

بررسی رسوبدهی جاده‌های جنگلی با استفاده از مدل‌های WARSEM، SEDMODL

و اندازه‌گیری مستقیم تحت شبیه‌سازی باران

- ❖ عطااله کاویان*؛ دانشیار، گروه مهندسی آبخیزداری، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری
- ❖ عطا صفری؛ دانشجوی دکتری، گروه مهندسی آبخیزداری، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری
- ❖ آیدین پارساخو؛ استادیار، گروه جنگل‌داری، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

چکیده

این تحقیق، به بررسی و برآورد میزان رسوبدهی جاده‌های جنگلی حوزه آبخیز دارابکلا با استفاده از مدل‌های WARSEM و SEDMODL پرداخته و به منظور ارزیابی نتایج حاصل، با استفاده از شبیه‌ساز باران به صورت مستقیم میزان تولید رسوب در سطح جاده‌های مذکور اندازه‌گیری شد. به منظور اجرای مدل‌های WARSEM و SEDMODL، عملیات صحرائی برای اندازه‌گیری پارامترهای مختلفی از قبیل طول جاده، عرض جاده، ارتفاع و پوشش شیروانی جاده، شیب طولی جاده، شکل و پیکربندی جاده، سطح جاده و غیره در تعداد ۶۳ قسمت مختلف در مسیری به طول ۱۱۹۷۹ متر از جاده‌های جنگلی منطقه مورد مطالعه انجام شد. برای اندازه‌گیری مستقیم رسوبدهی جاده‌های مورد مطالعه از دستگاه باران‌ساز صحرائی با ویژگی‌هایی از قبیل ارتفاع نازل ۳ متر و ابعاد پلات ۲ مترمربع استفاده گردید. نتایج حاصل از مدل‌های WARSEM، SEDMODL و اندازه‌گیری مستقیم تحت شبیه‌سازی باران نشان داد که میزان رسوبدهی جاده‌های مورد مطالعه، به ترتیب ۹/۹۱۸، ۵/۱۰۹ و ۴/۱۴۱ کیلوگرم در مترمربع در سال می‌باشد. سایر نتایج نشان داد که در سطح اطمینان ۹۵٪، اختلاف معنی‌داری بین داده‌های مشاهده‌ای (شبیه‌سازی باران) و نتایج مدل SEDMODL وجود نداشته، همچنین مدل مذکور با مقادیر RD، MD، BIAS، RE و RMSE به ترتیب ۰/۰۴، ۴/۵۴، ۲۱/۴۲، ۰/۰۴ و ۱۷/۵۹ و ۰/۷۱ مدل مناسب‌تر برای برآورد رسوبدهی در جاده‌های جنگلی منطقه مورد مطالعه می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: رسوبدهی، جاده‌های جنگلی، شبیه‌ساز باران، WARSEM و SEDMODL

۱. مقدمه

جنگل یکی از مؤلفه‌های اصلی کربن جهانی و به لحاظ اکولوژی زیستگاه بسیاری از گونه‌های گیاهی و جانوری و منبع اقتصادی بسیار مهمی برای بشر می‌باشد که نقش کلیدی در چرخه مواد غذایی، هیدرولوژی و دیگر عملکردهای اکوسیستم ایفا می‌کند و هرگونه دخالت در این اکوسیستم حیاتی، عملکرد آن را با مخاطره مواجه می‌سازد [۲۷]. نوار باریک جنگل‌های خزری در چند دهه اخیر به دلایل متعدد دستخوش چنان تغییرات شدیدی شده که حفظ، دوام و بقاء آن نیازمند چاره‌اندیشی همه جانبه است [۲۹]. به همین دلیل کسب اطلاعات از وضعیت حاکم بر این جنگل‌ها می‌تواند در تعیین ضوابطی منطقی به منظور اعمال مدیریت صحیح بر این منابع از اولویت بالایی برخوردار باشد [۲۳ و ۲۷]. سالانه حدود ۸۰۰ هزار مترمکعب چوب، از عرصه‌های جنگلی شمال کشور برداشت می‌شود [۳۶] که این امر مستلزم احداث و ساخت جاده‌هایی در میان این جنگل‌ها برای حمل و نقل و خروج مقطوعات می‌باشد. برای مدیریت صحیح حوزه‌های آبخیز نیاز به شناخت کافی از جاده‌های موجود در حوزه آبخیز و اثرات آنها روی منابع طبیعی می‌باشد [۴۲]. با توجه به اینکه یکی از مهمترین پیامدهای جاده سازی فرسایش خاک و تخریب خاک می‌باشد، شناخت نوع و مقدار فرسایش تحت تأثیر جاده، امری ضروری برای مدیریت همه جانبه حوزه آبخیز می‌باشد [۱۲]. میزان تولید رسوب توسط جاده‌های جنگلی به میزان ترافیک، وضعیت پوشش شیروانی‌های خاکی، روسازی جاده، شیب شیروانی‌ها و شیب طولی جاده، کیفیت زهکشی و غیره بستگی دارد [۱۴ و ۱۸]. طی دهه‌های اخیر، پیشرفت‌های چشم‌گیری در امر تحقیقات مربوط به فرسایش و رسوب در جهان به وجود آمده و روش‌های آسانتری برای جمع‌آوری نمونه‌های رواناب و رسوب ابداع شده است. یکی از این روش‌ها استفاده از دستگاه‌های شبیه‌ساز باران می‌باشد. با بهره‌گیری از باران‌سازها مشکلات تحقیق تحت

بارندگی‌های طبیعی از نظر زمان، هزینه، تکرارپذیری یکسان، تسلط بر تحقیق و کنترل و ارزیابی تغییرها (خصوصیات بارش، خصوصیات خاک و غیره) برطرف شده است [۲۹]. همچنین، امروزه به منظور بررسی حجم انتقال رسوب حاصل از جاده‌های جنگلی به رودخانه، نرم‌افزارها و مدل‌های مختلفی طراحی شده است [۲].

مدل SEDMODL^۱ یک برنامه شبیه‌سازی مبتنی بر GIS است که در ایالت آیداهو آمریکا و با همکاری انجمن ملی بهسازی هوا و رودخانه^۲ توسعه پیدا کرد. این مدل قسمت‌هایی از یک جاده با توان رسوب‌دهی بالا را در سطح یک حوزه آبخیز مشخص می‌کند [۱۷ و ۲۸]. مدل WARSEM^۳ نیز مدلی است که با بهره‌گیری از روابط تجربی، متوسط سالانه تولید و تحویل رسوب به رودخانه‌ها و آبراهه‌ها، ناشی از فرسایش در سطح جاده‌های جنگلی را برآورد می‌کند [۷]، این مدل توسط بخش منابع طبیعی واشنگتن توسعه پیدا کرده است [۱۱].

[۳] Akay *et al.* مدل SEDMODL را برای حوزه آبخیز جنگلی باسکنوس واقع در ترکیه بکار بردند و به این نتیجه رسیدند که مقدار رسوب حاصل از جاده‌های جنگلی درجه دو ۰/۸۳۹ تن در سال می‌باشد.

[۱۱] Fu *et al.* مدل WARSEM را در حوزه‌های Moruya-Deua و Tuross در استرالیا بکار بردند، نتایج نشان داد که تولید رسوب برآورد شده در جاده‌های حوزه‌های آبخیز مذکور، به ترتیب ۳۵ و ۲۱ هزار تن در سال و تحویل رسوب به رودخانه نیز به ترتیب ۶ و ۹ درصد بوده است.

[۲۰] Jordán-López *et al.* تأثیر بخش‌های مختلف جاده‌های جنگلی را در میزان فرسایش و تولید رسوب با استفاده از شبیه‌ساز باران بررسی کردند و به این نتیجه رسیدند که کناره‌های جاده می‌تواند منبع اصلی رسوبات

1- Road Sediment Delivery Model

2- National Council for Air and Stream Improvement

3- Washington Road Surface Erosion Model

در بخش‌های مورد مطالعه باشد.

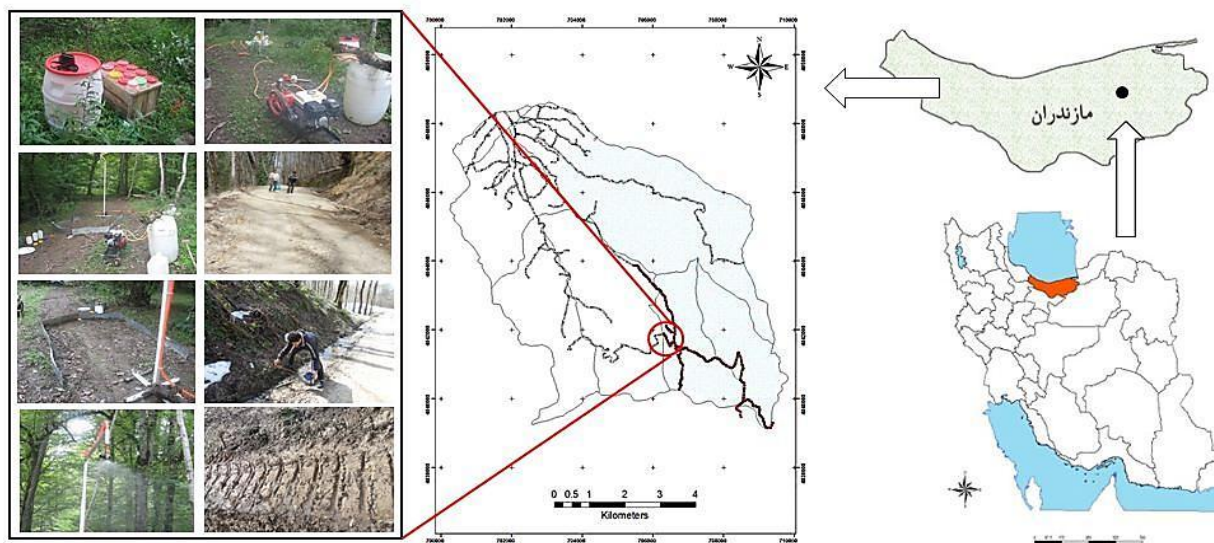
[۱۷] Hosseini *et al* در مسیری به طول ۲۲۶۰ متر از جاده‌های جنگلی قطعات ۲۶، ۲۷ و ۳۳ جنگل‌های دارابکلا، مدل SEDMODL را بکار برده و میزان تولید رسوب در این جاده‌ها را ۷۷/۵۱۴ تن در سال به‌دست آوردند. هدف از این تحقیق، بررسی مسئله فرسایش در مقیاس جاده و بخصوص بحث تولید رسوب در جاده‌های جنگلی بوده که بدین منظور، پس از تعیین تعداد ۶۳ قسمت و بازه با ویژگی‌ها و شرایط مشابه و همگن در مسیری به طول ۱۱۹۷۹ متر از جاده‌های جنگلی سری یک جنگل‌های حوزه آبخیز دارابکلا، اقدام به برداشت میدانی داده‌ها و پارامترهای لازم در مدل‌های WARSEM و SEDMODL کرده و با بهره‌گیری و اجرای مدل‌های مذکور، میزان تولید رسوب در سطح این جاده‌ها محاسبه و برآورد شد. سپس به‌منظور بررسی و ارزیابی نتایج حاصل، اندازه‌گیری مستقیم میزان رسوبدهی جاده‌های مورد مطالعه، با استفاده از شبیه‌ساز باران انجام شد. به‌منظور مدیریت مناسب و بهینه‌سازی جنگلی و کسب اطلاعات لازم از وضعیت حاکم بر آنها، لازم است با توجه به هدف مورد نظر، از تکنیک‌ها و ابزارهای مختلف بهره جست. از این‌رو کاربرد این تحقیق و هدف از انجام آن، تعیین مدل مناسب برای برآورد رسوبدهی جاده بوده که بتوان برای شرایط مشابه نیز، که در برخی مواقع با توجه به زمان بر بودن و هزینه‌بر بودن اندازه‌گیری‌های مستقیم و میدانی، امکان اندازه‌گیری مستقیم با استفاده از ابزارآلات خاص خود وجود نداشته، این مدل‌ها پیشنهاد و مورد استفاده قرار گیرد.

۲. روش شناسی

۱.۲. معرفی منطقه مورد مطالعه

این مطالعه، در حوزه آبخیز جنگلی دارابکلا واقع در استان مازندران، در محدوده جغرافیایی "۰۰' ۲۸' ۳۶° تا "۰۰' ۳۳' ۳۶° عرض شمالی و "۰۰' ۳۱' ۵۳° تا

"۰۰' ۲۰' ۵۳° طول شرقی انجام شد. متوسط بارندگی سالانه این منطقه ۷۳۰/۸ میلی‌متر و میانگین دمای سالانه ۱۶/۱ درجه سانتی‌گراد می‌باشد. مساحت حوزه آبخیز مذکور ۹۱۳/۳۲ هکتار و تراکم جاده در هر هکتار ۹ متر و از نوع درجه ۱ جنگلی و انشعابات داخلی آن عمدتاً از نوع درجه ۲ و ۳ جنگلی می‌باشد. متوسط شیب جاده‌های جنگلی منطقه مورد مطالعه بطور کلی ۵/۶ درصد می‌باشد. حوزه آبخیز جنگلی دارابکلا واقع در ۱۵ کیلومتری شهر ساری و در جنوب‌غربی شهرستان نکا، به دلیل وسعت جنگل‌های قابل توجه آن و شرایط خاص خود به لحاظ ذخائر جنگلی و همچنین وجود اشکال فرسایشی متنوع ناشی از عوامل طبیعی و انسانی، منطقه‌ای مناسب برای انجام این مطالعه بود [۱۳]. با توجه به حمل و نقل و تردد زیاد به‌منظور برداشت مقطوعات، توریسم و تردد اهالی روستاهای اطراف، این منطقه از لحاظ تخریب و کوبیدگی خاک دارای شرایط مناسبی نبوده و توجه به مسئله فرسایش و از بین رفتن خاک که در نهایت می‌تواند منجر به کاهش پوشش گیاهی و کاهش زادآوری گیاهان و درختان موجود در منطقه گردد، امری ضروری به نظر می‌رسد که نیاز به تحقیق و مطالعه در این زمینه داشت. به‌منظور انتخاب مسیرهای مورد مطالعه، کل جاده‌های جنگلی موجود در منطقه، طی بازدیدهای صحرائی اولیه و همچنین بررسی نقشه‌ها در محیط GIS مورد ارزیابی قرار گرفت [۱۷] و مشخص گردید که مسیرهای انتخاب شده برای انجام نمونه‌برداری و برداشت‌های میدانی، دارای استعداد بیشتری از لحاظ فرسایش و تولید رسوب می‌باشد. طول جاده‌های جنگلی تحت بررسی در این تحقیق، ۱۱/۹۷۹ کیلومتر و عمدتاً از نوع درجه ۲ بوده و وضعیت تردد و ترافیک در این مسیرها سبک و در بعضی موارد نسبتاً سبک می‌باشد. در شکل (۱) بخش‌هایی از مراحل مختلف عملیات‌های میدانی انجام شده و موقعیت حوزه آبخیز دارابکلا (شکل وسطی) و جاده‌های مورد نظر نشان داده شده است.



شکل ۱. موقعیت منطقه مورد مطالعه در ایران و استان

همان مقدار فرسایش ایجاد شده در سطح جاده می‌باشد و منظور از انتقال رسوب همان رسوب جابجا شده و تحویل داده شده می‌باشد که با لحاظ کردن فاکتور تحویل بدست می‌آید. به عبارتی، اگر فاکتور تحویل در زمان اجرای مدل لحاظ نگردد رسوب تولیدی برابر فرسایش جاده‌ای رخ داده، برآورد می‌گردد.

برای محاسبه T_S از رابطه (۲) استفاده می‌گردد:

$$T_S = L_r \times W_r \times GE_r \times S_f \times T_f \times G_f \times P_f \times D_f \quad (2)$$

L_r : طول جاده، W_r : عرض جاده، GE_r : میزان فرسایش زمین‌شناسی (تن در هکتار در سال)، S_f : فاکتور مربوط به سطح جاده، T_f : فاکتور ترافیک، G_f : فاکتور شیب، P_f : فاکتور بارندگی و D_f : فاکتور انتقال رسوب. برای محاسبه C_S از رابطه (۳) استفاده می‌گردد [۲۴]:

$$C_S = GE_r \times CS_f \times CS_h \times L_r \times D_f \quad (3)$$

GE_r : میزان فرسایش زمین‌شناسی (تن در هکتار در سال)، CS_f : فاکتور پوشش دیواره خاکبرداری، CS_h : ارتفاع دیواره خاکبرداری، L_r : طول جاده و D_f : فاکتور انتقال رسوب.

۲.۲. مدل‌های مورد استفاده

۱.۲.۲. مدل پیش‌بینی رسوب SEDMODL

اساس این مدل بر مبنای تقسیم کل رسوب تولیدی به دو بخش رسوب مربوط به سطح جاده و جوی کناری آن و همچنین رسوب حاصل از دیواره خاکبرداری می‌باشد. لازم به ذکر است که از رسوب حاصل از دیواره خاکریزی به دلیل ناچیز بودن مقدار آن صرف‌نظر می‌گردد [۱۷ و ۲۸].

میزان کل انتقال رسوب توسط جاده از رابطه (۱) محاسبه می‌گردد:

$$E = (T_S + C_S) \times A_f \quad (1)$$

E : میزان کل انتقال رسوب توسط جاده بر حسب تن در سال، T_S : کل رسوب تولیدی مربوط به سطح جاده بر حسب تن در سال، C_S : کل رسوب تولیدی مربوط به دیواره خاکبرداری بر حسب تن در سال و A_f : فاکتور مربوط به سن جاده بوده که میزان رسوب کل را تحت تأثیر قرار می‌دهد. لازم به ذکر است در مدل‌های خاص برآورد فرسایش جاده‌ای، منظور از مقدار تولید رسوب

کاسته می‌شود [۱۷]. هنگامی که جاده بطور مستقیم رودخانه را قطع می‌کند، فاکتور انتقال رسوب ۱۰۰ درصد است. زمانی که فاصله مرکز جاده از مرکز رودخانه کمتر از ۳۰ متر باشد، میزان فاکتور انتقال رسوب ۳۵ درصد و زمانی که فاصله بین ۳۰ تا ۶۰ متر باشد، این فاکتور ۱۰ درصد است. اگر جاده در فاصله بیش از ۶۰ متر از آبراهه قرار داشته باشد، رسوب تولیدی آن در بستر طبیعی جنگل ته‌نشین شده و هیچ رسوبی وارد آبراهه نمی‌شود [۴۰]. بنابراین فاکتور انتقال رسوب برای جاده‌های موجود در این فاصله صفر می‌باشد [۱۷].

فاکتور پوشش دیواره خاکبرداری (CS_f): فاکتور پوشش دیواره خاکبرداری بر اساس درصد پوشش سنگی یا گیاهی روی دیواره خاکبرداری در جدول (۵) نشان داده شده است [۴۰].

فاکتور ارتفاع دیواره خاکبرداری (CS_h): افزایش ارتفاع دیواره خاکبرداری منجر به تشدید خزش خاک، فرسایش ورقه‌ای و لغزش شده، در نتیجه سبب بالا رفتن میزان انتقال رسوب از دیواره به زهکش می‌گردد [۱۷]. در مطالعات انجام شده، میانگین ارتفاع دیواره خاکبرداری برای کلاس‌های شیب ۰-۱۵٪، ۱۵-۳۰٪، ۳۰-۶۰٪ و بالای ۶۰٪ به ترتیب ۰/۷۵، ۱/۵، ۳ و ۷/۵ متر برآورد شده است [۲۴].

فاکتور سن جاده (A_f): با توجه به اینکه بیشترین میزان تولید رسوب در جاده‌های جنگلی مربوط به سال اول یا دوم ساخت است و در سال‌های بعد کاهش می‌یابد [۳]، فاکتور سن جاده در معادله وارد می‌شود. میزان این فاکتور برای جاده‌هایی که یکسال از ساخت آن می‌گذرد مقدار عددی ۱۰ و برای جاده‌هایی که بیش از ۲ سال از ساخت آنها گذشته باشد مقدار عددی ۲ می‌باشد [۴].

فاکتورها و ورودی‌های مدل SEDMODL

فاکتور فرسایش زمین‌شناسی (GE_r): میزان تولید رسوب در جاده‌های جنگلی وابستگی زیادی به وضعیت زمین‌شناسی و خاک‌شناسی منطقه دارد [۲۱]. میزان تولید رسوب با توجه به وضعیت زمین‌شناسی از جدول (۱) استخراج می‌شود.

فاکتور سطح جاده (S_f): کیفیت مواد استفاده شده در روسازی تأثیر مستقیمی در میزان رسوبدهی سطح جاده‌های جنگلی دارد [۹ و ۱۷]. مقادیر فاکتور سطح جاده در جدول ۲ نشان داده شده است.

فاکتور ترافیک (T_f): میزان رسوبدهی سطح جاده‌های جنگلی به نوع کاربری جاده بستگی دارد [۱۰، ۱۷ و ۳۲]. در جدول (۳) مقادیر فاکتور ترافیک مورد استفاده در مدل SEDMODL ارائه شده است.

فاکتور شیب جاده (G_f): شیب یکی از عوامل مؤثر در میزان رسوبدهی جاده‌های جنگلی است [۳۳]. برای برآورد میزان فاکتور شیب از جدول (۴) استفاده می‌شود.

فاکتور بارندگی (P_f): میزان تولید رسوب جاده‌های جنگلی تحت تأثیر بارندگی محل قرار دارد [۱۷]. فاکتور بارندگی برای SEDMODL را می‌توان با توجه به میانگین بارندگی سالانه به میلی‌متر و از رابطه (۴) محاسبه کرد [۳۱].

$$P_f = (P_{avr}/1524)^{0.8} \quad (4)$$

P_{avr} : میانگین بارندگی سالانه بر حسب میلی‌متر.

فاکتور انتقال رسوب (D_f): برای محاسبه فاکتور انتقال رسوب در این روش از میزان فاصله نقطه مرکزی جاده تا نقطه مرکزی رودخانه استفاده می‌شود. با افزایش فاصله جاده نسبت به رودخانه از میزان انتقال رسوب

جدول ۱. میزان فرسایش با توجه به وضعیت زمین‌شناسی و سنگ‌شناسی (تن در هکتار در سال) در مدل SEDMODL

سنگ‌شناسی	سن زمین‌شناسی تشکیلات				
	کواترنری	ترشیاری	مزوزوئیک	پالئوزوئیک	پرکامبرین
متمرفیک	-	۳۷	۳۷	۳۷	۳۷
شیست	-	۱۴۸	۱۴۸	۱۴۸	۱۴۸
بازالت	۳۷	۳۷	۷۴	۷۴	۷۴
آندزیت	۳۷	۳۷	۷۴	۷۴	۷۴
خاکستر	۱۲۴	۱۲۴	۱۲۴	۱۲۴	۱۲۴
توف	۱۲۴	۱۲۴	۷۴	۷۴	۷۴
گابرو	-	۲۵	۲۵	۲۵	۲۵
گرانیت	-	۴۹	۷۴	۷۴	۷۴
سنگ آذرین نفوذی	-	۳۷	۳۷	۳۷	۳۷
رسوبات سخت	-	۳۷	۳۷	۷۴	۷۴
رسوبات گراولی	۳۷	۳۷	-	-	-
رسوبات نرم	۷۴	۷۴	-	-	-
رسوبات نرم ریزدانه	۱۴۸	۱۴۸	-	-	-

جدول ۲. فاکتور سطح جاده در مدل SEDMODL

نوع سطح	آسفالت	شن	خاک درهم	پوشش علفی	بستر طبیعی	بستر طبیعی همراه با شیار
فاکتور سطح	۰/۰۳	۰/۲	۰/۵	۰/۵	۱	۲

جدول ۳. فاکتور ترافیک برای جاده‌های مختلف در مدل SEDMODL

نوع جاده	بزرگراه	اصلی	شهری	درجه ۱	درجه ۲	فرعی	متروکه و از رده خارج
فاکتور ترافیک	۱۲۰	۱۲۰	۵۰	۱۰	۲	۱	۰/۱

جدول ۴. فاکتور شیب در مدل SEDMODL

درصد شیب	کمتر از ۵ درصد	۵-۱۰ درصد	بیشتر از ۱۰ درصد
فاکتور شیب	۰/۲	۱	۲/۵

جدول ۵. فاکتور پوشش دیواره خاکبرداری در مدل SEDMODL

درصد پوشش گیاهی یا سنگ	۰	۱۰	۲۰	۳۰	۴۰	۵۰	۶۰	۷۰	۸۰	۹۰	۱۰۰
فاکتور پوشش	۱	۰/۷۷	۰/۶۱	۰/۵۲	۰/۴۴	۰/۳۷	۰/۳۱	۰/۲۵	۰/۲۰	۰/۱۵	۰/۱

S: فاکتور شیب جاده، E_r : فاکتور بارش، SDR_{R-S} : فاکتور تحویل.

پارامتر دامنه خاکبرداری (شیروانی جاده) طبق معادله (۷)، به صورت زیر تعیین می‌گردد:

$$C_s = G \times C_f \times L \times H \times E_r \times SDR_{R-S} \quad (۷)$$

C_s : پارامتر دامنه خاکبرداری (شیروانی جاده)، G : فاکتور فرسایش زمین‌شناسی، C_f : فاکتور پوشش شیروانی جاده، L : فاکتور طول شیروانی جاده، H : فاکتور ارتفاع شیروانی جاده، E_r : فاکتور بارش، SDR_{R-S} : فاکتور تحویل.

فاکتورها و ورودی‌های مدل WARSEM

فاکتور فرسایش زمین‌شناسی (G): قابلیت فرسایش‌پذیری خاک توسط اندازه ذرات خاک و انسجام آن تحت تأثیر قرار می‌گیرد و رواناب تولید شده از آن، به ظرفیت نفوذ خاک و الگوهای بارش بستگی دارد [۱۳]. فاکتور فرسایش طبق جدول (۶) تعیین و در مدل لحاظ می‌گردد.

فاکتور سطح جاده (S_f): نوع و کیفیت سطح در یک جاده، تأثیر بزرگی در چگونگی نگهداری جاده در برابر استفاده ترافیک دارد [۳۵]. فاکتور سطح برای تیمارهای مختلف جاده در جدول (۷) نشان داده شده است.

فاکتورهای ترافیک (T) و عرض جاده (W): عرض جاده (عرض کف جاده) و مقدار ترافیک در یک جاده، هر دو در مقدار فرسایش سطحی تولید شده از کف جاده تأثیر دارند [۳۴]. مدل فرسایش جاده به کاربر این اجازه را می‌دهد تا ترافیک یک بخش خاص و مقادیر عرض جاده اندازه‌گیری شده را وارد مدل کند و یا از پیش‌فرض‌های تعیین شده (طبق جدول ۸) بر اساس طبقه و کلاس جاده استفاده کند.

فاکتور شیب جاده (S): گرادیان یا شیب یک بخش جاده، میزان فرسایش را تحت تأثیر قرار می‌دهد [۲۵]. مدل فرسایش جاده، فاکتور شیب جاده را برای هر بخش

۲.۲.۲. مدل فرسایش سطح جاده واشنگتن (WARSEM)

مدل WARSEM برای برآورد میانگین بلندمدت تولید و تحویل رسوب از جاده به رودخانه مورد استفاده قرار می‌گیرد و اساس آن نظیر مدل SEDMODL بر مبنای تقسیم کل رسوب تولیدی به دو بخش رسوب حاصل از سطح جاده و رسوب حاصل از دیواره خاکبرداری می‌باشد [۷].

در زیر ساختار کلی مدل، روابط و فاکتورهای مورد نیاز آن شرح داده شده است:

متوسط سالانه مقدار تحویل رسوب به یک آبراهه از هر بخش جاده بر اساس روابط زیر محاسبه می‌شود [۷ و ۱۲].

$$E = (R_s + C_s) \times A_g \quad (۵)$$

E : کل تحویل رسوب به یک آبراهه از هر بخش جاده (تن در سال)، R_s : پارامتر کف جاده و رودخانه، C_s : پارامتر دامنه خاکبرداری، A_g : فاکتور سن جاده.

در این مدل نیز، نظیر مدل قبل، منظور از تحویل رسوب همان رسوب جابجا شده و تحویل داده شده از هر بخش از جاده به رودخانه‌ها و آبراهه‌ها می‌باشد که با لحاظ کردن فاکتور تحویل بدست می‌آید. به عبارتی، اگر فاکتور تحویل در زمان اجرای مدل لحاظ نگردد رسوب تولیدی برابر همان فرسایش جاده‌ای رخ داده، برآورد می‌گردد.

پارامتر کف جاده و رودخانه طبق معادله (۶)، به صورت زیر تعیین می‌گردد:

$$R_s = G \times S_f \times T \times L \times W \times S \times E_r \times SDR_{R-S} \quad (۶)$$

R_s : پارامتر کف جاده و رودخانه، G : فاکتور فرسایش زمین‌شناسی (بدون واحد و بر اساس مقدار عددی امتیاز مربوطه برای هر نوع جنس)، S_f : فاکتور سطح جاده، T : فاکتور ترافیک، L : فاکتور طول جاده (طول قطعات مشخص جاده)، W : فاکتور عرض جاده (کف + رودخانه)،

بارندگی در مدل WARSEM، با استفاده از معادله (۸)، به صورت زیر تعیین می‌شود:

(۸)

$$\text{Rain Factor} = 0.016[\text{Average Annual Rainfall (inches)}]^{1.5}$$

فاکتور تحویل (SDR_{R-S}): رسوبات فرسایش یافته از یک بخش جاده که منابع آبی را تحت تأثیر قرار داده و در مدل WARSEM در نظر گرفته شده، باید از جاده به یک آبراهه یا رودخانه منتقل شود. در مدل مذکور، جاده‌های با فاصله بیشتر از ۲۰۰ فوت (۶۰/۹۶ متر) از رودخانه، برای تحویل رسوب فرض شده به آبراهه‌ها و رودخانه‌ها، در نظر گرفته نمی‌شوند؛ بجز گالی‌های موجود در بین جاده و کانال رودخانه، که به انتقال رسوب از جاده به رودخانه کمک می‌کنند [۱۶].

فاکتور سن جاده (A_g): تحقیقات نشان داده است که جاده‌های جدید یا بازسازی شده، میزان فرسایش بالاتری در طی ۱-۲ سال اول پس از ساخت نسبت به سال‌های بعدی دارند [۲۲]. بطور کلی، باید سال ساخت هریک از بخش‌های جاده تعیین گردد و بعد برای هر بخش از جاده، طبق جدول (۱۲)، مقادیر فاکتور سن جاده مشخص شده و وارد مدل شود.

جاده، بر اساس وضعیت شیب کف جاده در نظر گرفته، که توسط کاربر وارد مدل می‌شود. فاکتور شیب جاده بر اساس جدول (۹) تعیین می‌گردد.

فاکتور ارتفاع دامنه خاکبرداری (H): بر اساس برنامه SEDMODL، برای بخش‌های جاده‌ای، ارتفاع‌های از پیش تعیین شده‌ای بر اساس شیب دامنه خاکبرداری تعریف شده است [۲۶]. در این مطالعه ارتفاع دیواره خاکبرداری، پس از اندازه‌گیری‌های میدانی و تبدیل به واحد فوت در مدل بکار گرفته شد.

فاکتور پوشش دامنه خاکبرداری (C_f): اثربخشی نسبی پوشش زمین در کاهش میزان فرسایش در دامنه‌های خاکبرداری، تابعی از درصد زمین محافظت شده و نحوه تماس پوشش با سطح زمین و مقاومت ریشه است [۴۱]. فاکتور پوشش دامنه خاکبرداری (شیروانی جاده) بر اساس درصد پوشش گیاهی یا پوشش سنگ تعیین شده توسط کاربر، وارد مدل می‌شود. فاکتور پوشش مورد استفاده در مدل، در جدول (۱۰) ذکر شده است.

فاکتور بارندگی (E_f): بارش باران و ذوب برف مکانیزم‌های غالب در فرسایش و انتقال بوده و بر فرسایش سطح جاده در بیشتر مناطق تأثیرگذار است [۳۹]. فاکتور

جدول ۶. فاکتور فرسایش زمین‌شناسی مورد استفاده در WARSEM: کم (۱)، متوسط (۲) و زیاد (۵)

سن زمین‌شناسی سازند					سنگ‌شناسی
پركامبرين	پالئوزوئيك	مزوزوئيك	ترسیر	کواترنر	
۱	۱	۱	۱	-	سنگ‌های دگرگونی بدون هوازدگی
۲	۲	۲	۲	-	شیست هوازده یا گنیس
۱	۱	۱	۱	۱	بازالت
۱	۱	۱	۱	۱	آندوزیت
۱	۱	۱	۵	۵	خاکستر (Ash)
۱	۱	۱	۵	۵	توف
۱	۱	۱	۱	-	سنگ‌های نفوذی بدون هوازدگی
۵	۵	۵	۵	-	سنگ‌های نفوذی/گرانیت هوازده
۱	۱	۱	۱	-	سنگ‌های رسوبی سخت و بدون هوازدگی
-	-	-	۱	۱	رسوبات نرم با بافت درشت (شنی)
-	-	-	۵	۵	رسوبات هوازده عمیق یا ریز بافت (سیلت و ماسه)

جدول ۷. فاکتور سطح جاده در مدل WARSEM

فاکتور سطح	نوع سطح جاده
۰/۰۳	آسفالت
۰/۲	گراول (شن)
۰/۴	گراول با رد شیار
۰/۵	گراول فرسایش یافته یا خرد شده
۰/۵	بومی (محلی) چمنی یا پوشیده از گراس (علف)
۱	سطح بکر (بومی)
۲	بومی با رد شیار

جدول ۸. فاکتورهای ترافیک و عرض جاده در مدل WARSEM

عرض جاده (ft)	فاکتور ترافیک	وضعیت ترافیک	متوسط تعداد عبور در روز		توصیف	کلاس جاده
			ورود کامیون	وانت / اتومبیل		
۴۰	۱۲۰	سنگین (شدید)	۵<	۵<	- استفاده خیلی سنگین توسط کامیون و اتومبیل - ترافیک در سراسر سال	بزرگراه
۳۰	۵۰	نسبتاً سنگین	۵<	۴-۵	- زیاد توسط ورود کامیون مورد استفاده قرار می‌گیرد و در تمام سال ترافیک دارد. - معمولاً راه دسترسی اصلی در یک حوزه بوده که به طور فعال مورد استفاده قرار می‌گیرد.	مسیر اصلی (حمل و نقل عمده)
۳۵	۵۰	نسبتاً سنگین	۱۰<	۳-۵	- جاده شهری و عریض که مناطق مسکونی و یا استفاده سنگین کامیون را دربر می‌گیرد.	جاده بین شهری
۲۵	۱۰	متوسط	۵-۱۰	۳-۴	- استفاده متوسطی توسط ورود کامیون‌ها در تمام یا بیشتر سال دریافت می‌کند. - معمولاً این جاده‌ها شاخه‌ای از جاده "مسیر اصلی" هستند.	جاده اولیه (ابتدایی)
۱۸	۲	سبک	۱-۵	۱-۲	- استفاده سبک کامیون در طول سال - ممکن است گاهی اوقات به صورت سنگین برای حمل و نقل چوب و الوار مورد استفاده قرار گیرد. - ورود اتومبیل/وانت یا استفاده تفریحی	جاده فرعی (درجه ۲)
۱۵	۱	اتفاقی (بعضی اوقات)	<۱	<۱	- جاده‌ای کوتاه که برای دسترسی واحدهای ورودی استفاده می‌شود. - ورودی‌های مسیر برای یک زمان کوتاه مورد استفاده قرار می‌گیرد. - در حالت متوسط، استفاده کمی را دریافت می‌کند.	جاده انشعابی
۱۵	۰/۱	هیچ‌یک	.	.	- جاده توسط یک سد مخزنی یا تخته سنگ‌ها یا غیره مسدود شده است و یا دیگر استفاده ترافیکی ندارد.	جاده متروک شده (مسدود)

جدول ۹. فاکتور شیب جاده در مدل WARSEM

شیب سطح جاده	کمتر از ۵ درصد	۵-۱۰ درصد	بیشتر از ۱۰ درصد
فاکتور شیب	۰/۲	۱	۲/۵

جدول ۱۰. فاکتور پوشش دامنه خاکبرداری (شیروانی جاده) در مدل WARSEM

درصد پوشش گیاهی یا پوشش سنگ	فاکتور پوشش
۹۰-۱۰۰	۰/۱۰۲۳
۷۰-۹۰	۰/۲۰۱۴
۵۰-۷۰	۰/۳۱۳۳
۳۰-۵۰	۰/۴۴۶۶
۱۰-۳۰	۰/۶۳۵۹
۰-۱۰	۰/۸۸۵۰

جدول ۱۱. فاکتور تحویل جاده در مدل WARSEM

زهکشی از جریان‌های بخش‌های مختلف جاده	درصد تحویل رسوب
به طور مستقیم به رودخانه تحویل داده شود	۱۰۰
حدود ۱۰۰ فوتی رودخانه	۳۵
حدود ۲۰۰ فوتی رودخانه	۱۰

جدول ۱۲. فاکتور سن جاده در مدل WARSEM

سن جاده (سال ساخت منهای سال اجرای مدل)	فاکتور سن جاده
۰-۱	۱۰
۲	۲
بیشتر از ۲ سال یا سال ساخت مشخصی نداشته باشد	۱

جاده‌های جنگلی که انتقال بخش‌های مختلف آن به آزمایشگاه غیرممکن است، ضروری به نظر می‌رسد [۳۷]. البته باران‌سازهای صحرایی که تاکنون طراحی و ساخته شده‌اند یا در ابعاد بسیار کوچک هستند، این قبیل باران‌سازها معمولاً فاقد استانداردهای لازم برای تولید باران مصنوعی می‌باشند (زیرا ارتفاع ریزش باران آنقدر کم است که قطرات بسرعت حد نمی‌رسند) و یا آنقدر بزرگ می‌باشند که حمل و نقل آنها سخت و طاقت‌فرساست [۳۰]. از این‌رو در این تحقیق، باران‌ساز با ارتفاع ۳ متر که در گروه باران‌سازهای بزرگ تحقیقاتی

۳.۲. اندازه‌گیری مستقیم فرسایش در جاده‌های

جنگلی با استفاده از شبیه‌سازی باران

۱.۳.۲. ضرورت استفاده از شبیه‌ساز باران در این

تحقیق

با بکارگیری دستگاه باران‌ساز صحرایی و تولید باران مصنوعی بر روی ساختمان جاده جنگلی می‌توان رفتار سطح جاده را از نظر تولید رواناب و فرسایش مورد بررسی قرار داد [۲۹]. استفاده از باران‌ساز سیار برای مطالعات صحرایی به‌ویژه مطالعه روی عوارض مصنوعی مانند

سرعت قطره به سرعت حد می‌رسد. در شکل (۲) باران‌ساز مورد استفاده در این تحقیق نشان داده شده است.

قرار می‌گیرد، مورد استفاده قرار گرفته است. در این باران‌ساز، به دلیل اینکه آب توسط انرژی موتور پمپاژ شده و در لحظه خروج از روزنه نازل، با فشار خارج می‌شود و با توجه به اینکه قطرات در ارتفاع ۳ متری رها می‌شوند،



شکل ۲. تصویری از باران‌ساز مورد استفاده در این تحقیق با ارتفاع نازل ۳ متر

۲.۳.۲. شبیه‌ساز باران مورد استفاده در این تحقیق

باران‌ساز مورد استفاده در این تحقیق از نوع سیار تک نازله بوده و ارتفاع آن به ۳ متر می‌رسد. در این سیستم شبیه‌سازی که مطابق با استانداردهای حال حاضر دنیا توسط دانشکده منابع طبیعی دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری طراحی و ساخته شده است، آب توسط پمپ و انرژی موتور بنزینی از داخل مخزن به ارتفاع مورد نظر پمپاژ شده و پس از ثبت فشار آب در نزدیک نازل، باران مصنوعی با سرعت اولیه و با شدت مورد نظر بر روی خاک داخل قاب گالوانیزه پاشیده می‌شود. پایه باران‌ساز مورد استفاده در این تحقیق از نوع تک پایه و با قابلیت تک نازله می‌باشد و ارتفاع آن بین ۲، ۲/۵ و ۳ متر قابل تنظیم بوده که در این تحقیق در ارتفاع ۳ متری عملیات شبیه‌سازی انجام شده است. نازل مورد استفاده نیز از نوع BEX مدل 1/4 S 6.5 با مخروط بارش ۱۵ تا ۱۰۰ درجه می‌باشد.

۳.۳.۲. نمونه‌برداری و اندازه‌گیری رسوبدهی جاده

طی عملیات شبیه‌سازی باران

قبل از آغاز آزمایش‌های شبیه‌سازی باران نسبت به انتخاب قطعات نمونه در مقاطعی از جاده که با توجه به اهداف تحقیق مناسب بوده، اقدام شد. در آماربرداری و نمونه‌برداری رواناب و بار رسوب سه عامل هزینه، زمان و حداقل اشتباه آماربرداری در انتخاب تعداد نمونه‌ها تأثیرگذار هستند. بنابراین باید روشی را به کار برد که با توجه به زمان و هزینه پیش‌بینی شده کمترین اشتباه حاصل شود [۲۹].

در این تحقیق، تعداد مناسب نمونه با در نظر گرفتن $t = 2$ و $t = 0.8 \pm$ از رابطه (۹) محاسبه شد [۲۹].

$$n = \frac{t^2 \times (S_x \%)^2}{(E\%)^2} \quad (9)$$

$$t = \frac{\bar{d}}{S_{\bar{d}}} \quad (10)$$

\bar{d} : میانگین تفاضل جفت مشاهده‌ها، $S_{\bar{d}}$: اشتباه معیار تفاوت‌ها.

- خطای نسبی (RD):

از تفاضل مقدار مشاهده‌ای با مقدار برآوردی، اختلاف مطلق بدست آمده، سپس با استفاده از رابطه زیر مقدار خطای نسبی به دست می‌آید:

$$\text{خطای نسبی} = \left| \frac{\text{اختلاف مطلق}}{\text{مقدار مشاهده‌ای}} \right| * 100 \quad (11)$$

- انحراف معیار (MD):

$$MD = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [Q_o - Q_e] \quad (12)$$

Q_o : مقادیر مشاهده‌ای، Q_e : مقادیر برآوردی، n : تعداد نمونه.

- میانگین اختلاف (BIAS):

$$BIAS = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{E_o - E_e}{E_o} \quad (13)$$

E_o : مقادیر مشاهده‌ای، E_e : مقادیر برآوردی، n : تعداد نمونه.

- درصد خطای نسبی (RE):

$$RE = \left| \frac{Q_o - Q_e}{Q_e} \right| * 100 \quad (14)$$

Q_o : مقادیر مشاهده‌ای، Q_e : مقادیر برآوردی.

- میانگین مربع خطا (RMSE):

$$RMSE = \left| \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{(Q_o - Q_e)^2}{Q_o} \right|^{\frac{1}{2}} \quad (15)$$

Q_o : مقادیر مشاهده‌ای، Q_e : مقادیر برآوردی، n : تعداد نمونه.

t: درجه آزادی که معرف تعداد نمونه مورد نظر جهت برداشت برای هر تیمار منهای عدد یک می‌باشد، به عبارتی حداقل تعداد تکرار برای هر تیمار که بتوان آزمون‌های آماری مختلف و تجزیه و تحلیل‌های لازم بر روی آن انجام شود تعداد سه تکرار می‌باشد که درجه آزادی آن با لحاظ کردن تعداد تکرار منهای یک، عدد دو خواهد بود. E: خطای آماری (برای سطح ۰.۰۵، برابر ± 8 درصد) و S_x : انحراف معیار که با آماربرداری اولیه طی ۳ مرحله آزمون شبیه‌سازی باران برای هر بخش از جاده جنگلی به دست آمد. به طور کلی، در هر ۶۳ بازه تعیین شده در جاده‌های مورد نظر، با توجه به نتایج رابطه مورد استفاده و در نظر گرفتن انحراف معیار به دست آمده از آزمایش‌های اولیه میدانی برابر ۴۱ درصد، تعداد مناسب نمونه در این تحقیق، ۱۰۵ تکرار تعیین گردید. از این‌رو پس از استقرار و پیاده‌سازی باران‌ساز در قطعات مختلف در طول مسیر مورد مطالعه، عملیات شبیه‌سازی باران به مدت ۲۰ دقیقه با شدت $5/53$ میلی‌متر در ساعت بر روی تعداد ۱۰۵ پلات نمونه ۲ مترمربعی اجرا شد. رواناب و رسوب خروجی از قاب فلزی (قطعه نمونه)، در هر ۵ دقیقه توسط ظروف مدرج جمع‌آوری و به آزمایشگاه منتقل شد. در نهایت، مقدار بار رسوب و میزان فرسایش خاک محاسبه گردید [۱، ۵، ۸، ۱۹ و ۲۰].

۴.۳.۲. روش‌های آماری مورد استفاده برای مقایسه

و ارزیابی مدل‌ها

در این تحقیق، به منظور بررسی و ارزیابی نتایج و تعیین مدل مناسب، از آزمون t جفتی، خطای نسبی (RD)، انحراف معیار (MD)، میانگین اختلاف (BIAS)، درصد خطای نسبی (RE) و میانگین مربع خطا (RMSE) استفاده شد. در زیر به طور مختصر به هریک از این روش‌ها اشاره شده است.

- آزمون t جفتی:

رابطه کلی این آزمون به صورت زیر می‌باشد:

میزان فرسایش جاده برآورد و به دست می‌آید. از این رو در این تحقیق، به دلیل اینکه فقط رسوبدهی یا فرسایش جاده ملاک مطالعه بوده و به جابجایی و انتقال رسوب به آبراهه‌ها نپرداخته، در نتیجه SDR مورد بررسی قرار نگرفت. به بیان دیگر، مدل‌های مورد استفاده میزان تحویل رسوب به آبراهه‌ها و رودخانه‌ها را برآورد می‌کنند که با حذف فاکتور تحویل (SDR_{R-S})، میزان رسوب تولید شده از سطح جاده برابر همان فرسایش جاده که تنها بخشی از آن به آبراهه‌ها و رودخانه‌ها منتقل می‌شود، توسط مدل برآورد و پیش‌بینی می‌گردد. همچنین، بازه‌ها با شرایط و ویژگی‌های یکسان از لحاظ شیب، وجود و عدم وجود دیواره خاکبرداری، ارتفاع و پوشش دیواره خاکبرداری، شکل و پیکربندی، شبکه زهکشی و ... تقسیم‌بندی گردید و داده‌ها و اندازه‌گیری‌های مورد نیاز در مدل‌های WARSEM و SEDMODL برای هر بازه همگن به صورت جداگانه انجام و برداشت شد.

۳. نتایج

۳.۱. ویژگی‌های بارش شبیه‌سازی شده در این تحقیق

به منظور دستیابی به شرایط بارندگی موجود در منطقه و انجام عملیات شبیه‌سازی مطابق با بارندگی‌های غالب و طبیعی در منطقه مورد مطالعه از داده‌های بلندمدت بارندگی مربوط به ایستگاه هواشناسی دارابکلا واقع در داخل حوزه آبخیز دارابکلا بهره‌گیری شد.

مطابق با این داده‌ها، حداکثر شدت بارش مورد نظر با دوره بازگشت ۱۰۰ سال در تداوم تعیین شده (۲۰ دقیقه)، از مدل Ghahraman & Abkhezr, [۱۵] استخراج شد. با توجه به جدول شدت، مدت و تناوب بارندگی بدست آمده از مدل مذکور (جدول ۱۳ و شکل ۳)، طبق داده‌های هواشناسی ایستگاه دارابکلا، بارش با شدت ۵۳/۵ میلی‌متر در ساعت و تداوم ۲۰ دقیقه بر روی قاب گالوانیزه (پلات باران‌ساز) به ابعاد ۱۰۰ × ۲۰۰ سانتی‌متر (۲ متر مربع) اجرا شد و شبیه‌سازی انجام گردید (مدل پیشنهاد شده توسط Ghahraman & Abkhezr, [۱۵] متناسب

۳.۲. جمع‌آوری اطلاعات و برداشت میدانی داده‌ها

برای اجرای مدل‌های WARSEM و SEDMODL

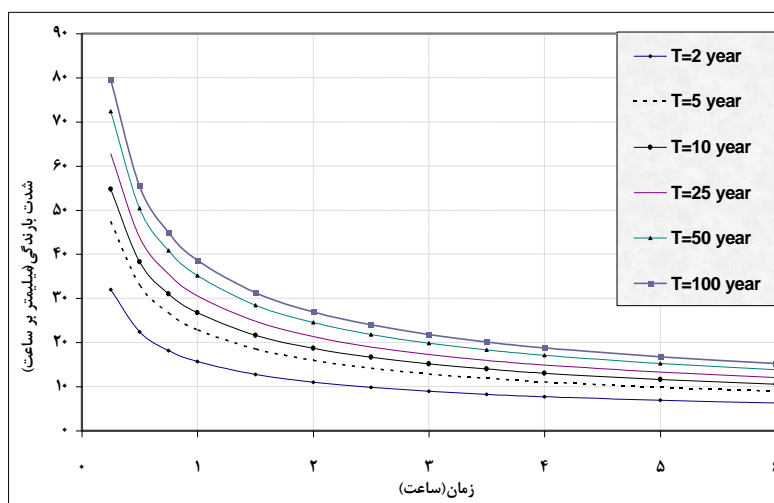
در این تحقیق، فاکتورهای طول و عرض هر بازه، عرض رودخانه و شیب طولی هر قسمت، ارتفاع و پوشش دیواره خاکبرداری، سطح جاده، شکل و پیکربندی هر بازه و سایر عوامل از قبیل تعیین مختصات کالورت‌ها و گالی‌ها در طول مسیر مورد مطالعه و ابتدا و انتهای هر بازه توسط GPS، از طریق اندازه‌گیری مستقیم و عملیات صحرائی تعیین و ثبت شد. فاکتورهای فرسایش و فاصله و نزدیکی به آبراهه (فاکتور تحویل) نیز از نقشه‌های پایه توپوگرافی، زمین‌شناسی، شبکه آبراهه و شبکه جاده با مقیاس ۱:۲۵۰۰۰ در محیط GIS استخراج گردید. همچنین، فاکتورهای وضعیت ترافیکی منطقه، میزان بارندگی سالیانه، مشخصات سطح و سن جاده از کتابچه طرح جنگل‌داری دارابکلا [۶] به دست آمد. لازم به توضیح است که برای تعیین دقیق فاکتور بارندگی، میزان بارندگی سالیانه برای هر بازه به صورت جداگانه با استفاده از Kriging در محیط GIS محاسبه و اعمال گردید و مقادیر مختلف فاکتور بارندگی برای هر قسمت مشخص، استخراج و در مدل لحاظ شد. همچنین، به منظور تعیین فاکتور تحویل برای هر قسمت، فاصله انتهای هر قسمت تا نزدیکترین آبراهه، از طریق آنالیز داده‌های DEM در محیط GIS محاسبه گردید [۱۱]، اما در این تحقیق، از این فاکتور یعنی فاکتور کاهنده تحویل رسوب به دلیل اینکه جزء اهداف تحقیق نبوده، صرف‌نظر گردید و در معادلات مدل‌های مورد نظر لحاظ نشد. زیرا در این تحقیق تنها به بررسی میزان رسوبدهی سطح جاده پرداخته شده است. قابل توضیح است که در مدل‌های برآورد فرسایش جاده‌ای، منظور از فاکتور تحویل رسوب همان SDR (نسبت تحویل رسوب) بوده که با لحاظ کردن آن در مدل، میزان تحویل و انتقال رسوب به آبراهه‌ها ناشی از فرسایش سطح جاده محاسبه می‌گردد و همان‌طور که در قبل‌تر به آن اشاره شد بدون در نظر گرفتن این فاکتور، میزان تولید رسوب جاده یا همان

است [۳۷]. در جدول (۱۴) برخی از خصوصیات بارش شبیه‌سازی شده توسط دستگاه باران‌ساز مذکور که مطابق با شرایط بارندگی‌های غالب در منطقه مورد مطالعه بوده، ارائه شده است.

با شرایط شمال کشور بوده و برای استفاده در شرایط آب و هوایی شمال ایران ارائه شده است). لازم به ذکر است که تاکنون در ایران مطالعه‌ای با استفاده از باران‌ساز صحرایی و سیار با ابعاد پلات ۲ متر مربع گزارش نشده

جدول ۱۳. نتایج حاصل از محاسبه مقادیر شدت بارش در دوره بازگشت‌های مختلف برای منطقه مورد مطالعه

تداوم بارش (دقیقه)	دوره بازگشت (سال)					
	۱۰۰	۵۰	۲۵	۱۰	۵	۲
۱۰	۷۸/۶	۷۲/۴	۶۲/۸	۵۴/۸	۴۷/۴	۳۲/۹
۲۰	۵۳/۵	۴۹/۴	۴۳/۸	۳۸/۳	۳۲/۹	۲۲/۴
۳۰	۴۴/۹	۴۰/۸	۳۵/۵	۳۱/۰	۲۶/۶	۱۸/۳
۴۰	۳۸/۶	۳۵/۲	۳۰/۶	۲۶/۷	۲۲/۹	۱۵/۷
۵۰	۳۴/۴	۳۱/۳	۲۷/۲	۲۳/۸	۲۰/۴	۱۴/۲
۶۰	۳۱/۳	۲۸/۵	۲۴/۸	۲۱/۷	۱۸/۵	۱۲/۷



شکل ۳. منحنی شدت، مدت و فراوانی بارندگی در دوره بازگشت‌های مختلف برای منطقه مورد مطالعه

جدول ۱۴. برخی از خصوصیات بارش شبیه‌سازی شده در این تحقیق

مقادیر اندازه‌گیری شده	متغیرهای بارش شبیه‌سازی شده
۵۳/۵	شدت بارش (میلی‌متر بر ساعت)
۲۰	تداوم بارش (دقیقه)
۲۶/۳۴	انرژی جنبشی بارش (ژول بر متر مربع بر میلی‌متر)
۹۱/۲۸	ضریب یکنواختی بارش (درصد)
۳	قطر قطرات (میلی‌متر)
۸	سرعت سقوط قطرات (متر بر ثانیه)

مورد مطالعه، داده‌های مورد نیاز در مدل‌های مذکور برداشت شد که مشخصات آماری این داده‌ها در جدول (۱۵) نشان داده شده است.

۲.۳. مشخصات آماری داده‌های برداشت شده طی عملیات صحرایی برای اجرای مدل‌های WARSEM و SEDMODL

در این تحقیق، طی انجام عملیات صحرایی در منطقه

جدول ۱۵. مشخصه‌های آماری برخی از داده‌های اندازه‌گیری شده طی عملیات صحرایی برای اجرای مدل‌های WARSEM و SEDMODL

ضریب تغییرات	انحراف معیار	میانگین	حداقل	حداکثر	فاکتور اندازه‌گیری شده
۰/۶۱	۱۱۶/۶۵	۱۹۰/۱۴	۲۶	۶۱۰	طول جاده (متر)
۰/۲۱	۱/۴۱	۶/۶۳	۴/۲۰	۱۱/۵	عرض جاده (متر)
۰/۵۴	۳/۰۲	۵/۶	۰/۰۹	۱۲/۲۴	شیب طولی جاده (٪)
۰/۴۹	۰/۳۷	۰/۷۴	۰/۳	۲/۴	عرض رودخانه (متر)
۰/۹۰	۳/۲۷	۳/۶۲	۰/۵	۱۵	ارتفاع دیواره خاکبرداری (متر)
۰/۱۰۴	۴۱/۶۳	۳۹/۹۲	۰	۹۵	پوشش دیواره خاکبرداری (٪)
۰/۷۱	۹۳۳/۵۰	۱۳۰۷/۸۷	۱۴۰/۴	۴۶۸۱/۸	سطح مشارکت جاده (متر مربع)

۴۲۰/۹ و ۳۴۱/۲ تن در سال به‌دست آمده است. مقادیر رسوب ویژه نیز به‌ترتیب ۹/۹۲، ۵/۱۱ و ۴/۱۴ کیلوگرم در مترمربع به‌دست آمده که مقادیر مذکور، دقت قابل قبول نتایج مدل SEDMODL در برآورد رسوبدهی جاده‌های جنگلی دارابکلا را نشان می‌دهد. لازم به ذکر است که مقادیر حاصل (جدول ۱۶)، مربوط به رسوبدهی سطح جاده بوده و اراضی کناره‌ای و دامنه‌ای اطراف جاده در نتایج لحاظ نشده است، زیرا پلات‌های شبیه‌سازی باران و اندازه‌گیری مستقیم میزان تولید رسوب با توجه به ساختار باران‌ساز مورد استفاده، تنها در سطح جاده پیاده شده و به اجرا درآمده است. که به این منظور، برای ارزیابی صحیح نتایج مدل‌های مورد استفاده که رسوبدهی ناشی از اراضی دامنه‌ای اطراف جاده را نیز مدنظر قرار می‌دهند و همچنین قیاس مناسب و درست داده‌های برآوردی با داده‌های مشاهده‌ای، فاکتورهای ارتفاع و پوشش دیواره خاکبرداری در هر دو مدل حذف و لحاظ نشده تا تأثیر و مشارکت این دیواره‌ها در رسوبدهی و خروجی مدل‌های مذکور به صفر برسد و نتایج برآورد

۳.۳. محاسبه و برآورد میزان رسوبدهی جاده‌ای توسط مدل‌های WARSEM، SEDMODL و شبیه‌سازی باران

پس از تهیه و جمع‌آوری تمامی داده‌ها و اطلاعات لازم، برای هر بازه به صورت جداگانه، مدل‌های WARSEM و SEDMODL اجرا و میزان رسوبدهی جاده‌های مورد نظر در هر مدل برآورد شد. علاوه بر آن، پس از انجام عملیات شبیه‌سازی باران و نمونه‌برداری در قطعات مختلف و انجام عملیات آزمایشگاهی، میزان تولید رسوب به صورت مستقیم در سطح جاده‌های جنگلی مورد مطالعه تعیین و اندازه‌گیری شد. نتایج کلی حاصل از بررسی‌های انجام شده در این تحقیق در جدول (۱۶) نشان داده شده است. طبق نتایج حاصل، متوسط رسوبدهی جاده برای مدل‌های WARSEM، SEDMODL و اندازه‌گیری مستقیم توسط شبیه‌ساز باران به‌ترتیب ۱۳/۳۱، ۶/۶۸ و ۵/۶۹ تن در سال و مقادیر کل رسوبدهی جاده‌های مورد مطالعه به‌ترتیب ۸۳۷/۶

شد تا در نهایت نتایج برآورد شده با نتایج اندازه‌گیری شده که هر دو مربوط به رسوبدهی سطح جاده می‌باشند بتوانند به درستی مورد بررسی و ارزیابی قرار گیرند.

شده توسط این مدل‌ها، فقط رسوب تولید شده از سطح جاده را نشان دهند. بدین صورت رسوبدهی اراضی کناره‌ای و دامنه‌ای اطراف از رسوبدهی سطح جاده جدا

جدول ۱۶. مقادیر رسوبدهی متوسط و کل در جاده‌های جنگلی منطقه مورد مطالعه

ابزار اندازه‌گیری	متوسط رسوبدهی جاده (تن در سال)	کل رسوبدهی جاده (تن در سال)	رسوب ویژه (کیلوگرم در متر مربع در سال)
SEDMODL	۶/۶۸۲	۴۲۰/۹۶۹	۵/۱۰۹
WARSEM	۱۳/۳۱۲	۸۳۷/۶۰۴	۹/۹۱۸
شبه‌ساز باران	۵/۶۸۷	۳۴۱/۱۹۳	۴/۱۴۱

(۱۷)، نتایج حاصل از سایر روش‌های آماری مورد استفاده شامل RD، MD، BIAS، RE و RMSE در جدول (۱۸) و عدم وجود اختلاف معنی‌دار بین نتایج مدل SEDMODL و مقادیر مشاهده‌ای طبق آزمون مقایسه میانگین‌ها (آزمون دانکن) در شکل‌های (۴) و (۵) نشان داده شده است.

۴.۳. تجزیه و تحلیل آماری نتایج مدل‌های WARSEM و SEDMODL با مقادیر مشاهده‌ای حاصل از شبه‌سازی باران

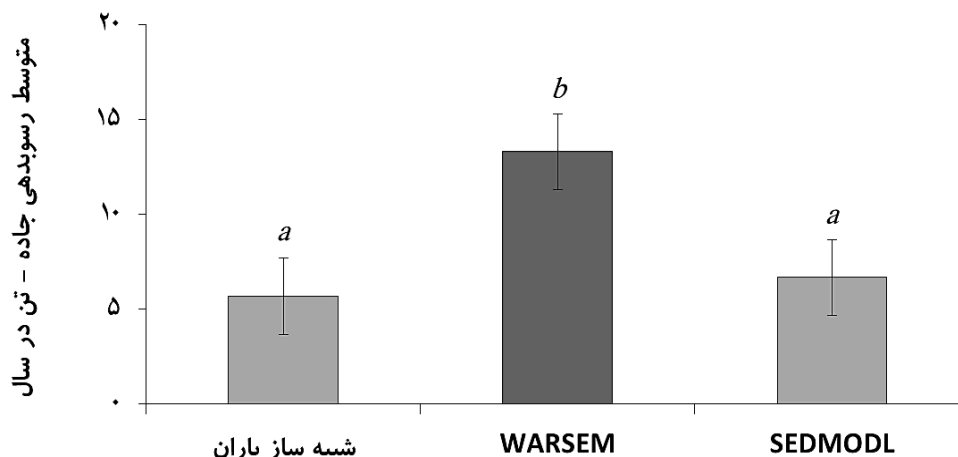
نتایج حاصل از روش‌های آماری مورد استفاده در این تحقیق برای مدل‌های مورد آزمون در جدولهای زیر ارائه شده است. نتایج حاصل از آزمون t جفتی در جدول

جدول ۱۷. نتایج آماری آزمون t جفتی برای مدل‌های مورد استفاده با داده‌های مشاهده‌ای در جاده‌های مورد مطالعه

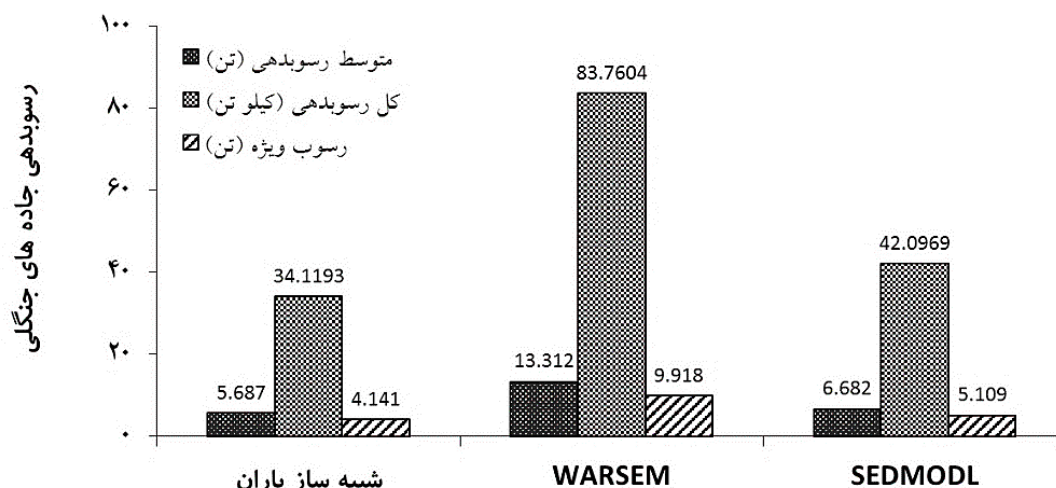
مدل‌های مورد آزمون	میانگین	انحراف معیار	اشتباه معیار اختلاف میانگین	درجه آزادی	فاصله اطمینان ۹۵٪		آماره t	سطح معنی‌دار
					حد پایین	حد بالا		
WARSEM	۱۶۹/۹۴	۲۸۲/۷۴	۱۶۳/۲۴	۴۰	-۵۳۲/۴۲	۸۷۲/۲۹	۱/۰۴۱	۰/۴۰۷
SEDMODL	۲۷/۲۵	۴۵/۴۹	۲۶/۲۷	۴۰	-۸۵/۷۶	۱۴۰/۲۶	۱/۰۳۷	۰/۴۰۹

جدول ۱۸. نتایج روش‌های آماری مختلف برای مدل‌های مورد استفاده با داده‌های مشاهده‌ای در جاده‌های مورد مطالعه

مدل‌های مورد آزمون	RD	MD	BIAS	RE	RMSE
WARSEM	۱۳۹/۶۹	۲۸/۳۲	۰/۲۳	۵۸/۲۶	۴/۴۸
SEDMODL	۲۱/۴۲	۴/۵۴	۰/۰۴	۱۷/۵۹	۰/۷۱



شکل ۴. متوسط رسوبدهی در جاده‌های جنگلی مورد مطالعه با استفاده از روش‌های مختلف



شکل ۵. مقادیر رسوبدهی متوسط، کل و ویژه در جاده‌های جنگلی مورد مطالعه طبق روش‌های مختلف

درصد خطای نسبی و میانگین مربعات خطا به ترتیب برابر ۲۱/۴۲، ۴/۵۴، ۰/۰۴، ۱۷/۵۹ و ۰/۷۱ مدل مناسب و قابل قبول برای بررسی مقوله فرسایش و هدررفت خاک در مقیاس جاده جنگلی در حوزه آخیز جنگلی دارابکلا می‌باشد که با یافته‌های (۱۷) که مدل SEDMODL را در بخش‌هایی دیگر از جاده‌های جنگلی درابکلا اجرا کرده بودند هم‌خوانی دارد. به‌طور کلی، با در نظر گرفتن جمیع جهات، کاملاً مشهود است که نتایج بدست آمده از مدل

۴. بحث و نتیجه‌گیری

تجزیه و تحلیل آماری نتایج به‌دست آمده از مدل‌های WARSEM و SEDMODL با مقادیر حاصل از اندازه‌گیری مستقیم تحت شبیه‌سازی باران نشان داد که اختلاف معنی‌داری بین داده‌های مشاهده‌ای حاصل از اندازه‌گیری مستقیم و نتایج مدل SEDMODL در سطح اعتماد ۹۵٪ وجود نداشته و مدل مذکور با حداقل مقادیر خطای نسبی، انحراف معیار، میانگین اختلاف،

جنگلی منطقه مورد مطالعه می‌باشد.

لازم به ذکر است که ساختار کلی هر دو مدل WARSEM و SEDMODL تقریباً مشابه بوده، اما تفاوت در خروجی و نتایج آنها می‌تواند به دلیل نحوه امتیازدهی مدل‌های مذکور برای فاکتورهای مختلف ورودی باشد. همچنین، با توجه به نتایج این تحقیق و یافته‌های تحقیق [۱۷]، Hosseini *et al.* می‌توان اینگونه اظهار داشت که مدل خارج منطقه‌ای SEDMODL با شرایط جنگل‌های شمال ایران مطابقت بیشتری داشته و میزان رسوبدهی برآورد شده توسط آن به واقعیت نزدیک‌تر است.

از کاربردهای این تحقیق، با توجه به زمان‌بر و هزینه‌بر بودن مطالعه و بررسی رسوبدهی جاده‌های جنگلی با استفاده از ابزار اندازه‌گیری مستقیم نظیر دستگاه باران‌ساز، می‌توان به اجرا و ارزیابی کردن مدل‌های خاص برآورد رسوبدهی جاده‌ای و در نهایت توصیه و پیشنهاد مدل مناسب‌تر از نظر دقت و کارایی در مناطق با شرایط مشابه اشاره کرد. از این‌رو می‌توان با توجه به یافته‌های این تحقیق، به‌منظور بررسی مقوله فرسایش جاده‌ای در جاده‌های جنگلی دارابکلا و سایر جنگل‌های شمال کشور با شرایط اقلیمی و ویژگی‌های ژئومورفولوژیکی و زمین‌ساختی مشابه، استفاده و اجرای مدل SEDMODL را پیشنهاد کرد.

SEDMODL، نتایجی قابل قبول و نزدیک به واقعیت می‌باشد، از این‌رو می‌توان اظهار داشت که مدل SEDMODL به‌منظور برآورد رسوبدهی در مقیاس جاده، از دقت و کارایی بیشتری نسبت به مدل WARSEM در منطقه مورد مطالعه برخوردار می‌باشد.

همان‌گونه که از نتایج این تحقیق مشخص است، مقادیر متوسط، کل و ویژه رسوبدهی برای مدل‌های مورد استفاده و اندازه‌گیری مستقیم، بیانگر بیش‌تخمینی مدل WARSEM نسبت به داده‌های مشاهده‌ای بوده، که با نتایج (۳۸) مبنی بر بیش‌تخمینی مدل WARSEM نسبت به داده‌های مشاهده‌ای مطابقت دارد. همچنین، نتایج آزمون دانکن (شکل ۴) حکایت از وجود اختلاف معنی‌دار بین نتایج حاصل از اندازه‌گیری مستقیم و نتایج مدل WARSEM دارد. در حالی‌که در مدل SEDMODL با توجه به اینکه نظیر مدل WARSEM دارای اندکی بیش‌تخمینی بوده اما مقادیر برآورد شده توسط آن بسیار نزدیک‌تر به داده‌های مشاهده‌ای بوده و طبق آزمون دانکن نیز اختلاف معنی‌داری با نتایج اندازه‌گیری مستقیم نداشته است. همچنین، با توجه به نتایج موجود (جدول ۱۶)، مقادیر برآورد شده توسط مدل WARSEM تقریباً بیش از دو برابر مقادیر مشاهده‌ای بوده و دارای اختلاف زیادی با داده‌های مشاهده‌ای می‌باشد که نشانگر دقت و کارایی کم مدل در جاده‌های

References

- [1] Arnaez, J., Larreab, V. and Ortigosaa, L. (2004). Surface runoff and soil erosion on unpaved forest roads from rainfall simulation tests in northeastern Spain. *Catena*, 57: 1-14.
- [2] Akay, A.E. and Sessions, J. (2005). Applying the decision support system, TRACER, to forest road design. *West J. of Appl. Forestry*, 20(3): 184-191.
- [3] Akay, A.E., Erdas, O., Reis, M. and Yuksel, A. (2007). Estimating sediment yield from a forest road network by using a sediment prediction model and GIS techniques. *Building and Environment*, 43: 687-695.
- [4] Boise Cascade Corporation, (1999). SEDMODL-Boise Cascade road erosion delivery model. Technical documentation. 19 pp.
- [5] Cerdà, A. (2007). Soil water erosion on road embankments in eastern Spain. *Science of the Total Environment*, 378: 151-155.
- [6] Darabkola forest management plan handbook, (2003). The natural resources general office of Mazandaran province. Department of Forests and Rangelands. 325 pp. (In Persian)
- [7] Dube', K., Megahan, W. and Mccalmon, M. (2004). Washington Road Surface Erosion Model (WARSEM) Manual. Department of Natural Resources, State of Washington.
- [8] Engel, F.L., Bertol, I., Ritter, S.R., Paz-Gonzalez, A., Paz-Ferreiro, J. and Vidal-Vazquez, E. (2009). Soil erosion under simulated rainfall in relation to phonological stages of soybeans and tillage methods in Lages, SC, Brazil. *Soil and Tillage Research*, 103: 216-221.
- [9] Foltz, R.B. and Burroughs, E.R. (1990). Sediment production from forest roads with wheel ruts. In: Proceedings of a symposium on watershed planning and analysis, July 9-11, 1989, *Durango CO. ASCE*, pp. 266-275.
- [10] Foltz, R.B. (1999). Traffic and no-traffic on an aggregate surfaced road: sediment production-differences, paper presented at Seminar on environmentally sound forest roads and wood transport. Rome, Italy: *Food and Agric. Organ*, pp. 195-204.
- [11] Fu, B., Newham, L.T.H. and Field, J.B. (2009). Modelling erosion and sediment delivery from unsealed roads in southeast Australia. *Mathematics and Computers in Simulation*, 79: 2679-2688.
- [12] Fu, B., Newham, L.T.H. and Ramos-Scharro'n, C.E. (2010). A review of surface erosion and sediment delivery models for unsealed roads. *Environmental Modeling & Software*, 25: 1-14.
- [13] Goldman, S.J., Jackson, K. and Bursztynsky, T.A. (1986). *Erosion and Sediment Control Handbook*. McGraw Hill: New York.
- [14] Grace, J.M. (2002). Control of sediment export from the forest road prism. *ASAE Annu. Meeting*, 45(4): 1-6.
- [15] Ghahraman, B. and Abkhezr, H.R. (2004). Correction of the rainfall intensity-duration-frequency equations in Iran. *Journal of Sciences and Technical of Esfahan Agriculture and Natural Resources*, 8(2): 1-13. (In Persian)
- [16] Haupt, H.F. (1959). Road and Slope Characteristics Affecting Sediment Movement from Logging Roads. *Journal of Forestry*, 57: 329-332.
- [17] Hosseini, S.A., Omidvar, E., Naghavi, H. and Parsakhoo, A. (2012). Estimation of Sediment Yield from Forest Roads Using SEDMODL. *J. of Wood & Forest Science and Technology*, 19(1): 23-41. (In Persian)
- [18] Jaarsma, F.C. (1994). Rural low-traffic roads (LTRs): the challenge for improvement of traffic safety for all road users. In: Proceedings of the 27th ISATA, *dedicated conference on road and vehicle safety, Aachen, Germany*, pp. 177-183.
- [19] Jordán-López, A. and Martínez-Zavala, L. (2008). Soil loss and runoff rates on unpaved forest roads in southern Spain after simulated rainfall. *Forest Ecology and Management*, 255: 913-919.
- [20] Jordán-López, A., Martínez-Zavala, L. and Bellinfante, N. (2009). Impact of different parts of unpaved forest roads on runoff and sediment yield in a Mediterranean area. *Journal of Science of the Total Environment*, 407: 937-944.
- [21] Ketcheson, G.L. and Megahan, W.F. (1996). Sediment production and downslope sediment transport from forest roads in granitic watersheds. US Department of Agriculture, Forest Service, *Intermountain Research Station*, 11 pp.

- [22] Ketcheson, G.L., Megahan, W.F. and King, J.G. (1999). "R1-R4" and "BOISED" Sediment Prediction Model Tests using Forest Roads in Granitics. *Journal of the American Water Resources Association*, 35(1): 83-98.
- [23] Khorami, R. (2004). *Investigation of Landsat ETM⁺ satellite data ability in estimate of beech pile volume (Case study: Sangdeh forest)*. M.Sc thesis. Tehran University. 80 pp. (In Persian)
- [24] Luce, C.H. and Black, T.A. (1999a). Sediment production from forest roads in western Oregon. *Water Resour. Res.*, 35(8): 2561-2570.
- [25] Luce, C.H. and Black, T.A. (1999b). Spatial and Temporal Patterns in Erosion from Forest Roads. In: M.S. Wigmosta and S.J. Burges, eds. *The Influence of Land Use on the Hydrologic-Geomorphic Responses of Watersheds*, AGU Monographs.
- [26] Megahan, W.F., Wilson, M.D. and Monsen, S.B. (2001). Erosion on steep, granitic roadcuts in Idaho. *Earth Surface Processes and Landforms*, 26(2): 153-163.
- [27] Mohamadi, J. (2007). *Investigation of the possibility of estimation of some quantitative characteristics to submit spacial models using satellite data of Landsat TM*. M.Sc thesis. Gorgan Agricultural Sciences and Natural Resources University. 99 pp. (In Persian)
- [28] Parsakhoo, A., Lotfalian, M., Kavian, A., Hosseini, S.A. and Demir, M. (2011). Prediction of the soil erosion risk in a forest and sediment yield from road network through GIS and SEDMODL. *International Journal of Sediment Research*, Code No. 1131.
- [29] Parsakhoo, A. (2012). *Investigation of the runoff and soil loss rate of different segments of forest road structure using rainfall simulation*. Ph.D thesis. Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University. Faculty of Natural Resources. 169 pp. (In Persian)
- [30] Parsakhoo, A., Lotfalian, M., Kavian, A., Hosseini, S.A. and Demir, M. (2012). Calibration of a portable single nozzle rainfall simulator for soil erodibility study in hyrcanian forests. *African Journal of Agricultural Research*, 7(27): 3957-3963.
- [31] Reid, L.M. (1981). *Sediment production from gravel-surfaced forest roads, clearwater basin, Washington*. M.Sc thesis. University of Washington. 247 pp.
- [32] Reid, L.M. and Dunne, T. (1984). Sediment production from forest road surfaces. *Water Resources*, 20(11): 1753-1761.
- [33] Reinig, L., Beveridge, R.L., Potyondy, J.P. and Hernandez, F.M. (1991). BOISED user's guide and program documentation. *USDA Forest Service*, Boise National Forest. 12 pp.
- [34] Sullivan, K.O. and Duncan, S.H. (1980). Sediment Yield from Road Surfaces in Response to Truck Traffic and Rainfall. Weyerhaeuser Technical Report 042-4402.80.
- [35] Swift, L.W.Jr. (1984). Gravel and Grass Surfacing Reduces Soil Loss from Mountain Roads. *Forestry Sciences*, 30: 657-670.
- [36] Soltani, F. (2007). *Evaluation of the effects of forest harvesting on recreation (Case study: Dolonak district in Guilan province)*. M.Sc thesis. Mazandaran University. Faculty of Natural Resources. 71 pp. (In Persian)
- [37] Safari, A. (2013). *Measurement of runoff and soil loss in the Darabkola forest roads*. M.Sc thesis. Department of watershed management engineering. Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University. Faculty of Natural Resources. 97 pp. (In Persian)
- [38] Safari, A., Kavian, A. and Parsakhoo, A. (2013). Investigation and estimation of the sediment delivery and transmit to streams and rivers via forest roads of Darabkola. *J. of Soil Management and Sustainable*, (In press).
- [39] Vincent, K.R. (1985). *Runoff and Erosion from a Logging Road in Response to Snowmelt and Rainfall*. Unpublished Master's thesis, University of California Berkley.
- [40] WDNR, (1995). Standard methodology for conducting watershed analysis, Version 3.0. Washington Forest Practices Board.
- [41] WDNR, (1997). Standard Methodology for Conducting Watershed Analysis, Version 4.0. Washington Forest Practices Board.
- [42] Yousefi, S. (2011). *Effects of geomorphological factors on degradation area resulted from forest road construction*. M.Sc thesis. Tarbiat Modares University. Faculty of Natural Resources and Marin Sciences. 63 pp. (In Persian).