی استهلاک انرژی خوبی داشته باشد و هم از لحاظ اجرایی مورد پذیرش جامعه‌ی مهندسی باشد، می‌تواند ارزیابی جامعی برای الگوی پیشنهادی در اختیار قرار دهد.

دیوار فولادی مورد بررسی مطابق شکل (۱۱) دارای دو ردیف شیار مایل با فواصل یکسان می‌باشد. این نوع دیوار برشی شیاردار یادآور مهاربندهای هشتی به عنوان سیستم مقاوم در برابر بارهای جانبی می‌باشد. در راستای ارزیابی عملکرد این نوع دیوار برشی فولادی، با اطمینان از صحت نتایج نرم‌افزار بر مبنای صحت‌سنجی‌های صورت پذیرفته، مدل‌سازی در نرم‌افزار Abaqus انجام می‌شود.



شکل ۱۱ تصویر دیوار برشی فولادی با شیارهای شیبدار پیشنهادی

برای توضیح بهتر نحوه عملکرد شیار شیبدار در دیوار برشی فولادی شکل (۱۲) مقایسه‌ای از منحنی چرخه‌ای و پوش دیوار فولادی بدون شیار و دیوار دارای شیارهای شیبدار تحت بار چرخه‌ای ارائه می‌دهد. همانطور که ملاحظه می‌شود با توجه به کاهش مساحت فولاد مصرفی مقاومت نهایی و سختی اولیه دیوار در نمونه‌ی شیاردار پایین‌تر از نمونه‌ی بدون شیار است. اما با بالا رفتن تغییرمکان نسبی افت مقاومت شدیدی در دیوار فولادی بدون شیار رخ داده که همین موضوع سبب افت پارامترهای لرزه-ای آن می‌شود. دلیل این پدیده اعمال نیروی بیشتر از سوی ورق فولادی به سخت‌کننده‌های انتهایی و کمانش آن‌ها و رفتار تردتر در نمونه‌ی بدون شیار می‌باشد.



شکل ۱۲ مقایسه نمودار چرخه‌ای و پوش دیوار فولادی بدون شیار و دیوار فولادی با شیارهای شیبدار

مدل‌سازی نمونه‌ها

برای بررسی تأثیر شکل و موقعیت قرارگیری شیارها در دیوار برشی فولادی شیاردار مقادیر ابعادی B1/B، B2/B، H1/H، عرض شیار، عرض نوار و مقطع سخت‌کننده انتهایی به عنوان متغیرهای پیکربندی انتخاب می‌شوند. ابعاد ورق فولادی و مشخصات فولاد مصرفی برای مقایسه نهایی با مدل‌های لو و همکاران [12] برابر با ۸ ×۵۵۰×۱۰۱۰ میلیمتر در نظر گرفته می‌شوند. متغیر β (نسبتی از ارتفاع دیوار که از شیار تشکیل‌شده است، β=ml/h) و b/t برای رفتار شکل‌پذیر دیوار بایستی موردتوجه قرار گیرد. مقدار بهینه β بین ۰/۶۵ و ۰/۸۵ است. به عبارت‌دیگر بین ۶۵ تا ۸۵ درصد ارتفاع دیوار بایستی از رابط‌ها و مابقی از ناحیه اتصالی تشکیل شده باشد. مقدار بهینه این پارامتر بر اساس نتایج آزمایش استخراج شده‌است [9]. این متغیر برای نمونه‌ی پایه برابر با ۰/۷۵ در نظر گرفته می‌شود. متغیر بعدی نسبت عرض رابط به ضخامت آن است. این نسبت برای جلوگیری از تغییر شکل خارج از صفحه کنترل می‌شود. اگر رابط خیلی نازک باشد، مشکل ناپایداری ایجاد می‌شود. در اینجا با توجه به اندازه ورق فولادی برای مدل پایه عرض نوار ۵۰ میلیمتر در نظر گرفته می‌شود. در ابتدا پیکربندی دیوار فولادی مورد نظر بر مبنای فرضیاتی اولیه جهت مدل نمونه پایه (نمونه شماره ۱) انجام می‌شود. برای بررسی اثر تغییر هر پارامتر، در هنگام تغییر یک پارامتر سایرین ثابت فرض می‌شوند. در ادامه ۱۵ مدل که جزئیات آن‌ها در جدول (۲) درج شده است، بررسی می‌شوند.

همانطور که در جدول (۲) مشاهده می‌شود در این ۱۵ مدل ٦ پارامتر مذکور به ترتیب دچار تغییرات شده تا اثر آن روی رفتار چرخه‌ای دیوار فولادی بررسی شوند. لازم به توضیح است ۵ پارامتر اول نشان‌دهنده وضعیت قرارگیری شیارها و به طور کلی پیکربندی ورق فولادی و مورد آخر سخت‌کننده‌های انتهایی هستند. برای بارگذاری از الگوی بار شکل (۸) استفاده می‌شود. در ادامه نتایج تحلیل‌ها مورد بررسی قرار می‌گیرند.

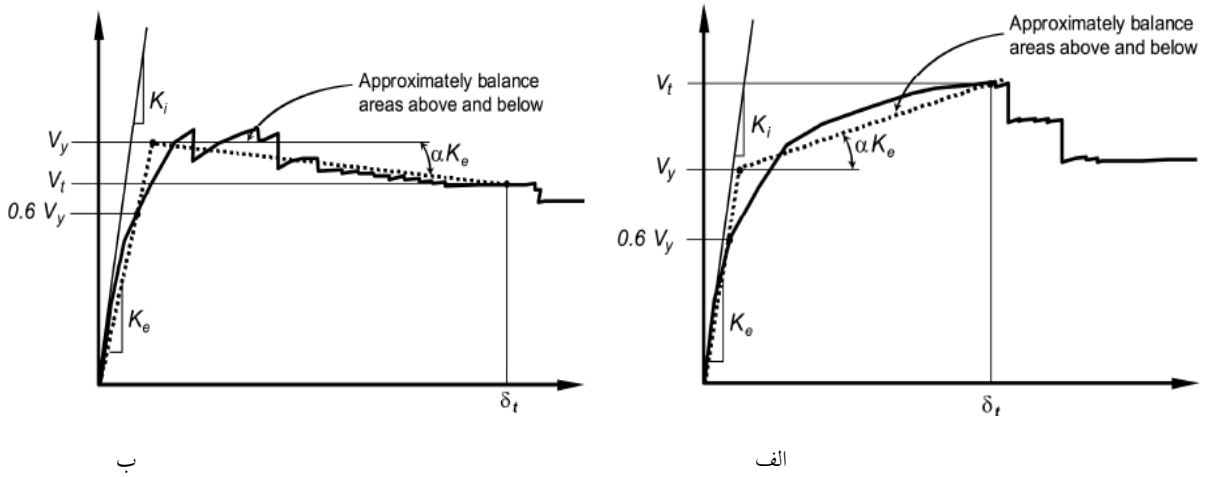
جدول ۲ جزئیات نمونه‌های مدل‌سازی شده

مقطع سخت کننده	عرض شیار	عرض نوار	H1	H1/H	B2	B2/B	B1	B1/B	مدل	متغیر	شماره
I	۱۰	۵۰	۱۳۰	۰/۱۳	۵۰	۰/۰۹	۱۰۰	۰/۱۸	1-Base	عرض	۱
I	۱۰	۵۰	۱۳۰	۰/۱۳	۵۰	۰/۰۹	۱۶۵	۰/۳۰	2-Width-165		۲
I	۱۰	۵۰	۱۳۰	۰/۱۳	۵۰	۰/۰۹	۵۵	۰/۱۰	3-Width-55		۳
I	۱۰	۵۰	۱۳۰	۰/۱۳	۲۷/۵	۰/۰۵	۱۰۰	۰/۱۸	4-Side-27.5		۴
I	۱۰	۵۰	۱۳۰	۰/۱۳	۸۲/۵	۰/۱۵	۱۰۰	۰/۱۸	5-Side-82.5		۵
I	۱۰	۵۰	۱۰۱	۰/۱۰	۵۰	۰/۰۹	۱۰۰	۰/۱۸	6-Heigth-101	ارتفاع	۶
I	۱۰	۵۰	۱۵۱/۵	۰/۱۵	۵۰	۰/۰۹	۱۰۰	۰/۱۸	7-Heigth-151.5		۷
I	۱۰	۳۵	۱۳۰	۰/۱۳	۵۰	۰/۰۹	۱۰۰	۰/۱۸	8-Strip-35	نوار	۸
I	۱۰	۶۵	۱۳۰	۰/۱۳	۵۰	۰/۰۹	۱۰۰	۰/۱۸	9-Strip-65		۹
I	۱۲/۵	۵۰	۱۳۰	۰/۱۳	۵۰	۰/۰۹	۱۰۰	۰/۱۸	10-Slit-12.5	شیار	۱۰
I	۷/۵	۵۰	۱۳۰	۰/۱۳	۵۰	۰/۰۹	۱۰۰	۰/۱۸	11-Slit-7.5		۱۱
Box50	۱۰	۵۰	۱۳۰	۰/۱۳	۵۰	۰/۰۹	۱۰۰	۰/۱۸	12-Box-50	مقطع سخت کننده	۱۲
Box100	۱۰	۵۰	۱۳۰	۰/۱۳	۵۰	۰/۰۹	۱۰۰	۰/۱۸	13-Box-100		۱۳
UNP50	۱۰	۵۰	۱۳۰	۰/۱۳	۵۰	۰/۰۹	۱۰۰	۰/۱۸	14-UNP-50		۱۴
UNP100	۱۰	۵۰	۱۳۰	۰/۱۳	۵۰	۰/۰۹	۱۰۰	۰/۱۸	15-UNP-100		۱۵

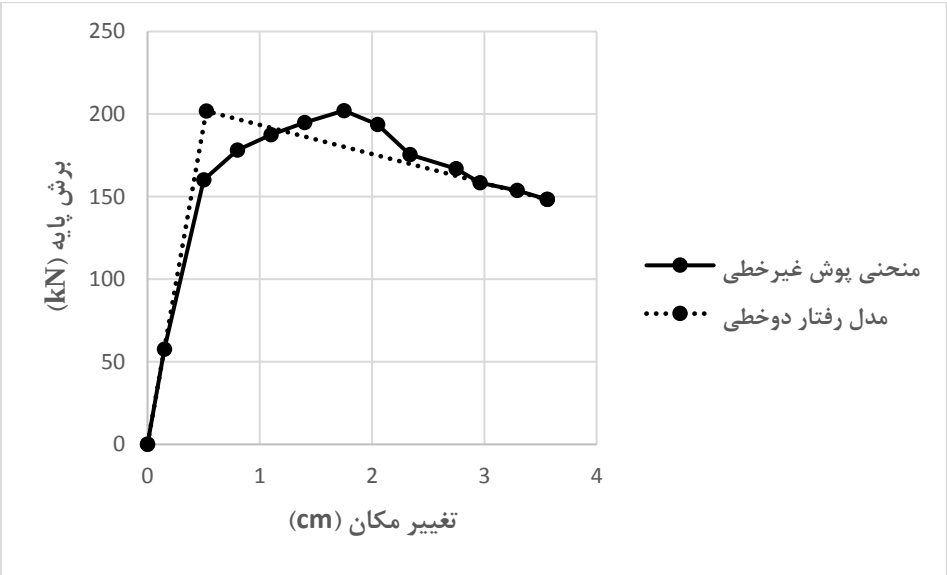
مقایسه نتایج تحلیل

در این بخش شاخص‌های با اهمیت از منظر رفتار چرخه‌ای مورد بررسی قرار می‌گیرند. سختی، مقاومت نهایی، شکل‌پذیری، اضافه مقاومت و انرژی تلف شده برای مدل‌ها اندازه‌گیری و با یکدیگر مقایسه می‌شوند. برای این منظور لازم است تا منحنی‌های دوخطی ایده‌آل سازه‌ها از روی نمودار پوش تهیه شود. این کار با استفاده از دستورالعمل FEMA356 [16] انجام شده است. در مدل ساده شده باید دقت شود که Vy بزرگتر از بیشینه برش پایه در منحنی رفتار غیرخطی نشود. منحنی دوخطی با سعی و خطا چنان ترسیم می‌شود که سطح زیر مدل رفتار دوخطی با سطح زیر منحنی رفتار غیرخطی تا تغییرمکان هدف برابر شود. شکل (۱۳) جزئیات مدل ایده‌آل دوخطی را نمایش می‌دهد.

در ادا مه برای نمو نه منحنی دوخطی ا یده‌آل برای مدل شماره ۱ (Base) در شکل (۱٤) ترسیم شده است.



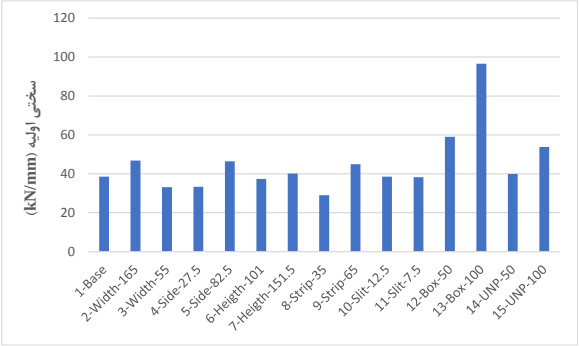
شکل ۱۳ منحنی ساده شده‌ی نیرو-تغییرمکان سازه برای دو حالت الف) با شیب مثبت و ب) شیب منفی [16]



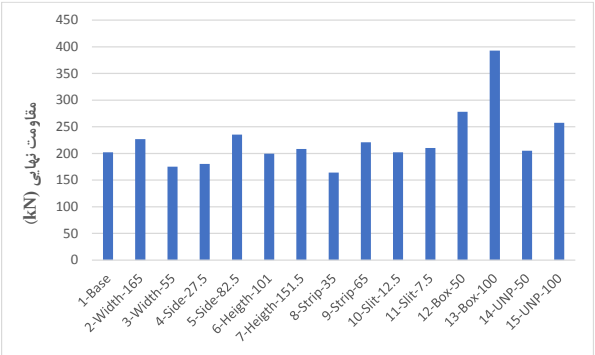
شکل ۱٤ منحنی ساده شده‌ی نیرو-تغییرمکان برای مدل شماره ۱

سختی اولیه

این پارامتر که بیانگر شیب ابتدایی منحنی پوش سازه است برای ۱۵ نمونه‌ی مدل‌سازی شده در شکل (۱۵) نمایش داده شده است. با دقت در این نمودار می‌توان دریافت که مقدار سختی اولیه دیوار با بالا رفتن مساحت شیار مطابق انتظار کاهش می‌یابد. همچنین واضح است با بکارگیری سخت‌کننده انتهایی با ممان اینرسی بالاتر، سختی اولیه به شکل محسوسی افزایش می‌یابد. به عنوان مثال سختی اولیه در نمونه ۱۲ با استفاده از مقطع BOX50 در حدود ۵۳ درصد بالاتر از سختی اولیه نمونه معیار می‌باشد. تغییر در عرض شیارها در نمونه‌های ۱۰ و ۱۱ تغییر چندانی در سختی دیوار فولادی ایجاد نمی‌کند. این مقایسه همچنین نشان می‌دهد تغییر در وضعیت شیارها یک راه مؤثر در تغییر و تنظیم سختی اولیه دیوار برشی می‌باشد.



شکل ۱۵ سختی اولیه نمونه‌ها



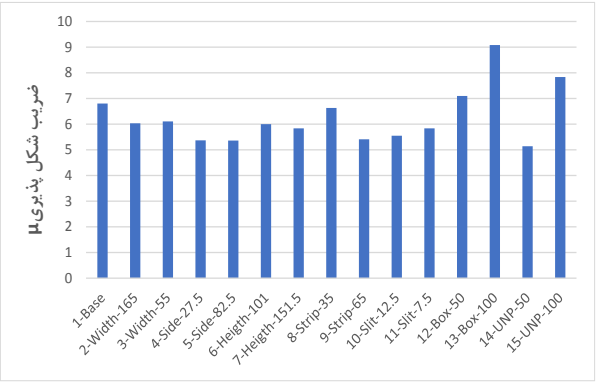
شکل ١٦ مقاومت نهایی نمونه‌ها

مقاومت نهایی

این پارامتر بیانگر بیشترین برش پایه تحمل شده توسط سازه در هنگام بارگذاری می‌باشد. شکل (١٦) نمونه‌ها را از این جهت مقایسه می‌کند. مطابق این نمودار مشاهده می‌شود که افزایش سطح شیار به علت کاهش سطح مصالح دیوار موجب کاهش مقاومت نهایی آن می شود. مشابه سختی اولیه در نمونه‌های ۱۱ و ۱۲ تغییر ۲۵ درصدی عرض شیارها تغییر چندانی در مقاومت نهایی نمونه‌ها نداشته است.

شکل‌پذیری

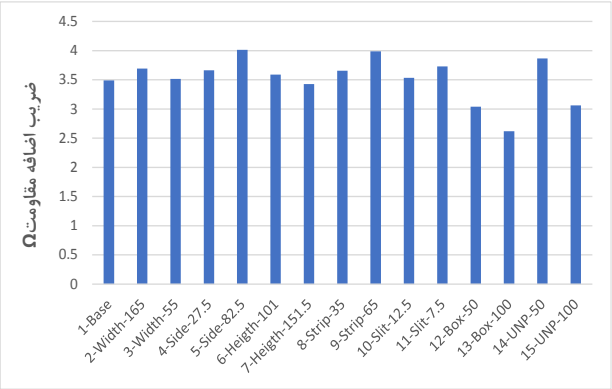
این پارامتر که بیانگر نسبت کرنش نهایی به کرنش جاری شدن می‌باشد، با استفاده از نمودار پوش دوخطی در نمونه‌ها به دست می‌آید. با توجه به شکل (۱۷) برخی نمونه‌ها از جمله نمونه معیار توانسته‌اند ضریب شکل‌پذیری در محدوده عدد ۷ را کسب نمایند و نمونه‌ها با سخت‌کننده انتهایی صلب‌تر شکل‌پذیری بالاتری دارند. در بین نمونه‌های با سخت‌کننده انتهایی ساده، نمونه معیار بیشترین ضریب شیکل‌پذیری را داراست.



شکل ۱۷ شکل‌پذیری نمونه‌ها

اضافه مقاومت

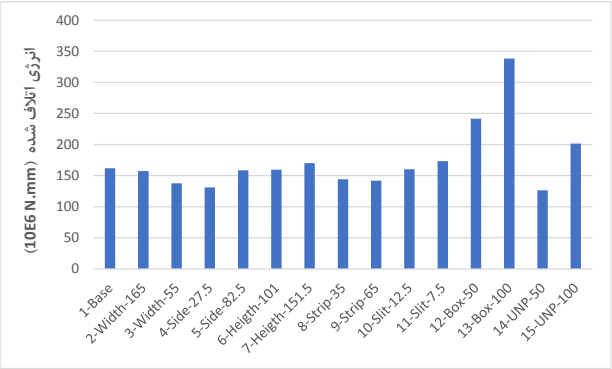
ضریب اضافه مقاومت به عنوان دیگر پارامتر مهم در رفتار چرخه-ای دیوار برشی فولادی در این بخش مورد بررسی قرار می‌گیرد. این ضریب نشان‌دهنده‌ی مقاومت ذخیره‌ای است که بین تراز تسلیم کلی سازه و تراز اولین تسلیم (نقطه‌ای که منحنی دوخطی ایده‌آل از منحنی غیرخطی جدا می‌شود) وجود دارد. از این رو این ضریب عبارت است از خارج قسمت نیروی متناظر با حد تسلیم کلی سازه به نیروی متناظر با تشکیل اولین مفصل پلاستیک [16]. کاهش سطح شیارها در نمونه‌های ۵ و ۹ نسبت به نمونه معیار (نمونه ۱) موجب افزایش ۱۵ درصدی ضریب اضافه مقاومت در این نمونه‌ها شده است. بکارگیری سخت‌کننده‌ها با صلبیت بیشتر نیز باعث کاهش ضریب اضافه مقاومت نمونه‌ها شده است.



شکل ۱۸ ضریب اضافه مقاومت در نمونه‌ها

انرژی اتلاف شده

این پارامتر که معرف سطح زیر منحنی چرخه‌ای دیوار برشی فولادی است، برای نمونه‌های مورد بررسی در شکل (۱۹) نمایش داده شده است. با توجه به این نمودار کاهش فاصله میانی شیارهای چپ و راست با یکدیگر (B1) از ۱۰۰ به ۵۵ میلیمتر موجب کاهش ۱۵ درصدی و کاهش فاصله شیارها با انتهای دیوار (B2) از ۵۵ به ۲۷,۵ موجب کاهش ۱۹ درصدی انرژی اتلاف شده، گردیده است. با توجه به اینکه افت مقاومت در چرخه‌های متوالی در نمونه‌های مذکور تقریباً ثابت بوده است، کاهش انرژی اتلاف شده به سبب کاهش مقاومت نهایی در اثر رشد مساحت شیارها در نمونه و در نتیجه کاهش سطح زیر منحنی چرخه‌ای رخ داده است. ضمن آنکه بکارگیری مقطع BOX برای سخت-کننده‌ی انتهایی افزایش چشمگیر انرژی اتلاف شده را به همراه داشته است که این موضوع با توجه به رشد چرخه‌ها در منحنی رفت و برگشتی قابل پیش‌بینی بود. همچنین اندازه ۵۰ میلیمتری انتخاب شده برای عرض نوارها بهترین عملکرد را از جهت انرژی اتلاف شده داشته است.



شکل ۱۹ انرژی اتلاف شده در نمونه‌ها

نتیجه‌گیری

هدف از این پژوهش معرفی و پیشنهاد دیوار برشی فولادی با شیارهای شیبدار با ساختار ساده‌تر نسبت به مدل‌های پیشین است. علت استفاده از شیارهای شیبدار نسبت به قائم، گستردگی بیشتر سطح تسلیم، استفاده از حداکثر ظرفیت ورق و اتلاف بیشتر انرژی ورودی به وا سطه‌ی عمل کردن المان‌های خرپایی در کشش و فشار می‌باشد [11]. این موضوع (ایجاد سطح تسلیم و مفصل پلاستیک) در المان‌های خمشی مورد نظر در دیوار برشی فولادی با شیارهای عمودی، عموماً در دو سمت نوار رخ می‌دهد.

ایده‌ی استفاده از شیار مایل در دیوار برشی فولادی پیش‌تر در پژوهش‌های دیگری از جمله دو پژوهش جین و همکاران [1] و وانگ و همکاران [11] مطرح شده است. دیوار فولادی شیاردار پیشنهادی با توجه به حذف یکی از دو ورق در مقایسه با پژوهش [11] و همچنین عدم استفاده از مهارهای جانبی بتنی در مقایسه با پژوهش [1] دارای ساختار ساده‌تر نسبت به دو نمونه مذکور برآورد می‌شود. پس از بررسی دیوارهای برشی با شیارهای متفاوت، شیار هشتی با ایده گرفتن از مهاربند هشتی پیشنهاد شد و رفتار آن تحت بارهای رفت و برگشتی مورد بررسی قرار گرفت.

مقایسه نتایج دیوار فولادی پیشنهادی با شیارهای شیبدار و دیوار فولادی بدون شیار با همان ابعاد نشان می‌دهد علی‌رغم کاهش مقاومت و سختی اولیه در نمونه شیاردار، این دیوار برشی از رفتار چرخه‌ای مناسب‌تری برخوردار است و توانایی استهلاک انرژی بیشتری دارد و خصوصاً در دریفت‌های بالای ۲ درصد عملکرد بهتری از خود نشان می‌دهد. با علم به این موضوع پیکربندی دیوار فولادی شیاردار با تعریف ۵ پارامتر با اهمیت لرزه‌ای مورد بررسی قرار گرفت. با تغییر این موارد می‌توان پارامترهای لرزه‌ای را به شکلی که مورد نظر است تغییر داد. نتایج نشان می‌دهند تنها با تغییر در محل قرارگیری شیارها در نمونه‌ها می‌توان مقاومت نهایی و سختی اولیه را به ترتیب تا ۱۹ و ۲۵ درصد تغییر داد. همچنین برای بالابردن میزان استهلاک انرژی استفاده از سخت‌کننده‌های انتهایی با ممان اینرسی بالاتر یکی از مؤثرترین راه‌هاست؛ به طوری که استفاده از مقطع Box100 به عنوان سخت‌کننده توانسته است استهلاک انرژی را نسبت به نمونه‌ی معیار بیش از ۲ برابر کند. از حیث شکل‌پذیری نمونه‌ی

معیار اعداد بالاتری را نسبت به نمونه‌های با سخت‌کننده‌ی معمولی به خود اختصاص داده است. با توجه به نتایج تحلیل به طور کلی رفتار دیوار برشی با شکل شیار پیشنهادی در مقایسه با دیوار برشی فولادی بدون شیار بهبود یافته است. همچنین استفاده از سخت‌کننده‌های انتهایی می‌تواند سبب افزایش ظرفیت و قابلیت اتلاف انرژی گردد.

مراجع

1. Jin, S., Ou, J. and Richard Liew, J.Y., "Stability of buckling-restrained steel plate shear walls with inclined-slots: Theoretical analysis and design recommendations", *Journal of Constructional Steel Research,* Vol. 117, pp. 13-23, (2016).
2. Muto, K., "Earthquake resistant design of 36-storied Kasumigaseki building", Muto Institute of Structural Mechanics, (1968).
3. Muto, K. N., Ohmori and Takahashi, T., "A study on reinforced concrete slitted shear walls for high-rise buildings", *5th World Conference on Earthquake Eng.,* Rome, Italy, (1973).
4. Martínez-Rueda, J.E. "On the evolution of energy dissipation devices for seismic design", *Earthquake Spectra,* Vol 18(2), pp. 309-346, (2002).
5. Hitaka, T. and Matsui, C. "Experimental study on steel shear wall with slits", *Journal of Structural Engineering,* Vol 129(5), pp. 586-595, (2003).
6. Cortes, G. "Steel slit panel frames for lateral resistance of buildings", PhD Thesis, Department of Civil Engineering, Purdue University, (2009).
7. Eatherton, M., Hajjar, J. G., Deierlein, H. Krawinkler, S., Billington and Ma, X. "Controlled rocking of steel-framed buildings with replaceable energy-dissipating fuses", *in Proceedings of the 14th world conference on earthquake engineering,* (2008).
8. Jacobsen, A., Hitaka, T. and Nakashima, M., "Online test of building frame with slit-wall dampers capable of condition assessment", *Journal of Constructional Steel Research,* Vol. 66(11), pp. 1320-1329, (2010).
9. Khatamirad, M. and Shariatmadar, H., "Experimental and analytical study of steel slit shear wall. Steel and Composite Structures", Vol. 24(6), pp. 741-751, (2017).
10. Nazifi, A. and Shariatmadar, H. "Evaluation of the interaction of steel slit panel-frame", *Journal of structural and construction engineering,* Vol. 6(4), pp. 107-124, (2018).
11. Wang, P., Xue, Z. and Xiao, S., "Seismic behavior of Self-Buckling-Restrained Steel Plate Shear Wall made by two incline-slotted infill plates", *Journal of Constructional Steel Research,*. Vol. 133 pp. 47-64, (2017).
12. Lu, J., Yu, S., Xia, J., Qiao, X. and Tang, Y., "Experimental study on the hysteretic behavior of steel plate shear wall with unequal length slits", *Journal of Constructional Steel Research,* Vol. 147, pp. 477-487, (2018).
13. Lu, J., Yu, S,. Qiao, X. and Li, N., "Experimental Study on Low Cyclic Loading Tests of Steel Plate Shear Walls with Multilayer Slits", *International Journal of Steel Structures,* Vol. 18(4), pp. 1210-1218, (2018).
14. Vian, D., Bruneau, M., Tsai, K. and Lin, Y., "Special perforated steel plate shear walls with reduced beam section anchor beams, I: Experimental investigation", *Journal of Structural Engineering,* Vol. 135(3), pp. 211-220, (2009).

15. Ahmadi, Z., Aghakouchak, A. and Mirghaderi, S. R., "Steel slit shear walls with an efficient geometry", Thin-Walled structures, Vol. 159, (2021).

16. FEMA, BSS. "Prestandard and commentary for the seismic rehabilitation of buildings", (2000).

نشریهٔ مهندسی عمران (۸۰-۶۹)
DOI: 10.22067/jfcei.2022.73899.1097
سال سی و چهار، شمارهٔ چهار، ۱۴۰۰

ارائه مدل پیش‌بینی شاخص وضعیت روسازی با استفاده از مقادیر شاخص بین‌المللی ناهمواری مطالعه موردی آزادراه‌های منتخب ایران*

مقاله پژوهشی

سیدعظیم حسینی [۱] مسعود صبائی [۲] سید امیر سعادتجو [۳] سید سعید فاطمی [۴] سید علی ضیائی [۵]

چکیده *یکی از مؤلفه‌های مهم در یک سیستم مدیریت رو سازی و برنامه‌ریزی منابع مالی جهت ترمیم و نگهداری آن‌ها، ارزیابی قابل اعتماد و دقیق از و ضع موجود شبکه روسازی است که شامل محاسبه پارامترهای خدمت رسانی مانند شاخص بین‌المللی ناهمواری (IRI) و شاخص وضعیت روسازی (PCI)، در طول دوره عملکرد روسازی می‌باشد. محاسبه میدانی شاخص PCI و تا حدودی شاخص IRI کمی دشوار و پیچیده است. لذا استفاده از مدل‌های عددی جهت تخمین این پارامترها ضرورت دارد. در این مطالعه، مقادیر اندازه‌گیری شده شاخص‌های PCI و IRI مربوط به پنج آزادراه مختلف در ایران مورد ا ستفاده قرار گرفت و دقت ارزیابی مدل‌های مختلف ریا ضی ارائه شده در نقاط مختلف جهان بر روی آن‌ها برر سی گردید. سپس برای پیش بینی داده‌های PCI با ا ستفاده از مقادیر ورودی IRI، یک مدل ریا ضی جدید معرفی گردید. نتایج برر سی دقت پیش بینی مدل‌ها ن شان داد برای تمامی آزادراه‌های مورد مطالعه، مدل پی شنهادی از تمام مدل‌هایی که تا کنون توسط محققین مختلف در دنیا ارائه شده‌است عملکرد بهتری از خود نشان داد. استفاده از این مدل می‌تواند پیش بینی پارامتر PCI با استفاده از مقادیر ورودی شاخص IRI را برای شبکه آزادراهی کشور میسر سازد و مدیریت روسازی آزادراه‌ها و برنامه ریزی عملیات ترمیم و نگهداری آن‌ها را با هزینه کم‌تری تسهیل نماید.*

واژه‌های کلیدی شاخص وضعیت روسازی، شاخص بین‌المللی ناهمواری، مدیریت روسازی، ترمیم و نگهداری.

مقدمه

شبکه جاده‌ای موجود در هر کشوری یکی از عناصر اصلی رشد و توسعه آن می‌باشد. تردد وسایل نقلیه و تأثیر شرایط جوی (تابش خورشید و ریزش‌های جوی) در طول عمر بهره‌برداری، روسازی‌ها به طور مداوم فرسایش می‌یابد. کاهش کیفیت سطح روسازی و شکل‌گیری خرابی‌ها موجب کاهش سطح خدمت‌رسانی راه و افزایش هزینه کاربران می‌گردد. از این‌رو تصمیمات مربوط به زمان‌بندی عملیات ترمیم و نگهداری، بهسازی و یا بازسازی روسازی چالش بزرگی برای ارگان‌های مدیریت راه‌ها در سراسر جهان می‌باشد. در همین راستا بسیاری از ارگان‌ها با هدف حفظ شبکه روسازی، استفاده از روش‌های مختلف نگهداری در زمان مناسب را در برنامه خود قرار دادند [1]. چنین شیوه‌هایی معمولاً تحت تأثیر بسیاری از عوامل از جمله کمبود اطلاعات وضع موجود روسازی، کمبود تخصص جهت تعیین روش ترمیم و نگهداری متناسب با وضع موجود و محدودیت‌های نیروی انسانی و مالی قرار می‌گیرد [2].

ارزیابی قابل اعتماد و دقیق از وضع موجود شبکه روسازی یکی از مؤلفه‌های مهم در یک سیستم مدیریت روسازی (Pavement Management System (PMS)) می‌باشد. این ارزیابی از طریق بازرسی چشمی مستمر وضعیت خدمت‌رسانی روسازی حاصل می‌گردد. به عنوان نمونه میزان ترک خوردگی سطح روسازی، از طریق رتبه بندی سطح و خرابی‌های غالب هر قطعه از شبکه روسازی ارزیابی می‌شود [3]. با این وجود، شرایط و عملکرد کامل روسازی فراتر از ارزیابی خرابی‌های سطح آن است. همچنین عوامل دیگر مانند کیفیت سواری، ظرفیت ساختاری و اصطکاک سطح از اجزای مهم برای یک سیستم مدیریت روسازی با کیفیت خدمت‌رسانی قابل قبول هستند.

* تاریخ دریافت مقاله ۱۴۰۰/۹/۱۲ و تاریخ پذیرش آن ۱۴۰۰/۱۲/۷ می‌باشد.
(۱) نویسنده مسئول: دانشیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب، تهران، ایران. **Email:** azim_hosseini@azad.ac.ir
(۲) دانشجوی دکتری مهندسی عمران گرایش مدیریت ساخت، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب، تهران، ایران.
(۳) دانشجوی دکتری عمران گرایش راه‌وترابری، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران.
(۴) دکتری عمران گرایش راه‌وترابری، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران.
(۵) استادیار گروه عمران دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران.

ارزیابی عملکرد روسازی جهت تعیین استراتژی‌های نگهداری آن، با استفاده از شاخص‌های مختلفی مانند رتبه بندی وضعیت روسازی (Pavement Condition Rating (PCR))، شاخص وضعیت روسازی (Pavement Condition Index (PCI))، رتبه بندی قابلیت خدمات‌رسانی فعلی (Present Serviceability Rating (PSR))، شاخص بین المللی ناهمواری (IRI) (International Roughness Index (IRI)) و غیره انجام می‌پذیرد [4].

در حال حاضر، کیفیت سواری به عنوان عنصر اساسی عملکرد روسازی و رضایت‌مندی کاربران در نظر گرفته می‌شود. یکی از مهم‌ترین پارامترهای تأثیرگذار بر کیفیت سواری و دیدگاه کاربران در مورد سطح خدمت‌رسانی جاده، میزان ناهمواری سطح روسازی است. افزایش ناهمواری‌ها سبب کاهش کارایی خودروها، افزایش مصرف سوخت و انتشار گازهای گلخانه‌ای می‌گردد. همچنین ممکن است منجر به کاهش ایمنی محور شود. این امر می‌تواند سالانه موجب هدرروی مقدار قابل توجهی از منابع مالی گردد. میزان ناهمواری روسازی را می‌توان از طریق تعیین شاخص بین‌المللی ناهمواری (IRI) ارزیابی نمود. این شاخص برابر با مجموع حرکت‌های عمودی تقسیم بر مسافت طی شده خودرو پیمایش با سرعت عبوری ۸۰ کیلومتر در ساعت می‌باشد که پروفیل حرکت آن از طریق یک مدل ریاضی محاسبه می‌گردد. در طراحی روسازی به روش مکانیکی – تجربی (Mechanistic-Empirical Pavement Design (MEPDG))، از طریق تابعی از مقدار IRI اولیه (Initial IRI (IRI_0)) (دقیقاً پس از ساخت روسازی)، فاکتور منطقه (SF)، میزان ترک‌های پوست سوسماری، طول ترک‌های عرضی و متوسط میزان شیارشدگی، مقدار IRI نهایی را با میزان همبستگی ۰,۵۶ (جامعه آماری ۱۹۲۶ قطعه) پیش‌بینی می‌نماید. این روش مبتنی بر پایگاه داده‌های عملکرد بلند مدت روسازی (LTPP) (Long-Term Pavement Performance (LTPP)) است [5]. بسیاری از ارگان‌های مدیریت روسازی در سراسر جهان مقدار اولیه IRI را به عنوان یک معیار تضمین کیفیت و مقدار IRI نهایی را به عنوان شاخصی مهم جهت تعیین زمان مناسب برای انجام عملیات ترمیم و نگهداری و یا بازسازی روسازی در نظر می‌گیرند [6,7]. همچنین در بسیاری از ارگان‌ها کیفیت خدمت‌رسانی راه‌ها را بر اساس مقادیر IRI طبقه بندی نموده‌اند. مقادیر مجاز IRI (پس از ساخت) جهت طبقه بندی عملکردی مختلف جاده‌ها در کشورهای مختلف، در جدول (۱) ارائه شده است. همچنین در جدول (۲) طبقه‌بندی کیفیت خدمت‌رسانی روسازی در کشورهای مختلف را بر اساس مقادیر IRI نشان داده شده است.

در سال ۲۰۰۰ ارتباط بین شاخص IRI و خرابی‌های شیارشدگی و ترک‌خوردگی بر مبنای بررسی میدانی ۳۱۷ محور واقع در ایالت نوادا، مورد ارزیابی قرار گرفت و طبق نتایج بدست آمده معادله (۱) با ضریب همبستگی ۰,۷۱ جهت محاسبه مقدار IRI ارائه گردید [8].

$$IRI = 0.597\,(IRI_{init}) + 0.0094\,(Fatigue\ \%) + 0.00847\,(Rut\ Depth) + 0.382 \quad (۱)$$

IRI_{init}: میزان شاخص بین‌المللی اولیه

Fatigue: میزان ترک‌های پوست سوسماری

RutDepth: میزان شیارشدگی

جدول ۱ معیار وضعیت روسازی [7]

کشور	نوع راه	مقدار اولیه قابل قبول
دبی (ISO 2016)	آزادراه	۰,۹۰
	راه‌های شهری	۱,۰۰
	راه‌های جمع کننده	۱,۲۰
استرالیا (Australroads 2017)	آزادراه	۱,۶۰
	بزرگراه‌ها و راه‌های اصلی	۱,۹۰
بلاروس (MTiKRB 2012)	بزرگراه‌ها و راه‌های اصلی	۱,۵۰
	راه‌های درجه دو و سه	۲,۰۰
	راه‌های درجه چهار و پنج	۲,۵۰
مجارستان (MUT 2008)	راه‌های اصلی	۱,۲۰
	راه‌های درجه یک و دو	۱,۸۰
	راه‌های فرعی	۲,۲۰
نروژ (NPRA 2014)	راه‌های اولیه	۲,۰۰
	دیگر راه‌ها	۲,۵۰
روسیه (MRRRF 2012)	بزرگراه‌ها و راه‌های اصلی	۲,۲۰
	راه‌های درجه دو و سه	۲,۲۰
	راه‌های درجه چهار و پنج	۲,۶۰
اسلواکی (MDVaRR 2012)	بزرگراه‌ها و آزادراه‌ها	۱,۹۰
	راه‌های درجه یک و دو	۱,۹۰
	راه‌های درجه سه و فرعی	۳,۳۰

جدول ۲ گروه بندی وضعیت روسازی بر اساس شاخص IRI [7]

مقدار قابل قبول IRI (m/km)						
کیفیت روسازی	Sayers et al (1986) (Sayers 1984)	FHWA (2003) (Federal Highway Administration 2003)		Cantisani (2010) (Cantisani and Loprencipe 2010)	INVIAS (2007) (Park, Thomas, and Wayne Lee 2007)	Goenaga et al. (2017) (Goenaga, Fuentes, and Mora 2017)
		بین شهری	دیگر محورها			
خیلی خوب	کمتر از ۲	کمتر از ۱	کمتر از ۱	کمتر از ۱/۴۲	بین ۲ تا ۳/۵	کمتر از ۲/۸
خوب	بین ۲ تا ۳/۵	بین ۱ تا ۱/۵	بین ۱ تا ۱/۵	بین ۱/۴۲ تا ۲/۸۴	بین ۳/۵ تا ۴/۵	بین ۲/۸ تا ۳/۵
متوسط	بین ۳/۵ تا ۶	بین ۱/۵ تا ۱/۹	بین ۱/۵ تا ۲/۶۸	بین ۲/۸۴ تا ۴/۰۶	بین ۴/۵ تا ۶/۵	بین ۳/۵ تا ۴/۳
ضعیف	بزرگتر از ۸	بزرگتر از ۲/۷	بزرگتر از ۳/۴۷	بزرگتر از ۴/۰۶	بزرگتر از ۶/۵	بزرگتر از ۴/۳

نتایج تحقیقات انجام شده نشان می‌دهد می‌توان از شبکه عصبی مصنوعی جهت تخمین پروفیل راه استفاده نمود [9]. در سال ۲۰۰۳ ارتباط بین شاخص IRI و خرابی‌های روسازی با استفاده از روش شبکه عصبی مصنوعی (back propagation Artificial Neural Network (ANN)) مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. نتایج نشان داد خرابی‌های چاله‌های شدید، لکه‌گیری و شیارشدگی بیش‌ترین تأثیر را بر مقدار شاخص IRI دارند [10]. در سال ۲۰۱۳ یک شبکه عصبی مصنوعی جهت تخمین شاخص IRI با استفاده از نشانه وضعیت روسازی ارائه گردید. این مدل از سه ورودی، یک لایه مخفی همراه با چهار رشته عصبی و یک خروجی تشکیل شده است. ضریب همبستگی مدل پیشنهادی توسعه یافته ۰٫۸۶ می‌باشد که نشان می‌دهد پیش‌بینی‌های انجام شده رضایت بخش بوده است [11].

در سال‌های ۲۰۱۷ و ۲۰۱۸ با استفاده از پایگاه داده شامل ۵۰۶ قطعه (۲۴۳۹ ارزیابی میدانی) یک مدل رگرسیون و شبکه عصبی مصنوعی، جهت پیش بینی IRI به صورت تابعی از خرابی‌ها ارائه شده است. مدل پیشنهادی تابعی از سن روسازی، مقدار IRI اولیه، شدت‌های مختلف ترک‌های عرضی، ترک‌های پوست سوسماری و میزان انحراف معیار میزان شیارشدگی است. ضریب همبستگی مدل‌های رگرسیونی و شبکه عصبی به ترتیب ۰٫۵۷ و ۰٫۷۵ بوده است [12,13].

$$IRI = IRI_o + 0.01479 * Age + 0.00382 * (F.C)_{all} + 0.00053 * (T.C)_{all} + 0.08941 * SDRUT \quad (۲)$$

در این رابطه:

IRI_o: میزان شاخص بین المللی اولیه

Age: سن روسازی پس از ساخت و اجرای روکش

$F.C_{all}$: میزان ترک‌های پوست سوسماری

$T.C_{all}$: میزان ترک‌های عرضی

شاخص PCI پرکاربردترین معیار برای ارزیابی وضعیت روسازی در غالب کشورهای جهان است. این شاخص یک معیار جامع از شرایط روسازی موجود است که براساس خرابی‌های مشاهده شده و تجزیه و تحلیل آماری آن‌ها برای نمونه برداری از روسازی تبیین شده است و یکپارچگی ساختاری روسازی و وضعیت عملکردی سطح آن را نشان می‌دهد [14]. با این وجود، در عمل استفاده از آن دشوار است؛ زیرا در این شاخص ۱۹ نوع خرابی مختلف با سطوح متفاوت شدت (کم ، متوسط و زیاد) و در سطح گستره‌تر بررسی می‌شود. داده‌های مورد استفاده برای تعیین PCI، از طریق بازرسی چشمی و یا روش بررسی مبتنی بر تصویر، جمع‌آوری می‌گردد. بازرسی چشمی مدت زمان طولانی طول می‌کشد و سبب اختلال در ترافیک می‌شود. همچنین برای محورهای طولانی و شبکه‌های بزرگ جاده‌ای مانند بزرگراه‌ها و آزادراه‌های چند خطه غیر عملی است و ممکن است شرایط ایمن برای بازرسان در حین عملیات برقرار نباشد. جهت اندازه‌گیری خرابی‌های مهم روسازی در سطح شبکه، فناوری‌های جدیدی مانند تصویرنگاری سطح روسازی از طریق عکس‌برداری یا تصویربرداری دیجیتال و اندازه‌گیری مشخصات روسازی با استفاده از حسگرهای غیرتماسی، ابداع شده است [15]. شایان ذکر است روش‌های بررسی مبتنی بر تصویر که در آن‌ها از وسیله نقلیه برای جمع آوری فیلم، فیلم یا تصاویر دیجیتالی از سیستم

روسازی استفاده می‌شود سریع‌تر و ایمن‌تر هستند اما به تجهیزات پیشرفته نیاز دارند و ممکن است هزینه‌بر باشند. از طرفی اندازه‌گیری شاخص بین‌المللی ناهمواری از لحاظ عملی راحت‌تر است. با توجه به پیشرفت تکنولوژی با استفاده از حسگرهای لیزری مبتنی بر تصویربرداری سه بعدی، پروفیل طولی ناهمواری‌ها و پروفیل عرضی شیارشدگی سطح اندازه‌گیری می‌شود [16]. لذا در سال‌های اخیر تلاش‌های گسترده جهت پیش بینی میزان شاخص PCI با استفاده از مقدار IRI از طریق مدل های ریاضی و روش‌های عددی صورت گرفته است.

در سال ۲۰۰۲ جهت مدیریت روسازی در ایالت کالیفرنیا، یک رابطه ریاضـــی بین مقدار IRI و PCI ارائه گردید که در معادله (۳) نشان داده شده است [17].

$$IRI = 0.0171(153 - PCI) \quad , R^2=0.53 \qquad (۳)$$

در سال ۲۰۰۷ ارتباط بین PCI و IRI با استفاده از داده‌های مرتبط با محورهای بزرگراهی ۹ ایالت آمریکای شمالی (شامل ۲۰ قطعه) مورد ارزیابی قرار گرفت. مدل ارائه شده در معادله (٤) نشان داده شده است [18].

$$\log(PCI) = 2 - 0.436\log\left(\frac{IRI}{0.727}\right) \quad , R^2=0.59 \qquad (٤)$$

در سال ۲۰۱۵ برای راه‌های درون شهری پر ترافیک در کشور کلمبیا با طبقه‌بندی عملکردی و نوع روسازی متفاوت، مدل‌های پیش‌بینی نشانه وضعیت روسازی با توجه به مقدار IRI ارائه گردید. مدل‌های ارائه شده به‌همراه ضرایب همبستگی آن در جدول (۳) ارائه شده است [19].

در سال ۲۰۱۹ با استفاده از پایگاه داده‌های عملکرد بلند مدت روسازی، یک تابع حلقوی با ضریب همبستگی ۰,۹۹۵، جهت ایجاد ارتباط بین شاخص‌های PCI و IRI پیشنهاد گردید (معادله (۱۲)). در این راستا خرابی‌های اندازه گیری شده از ۱۲۰۸ قطعه با ۱۰۸٦۸ نقطه داده برای توسعه مدل پیش بینی نشانه وضعیت روسازی و ۲٤۰ قطعه با ۱۸۷٦ نقطه داده جهت اعتبارسنجی مدل استفاده شد. اعتبارسنجی مدل با استفاده از مجموعه داده‌ها نشان داد میزان انحراف مقادیر IRI پیش بینی شده بسیار کم می‌باشد و مدل پیشنهادی (معادله (۱۲)) پیش‌بینی‌های بسیار دقیقی را به همراه داشته است ($R^2 = 0.992$) [20].

$$IRI = \left(\frac{79.933}{14.061+\exp(0.048*PCI)}\right) \quad , R^2=0.995 \qquad (۱۲)$$

عادلی و همکارانش در سال ۲۰۲۱ ارتباط بین شاخص‌های PCI و IRI برای راه‌های برون شهری را مورد ارزیابی قرار دادند. در این پژوهش شامل ٦۰۰ کیلومتر از راه‌های استان فارس بوده است؛ پس از دسته بندی راه‌ها با توجه به وضعیت خدمت رسانی روسازی، مدل‌های رگرسیونی نمایی با ضریب همبستگی ۰,۷۵، ۰,۷٦ و ۰,۵۹ پیشنهاد گردید [21].

جدول ۳ روابط پیشنهاد شده برای محورهای مختلف در کشور کلمبیا [19]

نوع دسته بندی		مدل پیش بینی	ضریب همبستگی R^2
عملکرد محور	آزادراه	$PCI = -0.215\,(IRI) + 110.73$ (5)	۰,٥٦
	راه‌های درون شهری	$PCI = -0.206\,(IRI) + 114.15$ (6)	۰,۷۱
	راه‌های جمع کننده	$PCI = -0.217\,(IRI) + 115.32$ (7)	۰,۷۳
	راه‌های فرعی	$PCI = -0.186\,(IRI) + 110.31$ (8)	۰,۷٤
نوع روسازی	بتن آسفالتی	$PCI = -0.224\,(IRI) + 120.02$ (9)	۰,۸۲
	روسازی مرکب	$PCI = -0.203\,(IRI) + 113.73$ (10)	۰,۷۵
	بتن سیمانی	$PCI = -0.172\,(IRI) + 110.01$ (11)	۰,۷۲

شاخص IRI و PCI از جمله شاخص‌های وضعیت روسازی هستند که جهت ارزیابی وضعیت سطح روسازی مورد استفاده قرار می‌گیرند. مروری بر تحقیقات انجام شده نشان می‌دهد اغلب شاخص‌های روسازی در نتیجه بکارگیری چندین مدل برای پیش‌بینی یک شاخص با استفاده از دیگر شاخص‌ها، ساخته شده‌اند. با وجود تلاش‌های صورت گرفته مدل‌های ارائه شده تنها بر اساس پایگاه‌های داده محدود انجام شده است و طیف گسترده‌ای از مقادیر IRI و PCI را نشان نمی‌دهد. همچنین دقت پیش بینی این مدل‌ها عمدتاً متوسط بوده است؛ لذا استفاده از این مدل‌ها برای محورهای مختلف بدون در نظر گرفتن ویژگی‌های منطقه‌ای قابل اطمینان نمی‌باشد. از این‌رو ارزیابی مدل‌های ارائه شده جهت امکان سنجی استفاده از آن‌ها برای محورهای موجود در ایران ضروری می‌باشد. در این راستا در این پژوهش داده‌های مربوط به PCI و IRI پنج محور مختلف آزادراهی در کشور مورد بررسی قرار گرفته اند و مدل‌های عددی بین این دو پارامتر بررسی و ارائه شده است.

اهداف این پژوهش

ارائه برنامه زمان‌بندی منسجم و انتخاب عملیات ترمیم و نگهداری مناسب مطابق با وضع موجود روسازی یکی از مهم‌ترین دغدغه‌ها در سطح مدیریت روسازی راه‌ها می‌باشد. زمان طولانی مورد نیاز جهت برداشت وضع موجود روسازی و شرایط سخت تأمین ایمنی در محورهای بزرگراهی و آزادراه‌های چند خطه، لزوم دست‌یابی به روش‌های جایگزین جهت تعیین مقدار شاخص PCI را بیش از پیش نمایان می‌سازد. در این راستا تحقیقات موردی در مناطق مختلف جهان انجام شده و روابط ارائه شده از دقت متوسط برخوردار بوده است. با توجه به تمایز شرایط ارزیابی در کشورهای مختلف می‌بایست قبل از استفاده مستقیم روابط ارائه شده برای آزادراه‌ها و بزرگراه‌های موجود در ایران، یک راستی آزمایی مناسب انجام پذیرد. از این‌رو در این پژوهش مطالعه موردی ارزیابی مدل‌های ارائه شده برای آزادراه‌های موجود در ایران صورت گرفته است.

جمع‌آوری اطلاعات و روش انجام تحقیق

در راستای اهداف این پژوهش اطلاعات مربوط به مقادیر IRI و PCI اندازه‌گیری شده آزادراه‌های منتخب ایران از سازمان راهداری و حمل و نقل جاده‌ای کشور تهیه گردید. در ادامه ارزیابی اولیه و پالایش داده‌ها انجام شد. سپس میزان دقت روابط ارائه شده در بخش‌های قبلی ذکر شده است برای داده‌های پالایش شده مورد ارزیابی قرار گرفت. پس از بررسی‌های صورت گرفته یک رابطه یک مدل درجه ۵ برای پیش‌بینی بهتر محورهای مورد مطالعه پیشنهاد و میزان دقت آن تعیین گردید.

در ادامه برای مدل سازی داده‌ها از روش رگرسیون استفاده شده است. یکی از روش‌های مرسوم در تحلیل چند متغیره، تکنیک «رگرسیون خطی چندگانه (Multiple Linear Regression)است. بر اساس تحلیل رگرسیونی، یک رابطه خطی بین متغیر پاسخ (Response Variable) با یک یا چند متغیر توصیفی (Explanatory Variable) برقرار می‌شود. البته گاهی به متغیر پاسخ، متغیر وابسته (Dependent Variable) و به متغیرهای توصیفی، متغیرهای مستقل(Independent Variables) نیز می‌گویند.

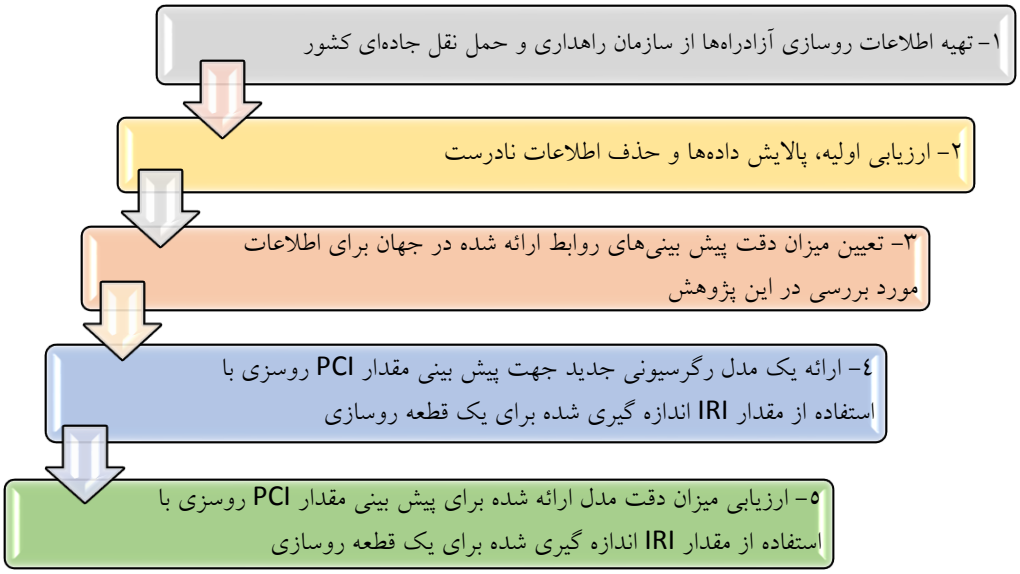
در رگرسیون خطی چندگانه، پارامترهای یک مدل خطی به کمک یه تابع هدف و مقدارهای متغیرها، برآورد می‌شوند. در رگرسیون خطی، مدل در نظر گرفته شده، یک رابطه خطی برحسب پارامترهای مدل است. به این ترتیب اگر nn مشاهده از متغیر مستقل pp بعدی XX داشته باشیم و بخواهیم یک رابطه خطی با متغیر پاسخ yy برقرار کنیم، می‌توانیم از مدل رگرسیون خطی زیر استفاده کنیم.

$$y_i=\beta_{01}+\beta_1 x_{i1}+\cdots+\beta_p x_{ip}+\varepsilon_i, i=1,\ldots,n$$

(۱۳)

از آنجایی که متغیر مستقل XX دارای pp بعد است، مقدار آن را در هر بعد با یک متغیر مستقل یک بعدی جایگزین کرده‌ایم. مشخص است که اندیس ii نیز شماره مشاهده را نشان می‌دهد. در انتها نیز εε جمله خطای مدل رگرسیونی محسوب می‌شود [22,23].

فرآیند انجام پژوهش در فلوچارت زیر نشـــان داده شـــده است.



شکل ۱ فلوچارت فرآیند انجام پژوهش

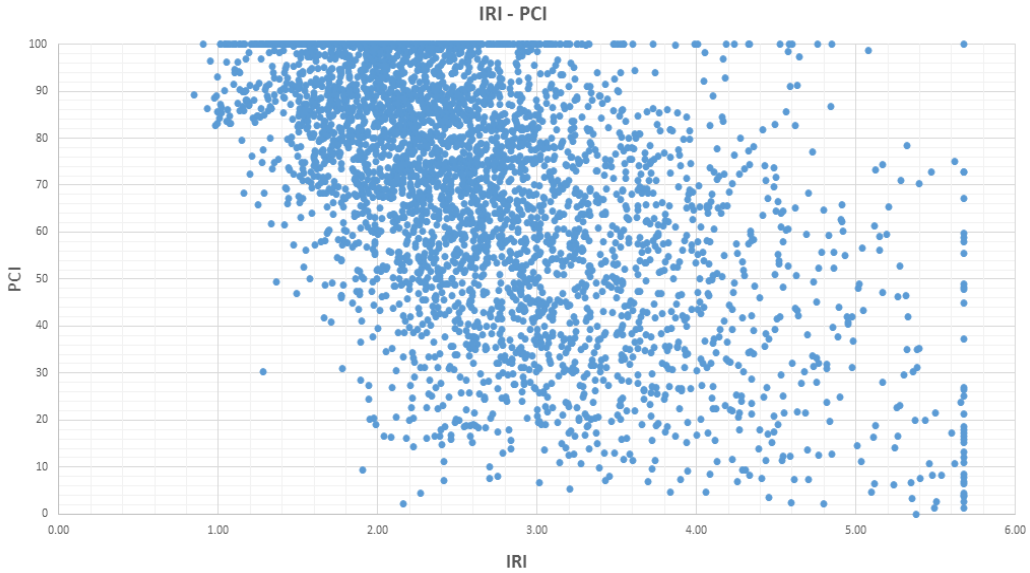
جدول ٤ داده‌های ورودی آزادراه تهران-زنجان

ردیف	کیلومتراژ ابتدا	کیلومتراژ انتها	PCI	IRI (in/mi)	IRI (m/km)
۱	۰/۲	۰/۷	۸٦/۱	۱٦۲/٦	۲/٥۷
۲	۰/۷	۱/۲	۹۱/۳	۱٦۲/٦	۲/٥۷
۳	۱/۲	۱/۷	۹۷/۸	۱۱۳/۱٥	۱/۷۹
٤	۱/۷	۲/۲	۷۹/۹	۱۲٥/۹٥	۱/۹۹
٥	۲/۲	۲/۷	۱۰۰	۱۳۰/٤٥	۲/۰٦
٦	۲/۷	۳/۲	۱۰۰	۱۲٦/۸٤	۲
۷	۳/۲	۳/۷	۱۰۰	۱۲۸/۰۷	۲/۰۲
۸	۳/۷	٤/۲	۱۰۰	۱۰٥/۸۸	۱/٦۷
۹	٤/۲	٤/۷	۸۹/۱	۱۱۰/۲٥	۱/۷٤
۱۰	٤/۷	٥/۲	۹۷/٦	/۱۱٥/۸۸	۱/۸۳
۱۱	٥/۲	٥/۷	۹۷/۹	۱۱۰/۹۳	۱/۷٥
۱۲	٥/۷	۷/۲	۹۳/۲	۱۱٥/۸۸	۱/۸۳
۱۳	٦/۲	٦/۷	۹٥/۳	۹۳/٦٥	۱/٤۸
۱٤	٦/۷	۷/۲	۱۰۰	۱۰۱/۱٦	۱/٦
۱٥	۷/۲	۷/۷	۹۸/٤	۱۰۰/۹۸	۱/٥۹
۱٦	۷/۷	۸/۲	۸٦/۹	۱۲٤/٦۳	۱/۹۷
۱۷	۸/۲	۸/۷	۹۱/۷	۱۲٦/٤۷	۲
۱۸	۸/۷	۹/۲	۸۳/۳	۱۲۷/۱٦	۲/۰۱
۱۹	۹/۲	۹/۷	۹۱/۸	۱۰۰/۳۳	۱/٥۸
۲۰	۹/۷	۱۰/۲	۷۱	۹۹/۲٤	۱/٥۷

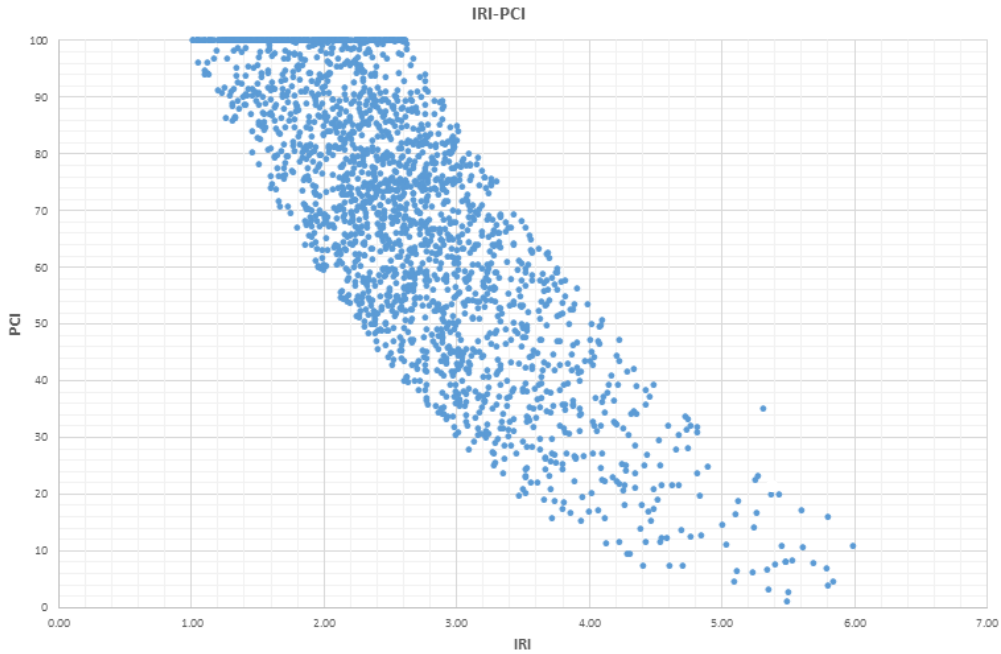
ردیف	کیلومتراژ	شاخص ناهمواری راست (m/km)	شاخص ناهمواری چپ (m/km)	شاخص ناهمواری متوسط (m/km)
۱	۰	٤/۲٦۷	٥/۳٥۹	٤/۸۱۳
۲	۰/۱	۲/۸٥	۳/۱۲	۲/۹۸٥
۳	۰/۲	۲/۰۳۷	۱/٥۰۲	۱/۷٦۹٥
٤	۰/۳	۲/۹۷	۲/۲۸۲	۲/٦۲٦
٥	۰/٤	۲/۷۱۳	۲/۰۸	۲/۳۹٦٥
٦	۰/٥	۲/۳۲۸	۱/۳۱۸	۱/۸۲۳
۷	۰/٦	۱/٦۷۷۲۷	۱/٦۳۰۹۱	۱/٦٥٤۰۹
۸	۰/۷۱	۲/۳٤٦٦۷	۲/٥۸	۲/٤٦۳۳۳
۹	۰/۸	۱/٥۳۸۱۸	۱/۹٦۷۲۷	۱/۷٥۲۷۳
۱۰	۰/۹۱	۱/٦۲۱۱۱	۲/۰۱	۱/۸۱٥٥٦
۱۱	۱	۱/٤۱۷	۱/۰٥۹	۱/۷۳۸
۱۲	۱۱/	۱/۸۳۱	۱/۷٥٦	۱/۷۹۳٥
۱۳	۱/۲	۱/۸۷۷۲۷	۱/۷۸۱۸۲	۱/۸۲۹٥٥
۱٤	۱/۳۱	۲/۸٤٤	۳/۰۹٦	۲/۹۷
۱٥	۱/٤۱	۱/۹٤٥٥٦	۱/۹۹٥٥٦	۱/۹۷۰٥٦
۱٦	۱/٥	۱/۸۰۱	۲/۱٤۱	۱/۹۷۱
۱۷	۱/٦	۱/٤۸۸	۱/۲۸۳	۱/۳۸٥٥
۱۸	۱/۷	۱/٦۲۱۸۲	۱/٦٦۲۷۳	۱/٦٤۲۲۷
۱۹	۱/۸۱	۲/۳٤۲	۲/۱	۲/۲۲۱
۲۰	۱/۹۱	۱/٦۳٥٥٦	۱/۲٤٦٦۷	۱/۹٤۱۱۱

جمع‌آوری پایگاه داده و پالایش اطلاعات

در راستای اهداف این پژوهش مقادیر IRI و PCI اندازه‌گیری شده برای سه آزادراه ایران شامل محورهای تهران–زنجان (رفت‌وبرگشت)، زنجان–تبریز (رفت‌وبرگشت) و کاشان–قم–نطنز (رفت‌وبرگشت) جمع‌آوری گردید. این اطلاعات شامل مقادیر PCI برای قطعات به طول ۵۰۰ متر و مقادیر IRI به ازای هر ۱۰۰ متر طول از محور بوده است. لذا جهت تقابل مناسب مقادیر IRI با PCI قطعه مورد نظر، میانگین IRI پنج داده متوالی به عنوان مقدار نماینده آن قطعه (۵۰۰ متر) در نظر گرفته شد. (جدول ٤). در ادامه اطلاعات بدست آمده مورد ارزیابی دقیق قرار گرفت. نتایج بررسی‌ها حاکی از پراکندگی زیاد اطلاعات و وجود خطاهای انسانی در اندازه‌گیری میدانی و محاسبه مقادیر شاخص‌ها بوده است. به همین منظور داده‌ها پالایش گردید و پس در مراحل بعدی مورد استفاده قرار گرفت (شکل‌های (۲) و (۳)).



شکل ۲ تمامی داده‌های ورودی آزادراه‌های منتخب



شکل ۳ داده‌های ورودی پالایش شده

ارزیابی مدل‌های ارائه شده و ارائه مدل پیشنهادی

پس از پالایش داده‌های ورودی با استفاده از مدل‌های ارائه شده در مطالعات گذشته (معادله‌های (۳)،(۲)،(۱) و (۱۲)) که در بخش‌های قبلی ارائه شده است، مقادیر شاخص PCI با توجه به مقدار اندازه گیری شده شاخص IRI پیش‌بینی گردید. در ادامه میزان دقت پیش‌بینی‌ها نسبت به مقادیر اندازه‌گیری شده شاخص PCI، محاسبه گردید. نتایج بدست آمده در جدول (۵) ارائه شده است.

نتایج بررسی‌های انجام شده نشان می‌دهد رابطه (۱۲)، دقت پیش‌بینی بالاتری نسبت به دیگر رابطه‌ها داشته‌است و به ترتیب رابطه‌های (۳)، (۱) و (۲) پیش‌بینی‌های ضعیف‌تری داشته‌اند. به طور کلی با توجه به مقادیر ضریب همبستگی محاسبه شده روابط ارائه شده ضریب اطمینان پایینی ارائه داده‌اند. از این‌رو برای استفاده در محورهای مورد مطالعه مناسب نمی‌باشند.

جدول ۵ دقت پیش‌بینی مدل‌ها ارائه شده برای داده‌های پالایش شده

نام محور	شماره رابطه	رابطه	R^2	MSE	σ
تهران – زنجان	۱	$PCI = 58.4795\ (IRI + 153)$	−۰/۲۰	٤٤١/١٦	۰/۲۷
	۲	$\log(PCI) = 2 - 0.436 \log\left(\frac{IRI}{0.727}\right)$	−۹/١٤	٣٧٤٤/٨٣	۰/۷۸
	۳	$PCI = -0.215\ (IRI) + 110.73$	−۰/١٥	٤٢٤/٤٢	۰/٢٦
	۱۲	$IRI = \left(\frac{79.933}{14.061 + \exp(0.048 * PCI)}\right)$	۰/٤٦	١٩٨/٩٩	۰/١٨
زنجان – تهران	۱	$PCI = 58.4795\ (IRI + 153)$	۰/١١	٤١٨/٥٨	۰/۲۷
	۲	$\log(PCI) = 2 - 0.436 \log\left(\frac{IRI}{0.727}\right)$	−۸/۰۸	٤٢٦٥/۰٦	۰/۸۸
	۳	$PCI = -0.215\ (IRI) + 110.73$	۰/٢٨	٣٣٧/٩٢	۰/٢٥
	۱۲	$IRI = \left(\frac{79.933}{14.061 + \exp(0.048 * PCI)}\right)$	۰/٤٩	٢٤۰/٧٨	۰/٢١
زنجان – تبریز	۱	$PCI = 58.4795\ (IRI + 153)$	۰/٢٥	٣٣٣/٩٨	۰/٣۰
	۲	$\log(PCI) = 2 - 0.436 \log\left(\frac{IRI}{0.727}\right)$	−١٣/٣٣	٦٣٥٣/٣٥	١/٢٩
	۳	$PCI = -0.215\ (IRI) + 110.73$	۰/٣٧	٢٧٩/١٤	۰/٢٧
	۱۲	$IRI = \left(\frac{79.933}{14.061 + \exp(0.048 * PCI)}\right)$	۰/١٩	٣٥٧/۰٨	۰/٣١
تبریز – زنجان	۱	$PCI = 58.4795\ (IRI + 153)$	۰/۰٣	٤٤٥/١٩	۰/٣۰
	۲	$\log(PCI) = 2 - 0.436 \log\left(\frac{IRI}{0.727}\right)$	−١٢/٥١	٦٢٣١/٦٨	١/١٤
	۳	$PCI = -0.215\ (IRI) + 110.73$	۰/١٧	٣٨٣/٢٤	۰/٢٨
	۱۲	$IRI = \left(\frac{79.933}{14.061 + \exp(0.048 * PCI)}\right)$	۰/٤٢	٢٦٩/٣٦	۰/٢٤
کاشان – قم – نطنز	۱	$PCI = 58.4795\ (IRI + 153)$	۰/٣۰	٥٦٧/٢۰	۰/٤۰
	۲	$\log(PCI) = 2 - 0.436 \log\left(\frac{IRI}{0.727}\right)$	−١۰/٤٩	٩٢٩٢/٤٨	١/٦١
	۳	$PCI = -0.215\ (IRI) + 110.73$	۰/۰٣	٧٨٥/٦٢	۰/٤٧
	۱۲	$IRI = \left(\frac{79.933}{14.061 + \exp(0.048 * PCI)}\right)$	۰/٤٦	٤٣٣/۰٤	۰/٣٥

از آن‌جاکه روند ساخت و نگهداری روسازی در نقاط مختلف جهان متفاوت است، روند اضمحلال روسازی، نوع و شدت خرابی‌ها در محورهای مختلف نیز می‌تواند متغیر می‌باشد. تفاوت در نحوه اجرای عملیات روسازی، زمان‌بندی و روش‌های مختلف مورد استفاده در ترمیم و نگهداری، میزان پایبندی به برنامه‌ها، منابع مالی، شرایط آب و هوایی و توپوگرافی منطقه از جمله پارامترهای مؤثر بر نحوه مدیریت و نگهداری روسازی‌ها در کشورهای مختلف جهان می‌باشد. با توجه به شرایط ویژه ایران از لحاظ توپوگرافی، آب و هوا و تکنولوژی انتظار می‌رود روند اضمحلال روسازی راه‌ها نسبت به کشورهای دیگر متفاوت باشد. لذا طبیعی است که پیش‌بینی‌های انجام شده با استفاده از روابط پیشنهادی در دیگر کشورها، برای محورهای ایران از دقت کافی برخوردار نباشند. از این‌رو در این پژوهش با توجه داده‌های پالایش شده یک مدل پیش‌بینی درجه ۵ پیشنهاد شده است که در معادله (۱٤) ارائه می‌گردد.

$$PCI = -0.4609\ IRI^5 + 8.691\ IRI^4 - 61.26\ IRI^3 + 199.4\ IRI^2 - 319.8\ IRI + 292.7 \quad (۱٤)$$

با استفاده از رابطه پیشنهادی مقادیر شاخص وضعیت روسازی با توجه به مقدار IRI اندازه‌گیری شده، پیش‌بینی گردید. در ادامه میزان دقت پیش‌بینی‌ها نسبت به مقادیر PCI واقعی محاسبه و در جدول (٦) ارائه شده است.

جدول ٦ دقت پیش‌بینی مدل پیشنهادی برای داده‌های پالایش شده

محور مورد مطالعه	R^2	MSE	σ
آزادراه تهران – زنجان	۰,۵۷	۱۵۸,٦٦	۰,۱٦۱
آزادراه زنجان – تهران	۰,٦۳	۱۷۱,۹٦	۰,۱۷٦
آزادراه زنجان – تبریز	۰,۵۱	۲۱۷,۹۹	۰,۲٤۰
آزادراه تبریز – زنجان	۰,۵۷	۱۹٦,٦٤	۰,۲۰۲
آزادراه کاشان – قم – نطنز (رفت‌وبرگشت)	۰,۷۱	۲۳۳,۸۰	۰,۲۵٦

همان‌طور که در جدول (٦) مشاهده می‌شود مقادیر پارامترهای ضریب همبستگی، مجموع خطاها و انحراف معیار استاندارد برای محورهای مختلف بسیار نزدیک به یکدیگر بوده‌است که نشان از رفتار مشابه در سیستم مدیریت روسازی در محورهای مورد مطالعه می‌باشد. از طرفی مقدار میانگین ضریب همبستگی رابطه پیشنهادی تقریباً ۰,٦۰ بوده که حاکی از ضریب اطمینان قابل قبول پیش‌بینی‌ها است. البته ضریب همبستگی برای آزادراه کاشان – قم – نطنز (۰,۷۱) بوده‌است که نشان دهنده دقت مناسب پیش‌بینی‌ها می‌باشد.

جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

بررسی‌های انجام شده نشان می‌دهد دقت اندازه‌گیری و پردازش داده‌ها در ایران پایین است و داده‌های اندازه‌گیری شده نیازمند کنترل دقیق و پالایش می‌باشد. طبق نتایج ارزیابی‌های انجام شده نمی‌توان از روابط ارائه شده در نقاط مختلف جهان برای آزادراه‌های موجود در ایران استفاده نمود. شرایط خاص موجود در هر کشور از جمله خصوصیات منطقه‌ای و شرایط آب و هوایی، نحوه اجرای عملیات روسازی، برنامه زمان‌بندی و روش های مختلف مورد استفاده جهت ترمیم و نگهداری روسازی، میزان پایبندی به برنامه‌ها و منابع مالی موجب ایجاد تفاوت در کیفیت ساخت و نگهداری از روسازی راه‌ها می‌گردد. لذا روند تغییرات در مقادیر شاخص‌های نشان‌دهنده وضعیت روسازی در هر کشوری متفاوت خواهد بود. این امر موجب متمایز بودن ارتباط شاخص‌ها با یکدیگر در نقاط مختلف و لزوم انجام مطالعات موردی برای محور های موجود در هر منطقه خواهد بود تا بتوان روابط کاربردی با دقت و ضریب اطمینان بالاتری تعیین نمود.

اگرچه تعیین مقدار شاخص PCI با استفاده از مقادیر IRI اندازه‌گیری شده می‌توان بسیار مفید واقع گردد و در این راستا تلاش‌های بسیاری نیز انجام شده است؛ اما طبق بررسی‌های انجام شده ارتباط ریاضی قوی بین شاخص‌های IRI و PCI وجود ندارد. یکی از مهم‌ترین دلایل آن است که اگرچه دو شاخص بیانگر وضعیت کلی روسازی هستند اما به سبب تفاوت در نحوه محاسبه و پارامترهای تشکیل دهنده، ایجاد ارتباط ریاضی قوی بین آن‌ها امکان‌پذیر نمی‌باشد. شاخص PCI شامل ترک‌های طولی و عرضی، ترک‌های پوست سوسماری و خرابی‌هایی چون قیرزدگی می‌شود که ممکن است موجب ایجاد ناهمواری محسوس در سطح روسازی نگردد و لذا در مقدار شاخص IRI تأثیر قابل توجهی نخواهند داشت. این درحالی است که خرابی‌های مذکور می‌توانند تأثیر بسزایی در مقدار مقدار شاخص

PCI داشته باشند. همچنین ممکن است میزان ناهمواری‌ها در قطعه‌ای از روسازی بالا باشد اما سطح روسازی عاری از ترک‌خوردگی باشد؛ در این صورت میزان ناهمواری‌ها تأثیر بسزایی در مقدار شاخص IRI دارد؛ در صورتی‌که در مقدار شاخص PCI تأثیر محسوسی نخواهد داشت. لذا برقراری ارتباط ریاضی با ضریب همبستگی قوی دور از انتظار خواهد بود. البته شایان ذکر است با توجه به جمیع موارد دست‌یابی به رابطه ریاضی با ضریب همبستگی ۰,۶۰ می‌تواند مطلوب ارزیابی گردد و بتوان از آن در پیش‌بینی شرایط و تصمیم گیری در حوزه مدیریت روسازی استفاده نمود.

مراجع

1. Adeli, S, Salehfard, R., and Amini, B., "The Influence of Asphalt Mixture Components on Pavement Skid Resistance and Accident Rate in Urban Un-Signalized Intersections", *International Journal of Pavement Research and Technology*, Vol. 43, pp 1–11 (2021).
2. Wotring, D. C., Baladi, G. Y., Buch, N., and Bower, S., "Pavement Distress and Selection of Rehabilitation Alternatives: Michigan Practice", *Transportation research record*, Vol. 1629(1), pp 214–25, (1998).
3. ASTM, D., "Standard Practice for Roads and Parking Lots Pavement Condition Index Surveys.", (2009).
4. Shah, Y. U., Devesh Tiwari, S. J., and Jain, M. K., "Development of Overall Pavement Condition Index for Urban Road Network", *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, Vol. 104, pp 332–341 ,(2013).
5. Olidis, C., and Hein, D., "Guide for the Mechanistic-Empirical Design of New and Rehabilitated Pavement Structures Materials Characterization: Is Your Agency Ready", *Annual Conference of the Transportation Association of Canada*, Citeseer, (2004).
6. Perera, R. W, and S D Kohn., "Issues in Pavement Smoothness", NCHRP Web Document 42, (2002).
7. Robbins, M., and Tran, N., "A Synthesis Report: Value of Pavement Smoothness and Ride Quality to Roadway Users and the Impact of Pavement Roughness on Vehicle Operating Costs", *National Center for Asphalt Technology (NCAT) at Auburn University*, NCAT Report 16-03, pp 3–16, (2016).
8. Mactutis, J. A., Alavi, H., and Ott,W., "Investigation of Relationship between Roughness and Pavement Surface Distress Based on WesTrack Project", *Transportation research record*, Vol. 1699(1), pp 107–13, (2000).
9. Yousefzadeh, M., Azadi, S., and Soltani, A., "Road Profile Estimation Using Neural Network Algorithm", *Journal of mechanical science and technology*, Vol. 24(3), pp 743–54, (2010).
10. Lin, J.D., Yau, J.T., and Hsiao, L.H., "Correlation Analysis between International Roughness Index (IRI) and Pavement Distress by Neural Network", *In 82nd Annual Meeting of the Transportation Research Board*, Vol. ???, pp 12–16, (2003).
11. Vidya, R., Santhakumar, M., and Mathew, S., "Estimation of IRI from PCI in Construction Work Zones", *International Journal on Civil and Environmental Engineering*, Vol. 3(1), pp 1-5, (2013).
12. Abdelaziz, N., El-Hakim, R.T., El-Badawy, S., and Afify, H., "International Roughness Index Prediction Model for Flexible Pavements", *International Journal of Pavement Engineering*, Vol. 21(1), pp 88–99, (2020).
13. El-Hakim, R.T., Abd, H., "Validation and Improvement of Pavement ME Flexible Pavement Roughness Prediction Model Using Extended LTPP Database", (2017).
14. Shahin, M., and Kohn, S., "Development of a Pavement Condition Rating Procedure for Roads, Streets, and Parking

Lots. Volume I. Conditions Rating Procedure", Construction Engineering Research Lab Champaign, (1979).

15. Di Mascio, P., Piccolo, I., and Cera, L., "Automated Distress Evaluation", *In Proceedings of 4th International SIIV Congress*, Palermo, Italy, Vol. 17(2), pp12–14, (2007).
16. Wang, K., "Network Level Pavement Evaluation with 1 Mm 3D Survey System", *Journal of traffic and transportation engineering (English edition)*, Vol. 2(6), pp 391–98, (2015).
17. Dewan, S.A., Smith, R.E., "Estimating IRI from Pavement Distresses to Calculate Vehicle Operating Costs for the Cities and Counties of San Francisco Bay Area", Transportation Research Record, (2002).
18. Park, K., Thomas, N.E., and Lee, K., "Applicability of the International Roughness Index as a Predictor of Asphalt Pavement Condition", *Journal of Transportation Engineering*, Vol. 133(12), pp 706–9, (2007).
19. Arhin, S.A., Williams, L., Ribbiso, A., and Anderson, M., "Predicting Pavement Condition Index Using International Roughness Index in a Dense Urban Area", *Journal of Civil Engineering Research*, Vol. 5(1), pp 10–17, (2015).
20. Elhadidy, A., El-Badawy, H., and Elbeltagi, E., "A Simplified Pavement Condition Index Regression Model for Pavement Evaluation" *International Journal of Pavement Engineering*, Vol. 22(5), pp 1–10, (2019).
21. Adeli, S., "Development of a Relationship between Pavement Condition Index and International Roughness Index in Rural Road Network", Advances in Civil Engineering, (2021).
22. Gilani, V., Hosseinian, S.M., Behbahani, H., and Hamedi, G., "Prediction and Pareto-Based Multi-Objective Optimization of Moisture and Fatigue Damages of Asphalt Mixtures Modified with Nano Hydrated Lime", Construction and Building Materials 261 120509, (2020).
23. Behbahani, H., Hamedi, G., and Gilani, V., "Predictive Model of Modified Asphalt Mixtures with Nano Hydrated Lime to Increase Resistance to Moisture and Fatigue Damages by the Use of Deicing Agents", Construction and Building Materials 265: 120353, (2020).

accuracy of the predictions is calculated by comparing the predicted PCI values to the measured PCI values. Results are presented in Table 1.

Table 1: Accuracy of proposed predicting model for the modified data

Freeway Name	R^2	MSE	σ
Tehran-Zanjan	0.57	158.66	0.161
Zanjan-Tehran	0.63	171.96	0.176
Zanjan-Tabriz	0.51	217.99	0.240
Tabriz-Zanjan	0.57	196.64	0.202
Kashan-Qom-Natanz	0.71	233.80	0.256

As can be seen in Table 1, the values of the parameters of correlation coefficient, total errors, and standard deviation for different freeways are very close to each other, which shows the similar behavior in the pavement management system in the studied roads. On the other hand, the average value R^2 is approximately 0.60, which indicates the acceptable reliability coefficient of the predictions.

In general, the following important results were obtained:

- The results showed that the accuracy of measurement and data processing in Iran is low and the measured data requires careful control and modification;
- According to the results of the evaluations, it is not possible to use the relations provided in different parts of the world for the freeways in Iran. Specific conditions in each country, including regional characteristics and climatic conditions, the way of carrying out pavement operations, schedule and different methods used to repair and maintain pavement, the degree of adherence to programs, and financial resources cause differences in the quality of construction and maintenance of roads. Therefore, the trend of changes in the values of indices indicating the condition of pavement will be different in each country. This will make the indicators different from each other in different places and it will be necessary to conduct case studies for the existing roads in each region in order to determine the applied relationships with higher accuracy and reliability.
- Determining the value of PCI index using measured IRI values can be very useful and many efforts have been made in this regard, but studies show that there is no strong mathematical relationship between IRI and PCI indices. One of the most important reasons is that although the two indicators indicate the general condition of the pavement, due to the difference in the calculation method and the constituent parameters, it is not possible to establish a strong mathematical relationship between them. The PCI index includes longitudinal and transverse cracks, lizard skin cracks, and damage such as tarring that may not cause noticeable roughness at the pavement surface and therefore will not have a significant effect on the amount of IRI index. However, these failures can have a significant impact on the value of the PCI index. It is also possible that the amount of roughness in a piece of pavement is high but the pavement surface is free of cracking. In this case, the amount of unevenness has a significant effect on the value of the IRI index; If it will not have a significant effect on the value of the PCI index.
- A 5 degree prediction model was proposed in this study to predict PCI value from IRI value by average R^2 of 0.60 that means the model can be considered desirable and can be used in predicting conditions and decisions in pavement management in Iran.

A Prediction Model for the Pavement Condition Index using the International Roughness Index: A Case Study of 5 Selected Freeways in Iran

Seyed Azim Hosseini[1] Masoud Sabaee[2]
Seyed Amir Saadatjoo[3] Saeed Fatemi[4]
Seyed Ali Ziaee[5]

1. Introduction

Reliable and accurate assessment of current condition of the pavement network is one of the most important components in a pavement management system. This assessment is achieved through continuous visual inspection of the pavement condition. For example, the amount of cracking of the pavement surface can be evaluated and the predominant failures of each part of the pavement network can be recognized. Currently, driving quality is considered as an essential element of pavement performance and user satisfaction. One of the most important parameters affecting the driving quality and users' views about the level of road services is the level of roughness of the pavement surface. The degree of pavement roughness can be assessed by determining the International Roughness Index (IRI). This index is equal to the sum of the vertical movements divided by the distance traveled by the navigation vehicle at a speed of 80 km/h. On the other hand, the PCI index is the most widely used criterion for assessing the conditions of pavement in most countries. This index is a comprehensive criterion for existing pavement conditions, which is explained based on the observed failures and their statistical analysis for pavement sampling, and shows the structural integrity of the pavement and the functional status of its surface. In this index, 19 different types of failures with different levels of intensity (low, medium, and high) are examined.

In recent years, various studies have been conducted to link PCI and IRI indices. In 2019, Elhadidy et al. using 10868 pavement failure data, obtained the following equation to determine IRI from PCI with R^2=0.995:

$$IRI = \left(\frac{79.933}{14.061 + \exp(0.048 * PCI)}\right) \quad (1)$$

In 2021, Adeli et al. evaluated the relationship between PCI and IRI indices for suburban routes using 600 km of roads in Fars province with R^2=0.59 to 0.76 for different types of roads.

A review of the research shows that the proposed models are based on limited databases only and do not show a wide range of IRI and PCI values. Since the use of these models for different roads is not reliable without considering the characteristics of the region, it is necessary to evaluate the proposed models to enable their use for roads in Iran. So in this study, data on PCI and IRI of five different freeways in Iran were studied and numerical models between these two parameters were reviewed and presented.

2. Data and Methodology

In line with the objectives of this study, IRI and PCI values measured for three freeways in Iran, that is, Tehran-Zanjan, Zanjan-Tabriz, and Kashan-Qom-Natanz, were collected. This data included PCI values for 500 m lengths and IRI values per 100 m road length. Therefore, in order to compare the IRI values with the PCI of the desired fragment, the average IRI of five consecutive data was considered as the representative value of that fragment (500 m). After modifying the input data using the models presented in previous studies, the values of the PCI index were predicted according to the measured value of the IRI index. Then, the accuracy of the predictions compared to the measured values of PCI index was calculated. The results showed that Equation 1 has a higher predictive accuracy than other relationships.

Since the process of construction and maintenance of pavements is different in different parts of the world, the process of pavement demolition, the type, and severity of damage in different roads can also be variable. Differences in the way pavement operations are performed, scheduling and different methods used in repair and maintenance, adherence to plans, financial resources, climatic conditions and topography of the region are among the effective parameters on how pavements are managed and maintained in different countries. Due to the special conditions of Iran in terms of topography, climate, and technology, it is expected that the process of road pavement demolition be different from other countries. Therefore, it can be expected that the predictions made using the proposed relations in other countries are not accurate enough for the Iranian roads. Therefore, to have an accurate prediction for Iran's roads pavement, we must provide an accurate model based on the conditions of pavements in Iran roads.

3. Results and Conclusion

According to the Iranian freeways pavement date used in this study, a 5 degree prediction model is proposed, which is presented in Equation 2.

$$PCI = -0.4609\ IRI^5 + 8.691\ IRI^4 - 61.26\ IRI^3 + 199.4\ IRI^2 - 319.8\ IRI + 292.7 \quad (2)$$

Using the proposed relationship, PCI values were predicted according to the measured IRI value. The

[1] Corresponding Author: Associate Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Qom University of Azad University, South Branch, Tehran, Iran. **Email**: azim_hosseini@azad.ac.ir

[2] Ph.D. Student, Civil Engineering Department, Islamic Azad University

[3] Ph.D. Student, Faculty of Civil Engineering, Iran University of Science and Technology

[4] Ph.D. Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

[5] Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

4. Modeling the samples

In order to investigate the effects of slot shape and position on shear wall, the configuration variables are selected as B1/B, B2/ B, H1/H, slit width, strip width, and end stiffener's cross section. The dimensions of the steel sheet are considered to be 850 × 550 × 1010 mm. When changing one parameter, others are assumed to remain constant in order to examine their effects. The following 15 models are reviewed, with the details in Table 1. The first 5 parameters indicate the slot position and in general the configuration of the steel sheet, and the last case describes different end stiffeners.

5. Comparison of results

In this section, key parameters of cyclical behavior including initial stiffness, ultimate strength, and amount of energy dissipated are examined. For this purpose, it is necessary to prepare the idealized force-displacement curves of the structures from the push diagram. This is done using the FEMA356 guidelines.

The comparison of the results of the proposed steel wall with inclined slots and the ordinary steel plate shear wall with the same dimensions indicates that despite the reduction of strength and initial stiffness in the slotted sample, this wall has a more favorable cyclic behavior and has the ability to dissipate more energy and perform better at drifts above 2%. The behavior of the slit steel wall was studied by defining 3 seismic parameters. According to Figures 4 to 6, by changing these items, the seismic parameters can change accordingly.

Table 1. Details of modeled samples

Number	Type	Model
1	width	1-Base
2		2-Width-165
3		3-Width-55
4		4-Side-27.5
5		5-Side-82.5
6	Heigth	6-Heigth-101
7		7-Heigth-151.5
8	Strip	8-Strip-35
9		9-Strip-65
10	Slit	10-Slit-12.5
11		11-Slit-7.5
12	Section	12-Box-50
13		13-Box-100
14		14-UNP-50
15		15-UNP-100

According to the results, changing the location of the slots in the samples can change the ultimate strength and initial stiffness by 19 and 25%, respectively. Furthermore, using end stiffeners with higher moment of inertia is one of the most effective ways to increase energy dissipation. For example, using Box100 cross-section as a stiffener has more than doubled energy dissipation compared to the basic sample.

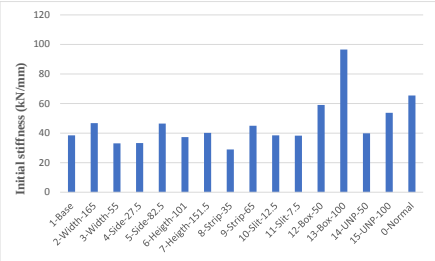


Figure 4. Initial stiffness of samples

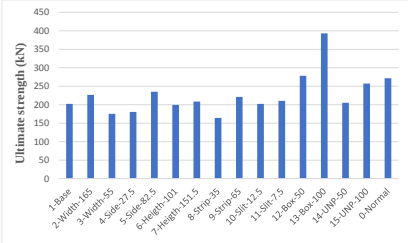


Figure 5. Ultimate Strength of samples

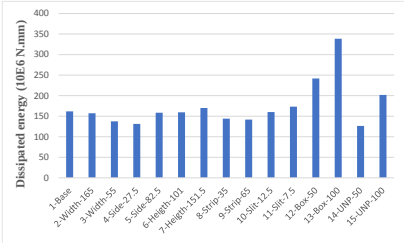


Figure 6. Dissipated energy of samples

Journal of Ferdowsi Civil Engineering, Vol.34, No.4, 2021.

Exploring the Behavior of Steel Plate Shear Wall with Inclined Slots

Ehsan Naeemi Hami Saffar[1] Hashem Shariatmadar[2]

1. Introduction

The main goal of civil engineering is finding new and efficient ways for protecting structures and equipment inside them against natural forces. In the past decades, many researchers have worked to offer appropriate methods for protecting structures. Steel Plate Shear Walls have been considered a lateral load-resistant system in the last three decades in the world. In this study, the behavior of slit steel shear walls is investigated. The purpose of creating slits in the steel shear wall is to dissipate more energy and concentrate damage in the steel sheet as well as to protect other elements, particularly gravity load-bearing ones. Due to the occurrence of the tension field, one of the drawbacks of steel plate shear wall system is the application of large forces by the steel sheet to the boundary members, causing these members to enlarge. The implementation of regular holes, the slits of different shapes, and the use of lower-capacity steel for the sheet have been suggested as solutions to this problem.

The main purpose of this study is to numerically investigate the effect of the shape and position of inclined slits on ultimate strength, initial stiffness, and energy dissipation of slit steel plate shear wall. For this purpose, numerical models are prepared using Abaqus software. However, to ensure the accuracy of the model, the results obtained should be compared with the results of existing analytical or experimental researches. To validate the modeling in Abaqus software, two experiments are presented below.

2. Validation

The slit steel wall was modeled using Abaqus software version 6.14. The wall was modeled using the S4R shell element, which is a general four-point element with reduced integration, having three degrees of transient freedom and three degrees of rotational freedom. Figure 1 compares the results of numerical modeling performed with Abaqus software and the results of a 2009 study by Vian et al.

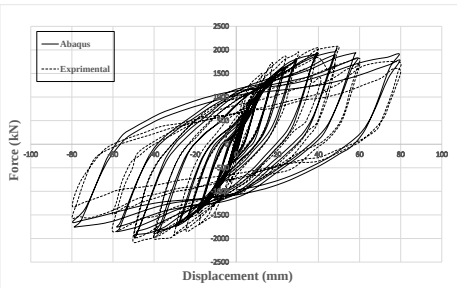


Figure 1. Comparison of the cyclic curve obtained from the numerical model and the experimental work by Vian et al. (2009)

Another study used to validate the simulation was performed by Lou et al., which contains a steel sheet that is attached to two end stiffeners.

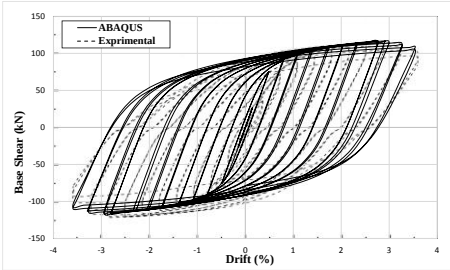


Figure 2. Comparison of the cyclic curve obtained from the numerical model and the experimental work by Lou et al. (2018)

Figure 2 compares the cyclic curve obtained from modeling with that from an experiment conducted by Lou et al. The difference between the base shear is about 3%. As a result, the comparison indicates good consistency in results.

3. Using inclined slots in steel plate shear wall

This study investigates numerically the effect of using inclined slots in steel shear walls. The idea of using a 45-degree slot in steel shear walls has already been explored in other studies, including two papers by Jin et al and Wang et al. According to Wang et al., the use of inclined slots relative to vertical ones causes greater expansion of surface yield, maximum use of sheet capacity, and greater energy dissipation due to operating truss elements in tension and compression. In a steel shear wall with vertical slots, the yielding surface and plastic joint usually appear just on sides of the strip. The steel wall in Figure 3 has two rows of inclined slots with equal distances. This type of shear wall is comparable to inverted-V-bracing as a lateral resistance system.

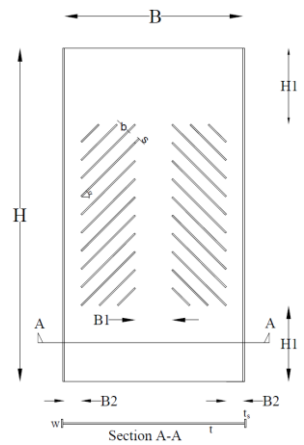


Figure 3. Steel plate shear wall with suggested inclined slots

[1]. PhD Candidate in Civil Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran
[2]. Corresponding author. Professor in Civil Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.
Email: shariatmadar@um.ac.ir

3. Results and Conclusion

The examination of the pedestrians behavioral characteristics in pedestrian facilities showed:

- The highest values of the 15th percentile in both normal and rainy weather conditions belong to men in all pedestrian facilities. However, women especially women with hijab walk at a lower speed in all conditions, and also they have the lowest values of the 15th percentile.
- The speed of pedestrians on the sidewalks and when crossing the width of the passages is equal to each other and have very low values compared to crossing the intersections. Moreover, the lowest speed among all pedestrian facilities in both normal and rainy weather conditions belongs to the sidewalk. Perhaps the reason for this is the special design of sidewalks with pedestrian priority, as well as the placement of sidewalks in tourist, recreational or shopping areas.
- With 95% confidence level in middle-aged and older age groups, the difference in speed between women with hijab and other women is statistically significant and hijab has an effect on people speed. In other words, women with hijab compared to other women, men and platoon movements have the lowest speed values. Therefore, it is not possible to predict which people will cross the definite area over a period of time with what type of cover; Therefore, it is better to be considered the type of cover for designing woman walking facilities.
- Among the various models obtained using linear and nonlinear regression methods, for all pedestrian facilities, the flow-density rate model has the highest prediction accuracy;
- The accuracy of the developed models for different facilities including sidewalks, and pedestrian malls, intersections without signals and with signals using the genetic algorithm is equal 0.9451, 0.9062, 0.9822 and 0.9938, respectively.
- Genetic algorithm for all types of pedestrian facilities is more accurate than regression model for predicting pedestrian flow; Therefore, this method can be introduced as the best methods of modeling to predict pedestrian behavior.

Journal of Ferdowsi Civil Engineering, Vol.34, No.4, 2021.

Modeling Pedestrian Flow in Urban Pedestrian Facilities Using Meta-Heuristic Algorithms (Case Study: Rasht City)

Seyed Ebrahim Abdolmanafi[1]
Termeh Vedadi[2] Seyed Amir Saadatjoo[3]
Saeed Fatemi[4] Seyed Ali Ziaee[5]

1. Introduction

The role of transportation in various economic, social, and political dimensions of today's societies is clear. The transportation is one of the main pillars of sustainable development in human societies. Among the transportation modes, walking is considered as one of the most common modes. walking is one of the most important aspects of human presence in urban spaces, which causes the vitality and dynamism of these spaces and also increases their social role. The pedestrian flow modeling can be the background for designing the optimal facilities to make a city pedestrian. The pedestrian behavior is influenced by the variables such as speed, density, and flow rate, which under the influence of age, gender, weight, individual or group of pedestrians, and even the type of cover can lead to different behaviors. Therefore, before designing pedestrian facilities, pedestrian traffic parameters such as speed, density, flow rate, movement, capacity of the definite zone and also pedestrian behavioral parameters such as type of coverage, age, weight, gender, etc. should be examined.

Previous studies have shown that these studies classify into three categories: macro, intermediate and micro. All the researchers have evaluated the pedestrians flow under the influence of specific parameters. Therefore, in this study, along with examining the pedestrians behavior and collecting the related parameters such as speed, density, and flow rate, pedestrian flow will be modeled at intersections and pedestrian facilities. The developed model can be used to predict the pedestrians behavior more accurately than other models.

2. Data and Methodology

The required data were collected in the present study in Rasht. In order to collect pedestrians' data to model their flow, the most important and crowded pedestrian facilities in the city were selected and the facilities were filmed. These facilities were selected from more than 50 places in Rasht. Then, by specifying a fixed section per unit length (meters) in the recorded images and also the duration of each crossing in this specific section, the walking speed of each pedestrian was extracted. In order to conduct the survey, due to the peak of pedestrian crossings in the selected places, the peak time of 17 to 20 in the early spring was selected. The time chosen for the survey was due to the clear weather, the saturation of the pedestrian flow, and the peak time of the pedestrian flow. Finally, 10,210 pedestrian data were prepared for use as modeling data.

One of the methods used for modeling in this study is regression model. In this model, the aim is to obtain a mathematical correlation between one or more independent variables and a dependent variable in order to predict the dependent variable using the independent variables. In regression equation, there is one independent variable and one dependent variable, which in the multivariate regression equation, the number of independent variables is more than one. In this study, by drawing a distribution diagram and fitting the curve in Excel and SPSS software and using regression method, the required equations were extracted.

Moreover, the meta-heuristic algorithms as an approximate optimization algorithm that have solutions for exit from local optimal solutions, were used.

To develop these models, first based on the people number crossing the definite length of the sidewalks and pedestrian malls per minute obtained from the recorded images, the flow rate (v) was determined at survey in the pedestrian facility. After that, using a stopwatch, the people walking time was determined for all pedestrians. Then, by dividing the distance traveled of the people by their walking time, the people speed (S) was obtained. Finally, using the relation ($v=S\times D$), the density (D) for each minute were calculated. Three methods of linear and nonlinear regression and genetic algorithm were used to model the obtained relationships.

Different methods of modeling the flow of pedestrians on sidewalks and pedestrian malls in Rasht are shown in accordance with Table 1. As can be seen from these results, the accuracy of the genetic method is higher than the regression method. Therefore, the metaheuristic algorithms have a higher accuracy for modeling pedestrian behavior.

Table 1. Comparison of the models results

Type of facility	Type of model	R^2
Sidewalk	regression methods	0.9103
	genetic algorithm	0.9451
Pedestrian mall	regression methods	0.9082
	genetic algorithm	0.9062

[1] Corresponding Author: Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Islamic Azad University, Science and Research Branch, Tehran, Iran. **Email:** abdolmanafi@srbiau.ac.ir.

[2] Master Graduate, Department of Civil Engineering, Islamic Azad University, Tehran North Branch, Tehran, Iran.

[3] Ph.D. Candidate, Department of Civil Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran.

[4] Ph.D. Candidate, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.

[5] Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.

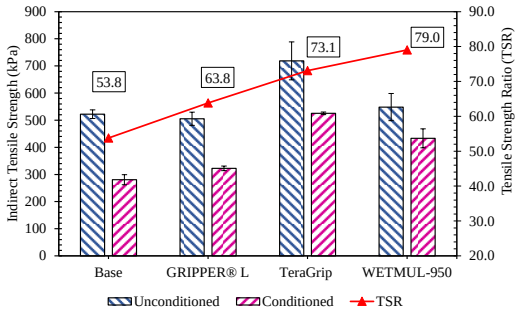


Figure 1. TSR of asphalt mixtures containing the anti-stripping additive

Figure 2 shows the resilient modulus of mixtures containing various additives under wet and dry conditions. According to this figure, the use of anti-stripping additives, creating a strong chemical bond between bitumen and aggregates, and creating a hydrophobic surface by increasing the amount of work of adhesion and cohesion increased the resilient modulus under wet and dry conditions. This increase in the resilience modulus value for the mixture containing G in the dry condition and the mixture containing W in the wet condition are about 59.7% and 156%, respectively. Changes in the resilient modulus ratio for different asphalt mixtures showed that the resilient modulus ratio (RMR) and indirect tensile stress ratio (TSR) had a similar trend and anti-stripping additives had a positive effect on the moisture resistance of asphalt mixtures.

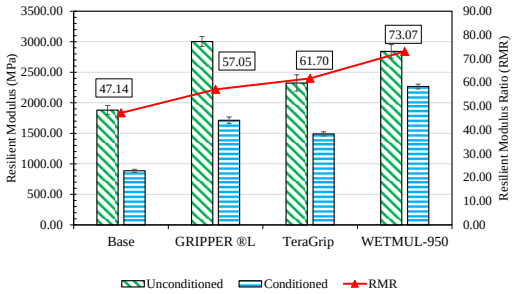


Figure 2. Resilient modulus of asphalt mixtures containing anti-stripping additives

Figure 3 shows the fracture energy and flexibility index value for asphalt mixtures containing anti-stripping additives. According to this figure, by adding anti-stripping additives, because of increasing the amount of adhesion and cohesion energy between bitumen and aggregates due to their chemical properties, the amount of energy required for breaking the samples made with these additives is increased (increment values: 18.7%, 49.6% and 24.6% for G, TG, and W, respectively). Moreover, modified asphalt mixture with anti-stripping agents increased the flexibility index and improved the cracking resistance of the modified asphalt mixtures.

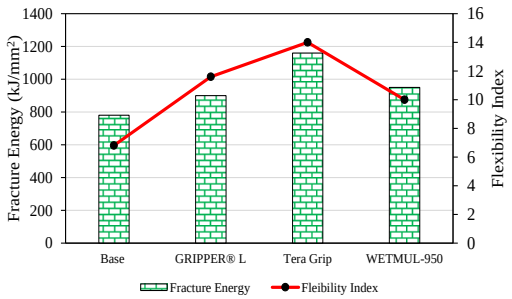


Figure 3. Fracture energy and flexibility index values for asphalt mixtures containing anti-stripping additives

4. Correlation analysis between the results of mechanical performance tests

The correlation analysis between the results of mechanical performance tests of asphalt mixtures showed that there was more correlation between the performed tests, so that the correlation coefficient between the parameter of indirect tensile strength ratio and resilient modulus under wet and dry conditions (TSR and RMR) with 0.974 has the highest correlation between different parameters of mechanical tests.

Table 3. The results of bivariate correlation analysis on various mechanical performance tests

	FN	TSR	RMR	FE	FI
FN	1				
TSR	0.9578	1			
RMR	0.8726	0.9740	1		
FE	0.9051	0.7482	0.5826	1	
FI	0.7582	0.5496	0.3841	0.9194	1

5. Conclusion

The mechanical tests showed that all additives used in this study increased the moisture resistance, rutting resistance, and crack resistance of asphalt mixtures. Asphalt mixture containing TeraGrip compared to other additives used in this study showed the higher resistance to rutting and cracking, resulting in a 43% increase in rutting resistance and 49.6% in crack resistance. Moreover, asphalt mixture containing WETMUL-950 showed a 25% increase in resistance to moisture damage (i.e., the highest resistance to moisture susceptibility among the various additives used in this study).

Journal of Ferdowsi Civil Engineering, Vol.34, No.4, 2021.

Evaluation of Mechanical Properties of Asphalt Mixtures Containing Anti-Stripping Additives of GRIPPER® L, TeraGrip and WETMUL-950

Afshar A. Yousefi[1] Wshyar Mohammed Hasan[2]

Alireza Saghaei[3] Pooyan Ayar[4] Mahmoud Ameri[5]

1. Introduction

Moisture susceptibility is one of the common pavement damages that may occur due to reduced adhesion between bitumen and aggregates and reduced cohesion in the bitumen structure. Separation, displacement, emulsification, and environmental effects are among the various factors that cause stripping. To evaluate the stripping and moisture susceptibility of asphalt mixtures, various methods and experiments such as modified Lottman (AASHTO T283), Wheel Track test, resilient modulus, energy methods based on the theory of surface free energy between bitumen and aggregate have been used by some researchers.

Moisture susceptibility of asphalt mixtures can be affected by factors such as type and chemical properties of bitumen, bitumen aging rate, type and grading of aggregate, mixing temperature, compaction temperature of asphalt mixtures, etc.

Infiltration of moisture into the asphalt mixture can reduce durability, increase stripping, and cause damages such as rutting and cracking. To increase the durability and resistance to the moisture of asphalt mixtures, anti-stripping additives, hydrated lime, and polymer have been the focus of many researchers in the asphalt industry. The addition of anti-stripping liquid increases the resistance to moisture susceptibility and stripping of asphalt mixtures by changing the surface properties of aggregates and improving the adhesion between bitumen and aggregates.

Although anti-stripping additives can increase the resistance of asphalt mixtures to stripping, they can have different effects on other parameters and mechanical properties. Therefore, understanding the behavior of anti-stripping additives in asphalt mixtures and their effect on mechanical properties is an essential prerequisite for making asphalt mixtures resistant to stripping and other failures such as rutting and cracking.

2. Experimental program

In this study, the effect of three different types of anti-stripping additives (i.e., GRIPPER, Tragrip, and WETMUL-950) on the mechanical properties and durability of asphalt mixtures were evaluated using various methods, including resilient modulus, dynamic creep, semi-circular bending fracture test, and indirect tensile strength tests. Furthermore, correlation analysis between the results of performance tests was conducted. Table 1 describes the physical properties and the dosage of anti-stripping used in this research.

Table 1. Physical properties of the used additives

Additive	ID	Content	Physical properties
GRIPPER ® L	G	0.4 %	Physical state: liquid Color: yellow Viscosity (20°C): 2.5 Pa.S Density (gr/cm^3 at 20°C): 1.02 Softening point: more than 150
TeraGrip	TG	0.4 %	Physical state: liquid Color: Honeyed Density (gr/cm^3 at 20°C): 0.94-0.96 Softening point: more than 150
WETMUL -950	W	0.5 %	Physical state: liquid Color: brown Density (gr/cm^3 at 20°C): 0.94-0.96 Solubility in water: Not soluble Solubility in hydrocarbons: soluble

3. Results and discussion

Table 1 shows the flow number (FN) value of asphalt mixtures containing various anti-stripping agents. Anti-stripping agents have increased the flow number of asphalt mixtures, which can create a strong bond between bitumen and aggregates and enhance adhesion work between them. Thus, the addition of anti-stripping agents has increased the rutting resistance of modifies asphalt mixtures.

Table 2. FN value of different asphalt mixtures

	Base	G	TG	W
FN	228	276	325	318

Additionally, using G, TG, and W agents as anti-stripping additives increased resistance to moisture susceptibility. The highest increase in the ITS ratio for asphalt mixes containing W is by about 25.2%. According to previous studies, to evaluate the moisture susceptibility of different asphalt mixtures, a TSR of 80% is the threshold (Figure 1).

[1] MSc Student in Highway and Transportation Engineering, School of Civil Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran

[2] MSc Student in Highway and Transportation Engineering, School of Civil Engineering, Islamic Azad University, Science and Research Branch, Tehran, Iran

[3] MSc Student in Highway and Transportation Engineering, School of Civil Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran.

[4]. Corresponding Author. Assistant Professor, School of Civil Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran. **Email**: ayar@iust.ac.ir

[5]. Professor, School of Civil Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran

Application of the Geostatistics to Identification of the High Water Escape Potential Locations in the Tangab Dam

Reza Dehshibi[1] Reza Jahanshahi[2]

Morteza Mozafari[3] Amin Assari[4]

1. Introduction

In dam site studies, the study of permeability and joints and hydrogeomechanical behavior is one of the basic requirements of the exploration stages. Due to the complexity of geological conditions, measurements of hydrogeological data such as hydraulic conductivity and conductivity may indicate significant uncertainty. Accordingly, estimation and simulation of hydrogeological data are performed by different methods. Geostatistical methods have been widely used for estimating aquifer hydraulic parameters and investigating the uncertainty of hydrogeological and geotechnical parameters. One of the methods for modeling the geometry of permeable layers is the use of geostatistical simulation. In Fars province, Tangab Reservoir Dam provides part of the irrigation water of Firoozabad plain. The water balance calculations by Fars Regional Water Company and previous studies show that a large part of the reservoir water escapes through parts of the dam supports. Therefore, the question that arises is that geologically, which areas around this dam, the potential for water escape, is high. An attempt was made to answer this question by examining the spatial continuity of the data of Lugeon variables, RQD and cementing of exploratory boreholes, and finally the geostatistical simulations of the mentioned variables in the study area.

Tangab Dam is located in 90 km south of Shiraz and on the Firuzabad River. This dam is in the Zagros zone (the Podenow anticline). This anticline is mainly composed of Asmari (Oligomyocene) calcareous Formation and is surrounded by Razak Formation and Pabdeh Gurpi Formation (Paleocene-Oligocene).

2. Method

In this study, geostatistical studies were performed on Lugeon data, RQD and cementing of exploratory wells in the vicinity of Tangab Dam, which include: exploratory-spatial analysis of data, declassification of data, histogram or box diagrams of various variables, investigating changes in variables at different altitudes, investigating the possible relationship between different variables using scatter plots, preparing mapping maps and investigating the presence or absence of possible anisotropy and finally geostatistical modeling (using Isatis geostatistical software) Gaussian simulation.

3. Results

The variables of RQD, Lugeon, and cementing have high variation in different elevations. According to omnidirection variograms, the spatial continuity of cementing estimated 100 m while pursuant to directional variograms for RQD and Lugeon ranged between 200-400 and 40-160, respectively.

4. Conclusion

According to the simulation maps in two locations in the center of the dam reservoir and northwest of the dam, areas with high permeability were identified. Therefore, there is a potential for water to escape in these places. The study of faults in the study area also showed that the density of faults is higher on the right side of the dam, therefore, the presence of faults can increase the permeability of rock units.

[1] M.Sc. Department of Geology, Faculty of Science, University of Sistan and Baluchestan, Zahedan, Iran.

[2] Corresponding Author: Associate Professor, Department of Geology, Faculty of Science, University of Sistan and Baluchestan, Zahedan, Iran.

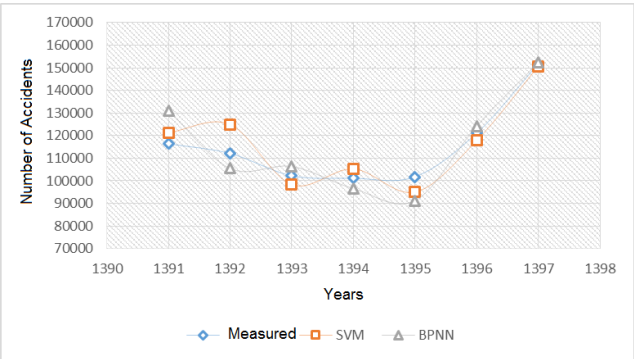
Email: jahanshahireza@science.usb.ac.ir.

[3] Assistant Professor School of Geology, College of Science, University of Tehran, Tehran, Iran.

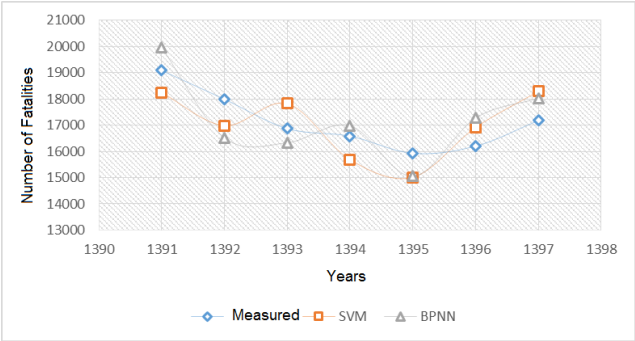
[4] Ph.D. Gohar-Zamin Iron Ore Co, Gol-Gohar Industrial & Mining, Sirjan, Iran.

PSO-SVM is more accurate than the neural network after propagation.

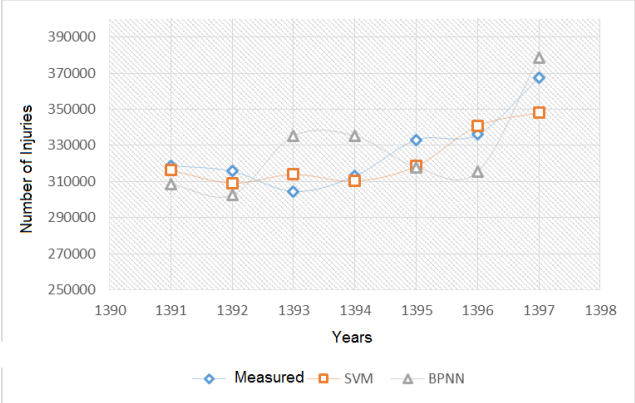
The prediction values of the number of accidents of PSO-SVM method and post-diffusion neural network are compared. The general trend is declining from 1991 to 1995, but the number of accidents has increased until 1997. It is clear that the random nature of the crash data is seen in both methods, and it cannot be said that one of the models always reports more or less values than the counted data. According to Figure 1, it is stated that the trend of changes in casualties is almost similar to the number of accidents, but, the number of injured people is almost constant until 1995, after which it takes an upward trend. We can see the superiority of the PSO-SVM model over the neural network, where the values of the orange graph are closer to blue than the gray graph. For example, in 2012, the SVM output reports 120,000 crashes, of which the numbered counter is 118,000, while the neural network reports 130,000 crashes, with a difference from the observed values. Another point is that the models show more fluctuations than the observed data. By adjusting the mentioned models and reducing the fluctuations, higher accuracy models can be created. Considering that the amount of error in the data related to the number of the injured is less than the data on the number of accidents and the number of casualties, this category can be considered as the result of more data. The more data the models have, the better they can be matched to the counted values.



A



B



C

Figure 1. Comparison of number prediction values a) Accidents, b) Losses, c) injured, Between PSO-SVM and neural network after diffusion

Journal of Ferdowsi Civil Engineering, Vol.34, No.4, 2021.

Predicting Traffic Safety using PSO-SVM Method and Back Propagation Neural Network

Mahmoud Ameri [1] Hamid Bigdeli Rad[2]
Hamid Shaker[3] Amirhosein Ameri[4]
Seyed Amir Saadatjoo[5] Saeed Fatemi[6]
Seyed Ali Ziaee[7]

1. Introduction

SVM is one of the supervised (labeled) learning methods used for classification. This method is one of the relatively new methods that in recent years has performed well compared to older methods like perceptron neural networks. The particle swarm optimization method is a computational method that optimizes the problem with repeated efforts to improve the candidate solution according to the assumed quality criterion. A search space is moved by simple mathematical formulas to calculate the position and velocity of a particle.

In recent years, with the improvement of road construction and the increase in the presence of mobile ambulances and the use of different routes, the rate of traffic accidents has had a relatively declining trend. It is important that traffic safety planning be determined by predicting traffic accidents based on safety data from past years. In this study, the aim was to cover the weakness of neural networks by combining PSO- SVM as a new method and increase the accuracy of calculations. Therefore, the method was used for the first time on a large volume of data in Iran. This model has been implemented for all three cases of number of accidents, number of casualties and number of injured. Among the effective factors in the model according to other studies are speed cameras, number of roadside assistance centers, population, person-kilometer displacement, and the ratio of passenger cars to Bari.

2. Method

This study proposes a new approach that combines particle swarm optimization and support vector machine (PSO - SVM) to predict traffic safety. First, factors affecting traffic safety $\{(x_i, y_i)\}_i^n$ and evaluation indicators are analyzed. Then the traffic safety forecasting model is developed by PSO- SVM according to the effective factors. Data related to traffic safety in the country (including the number of accidents, casualties, and injuries) from 1997 to 2018 are used to investigate the ability of predicting the proposed method, in which data from 1997 to 2011 are used as educational data and data from years 2012 to 2018 are used as test data.

3. Discussion and Conclusion

Observation of the values between the mean percentage of absolute error (MAPE) between PSO-SVM and the post-diffusion neural network shows that the absolute mean error values for the number of accidents with the PSO-SVM method and the post-diffusion neural network are 0.0281 and 0.0498. Also, the number of casualties reported by the PSO-SVM model and post-diffusion neural network are 0.0343 and 0.05610, and the absolute mean error values for the number of casualties reported by the PSO-SVM model and neural network are 0.0261 and 0, respectively. The number 0.0452 indicates that the traffic safety reported by

[1] Corresponding Author: Professor, Department of Civil Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran.
Email: ameri@iust.ac.ir
[2] Ph.D. Student, Department of Civil Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran.
[3] Ph.D. Student, Department of Civil Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran.
[4] M.Sc. Department of Civil Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran.
[5] Ph.D. Student, Department of Civil Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran.
[6] Ph.D. Student, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.
[7] Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.

CONTENTS

Predicting Traffic Safety using PSO-SVM Method and Back Propagation Neural Network	Mahmoud Ameri - Hamid Bigdeli Rad Hamid Shaker- Amirhosein Ameri Seyed Amir Saadatjoo - Saeed Fatemi Seyed Ali Ziaee	1
Application of the Geostatistics to Identification of the High Water Escape Potential Locations in the Tangab Dam	Reza Dehshibi - Reza Jahanshahi Morteza Mozafari - Amin Assari	15
Evaluation of Mechanical Properties of Asphalt Mixtures Containing Anti-Stripping Additives of GRIPPER® L, TeraGrip and WETMUL-950	Afshar A. Yousef Wshyar Mohammed Hasan Alireza Saghaei - Pooyan Ayar Mahmoud Ameri	31
Modeling Pedestrian Flow in Urban Pedestrian Facilities Using Meta-Heuristic Algorithms (Case Study: Rasht City)	Seyed Ebrahim Abdolmanafi Termeh Vedadi- Seyed Amir Saadatjoo Saeed Fatemi - Seyed Ali Ziaee	45
Exploring the Behavior of Steel Plate Shear Wall with Inclined Slots	Ehsan Naeemi Hami Saffar Hashem Shariatmadar	55
A Prediction Model for the Pavement Condition Index using the International Roughness Index: A Case Study of 5 Selected Freeways in Iran	Seyed Azim Hosseini - Masoud Sabaee Seyed Amir Saadatjoo - Saeed Fatemi Seyed Ali Ziaee	69

JOURNAL OF
CIVIL ENGINEERING
FERDOWSI UNIVERSITY OF MASHHAD

Ferdowsi University of Mashhad

ISSN 2008-7454

General Director: F. Irani
Editor-Chief: M. R. Esfahani
Published: Ferdowsi University of Mashhad

Editorial Board:

M. Reza Esfahani	Professor	Ferdowsi University of Mashhad
F. Irani	Professor	Ferdowsi University of Mashhad
K. badv	Professor	Urmia University
J. Bolouri Bazaz	Associate Professor	Ferdowsi University of Mashhad
A. Pouya	Professor	Ecole des Ponts Paris tech
S. M. Hosseini	Professor	Ferdowsi University of Mashhad
N. Hafezi Moghaddas	Professor	Ferdowsi University of Mashhad
E. Seyedi Hosseininia	Associate Professor	Ferdowsi University of Mashhad
Sh. Danesh	Associate Professor	Ferdowsi University of Mashhad
Gh. Rakhshandehro	Professor	Shiraz University
M. H. Sebt	Professor	Amirkabir University of Technology
F. Shahabian Moghadam	Professor	Ferdowsi University of Mashhad
A. Kavussi	Professor	Tarbiat Modares University
H. Ganji Doost	Professor	Tarbiat Modares University
M. Faghfour Maghrebi	Professor	Ferdowsi University of Mashhad
F. Moghadas Nejad	Professor	Amirkabir University of Technology
M. Kianoush	Professor	University of Ryerson

Text Editor: Yousef Bina
Administrative Director: T. Hooshmand
Typist: A. Noie – T. Hooshmand

Journal of Civil Engineering
Department of Civil Engineering, Ferdowsi University of Mashhad.
P. O. Box. 91775-1111, Mashhad, I.R.IRAN
Tel: +98 51 38806024; Fax: +98 51 38807384; Email: ejour@um.ac.ir
Web site: http://civil-ferdowsi.um.ac.ir

ISSN 2783-2805

Ferdowsi University of Mashhad

Journal of Ferdowsi Civil Engineering

Predicting Traffic Safety using PSO-SVM Method and Back Propagation Neural Network 1
Mahmoud Ameri - Hamid Bigdeli Rad
Hamid Shaker- Amirhosein Ameri
Seyed Amir Saadatjoo - Saeed Fatemi
Seyed Ali Ziaee

Application of the Geostatistics to Identification of the High Water Escape Potential Locations in the Tangab Dam 15
Reza Dehshibi - Reza Jahanshahi
Morteza Mozafari - Amin Assari

Evaluation of Mechanical Properties of Asphalt Mixtures Containing Anti-Stripping Additives of GRIPPER® L, TeraGrip and WETMUL-950 31
Afshar A. Yousef - Wshyar Mohammed Hasan
Alireza Saghaei - Pooyan Ayar - Mahmoud Ameri

Modeling Pedestrian Flow in Urban Pedestrian Facilities Using Meta-Heuristic Algorithms (Case Study: Rasht City) 45
Seyed Ebrahim Abdolmanafi
Termeh Vedadi - Seyed Amir Saadatjoo
Saeed Fatemi- Seyed Ali Ziaee

Exploring the Behavior of Steel Plate Shear Wall with Inclined Slots 55
Ehsan Naeemi Hami Saffar - Hashem Shariatmadar

A Prediction Model for the Pavement Condition Index using the International Roughness Index: A Case Study of 5 Selected Freeways in Iran 69
Seyed Azim Hosseini - Masoud Sabaee
Seyed Amir Saadatjoo - Saeed Fatemi
Seyed Ali Ziaee

Serial No. 36

Vol. 34, No. 4
Winter, 2020