

بررسی مقدار فرسایش و نسبت تحویل رسوب در جاده‌های خاکی و جنگلی

قربان وهاب‌زاده^۱، عطا صفری^{۲*}، محمدحسین فرهودی^۲، حمیدرضا عبدالمهی^۲،

حسن فتحی‌زاد^۳ و غلامرضا خسروی^۴

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۱/۷/۱۸؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۲/۷/۶)

چکیده

در این تحقیق، میزان تولید و تحویل رسوب توسط جاده‌های جنگلی دارابکلا با استفاده از مدل SEDMODL برآورد گردیده و سپس به منظور ارزیابی نتایج مدل، به صورت مستقیم میزان رسوب‌دهی در جاده‌های مذکور با استفاده از شبیه‌ساز باران اندازه‌گیری گردید. برای ارزیابی نتایج از آزمون t جفتی، RE، BIAS و RMSE استفاده شد. نتایج نشان داد که میزان تولید رسوب از سطح جاده‌های مورد مطالعه طبق مدل SEDMODL و اندازه‌گیری مستقیم تحت شبیه‌سازی باران به ترتیب ۴۲۰/۹۷ و ۳۴۱/۱۹ تن در سال و میزان تحویل رسوب به آبراهه‌ها با نسبت تحویل رسوب به ترتیب معادل ۰/۴۲ و ۵۱٪، حدود ۱۷۷/۵۸ و ۱۷۴/۰۲ تن در سال می‌باشد. هم‌چنین، نتایج روش‌های آماری RE، BIAS و RMSE برای مدل مذکور به ترتیب ۰/۰۴، ۱۷/۵۹ و ۰/۷۱ بوده و اختلاف معنی‌داری در سطح اطمینان ۹۵٪ بین داده‌های مشاهده‌ای و برآوردی مشاهده نگردید. لذا مدل مذکور دقت و کارایی مناسب جهت برآورد میزان رسوب‌دهی جاده‌های جنگلی دارابکلا را دارا می‌باشد. با بررسی فاکتورهای مؤثر در تولید و انتقال رسوب براساس مقدار عددی امتیازات هر فاکتور در حین اجرای مدل مشخص گردید که در بین عوامل ورودی مدل، فاکتورهای شیب طولی جاده، بارندگی و تحویل رسوب به ترتیب تأثیرگذارترین عوامل در تولید و انتقال رسوب می‌باشند.

واژه‌های کلیدی: شبیه‌ساز باران، جاده‌های جنگلی، رسوب‌دهی، دارابکلا، SEDMODL

۱. دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری

۲. گروه آب‌خیزداری، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری

۳. گروه بیابان‌زدایی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ایلام

۴. گروه آب‌خیزداری، دانشگاه هرمزگان

*: مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: Attasafari@yahoo.com

مقدمه

سالیانه حدود ۸۰۰ هزار مترمکعب چوب، از عرصه‌های جنگلی شمال کشور برداشت می‌شود (۳) که این امر مستلزم احداث و ساخت جاده‌هایی در میان این جنگل‌ها جهت حمل، نقل و خروج مقطوعات می‌باشد. با احداث و استفاده از جاده‌های جنگلی به پوشش گیاهی مستقر در محدوده عملیات ساختمانی جاده (عرض جاده، شیروانی‌های خاک‌برداری و خاک‌ریزی) آسیب فراوانی وارد شده و عرصه در معرض فرسایش قرار می‌گیرد (۱۳). مطالعات نشان داده است که جاده‌های جنگلی یکی از منابع اصلی انتقال رسوب به رودخانه‌ها می‌باشند (۱۵). افزایش میزان رسوب ورودی به رودخانه‌ها باعث ایجاد خسارات جبران‌ناپذیری به کیفیت آب، اکوسیستم و موجودات آبی می‌شود. بنابراین متخصصان جاده‌سازی نه تنها باید به هزینه‌های ساخت جاده بلکه به خسارات زیست محیطی ناشی از آن نیز باید توجه داشته باشند (۱۹). لذا کنترل بار رسوبی ورودی به منابع آبی یکی از مهم‌ترین موضوعات مورد بررسی در مدیریت کیفیت آب است (۴). 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 (۲۸ و ۲۹). امروزه به‌منظور تجزیه و تحلیل طرح سیستم زهکشی عرضی و کاستن از حجم انتقال رسوب حاصل از جاده‌های جنگلی به رودخانه، نرم‌افزارها و مدل‌های مختلفی طراحی شده‌است (۹).

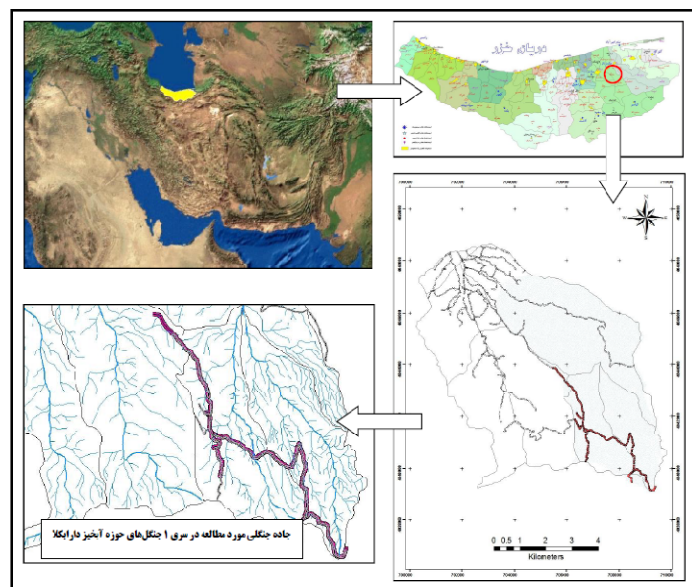
مدل SEDMODL یک برنامه مدل‌سازی مبتنی بر GIS است که توسط شرکتی در شهر بیز واقع در ایالت آیداهو آمریکا و با همکاری انجمن ملی بهسازی هوا و رودخانه توسعه پیدا کرد. این مدل قسمت‌هایی از یک جاده با پتانسیل رسوب‌دهی بالا را در سطح یک حوزه آبخیز مشخص می‌کند. وضعیت دوری و نزدیکی جاده‌ها به شبکه رودخانه در این مدل، توسط داده‌های مکانی سنجیده می‌شود (۱۰). فرسیت و همکاران (۲۴)، در

جنگل‌کاری‌های سوزنی‌برگ استرالیا و در شرایط بارندگی طبیعی، مقدار کل رسوب تولیدی توسط جاده‌شن‌ریزی شده را طی یک دوره دو ساله، ۵/۷ تن در کیلومتر و برای جاده فاقد شن‌ریزی ۳/۹ تن در کیلومتر برآورد کردند. ریجسدیجک و همکاران (۳۹)، مقدار رسوب حاصل از جاده‌های روستایی، راه‌های مالرو و مناطق مسکونی حوزه آبخیز کنتو در شرق جاوه اندونزی را به‌ترتیب ۱/۹، ۲/۵ و ۲/۴ کیلوگرم در مترمربع در سال به‌دست آوردند. آکای و همکاران (۱۱)، مدل‌هایی را براساس روابط تجربی میان فاکتورهای محرک فرسایش تحت عنوان SEDMODL برای حوزه آبخیز جنگلی باسکنوس واقع در غرب شهر کهرمنمرس ترکیه طراحی کردند که امکان محاسبه حجم سالانه رسوب حاصل از شبکه جاده‌های جنگلی را به کمک تکنیک‌های GIS فراهم نمود. دراین تحقیق مقدار رسوب حاصل از جاده‌های جنگلی درجه دو با روسازی شنی، طول ۸۹۳/۵ متر، عرض ۵ متر و شیب طولی ۱۴ درصد، ۰/۸۳۹ کیلوگرم در مترمربع در سال به‌دست آمد. فو و همکاران (۲۶)، در حوزه‌های آبخیز مورویا-دوا و توروس در استرالیا یکی از مدل‌های خاص فرسایش جاده‌ای تحت عنوان WARSEM را به‌کار بردند، نتایج نشان داد که تولید رسوب برآورد شده در حوزه‌های آبخیز مذکور، به‌ترتیب ۳۵ و ۲۱ هزار تن در کیلومترمربع در سال و تحویل رسوب به رودخانه نیز به‌ترتیب ۶ و ۹ درصد بوده‌است. جوردن‌لوپز و همکاران (۳۱)، تأثیر بخش‌های مختلف جاده‌های جنگلی را در میزان فرسایش و تولید رسوب در مناطق مدیترانه‌ای با استفاده از شبیه‌ساز باران بررسی کردند و به‌این نتیجه رسیدند که کناره‌های جاده می‌تواند منبع اصلی رسوبات در بخش‌های مورد مطالعه باشد. اگان (۲۰)، در مطالعه‌ای در آمریکا علت بسیاری از رانش‌های اطراف جاده‌ها را به مشکلات موجود در زهکشی جاده مربوط دانست و بیان نمود که با احداث جاده، فرسایش افزایش می‌یابد. هم‌چنین، نتایج حاصل نشان داد که مقدار رسوب ناشی از جاده، با پوشش گیاهی، درصد شیب، طول شیب و شیوه حفاظت از خاک دارای رابطه معنی‌داری است. لوس و بلک

مدل SEDMODL را به کار برده و میزان تولید رسوب در این جاده‌ها را ۷۷/۵۱۴ تن در سال به دست آوردند. هم‌چنین، آنها اظهار داشتند که نتایج به دست آمده از این مدل با یک عدم قطعیت همراه بوده، بنابراین باید مقادیر فرسایش به دست آمده از این مدل با مشاهدات واقعی در طبیعت مقایسه و ارزیابی انجام گردد که برای ارزیابی این مدل، لازم است تحت شرایط کنترل شده و با استفاده از دستگاه شبیه‌ساز باران، میزان فرسایش و رسوب در واحد سطح برای بخش‌های مختلف ساختمان جاده جنگلی محاسبه گردد و سپس با مقدار به دست آمده از مدل مورد مقایسه قرار گیرد. پارساخو (۱)، به بررسی هدررفت خاک و رواناب در بخش‌های مختلف ساختمان جاده جنگلی با استفاده از شبیه‌ساز باران پرداخت. نتایج نشان داد که بخش‌های شیروانی خاک‌برداری و سطح جاده به ترتیب مهم‌ترین منابع تولید رسوب و رواناب بوده و فرسایش‌پذیری خاک در سطح جاده به ترتیب ۲/۳ و ۱/۳ برابر بیشتر از بخش‌های خاکریزی و خاک‌برداری جاده می‌باشد. هدف از این تحقیق، بررسی معضل فرسایش در مقیاس جاده و به خصوص بحث تولید و انتقال رسوب در جاده‌های جنگلی بوده که بدین منظور، پس از تعیین تعداد ۶۳ بازه و مقطع با ویژگی‌ها و شرایط مشابه و همگن در مسیری به طول ۱۱/۹۷۹ کیلومتر از جاده‌های جنگلی حوزه آبخیز دارابکلا، اقدام به برداشت میدانی داده‌ها و پارامترهای لازم در مدل SEDMODL از قبیل طول جاده، عرض جاده، ارتفاع و پوشش شیروانی جاده، شیب طولی جاده، شکل و پیکربندی جاده، سطح جاده و غیره نموده و با بهره‌گیری از مدل مذکور، میزان فرسایش و تحویل رسوب توسط این جاده‌ها محاسبه و برآورد گردید. سپس به منظور بررسی و ارزیابی نتایج مدل مذکور، با استفاده از دستگاه شبیه‌ساز باران، میزان رسوب‌دهی جاده‌های مورد مطالعه به صورت مستقیم اندازه‌گیری گردید و در نهایت نتایج حاصل با یکدیگر مقایسه و به ارزیابی دقت و کارایی نتایج مدل مورد استفاده پرداخته شد.

(۳۳)، در مطالعه‌ای در غرب آمریکا روی میزان رسوب تولیدی از جاده‌های جنگلی بیان نمودند که مقدار رسوب‌دهی جاده با توان دوم شیب جاده رابطه مستقیم دارد.

سایدل و همکاران (۴۰)، در تحقیقات خود در جنگل‌های حاره‌ای مالزی نشان دادند که جاده‌های جنگلی با شیب زیاد (بیشتر از ۲۰ درصد) دارای نرخ فرسایش‌پذیری بالاتری نسبت به جاده‌های جنگلی با شیب ملایم هستند. آرنائز و همکاران (۸)، در تحقیقات خود در جنگل‌های شمال‌شرقی اسپانیا رواناب سطحی و فرسایش خاک را در جاده‌های خاکی جنگلی با استفاده از شبیه‌ساز باران بررسی کردند و به این نتیجه رسیدند که شیب، تراکم پوشش گیاهی، پوشش سنگی دامنه خاک‌برداری و بستر جاده تأثیر معنی‌داری در رواناب و فرسایش خاک دارد. راموس اسچارون و مک‌دونالد (۳۸)، به ارزیابی و اندازه‌گیری رسوب حاصل از جاده‌های شن‌ریزی نشده در ایسلند پرداختند و به این نتیجه رسیدند که جاده‌ها قادر به افزایش میزان تولید رسوب در مناطق کوهستانی به میزان ۴ برابر مناطق کنترل است. دلیل افزایش میزان رسوب، کاهش تخلخل، نفوذپذیری و به دنبال آن افزایش رواناب بود. فولتز و همکاران (۲۵)، به منظور تعیین میزان رواناب، نفوذ، فرسایش و غلظت رسوب در دو جاده جنگلی دارای عبور و مرور زیاد و کم در شمال آمریکا، از شبیه‌ساز باران استفاده کردند. نتایج حاکی از آن بود که میزان رواناب و غلظت رسوب در جاده‌های جنگلی دارای عبور و مرور زیاد، به دلیل کاهش پوشش گیاهی و تغییر در خصوصیات فیزیکی خاک بیشتر می‌باشد. کارلوس و راموس (۱۷)، در منطقه خشک جنوب‌غربی پورتوریکو به مطالعه تولید رسوب ناشی از جاده‌های خاکی پرداختند و به این نتیجه رسیدند که رسوب‌دهی در جاده‌های خاکی ۱۵ تا ۵۰ برابر بیشتر از مناطق فاقد جاده است و مقدار رسوب تولیدی در جاده با مقدار شیب و طول شیب دارای رابطه معنی‌داری است. حسینی و همکاران (۲)، در مسیری به طول ۲۲۶۰ متر از جاده‌های جنگلی پارس‌های ۲۶، ۲۷ و ۳۳ دارابکلا،



شکل ۱. موقعیت منطقه مورد مطالعه در ایران و استان

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

مطالعه حاضر، در حوزه آبخیز جنگلی دارابکلا واقع در شهرستان نکا در استان مازندران، در محدوده جغرافیایی $36^{\circ} 28' 00''$ تا $36^{\circ} 33' 00''$ عرض شمالی و $53^{\circ} 31' 00''$ تا $53^{\circ} 20' 00''$ طول شرقی انجام پذیرفت. متوسط بارندگی سالانه این منطقه $730/8$ میلی‌متر و میانگین دمای سالانه $16/1$ درجه سانتی‌گراد می‌باشد. اقلیم منطقه مورد مطالعه براساس روش‌های دومارتن و آمبرژه از نوع مرطوب معتدل تا نیمه‌مرطوب بوده و دارای حداکثر بارش 24 ساعته معادل $55/2$ میلی‌متر می‌باشد. همچنین، حداکثر و حداقل دما در این منطقه به ترتیب $23/3$ و $3/3$ درجه سانتی‌گراد می‌باشد. تراکم جاده در هر هکتار 9 متر و از نوع درجه 1 جنگلی و انشعابات داخلی آن عمدتاً از نوع درجه 2 و 3 جنگلی می‌باشد. طول جاده‌های جنگلی تحت بررسی در این تحقیق، $11/979$ کیلومتر و عمدتاً از نوع درجه 2 بوده و وضعیت تردد و ترافیک در این مسیر سبک و در بعضی موارد نسبتاً سبک می‌باشد (شکل ۱).

مدل پیش‌بینی رسوب جاده 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. بنابراین میزان کل انتقال رسوب توسط جاده از رابطه 1 محاسبه می‌گردد (۲ و ۱۴)

$$E = (T_s + C_s) \times A_f \quad [1]$$

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.

جهت محاسبه T_s از رابطه 2 استفاده می‌گردد (۲ و ۱۴):

$$T_s = L_r \times W_r \times GE_r \times S_f \times T_f \times G_f \times P_f \times D_f \quad [2]$$

L_r : طول جاده، W_r : عرض جاده، GE_r : میزان فرسایش

جدول ۱. میزان فرسایش با توجه به وضعیت زمین‌شناسی و سنگ‌شناسی (تن در هکتار در سال) (۳۲)

سنگ شناسی	سن زمین شناسی تشکیلات				
	کواترنری	ترشیاری	مزوزوئیک	پالئوزوئیک	پرکامبرین
متامرفیک	-	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. مقادیر فاکتور سطح جاده

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

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 (۱۲ و ۲۲). مقادیر فاکتور سطح جاده در جدول ۲ نشان داده شده‌است.

فاکتور ترافیک (T_f)

میزان رسوب‌دهی سطح جاده‌های جنگلی به نوع کاربری جاده بستگی دارد (۲۱ و ۳۵). در مدل SEDMODL با توجه به بار ترافیکی و میزان تردد وسایل نقلیه در جاده‌های مختلف، امتیازاتی در نظر گرفته شده که با توجه به نوع جاده مورد مطالعه می‌توان با

زمین‌شناسی، 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. جهت محاسبه C_s از رابطه ۳ استفاده می‌گردد (۲، ۱۴ و ۳۳):

$$C_s = G_{E_f} \times C_{S_f} \times C_{S_h} \times L_r \times D_f \quad [3]$$

G_{E_f} : میزان فرسایش زمین‌شناسی، C_{S_f} : فاکتور پوشش دیواره خاک‌برداری، C_{S_h} : ارتفاع دیواره خاک‌برداری، L_r : طول جاده و D_f : فاکتور انتقال رسوب.

فاکتورها و ورودی‌های مدل SEDMODL

فاکتور فرسایش زمین‌شناسی (G_{E_f})

میزان تولید رسوب در جاده‌های جنگلی وابستگی زیادی به وضعیت زمین‌شناسی و خاک‌شناسی منطقه دارد. میزان تولید

جدول ۳. میزان فاکتور ترافیک برای جاده‌های مختلف

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. میزان فاکتور شیب برای شیب‌های مختلف جاده جنگلی

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

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

استفاده از جدول مربوط به آن، مقادیر امتیاز فاکتور ترافیک را تعیین و در مدل لحاظ نمود. در جدول ۳ مقادیر فاکتور ترافیک مورد استفاده در مدل SEDMODL ارائه گردیده است.

فاکتور شیب جاده (G_f)

شیب یکی از عوامل مؤثر در میزان رسوب‌دهی جاده‌های جنگلی است. جهت برآورد میزان فاکتور شیب از جدول ۴ استفاده می‌شود (۳۷).

فاکتور بارندگی (P_f)

میزان تولید رسوب جاده‌های جنگلی تحت تأثیر بارندگی محل قرار دارد. فاکتور بارندگی برای SEDMODL را می‌توان با توجه به میانگین بارندگی سالانه به میلی‌متر و از رابطه ۴ محاسبه نمود (۳۶):

$$P_f = \left(\frac{P_{avr}}{1524} \right)^{1/4} \quad [4]$$

P_{avr} : میانگین بارندگی سالانه برحسب 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

کاسته می‌شود. هنگامی که جاده مستقیماً 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 (۴۱). بنابراین فاکتور انتقال رسوب برای جاده‌های موجود در این فاصله نسبت به آبراهه، در همه جای حوزه صفر می‌باشد. به عبارتی، در هر نقطه از حوزه یا منطقه مورد مطالعه که این فاصله (بیش از ۶۰ متر) بین جاده و نزدیک‌ترین آبراهه به آن برقرار باشد، تحویل رسوب از سطح جاده به آبراهه صفر در نظر گرفته شده و مقدار فاکتور انتقال رسوب به صورت صفر در مدل لحاظ می‌گردد.

فاکتور ارتفاع دیواره خاکبرداری (CS_h)

افزایش ارتفاع دیواره خاکبرداری منجر به تشدید خزش خاک، فرسایش ورقه‌ای و لغزش‌شده و در نتیجه سبب بالارفتن میزان انتقال رسوب از دیواره به زهکش می‌گردد. در مطالعات انجام گرفته، میانگین ارتفاع دیواره خاکبرداری برای کلاس‌های شیب ۱۵-۰٪، ۳۰-۱۵٪، ۶۰-۳۰٪ و بالای ۶۰٪ به ترتیب ۰/۷۵، ۱/۵، ۳ و ۷/۵ متر برآورد شده است (۳۳).

است که مقادیر بارندگی بازه‌های مختلف، تفاوت و اختلافی غیرمحسوس و بسیار ناچیز داشته و فقط به منظور افزایش دقت در اجرای مدل از عملیات Kriging استفاده گردید. هم‌چنین، به منظور تعیین فاکتور تحویل برای هر بازه، فاصله انتهایی هر بازه تا نزدیک‌ترین آبراهه، از طریق آنالیز داده‌های DEM در محیط GIS محاسبه گردید (۲۶).

اندازه‌گیری مستقیم رسوب‌دهی با استفاده از شبیه‌سازی باران در جاده‌های جنگلی مورد مطالعه

استفاده از باران‌ساز سیار جهت مطالعات صحرایی به‌ویژه مطالعه روی عوارض مصنوعی مانند جاده‌های جنگلی که انتقال بخش‌های مختلف آن به آزمایشگاه غیرممکن است، ضروری به نظر می‌رسد (۵). در تحقیق حاضر، باران‌ساز با ارتفاع ۳ متر که در گروه باران‌سازهای بزرگ تحقیقاتی قرار می‌گیرد، مورد استفاده واقع شده است. 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 بلند مدت بارندگی (آمار ۳۱ ساله) مربوط به ایستگاه هواشناسی دارابکلا واقع در داخل حوزه آبخیز دارابکلا بهره‌گیری شد. مطابق با این داده‌ها، حداکثر شدت بارش مورد نظر در تداوم تعیین شده، از مدل قهرمان و آبخضر (۶) استخراج گردید. با توجه به نتایج به‌دست آمده از مدل مذکور طبق داده‌های هواشناسی ایستگاه دارابکلا، بارش با شدت ۵۴ میلی‌متر در ساعت و تداوم ۲۰ دقیقه بر روی قاب گالوانیزه (پلات باران‌ساز) به ابعاد ۲۰۰ × ۱۰۰ سانتی‌متر (۲ مترمربع) به اجرا درآمد. رواناب و رسوب خروجی از قاب فلزی، در هر ۵ دقیقه توسط ظروف مدرج جمع‌آوری و به آزمایشگاه منتقل شد. در نهایت، مقدار بار رسوب و نرخ فرسایش خاک محاسبه گردید (۸، ۱۶ و ۳۱). در شکل ۲ بخشی از عملیات صحرایی و برداشت‌های میدانی صورت‌گرفته به‌منظور اندازه‌گیری پارامترهای مدل SEDMODL و هم‌چنین اندازه‌گیری مستقیم رسوب‌دهی با استفاده از شبیه‌سازی باران نشان داده شده‌است.

فاکتور پوشش دیواره خاکبرداری (CS_f)

فاکتور پوشش دیواره خاکبرداری براساس درصد پوشش سنگی یا گیاهی روی دیواره خاکبرداری در جدول ۵ نشان داده شده‌است (۴۱).

برداشت میدانی داده‌ها و اندازه‌گیری پارامترهای لازم در مدل SEDMODL

در تحقیق حاضر، پس از تعیین ۶۳ بازه 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 سایر ویژگی‌های موجود، در مسیر ۱۱/۹۷۹ کیلومتری جاده جنگلی مورد مطالعه، پارامترهای شیب طولی هر بازه، طول و عرض هر بازه، ارتفاع و پوشش دیواره خاکبرداری و سایر عوامل از قبیل تعیین مختصات کالورت‌ها و گالی‌ها توسط GPS در طول مسیر مورد مطالعه، از طریق اندازه‌گیری مستقیم و عملیات صحرایی تعیین و ثبت گردید. فاکتورهای فرسایش زمین‌شناسی 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 (۲۳) به‌دست آمد. لازم به توضیح است که جهت تعیین دقیق فاکتور بارندگی، میزان بارندگی سالیانه برای هر بازه به‌صورت جداگانه با استفاده از Kriging در محیط GIS محاسبه و اعمال گردید و مقادیر مختلف فاکتور بارندگی برای هر بازه استخراج گردیده و در مدل لحاظ شد. به‌این‌منظور، از داده‌ها و اطلاعات بارندگی ۴ ایستگاه نزدیک به منطقه مورد مطالعه شامل ایستگاه‌های دارابکلا، آبلو، بهشهر و ساری استفاده گردید. روش Kriging مورد استفاده در این تحقیق نیز از نوع کریجینگ معمولی (درجه دوم) بوده که با استفاده از آن برای هر بازه یک مقدار مشخص بارندگی تعیین و استخراج گردید. البته لازم به ذکر



شکل ۲. تصاویری از عملیات صحرایی و برداشت‌های میدانی صورت گرفته در تحقیق حاضر

Q_o : مقادیر مشاهده‌ای، Q_e : مقادیر برآوردی.

- میانگین مربع خطا (RMSE):

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{(Q_o - Q_e)^2}{Q_o}} \quad [8]$$

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

نتایج

مشخصات بازه‌های مختلف جاده‌ای و فاکتورهای محاسبه

شده جهت اجرای مدل SEDMODL

همان‌طور که قبل‌تر به آن اشاره شد، در تحقیق حاضر، طی انجام عملیات‌های گسترده صحرایی و برداشت‌های میدانی تعداد ۶۳ بازه همگن با ویژگی‌های مشابه در مسیری به طول ۱۱/۹۷۹ کیلومتر در جاده جنگلی منطقه مورد مطالعه، تعیین و اقدام به اندازه‌گیری پارامترهای مورد نیاز به‌صورت جداگانه برای هر بازه گردید. مشخصات بازه‌های مذکور و مقادیر فاکتورهای لازم جهت اجرای مدل SEDMODL در جدول ۶ و شکل ۳ ارائه شده‌است.

روش‌های آماری مورد استفاده جهت مقایسه و ارزیابی مدل

در این تحقیق، به‌منظور بررسی و ارزیابی نتایج مدل مورد مطالعه، از آزمون t جفتی، میانگین اختلاف (BIAS)، درصد خطای نسبی (RE) و میانگین مربع خطا (RMSE) استفاده گردید. در زیر به‌طور مختصر به هر یک از این روش‌ها اشاره شده‌است:

- آزمون t جفتی

رابطه کلی این آزمون به‌صورت زیر می‌باشد:

$$t = \frac{\bar{d}}{S_d} \quad [5]$$

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

- میانگین اختلاف (BIAS):

$$BIAS = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{E_o - E_e}{E_o} \quad [6]$$

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

- درصد خطای نسبی (RE):

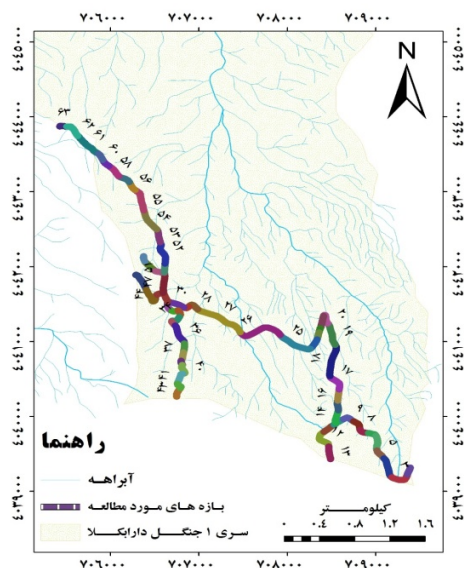
$$RE = \left| \frac{Q_o - Q_e}{Q_e} \right| \times 100 \quad [7]$$

جدول ۶. مشخصات بازه‌های اندازه‌گیری شده طی برداشت‌های میدانی و مقادیر فاکتورهای محاسبه شده برای هر بازه

شماره بازه	طول جاده (متر)	عرض جاده (متر)	فاکتور فرسایش (GE _r)	فاکتور شیب جاده (G _r)	فاکتور سطح جاده (S _r)	فاکتور سن جاده (A _r)	فاکتور ترافیک (T _r)	فاکتور شبروانی جاده (CS _r)	ارتفاع شبروانی جاده (متر)	فاکتور انتقال رسوب (D _r)	فاکتور بارندگی (P _r)
۱	۱۰۷	۶	۰/۰۰۷۴	۱	۰/۲	۲	۲	۰/۱۵	۲	۰	۰/۵۳۹۱
۲	۲۴۰	۶/۲	۰/۰۰۷۴	۰/۲	۰/۲	۲	۲	-	-	۰	۰/۵۳۹۶
۳	۲۸۶	۶	۰/۰۰۷۴	۱	۰/۲	۲	۲	۰/۳۱	۳/۵	۰/۱	۰/۵۴۰۰
۴	۱۴۵	۶/۳	۰/۰۰۷۴	۰/۲	۰/۲	۲	۲	-	-	۱	۰/۵۴۰۵
۵	۲۱۱	۶/۹	۰/۰۰۷۴	۰/۲	۰/۲	۲	۲	۰/۲	۲/۷	۱	۰/۵۴۰۹
۶	۱۰۶	۶/۲	۰/۰۰۷۴	۰/۲	۰/۲	۲	۲	۰/۲	۳	۰	۰/۵۴۱۶
۷	۱۲۱	۸/۱	۰/۰۰۷۴	۱	۰/۲	۲	۲	۰/۲	۳/۶	۱	۰/۵۴۱۹
۸	۱۵۸	۶/۸	۰/۰۰۷۴	۰/۲	۰/۲	۲	۲	۰/۲	۲/۷۵	۰	۰/۵۴۲۲
۹	۱۴۷	۷/۹	۰/۰۰۷۴	۱	۰/۲	۲	۲	۰/۲	۱/۵	۱	۰/۵۴۲۵
۱۰	۱۴۵	۶/۲	۰/۰۰۷۴	۱	۰/۲	۲	۲	۰/۲	۳/۲	۰	۰/۵۴۲۸
۱۱	۱۶۱	۵/۹	۰/۰۰۷۴	۰/۲	۰/۴	۲	۲	۰/۱۵	۱/۲	۱	۰/۵۴۲۸
۱۲	۲۹۲	۵/۸	۰/۰۰۷۴	۰/۲	۰/۲	۲	۲	۰/۲	۱/۸	۱	۰/۵۴۲۸
۱۳	۱۸۱	۵/۶	۰/۰۰۷۴	۰/۲	۰/۲	۲	۲	۰/۲	۲/۳	۰	۰/۵۴۲۹
۱۴	۱۹۹	۷/۴	۰/۰۰۷۴	۰/۲	۰/۲	۲	۲	-	-	۰/۳۵	۰/۵۴۳۴
۱۵	۱۵۱	۸/۸	۰/۰۰۷۴	۱	۰/۲	۲	۲	۰/۳۱	۱/۵	۰	۰/۵۴۳۷
۱۶	۱۶۸	۸/۴	۰/۰۰۷۴	۱	۰/۲	۲	۲	۰/۲	۲/۵	۰	۰/۵۴۳۹
۱۷	۲۵۲	۶	۰/۰۰۷۴	۱	۰/۲	۲	۲	-	-	۰	۰/۵۴۴۶
۱۸	۴۵۲	۷/۸	۰/۰۰۷۴	۲/۵	۰/۲	۲	۲	۰/۱۵	۱/۴	۰	۰/۵۴۴۹
۱۹	۳۲۵	۹/۸	۰/۰۰۷۴	۱	۰/۲	۲	۲	-	-	۱	۰/۵۴۵۲
۲۰	۱۶۳	۵/۷	۰/۰۰۷۴	۱	۰/۴	۲	۲	۰/۱۵	۷/۳	۱	۰/۵۴۵۴
۲۱	۱۹۱	۶/۵	۰/۰۰۷۴	۲/۵	۰/۲	۲	۲	-	-	۰	۰/۵۴۵۵
۲۲	۷۸	۸/۵	۰/۰۰۷۴	۱	۰/۲	۲	۲	۰/۱۵	۱/۹	۰	۰/۵۴۵۵
۲۳	۱۱۷	۵/۶	۰/۰۰۷۴	۲/۵	۰/۴	۲	۲	۰/۷۷	۱۲	۰	۰/۵۴۵۵
۲۴	۱۶۸	۵/۹	۰/۰۰۷۴	۱	۰/۴	۲	۲	۰/۲	۲	۱	۰/۵۴۵۵
۲۵	۴۲۵	۸	۰/۰۰۷۴	۰/۲	۰/۲	۲	۲	۰/۱۵	۹/۵	۱	۰/۵۴۵۸
۲۶	۵۷۸	۸/۱	۰/۰۰۷۴	۰/۲	۰/۲	۲	۲	-	-	۱	۰/۵۴۶۴
۲۷	۶۱۰	۶	۰/۰۰۷۴	۱	۰/۴	۲	۲	-	-	۱	۰/۵۴۷۴
۲۸	۱۶۳	۶/۸	۰/۰۰۷۴	۱	۰/۴	۲	۲	-	-	۱	۰/۵۴۷۹
۲۹	۷۲	۸	۰/۰۰۷۴	۰/۲	۰/۴	۲	۲	-	-	۱	۰/۵۴۸۳
۳۰	۲۸۴	۹/۴	۰/۰۰۷۴	۰/۲	۰/۴	۲	۲	۰/۱۵	۳/۲	۰	۰/۵۴۸۶

ادامه جدول ۶. مشخصات بازه‌های اندازه‌گیری شده طی برداشت‌های میدانی و مقادیر فاکتورهای محاسبه شده برای هر بازه

۰/۵۴۸۹	۱	۳/۸	۰/۱۵	۱	۲	۰/۴	۰/۲	۰/۰۰۷۴	۷	۱۰۲	۳۱
۰/۵۴۸۶	۱	۳	۰/۳۱	۱	۲	۰/۴	۰/۲	۰/۰۰۷۴	۵/۷	۸۵	۳۲
۰/۵۴۸۳	۱	-	-	۱	۲	۰/۴	۰/۲	۰/۰۰۷۴	۴/۴	۱۱۵	۳۳
۰/۵۴۸۳	۱	۱	۰/۳۱	۱	۲	۰/۴	۱	۰/۰۰۷۴	۵/۵	۱۴۳	۳۴
۰/۵۴۸۳	۰	-	-	۱	۲	۰/۴	۱	۰/۰۰۷۴	۵/۴	۸۲	۳۵
۰/۵۴۷۹	۰	۰/۵	۰/۳۱	۱	۲	۰/۴	۱	۰/۰۰۷۴	۵/۵	۳۱۶	۳۶
۰/۵۴۷۴	۱	-	-	۱	۲	۰/۴	۱	۰/۰۰۷۴	۵/۲	۱۶۰	۳۷
۰/۵۴۶۹	۱	-	-	۱	۲	۰/۴	۱	۰/۰۰۷۴	۵/۵	۱۴۶	۳۸
۰/۵۴۶۸	۱	-	-	۱	۲	۰/۴	۰/۲	۰/۰۰۷۴	۶	۵۳	۳۹
۰/۵۴۶۴	۱	-	-	۱	۲	۰/۴	۰/۲	۰/۰۰۷۴	۵/۹	۱۵۷	۴۰
۰/۵۴۶۴	۰/۳۵	-	-	۱	۲	۰/۴	۰/۲	۰/۰۰۷۴	۵/۷	۱۷۴	۴۱
۰/۵۴۶۱	۰/۱	-	-	۱	۲	۰/۴	۱	۰/۰۰۷۴	۵/۶	۶۹	۴۲
۰/۵۴۵۸	۰	-	-	۱	۲	۰/۴	۱	۰/۰۰۷۴	۵/۳	۱۴۴	۴۳
۰/۵۴۹۱	۰/۳۵	-	-	۲	۲	۰/۴	۰/۲	۰/۰۰۷۴	۵/۵	۱۶۶	۴۴
۰/۵۴۹۳	۱	-	-	۲	۲	۰/۲	۰/۲	۰/۰۰۷۴	۵/۴	۲۶	۴۵
۰/۵۵۰۴	۱	-	-	۲	۲	۰/۲	۱	۰/۰۰۷۴	۵/۲	۳۴	۴۶
۰/۵۴۹۵	۰	-	-	۲	۲	۰/۴	۰/۲	۰/۰۰۷۴	۱۱/۵	۲۶۵	۴۷
۰/۵۵۰۱	۱	-	-	۱	۲	۰/۲	۰/۲	۰/۰۰۷۴	۵/۵	۱۰۵	۴۸
۰/۵۵۰۷	۰/۳۵	-	-	۱	۲	۰/۲	۰/۲	۰/۰۰۷۴	۵	۱۷۰	۴۹
۰/۵۵۱۰	۱	-	-	۱	۲	۰/۲	۰/۲	۰/۰۰۷۴	۴/۲	۶۷	۵۰
۰/۵۵۰۲	۰	۲	۰/۲	۲	۲	۰/۲	۲/۵	۰/۰۰۷۴	۹/۸	۱۳۶	۵۱
۰/۵۵۰۷	۰	-	-	۲	۲	۰/۲	۰/۲	۰/۰۰۷۴	۷/۲۵	۳۲۴	۵۲
۰/۵۵۰۹	۰	۵	۰/۲	۲	۲	۰/۴	۱	۰/۰۰۷۴	۷/۸۵	۱۹۶	۵۳
۰/۵۵۱۳	۰	-	-	۲	۲	۰/۴	۱	۰/۰۰۷۴	۷/۳	۳۱۵	۵۴
۰/۵۵۱۴	۱	۷/۵	۰/۲	۲	۲	۰/۴	۲/۵	۰/۰۰۷۴	۷/۷۵	۳۲۱	۵۵
۰/۵۵۱۶	۱	۲	۰/۲	۲	۲	۰/۴	۰/۲	۰/۰۰۷۴	۵/۸۵	۱۴۰	۵۶
۰/۵۵۱۹	۱	۱	۰/۲	۲	۲	۰/۴	۱	۰/۰۰۷۴	۷	۱۶۶	۵۷
۰/۵۵۲۲	۰	-	-	۲	۲	۰/۴	۱	۰/۰۰۷۴	۶/۱	۱۹۶	۵۸
۰/۵۵۲۵	۰	۳/۸	۰/۱۵	۲	۲	۰/۴	۰/۲	۰/۰۰۷۴	۶/۵	۱۲۳	۵۹
۰/۵۵۳۲	۰/۳۵	-	-	۲	۲	۰/۴	۱	۰/۰۰۷۴	۶/۲	۱۱۲	۶۰
۰/۵۵۳۸	۰	۲/۵	۰/۱۵	۲	۲	۰/۴	۲/۵	۰/۰۰۷۴	۶/۱۵	۳۵۵	۶۱
۰/۵۵۴۴	۰	-	-	۲	۲	۰/۴	۲/۵	۰/۰۰۷۴	۶/۱۵	۲۱۷	۶۲
۰/۵۵۴۹	۱	۱۵	۰/۳۱	۲	۲	۰/۲	۲/۵	۰/۰۰۷۴	۸/۴	۱۰۳	۶۳



شکل ۳. نقشه بازه‌های مختلف تعیین شده در جاده‌های جنگلی منطقه مورد مطالعه

جدول ۷. مشخصات آماری برخی از داده‌های اندازه‌گیری شده طی عملیات صحرایی برای مدل SEDMODL

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

هدررفت خاک طی عملیات شبیه‌سازی باران در سطح جاده‌های مذکور اندازه‌گیری و برداشت گردید که مشخصات آماری آنها در جداول ۷ و ۸ به تفکیک نشان داده شده‌است.

محاسبه و برآورد میزان تولید و تحویل رسوب جاده‌ای توسط مدل SEDMODL و شبیه‌سازی باران

پس از تهیه و جمع‌آوری تمامی داده‌ها و اطلاعات لازم، برای هر بازه به‌صورت جداگانه، مدل SEDMODL اجرا و میزان

مشخصات آماری داده‌های برداشت شده طی عملیات‌های میدانی

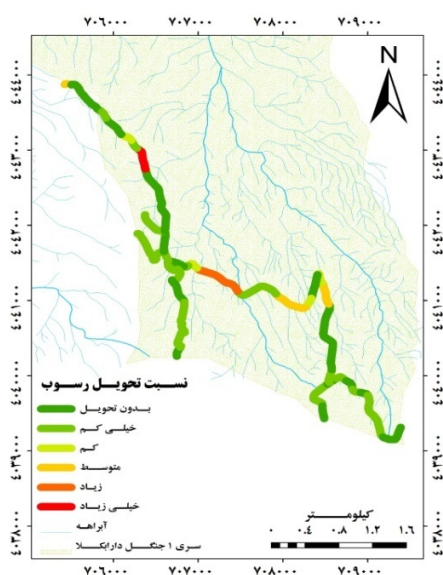
در مطالعه حاضر، طی انجام عملیات‌های صحرایی مختلف در منطقه مورد مطالعه، داده‌هایی از قبیل طول و عرض جاده، شیب طولی جاده، عرض نهر کنار جاده، سطح مشارکت جاده، ارتفاع و پوشش دیواره خاک‌برداری از ۶۳ بازه و قطعه همگن جاده‌ای برای اجرای مدل SEDMODL و هم‌چنین پارامترهایی از قبیل حجم رواناب، آستانه ظهور رواناب، ضریب رواناب، بار رسوب، غلظت رسوب و

جدول ۸. مشخصات آماری پارامترهای مختلف اندازه‌گیری شده طی عملیات شبیه‌سازی باران

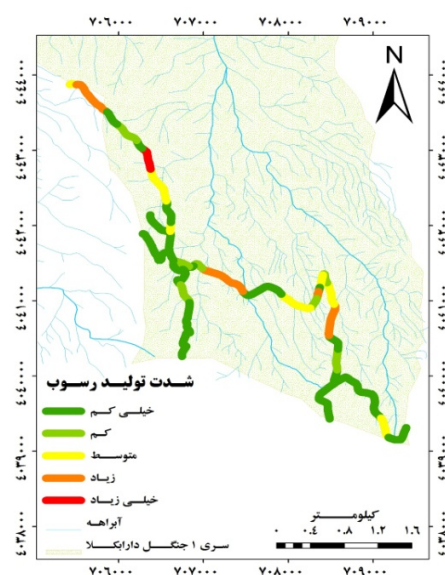
متغیر اندازه‌گیری شده	میانگین	حداکثر	حداقل	انحراف معیار	ضریب تغییرات (درصد)
حجم رواناب (لیتر)	۳/۹۵	۱۳/۰۲	۱/۰۶	۳/۱۶	۸۰/۱۹
آستانه ظهور رواناب (دقیقه)	۳/۹۴	۷/۳۵	۱/۲۸	۳/۶۵	۹۲/۸۴
ضریب رواناب (درصد)	۱۱/۲۴	۲۴/۷۰	۰/۳۴	۷/۱۴	۶۳/۴۹
بار رسوب (گرم)	۲۳/۳۸	۷۷/۳۶	۱۲/۹۱	۱۷/۲۴	۷۳/۷۵
غلظت رسوب (گرم در لیتر)	۷/۸۴	۴۶/۸۹	۵/۶۴	۷/۸۰	۹۹/۴۶
هدررفت خاک (گرم در مترمربع)	۱۵/۰۵	۶۱/۶۴	۷/۲۲	۱۲/۸۹	۸۵/۶۸

جدول ۹. میزان رسوب‌دهی برآوردی و مشاهده‌ای در جاده‌های جنگلی منطقه مورد مطالعه

اندازه‌گیری ایزار	کل تولید رسوب جاده (تن در سال)	مؤسسه تولید رسوب جاده (تن در سال)	کل تحویل رسوب (تن در سال)	مؤسسه تحویل رسوب (تن در سال)	نسبت تحویل رسوب (درصد)	نسبت تحویل رسوب (درصد)
SEDMODL	۴۲۰/۹۷	۶/۶۸	۱۷۷/۵۸	۲/۸۲	۵/۱۱	۴۲
شبیه‌ساز باران	۳۴۱/۱۹	۵/۶۹	۱۷۴/۰۲	۲/۳۹	۴/۱۴	۵۱



شکل ۵. نسبت تحویل رسوب بازه‌های مختلف



شکل ۴. شدت تولید رسوب بازه‌های مختلف

جدول ۱۰. نتایج آماری آزمون t جفتی برای مدل SEDMODL با داده‌های مشاهده‌ای در جاده‌های مورد مطالعه

مدل مورد آزمون	میانگین	انحراف معیار	اشتباه معیار اختلاف میانگین	درجه آزادی	فاصله اطمینان ۹۵٪ حد پایین حد بالا	آماره t	سطح معنی‌دار
SEDMODL	۲۷/۲۵	۴۵/۴۹	۲۶/۲۷	۴۰	-۸۵/۷۶ ۱۴۰/۲۶	۱/۰۳۷	۰/۴۰۹

جدول ۱۱. نتایج روش‌های آماری RE، BIAS، RMSE و برای مدل SEDMODL در جاده‌های مورد مطالعه

مدل مورد آزمون	BIAS	RE	RMSE
SEDMODL	۰/۰۴	۱۷/۵۹	۰/۷۱

۹۵ درصد وجود نداشته و مقادیر RE، BIAS و RMSE به‌دست آمده بیان‌گر دقت قابل قبول و کارایی مناسب مدل SEDMODL، جهت برآورد تولید و تحویل رسوب در مقیاس جاده در منطقه مورد مطالعه می‌باشد. در شکل ۶ و ۷ مقادیر مختلف برآوردی و مشاهده‌ای تولید و تحویل رسوب توسط مدل SEDMODL و اندازه‌گیری مستقیم تحت شبیه‌سازی باران نشان داده شده‌است. همان‌گونه که در اشکال ۶ و ۷ مشخص است، بین مقادیر برآوردی و مشاهده‌ای رسوب‌دهی جاده، اختلاف معنی‌دار وجود نداشته، اما مدل مورد استفاده، در تمامی مقادیر مختلف برآوردی دارای بیش تخمینی نسبت به داده‌های مشاهده‌ای بوده که این بیش تخمینی معنی‌دار نبوده و اختلاف ناچیز بین داده‌های برآوردی و مشاهده‌ای می‌تواند قابل اغماض باشد.

بررسی فاکتورهای تأثیرگذار در تولید و تحویل رسوب در

مدل SEDMODL

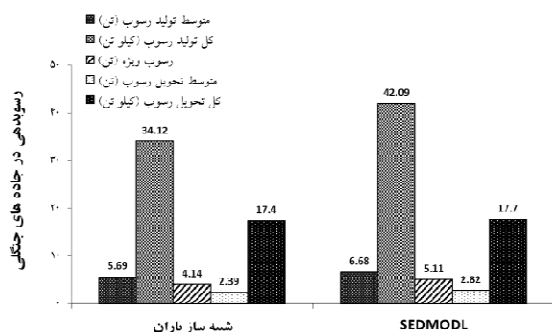
به‌منظور تعیین مؤثرترین فاکتورها در میزان رسوب‌دهی جاده‌های جنگلی دارابکلا و انتقال آن، فاکتورهایی مورد بررسی قرار گرفت که تغییرات آنها در بازه‌های مختلف باعث بیشترین تغییر در میزان تولید و تحویل رسوب گردد. فاکتورهای طول و عرض بازه و ارتفاع شیاروانی بازه به‌صورت مقدار اندازه‌گیری شده آن بر حسب متر وارد مدل شده و امتیازدهی نمی‌شوند. هم‌چنین برخی

رسوب‌دهی برآورد گردید. علاوه‌بر آن، پس از انجام عملیات شبیه‌سازی باران و نمونه‌برداری در سایت‌های مختلف و انجام عملیات آزمایشگاهی، میزان رسوب‌دهی به‌صورت مستقیم در سطح جاده‌های جنگلی مورد مطالعه تعیین و اندازه‌گیری شد. نتایج کلی حاصل از بررسی‌های انجام شده در تحقیق حاضر در جدول ۹ ارائه گردیده‌است. هم‌چنین، بازه‌هایی که دارای شرایط بحرانی و حساسیت بیشتری از لحاظ تولید و تحویل رسوب بوده مشخص و در نقشه‌هایی به‌صورت جداگانه نشان داده‌شد (اشکال ۴ و ۵). لازم‌به‌ذکر است که برای محاسبه تولید رسوب در جاده‌های منطقه مورد مطالعه، از فاکتور کاهنده انتقال رسوب صرف‌نظر نموده و میزان تولید رسوب در هر بازه محاسبه گردید، سپس با لحاظ نمودن فاکتور انتقال رسوب در هر واحد میزان رسوب انتقالی به آبراهه محاسبه شد (۲).

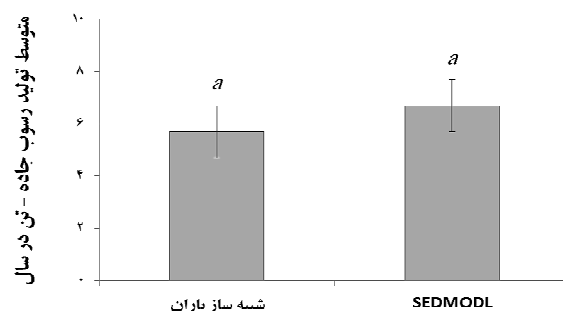
تجزیه و تحلیل آماری نتایج مدل SEDMODL با مقادیر

مشاهده‌ای حاصل از شبیه‌سازی باران

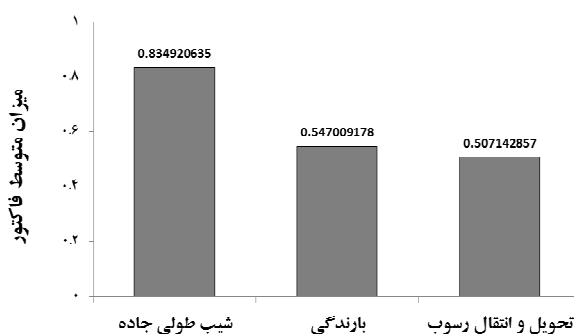
نتایج حاصل از روش‌های آماری مورد استفاده در این تحقیق برای ارزیابی مدل SEDMODL و بررسی نتایج آن در جداول ۱۰ و ۱۱ ارائه گردیده است. همان‌طور که نتایج جداول ۵ و ۶ نشان می‌دهد بین داده‌های برآوردی مدل و داده‌های مشاهده‌ای و اندازه‌گیری شده توسط شبیه‌ساز باران، اختلاف معنی‌داری در سطح اطمینان



شکل ۷. مقادیر فرسایش متوسط، کل و ویژه در جاده های جنگلی مورد مطالعه طبق روش های مختلف



شکل ۶. مقایسه میزان رسوبدهی در جاده های جنگلی مورد مطالعه براساس روش های مورد استفاده



شکل ۸. تغییرات مؤثرترین فاکتورها در تولید و تحویل رسوب در مدل SEDMODL

شرایط و استعداد تولید رسوب یک فاکتور بیشتر باشد مقدار عددی امتیاز آن فاکتور بیشتر و در نتیجه رسوبدهی نیز بیشتر خواهد شد. این نوع بررسی فاکتورهای تأثیرگذار در رسوبدهی جاده طبق مدل SEDMODL، با مطالعات حسینی و همکاران (۲) مطابقت داشته و آنها نیز در مطالعات خود، برای تعیین فاکتورهای مؤثر در فرسایش جاده ای از روش فوق استفاده نموده و مقدار عددی امتیازات هر فاکتور را ملاک تأثیرگذاری آن فاکتور در خروجی مدل قرار داده اند. نتایج بررسی ها نشان داد که در مدل SEDMODL، فاکتورهای شیب طولی جاده، بارندگی و تحویل و انتقال رسوب به ترتیب تأثیرگذارترین عوامل در میزان رسوبدهی جاده های مذکور و انتقال آن به آبراهه ها و رودخانه ها می باشند (شکل ۸).

فاکتورها نظیر فرسایش زمین شناسی، ترافیک و سن جاده در تمامی بازه ها یکسان بوده لذا تأثیر آنها در همه بازه ها یکسان در نظر گرفته شد. با توجه به ساختار مدل مورد استفاده، به منظور بررسی و تعیین فاکتورهای مؤثر در خروجی مدل، از آنالیز حساسیت استفاده نگردیده و جهت تعیین حساسیت خروجی مدل به تغییرات فاکتورهای مختلف تنها مقدار عددی امتیازات هر فاکتور مدنظر قرار گرفته و براساس جمع امتیازات هر فاکتور تأثیرگذاری آن مشخص گردید (۲)، زیرا هر چه میزان امتیاز یک فاکتور بیشتر باشد به تبع آن، میزان رسوبدهی نیز بیشتر خواهد شد و خروجی مدل را تحت تأثیر قرار خواهد داد. به عبارتی دیگر، مدل برای خصوصیات و ویژگی هایی که تأثیر سوء در رسوبدهی جاده داشته امتیاز بیشتری در نظر گرفته و هر چه

بحث و نتیجه‌گیری

فعالیت‌های انسانی نظیر احداث جاده‌های جنگلی به‌منظور دسترسی آسان به منابع جنگلی و سایر اهداف اقتصادی و توریستی، موجب برهم خوردن اکوسیستم جنگلی، تخریب خاک و بستر جنگل و کاهش زادآوری گیاهان می‌شود. هم‌چنین، احداث جاده‌ها در مناطق جنگلی یکی از عوامل مؤثر در ایجاد فرسایش و تولید رسوب می‌باشد که نقش بسیار مهمی در تولید رسوب در مناطق جنگلی دارد. امروزه استفاده از مدل‌های برآورد میزان فرسایش و تولید رسوب در عرصه جاده‌ای به‌خصوص جاده‌های جنگلی گسترش یافته و با استفاده از این مدل‌ها و ابزارهایی مانند GIS می‌توان میزان تولید رسوب در مناطق مختلف را پیش‌بینی و برآورد نمود و از نتایج به‌دست آمده در جهت مدیریت بهتر منطقه از قبیل کنترل فرسایش و استفاده از روش‌های اصلاحی در مناطقی که میزان تولید رسوب بالایی دارند، استفاده نمود (۲). با توجه به این‌که محققین به بررسی و مطالعه تأثیرات منفی و پیامدهای ناشی از احداث جاده در جنگل‌ها کمتر پرداخته و می‌تواند فرسایش خاک و تولید رسوب در مقیاس جاده کمتر مورد توجه محققین قرار گرفته است، بدین‌منظور در این تحقیق، به بررسی میزان رسوب‌دهی و انتقال آن از سطح جاده‌های جنگلی حوزه آبخیز دارابکلا با استفاده از مدل SEDMODL پرداخته شد. طی عملیات صحرایی انجام‌شده در مسیری به‌طول ۱۱/۹۷۹ کیلومتر از جاده‌های جنگلی منطقه مورد مطالعه که به ۶۳ بازه همگن تقسیم‌بندی شده بود، پارامترها و داده‌های مورد نیاز از قبیل طول و عرض جاده، شیب طولی جاده، عرض نهر کنار جاده، سطح مشارکت جاده، ارتفاع و پوشش دیواره خاکبرداری اندازه‌گیری و جهت تجزیه و تحلیل وارد مدل گردید. هم‌چنین، جهت ارزیابی نتایج مدل مذکور، اندازه‌گیری مستقیم میزان رسوب‌دهی جاده‌های مورد مطالعه تحت عملیات شبیه‌سازی باران صورت پذیرفت. با استفاده از دستگاه باران‌ساز صحرایی مورد استفاده در تحقیق حاضر (با ویژگی‌های خاص از لحاظ موتور پمپاژ، ارتفاع نازل و ابعاد پلات که برای

تحقیقات در زمینه فرسایش و رسوب بسیار مناسب بوده و هم‌چنین تاکنون در ایران هیچ‌گونه مطالعات فرسایش و رسوب با استفاده از باران‌ساز سیار با ارتفاع نازل و ابعاد پلات مورد استفاده در این تحقیق، گزارش نشده‌است)، عملیات شبیه‌سازی باران مطابق با بارندگی غالب منطقه در طول مسیر مورد مطالعه و در سایت‌های مختلف انجام و میزان رسوب‌دهی جاده‌ای به‌صورت مستقیم اندازه‌گیری و برداشت گردید.

با توجه به نتایج به‌دست آمده از اجرای مدل SEDMODL و اندازه‌گیری مستقیم با استفاده از شبیه‌ساز باران، میزان تولید رسوب در جاده‌های مورد بررسی به‌ترتیب ۴۲۰/۹۷ و ۳۴۱/۱۹ تن در سال برآورد گردید که بر همین اساس از این مقدار به‌ترتیب ۴۲ و ۵۱ درصد آن معادل ۱۷۷/۵۸ و ۱۷۴/۰۲ تن در سال، به آبراهه‌ها و رودخانه‌های موجود در حوزه تحویل و انتقال یافته‌است که این بیان‌گر تأثیر بسزای فرسایش و تولید رسوب توسط سطح جاده‌ها در بار رسوبی رودخانه‌هایی که از خروجی حوزه‌های آبخیز می‌گذرند، می‌باشد که با یافته‌های فو و همکاران (۲۶) مطابقت دارد. همان‌طور که در بخش نتایج به آن اشاره گردید برای محاسبه تولید رسوب در جاده‌های منطقه مورد مطالعه، از فاکتور کاهنده انتقال رسوب صرف‌نظر نموده و میزان تولید رسوب در هر بازه محاسبه گردید، سپس با لحاظ نمودن فاکتور انتقال رسوب در هر واحد میزان رسوب انتقالی به آبراهه محاسبه شد (۲) و به این شکل مقدار نسبت تحویل رسوب برای مدل مورد استفاده محاسبه شده که معادل ۴۲ درصد به‌دست آمد. هم‌چنین، با توجه به نتایج حاصل، متوسط تولید رسوب در جاده‌های مذکور با استفاده از مدل SEDMODL و اندازه‌گیری تحت شبیه‌سازی باران به‌ترتیب ۶/۶۸ و ۵/۶۹ تن در سال و متوسط تحویل رسوب به‌ترتیب ۲/۸۲ و ۲/۳۹ تن در سال محاسبه گردید که مقادیر حاصل با یافته‌های محققینی از جمله آکای و همکاران (۱۱) که مدل مذکور را در بخش‌هایی از جاده‌های جنگلی ترکیه اجرا نموده بودند، مشابه بوده و با نتایج آنها مطابقت

و نزدیکی دارد. تجزیه و تحلیل آماری نتایج به دست آمده از مدل SEDMODL با مقادیر حاصل از اندازه گیری مستقیم تحت شبیه سازی باران نشان داد که اختلاف معنی داری بین داده های مشاهده ای حاصل از اندازه گیری مستقیم و نتایج مدل SEDMODL در سطح اعتماد ۹۵٪ وجود نداشته و مدل مذکور با حداقل مقادیر میانگین اختلاف، خطای نسبی و میانگین مربعات خطا به ترتیب معادل ۰/۰۴، ۱۷/۵۹ و ۰/۷۱ مدل مناسب و قابل قبول جهت بررسی مقوله فرسایش و هدررفت خاک در مقیاس جاده جنگلی در حوزه آبخیز جنگلی دارابکلا می باشد. به طور کلی، با در نظر گرفتن جمیع جهات، کاملاً مشهود است که نتایج به دست آمده از مدل SEDMODL، نتایجی قابل قبول و نزدیک به واقعیت می باشد، لذا می توان اظهار داشت که مدل SEDMODL به منظور برآورد فرسایش در مقیاس جاده، از دقت و کارایی مناسبی برخوردار می باشد.

نتایج این بررسی و بررسی های مشابه نشان داده که میزان تولید و تحویل رسوب در جاده های جنگلی به عواملی مانند نوع جاده، نوع استفاده از جاده، میزان شیب، فاصله جاده از آبراهه و... بستگی دارد. در تحقیق حاضر، نتایج بررسی عوامل تأثیرگذار در تولید و تحویل رسوب نشان داد که در جاده های جنگلی منطقه مورد مطالعه فاکتورهای شیب طولی، بارندگی و تحویل رسوب به ترتیب تأثیرگذارترین عوامل در مدل SEDMODL می باشند که با نتایج تحقیق آکای و همکاران (۱۱) مطابقت دارد. تحقیقات در زمینه عوامل مؤثر در میزان تولید رسوب نشان داده که یک رابطه معکوس بین فاکتور ترافیک و فاکتور روسازی جاده وجود دارد (۱۴). به عبارتی، هر چه سطح ترافیک یک جاده و میزان تردد وسایل نقلیه سبک و سنگین در آن بیشتر باشد، میزان روسازی جاده افزایش یافته و از سطوح با مقاومت بیشتر و نفوذپذیری کمتر نظیر آسفالت استفاده خواهد شد. جاده های با این خصوصیات روسازی، از تولید رسوب بسیار ناچیزی برخوردار بوده و حتی ممکن است فرسایش در سطح این نوع جاده ها به

صفر برسد، اما مشکل دیگری که تحت این شرایط، به خصوص در حوزه های آبخیز جنگلی می تواند حادث شود عدم نفوذپذیری سطح جاده بوده که می تواند منجر به تولید و افزایش رواناب گردد (۱۸) و در نتیجه سبب ایجاد پدیده آب شویی در کناره های جاده شده و موجب تخریب کناره ها و اراضی حواشی جاده شود (۷). قابل ذکر است که نتایج حاصل از مدل سازی همواره با یک عدم قطعیت همراه بوده که این عدم قطعیت می تواند ناشی از ساختار مدل، ورودی ها، پارامترهای مدل و همچنین به دلایل پیش بینی نشده باشد (۲ و ۳۴). تست مدل و آنالیز عدم قطعیت برای توسعه و فهم خروجی مدل، صحیح بوده و باید مورد بررسی قرار گیرد (۳۰). بهرحال این موضوع برای مدل های برآورد فرسایش و تولید رسوب جاده ای بندرت گزارش شده اند (۲۷). عوامل محدودکننده در تست مدل و آنالیز عدم قطعیت شامل دسترسی به داده ها از نظر مقدار کافی داده و قدرت تفکیک مناسب زمانی و مکانی و همچنین قابلیت اطمینان برای مقایسه خروجی مدل می باشد (۲۶). عدم قطعیت اصلی در این مطالعه، استفاده از مدل تجربی فرسایش جاده ای خارج منطقه ای می باشد که برای مناطق با ویژگی ها و شرایط متفاوت با ایران توسعه یافته است. اما داده های پایش از قبیل موقعیت زهکش، عرض جاده، شیب جاده، ترافیک و شرایط سطح جاده در این تحقیق در دسترس بوده و از طریق مشاهدات مستقیم و برداشت های میدانی دقیق استخراج و به کار گرفته شدند. در نتیجه عدم قطعیت در کاربرد مدل به کار رفته در منطقه مورد مطالعه می تواند تا حدودی کاهش یافته باشد. چرا که در این مطالعه سعی گردیده که منابع عدم قطعیت مرتبط با اندازه گیری داده های ورودی و پارامترهای مدل، دارای حداقل خطا باشند و در این راستا داده هایی که طی بازدید صحرایی برداشت گردید حتی الامکان با دقت کامل و با استفاده از ابزار دقیق اندازه گیری شد. با این وجود برخی از داده های لازم برای مدل، از نقشه های موجود استخراج گردید که خطاهای موجود در آنها می تواند سبب ایجاد عدم قطعیت در

نتایج حاصل از پیش‌بینی مدل شود.

ساری و دکتر عطاله کاویان به منظور ایجاد زمینه لازم جهت انجام این تحقیق و راهنمایی‌های آقایان دکتر ابراهیم امیدوار، حامد نقوی و آیدین پارساخو تشکر و قدردانی به عمل آید.

سپاسگزاری

لازم است که در این بخش از حمایت‌های دانشکده منابع طبیعی

منابع مورد استفاده

۱. پارساخو، آ. ۱۳۹۱. بررسی میزان هدررفت خاک و رواناب بخش‌های مختلف ساختمان جاده جنگلی با استفاده از شبیه‌ساز باران. رساله دکتری، گروه مهندسی جنگل، دانشکده منابع طبیعی ساری، ۱۶۹ ص.
۲. حسینی، س.ع.ا.، امیدوار، ح. نقوی، و آ. پارساخو. ۱۳۹۱. برآورد مقدار رسوب به‌دست آمده از جاده‌های جنگلی به کمک SEDMODL. پژوهش‌های علوم و فناوری چوب و جنگل ۱۹(۱): ۴۱-۲۳.
۳. سلطانی، ف. ۱۳۸۶. ارزیابی اثرات بهره‌برداری از جنگل بر گردشگری (مطالعه موردی: سری دو لونک واقع در استان گیلان). پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده منابع طبیعی ساری، دانشگاه مازندران.
۴. صادقی، س.ح.ر.، ل. غلامی، و ع. خالدی درویشان. ۱۳۸۷. مقایسه روش‌های برآورد نسبت تحویل رسوب رگبار در حوزه آبخیز چهل‌گزی سد قشلاق استان کردستان. علوم و صنایع کشاورزی، ویژه آب و خاک ۲۲(۱): ۱۵۰-۱۴۱.
۵. صفری، ع. ۱۳۹۱. اندازه‌گیری هدررفت خاک و رواناب در جاده‌های جنگلی دارابکلا. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ۹۷ ص.
۶. قهرمان، ب.، و ح.ر. آبخضر. ۱۳۸۳. اصلاح روابط شدت مدت- فراوانی بارندگی در ایران. مجله علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی اصفهان ۸(۲): ۱۳-۱.
۷. یوسفی، ص. ۱۳۸۹. تأثیر عوامل ژئومورفولوژیکی بر سطح تخریب ناشی از احداث جاده‌های جنگلی. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده منابع طبیعی و علوم دریایی، دانشگاه تربیت مدرس، ۶۳ ص.
8. Arnaez, J., V. Larreab and L. Ortigosaa. 2004. Surface runoff and soil erosion on unpaved forest roads from rainfall simulation tests in northeastern Spain. Catena 57: 1-14.
9. Akay, A.E. and J. Sessions. 2005. Applying the decision support system, TRACER, to forest road design. West J. Appl. Forestry 20: 184-191.
10. Akay, A.E., K. Boston and J. Sessions. 2005. The evolution of computer-aided road design systems. Int. J. Forest Eng. 16: 73-79.
11. Akay, A.E., O. Erdas M. Reis and A. Yuksel. 2007. Estimating sediment yield from a forest road network by using a sediment prediction model and GIS techniques. Building and Environment 43: 687-695.
12. Burroughs, E.R. and J.G. King. 1989. Reduction of soil erosion on forest roads. USDA Forest Service, Intermountain Research Station, Ogden, Utah. General Technical Report INT-264.
13. Binkley, D. and T.C. Brown. 1993. Forest practices as nonpoint sources of pollution in North America. Water Res. Bull. 29: 729-740.
14. Boise Cascade Corporation. 1999. SEDMODL-Boise Cascade road erosion delivery model. Technical documentation. 19 p.
15. Cole, D.N. and P.B. Landres. 1996. Threats to wilderness ecosystems: impacts and research needs. Ecol. Appl. 6: 168-84.
16. Cerdà, A. 2007. Soil water erosion on road embankments in eastern Spain. Science of the Total Environment 378: 151-155.

17. Carlos, E. and S. Ramos. 2010. Sediment production from unpaved roads in a sub-tropical dry setting, Southwestern Puerto Rico, *Catena* 82: 146-158.
18. Dube', K., W. Megahan and M. Mccalmon. 2004. Washington Road Surface Erosion Model (WARSEM) Manual. Department of Natural Resources, State of Washington, Open-file report 189 pp, Appendix A.
19. Demir, M. and M. Hasdemir. 2005. Functional planning criterion of forest road network systems according to recent forestry development and suggestion in Turkey. *Am. J. Environ. Sci.* 1: 22-28.
20. Egan, A.F. 1999. Forest roads where soil and water don't mix. *Journal of Forestry* 23: 18-21.
21. 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.
22. Foltz, R.B. and E.R. Burroughs. 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.
23. Forest Management plan handbook of Darabkola. 2003. The natural resources general office of Mazandaran province. Department of Forests and Rangelands. 325 PP. (In Persian).
24. Forsyth, A.R., K.A. Bubb and M.E. Cox. 2006. Runoff, sediment loss and water quality from forest roads in a southeast Queensland coastal plain Pinus plantation. *Forest Ecol. Manage.* 221: 194-206.
25. Foltz, R.B., N.S. Copeland and W.J. Elliot. 2009. Reopening abandoned forest roads in northern Idaho, USA: Quantification of runoff, sediment concentration, infiltration, and interrill erosion parameters. *Journal of Environmental Management* 90: 2542-2550.
26. Fu, B., L.T.H. Newham and J.B. Field. 2009. Modelling erosion and sediment delivery from unsealed roads in southeast Australia. *Mathematics and Computers in Simulation* 79: 2679-2688.
27. Fu, B. and L.T.H. Newham. 2010. A review of road erosion and sediment delivery models. *Environmental Modelling & Software* 25: 1-14.
28. Grace, J.M. 2002. Control of sediment export from the forest road prism. *ASAE Annu. Meeting* 45: 1-6.
29. 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.
30. Jakeman, A.J., R.A. Letcher and J.P. Norton. 2006. Ten iterative steps in development and evaluation of environmental models. *Environmental Modelling & Software* 21: 602-614.
31. Jordán-López, A., L. Martinez-Zavala and N. Bellinfante. 2009. Impact of different parts of unpaved forest roads on runoff and sediment yield in a Mediterranean area. *J. of Sci. of the Total Environ.* 407: 937-944.
32. Ketcheson, G.L. and W.F. Megahan. 1996. Sediment production and downslope sediment transport from forest roads in granitic watersheds. US Department of Agriculture, Forest Service, Intermountain Research Station. 11 p.
33. Luce, C.H. and T.A. Black. 1999. Sediment production from forest roads in western Oregon. *Water Resour. Res.* 35: 2561-2570.
34. Maskey, Sh. 2004. Modeling Uncertainty in Flood Forecasting Systems. Published in Taylor & Francis Routledge 177 pp. ISBN 9058096947.
35. Reid, L.M. and T. Dunne. 1984. Sediment production from forest road surfaces. *Water Resour. Res.* 20: 1753-1761.
36. Reid, L.M. 1981. Sediment production from gravel-surfaced forest roads. Clearwater basin, Washington. Master degree Thesis, University of Washington. 247 p.
37. Reinig, L., R.L. Beveridge J.P. Potyondy and F.M. Hernandez. 1991. BOISED user's guide and program documentation. USDA Forest Service, Boise National Forest 12 p.
38. Ramos-Scharrón, C.E. and L.H. MacDonald. 2005. Measurement and prediction of sediment production from unpaved roads, St John, US Virgin Islands, *Earth Surface Processes and Landforms* 30: 1283-1304.
39. Rijsdijk, A., L.A. Sampurno Bruijnzeel and C. Kukuh Sutoto. 2007. Runoff and sediment yield from rural roads, trails and settlements in the upper Konto catchment. East Java, Indonesia. *Geomorphology* 87: 28-37.
40. Sidle, R.C., S. Sasaki. M. Otsuki. S. Noguchi and A. Rahim-Nik. 2004. Sediment pathways in a tropical forest: effects of logging roads and skid trails. *Hydrol. Process* 18: 703-720.
41. WDNR. 1995. Standard methodology for conducting watershed analysis. Version 3.0. Washington Forest Practices Board.