

بررسی برآورد میزان رسوب سطح جاده‌ی جنگلی با استفاده از دو مدل تجربی

WARSEM و SEDMODL

ایوب رضایی مطلق*: دانشجوی دکتری مدیریت جنگل، دانشکده‌ی علوم جنگل، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان

آیدین پارساخو: دانشیار گروه جنگلداری، دانشکده‌ی علوم جنگل، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان

فاطمه فلاح‌نژاد: دانشجوی ارشد مدیریت جنگل، دانشکده‌ی علوم جنگل، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان

نوع مقاله: پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۱۲/۷ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۴/۱۶

DOR: [20.1001.1.22517812.1400.11.2.3.3](https://doi.org/10.1001.1.22517812.1400.11.2.3.3)

چکیده

امروزه جاده‌های جنگلی براساس نقش انکارناپذیری که در زمینه‌های جنگل‌داری، جنگل‌شناسی، بهره‌برداری و دسترسی سریع و آسان به مناطق جنگلی دارند، جزئی جدا نشدنی از منابع طبیعی محسوب می‌شوند. اما با تغییراتی که در طول مسیر بر پوشش گیاهی، هیدرولوژی، خاک و شکل طبیعی مناطق جنگلی ایجاد می‌کنند، به برهم زدن تعادل طبیعی مناطق و افزایش فرسایش و تولید رسوب در این مناطق منجر می‌شوند. امروزه برای برآورد میزان فرسایش و رسوب جاده‌های جنگلی، مدل‌های زیادی طراحی و معرفی شده‌اند که می‌توانند به کارشناسان در پیش‌بینی میزان تولید رسوب در جاده‌های جنگلی کمک کنند. در این پژوهش برای پیش‌بینی میزان تولید رسوب، از دو مدل WARSEM و SEDMODEL برای تخمین میزان متوسط سالیانه‌ی تولید رسوب در جاده‌ی جنگلی استفاده شد. به این منظور، ۲۶۰۲ متر از جاده‌های سری دو طرح جنگل‌داری رضاییان واقع در حوضه آبخیز ۸۸ طرح آبخیزداری زرین گل شهرستان علی‌آباد انتخاب شد. در ابتدا کل جاده‌ی منطقه به واحدهای همگن تقسیم شد، سپس شاخص‌هایی مانند طول جاده، عرض جاده، میزان تولید رسوب، شاخص مربوط به سطح جاده، ترافیک، شیب طولی جاده، بارندگی و انتقال رسوب، با استفاده از نقشه‌های GIS بررسی و اطلاعات موجود در کتابچه‌ی طرح جنگل‌داری منطقه و بازدید زمینی محاسبه شد. برای برداشت میزان رسوب واقعی سطح جاده، در انتهای هر واحد ظرف مناسبی در انتهای تله‌ی رسوب‌گیر قرار گرفت و پس از هر بارندگی نمونه‌گیری شد. با محاسبه‌ی میزان فرسایش و تولید رسوب در جاده و قطعات مختلف با استفاده از WARSEM و SEDMODL و مقایسه‌ی آنها با مقدار اندازه‌گیری شده، مشخص شد که بین مقدار رسوب برآورد شده توسط WARSEM و SEDMODL تفاوت معنی‌داری وجود نداشت، اما این مقادیر برآوردی در سطح احتمال ۵ درصد، بیش از مقدار اندازه‌گیری شده بود. همچنین شیب طولی جاده بر مقدار رسوب برآورد شده در سطح احتمال ۵ درصد تأثیر معنی‌داری داشت.

واژگان کلیدی: برداشت میدانی، جاده‌ی جنگلی، رسوب، شیب طولی، مدل‌های تجربی.

۱- مقدمه

جاده‌های جنگلی ورود به جنگل برای دسترسی به نقاط مختلف آن، خروج چوب در اجرای طرح‌های جنگل‌داری، عملیات جنگل‌شناسی، پرورش، حفاظت و استفاده از سایر کاربردهای جنگل را ممکن می‌سازد (Mostafa and Shataee, 2016). با احداث این جاده‌ها، سطحی عاری از پوشش گیاهی ایجاد می‌شود که عامل اصلی ایجاد فرسایش و رسوب در مناطق جنگلی و یکی از منابع اصلی انتقال رسوب به رودخانه‌ها است. افزایش میزان رسوب در آب رودخانه‌ها، خسارت‌های جبران‌ناپذیری را بر کیفیت اکوسیستم آب و زندگی موجودات آبی وارد می‌سازد. بنابراین، متخصصان جاده‌سازی نه تنها باید به هزینه‌های ساخت جاده بلکه به خسارت‌های زیست محیطی ناشی از آن نیز توجه داشته باشند (Demir and Hasdemir, 2005). بنابراین، همواره سعی بر این بوده‌است که از میزان فرسایش و رسوب ناشی از این جاده‌ها کاسته شود. میزان تولید رسوب ناشی از احداث جاده به فرسایش‌پذیری خاک‌ها، وضعیت پوشش دیواره‌های خاک-بررداری و خاک‌ریزی، روسازی جاده، شیب دیواره‌ها، شیب عرضی و طولی جاده، کیفیت زهکشی، طول راه، درجه‌ی راه، میزان ترافیک و غیره بستگی دارد (Grace, 2002 & Jaarsma, 1994). در مناطقی که این جاده‌ها احداث می‌شود، معمولاً انواع مختلف فرسایش مشاهده می‌شود (Akay et al, 2005)؛ از این رو، توانایی در پیشگویی درست و صحیح فرسایش و برآورد رسوب جاده‌ی جنگلی به عنوان یک ضرورت، می‌تواند اثرات منفی رسوب‌زایی آنها را کاهش دهد (Sarykhany et al, 2005). در همین راستا، مدل‌های متعددی به منظور تخمین رسوب و شناسایی نقاط حساس به فرسایش مانند WEPP، SEDMODEL، WARSEM و غیره معرفی شده‌اند که از مدل‌های متداول فرسایش سطح جاده در حوضه‌های جنگلی به شمار می‌روند (Christopher et al, 2011). مدل مورد استفاده در این تحقیق، SEDMODL و WARSEM است.

SEDMODL، یک برنامه‌ی مدل‌سازی مبتنی بر GIS است که در سال ۱۹۹۹ توسط شرکتی در شهر بیز واقع در ایالت آیداهو آمریکا و با همکاری انجمن ملی بهسازی هوا و رودخانه توسعه یافت. این مدل، قسمت‌هایی از یک جاده با پتانسیل رسوب‌دهی بالا را در سطح یک حوضه آبخیز مشخص می‌کند. این روش بر پایه‌ی روابط تجربی بین شاخص‌های فرسایش از قبیل نوع استفاده از جاده، مواد، وضعیت سطح جاده (جنس سطح)، شیب طولی جاده، پوشش گیاهی ترانشه‌ی خاک‌بررداری و میزان فاصله از آبراهه استوار است (Akay et al, 2008).

WARSEM مدل فرسایش سطح جاده‌ی واشنگتن یک مدل تجربی است که برای تخمین درازمدت رسوب ناشی از جاده‌ها - که به شبکه آبراهه‌ها وارد می‌شود - طراحی شده‌است. این مدل توسط اداره‌ی منابع طبیعی ایالت واشنگتن پیشنهاد شده‌است و می‌توان از آن در حوضه‌های آبخیز با مقیاس بزرگ، همچنین برای اعمال بهترین شیوه‌های تصمیم‌گیری در مدیریت آبخیز استفاده کرد (Fu et al, 2010).

Asadollahi و همکاران (۲۰۱۳) در تحقیقی، رسوب ناشی از شبکه جاده‌های موجود در کاربری‌های متفاوت حوضه آبخیز کجور را با استفاده از مدل تحویل رسوب در محیط GIS برآورد کردند. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که سالانه، ۱۰۵۶۰ تن رسوب از این حوضه خارج می‌شود؛ در حالی که جاده‌ی مورد مطالعه تنها ۰/۳۱ درصد از سطح حوضه را شامل

می‌شود و سهم آن در تولید رسوب خروجی از حوضه، ۵/۵۷ درصد است. Forsyth و همکاران (۲۰۰۶) در جنگل کاری‌های سوزنی برگ استرالیا و در شرایط بارندگی طبیعی، مقدار کل رسوب تولیدی توسط جاده‌ی شن‌ریزی شده را طی یک سال، ۵/۷ تن در کیلومتر و برای جاده‌ی فاقد شن‌ریزی، ۳/۹ تن در کیلومتر برآورد کردند. Surfleet (۲۰۱۱)، به منظور تعیین برآورد رسوب جاده‌ای از مدل‌های SEDMODL و WARSEM استفاده کرد. نتایج این تحقیق نشان داد که مقادیر رسوب برآوردی حوضه در صورتی می‌تواند بهبود یابد که از اندازه‌گیری‌های صحرائی و عرصه‌ای در تجزیه و تحلیل‌ها استفاده شود. Hosseini و همکاران (۲۰۱۲) با استفاده از SEDMODL، به بررسی و تخمین رسوب جاده‌های جنگلی در جنگل‌های داربکلا پرداختند و با اندازه‌گیری میزان رسوب در طول ۲۲۶۰ متر جاده‌ی جنگلی، پارسل‌های مختلف منطقه را براساس حساسیت تولید رسوب، طبقه‌بندی و شاخص‌های شیب جاده و ارتفاع دیواره‌ی خاک‌برداری را به عنوان مهم‌ترین عوامل مؤثر بر تولید رسوب در منطقه معرفی کردند. Vahabzadeh و همکاران (۲۰۱۵) با استفاده از SEDMODL، به بررسی میزان فرسایش و تولید رسوب در جاده‌ی جنگلی دارابکلا پرداختند. نتایج نشان داد که با استفاده از این مدل و شبیه‌ساز باران، مقدار رسوب تولیدی از سطح جاده به ترتیب ۴۲۰/۹۷ و ۳۴۱/۰۲ تن در سال است. آنها همچنین بیان کردند که مدل ذکر شده در برآورد میزان رسوب‌دهی جاده‌ی جنگلی، دقت و کارایی مناسبی دارد. Farokhzadeh و همکاران (۲۰۱۷) با استفاده از SEDMODL، به بررسی میزان تولید رسوب جاده‌ی جنگلی در شهرستان روانسر در استان کرمانشاه پرداختند. برای این کار، جاده‌ی ذکر شده به پنج قطعه تقسیم و در هر بخش، شاخص مورد نیاز در مدل اندازه‌گیری شد. نتایج حاصل نشان داد که این جاده‌ی با سهم ۰/۰۳ درصد از کل مساحت حوضه آبخیز، ۱۱/۹۲ تن رسوب تولید کرده و ۲/۰۶ تن رسوب را نیز به آبراهه تحویل داده‌است. همچنین براساس نتایج آزمون پیرسون، ارتفاع ترانشه‌های خاک‌برداری، پوشش محافظ دیوارها و شیب، به ترتیب به عنوان شاخص‌های اصلی مؤثر بر میزان فرسایش جاده‌ای شناخته شد. Rezaei (۲۰۱۳)، به ارزیابی و مقایسه‌ی برآورد میزان رسوب سطح جاده با استفاده از دو مدل WARSEM و SEDMODL پرداخت. نتایج نشان داد که مقدار رسوب خروجی حاصل از این دو مدل به ترتیب، ۱۳/۱۴ و ۱۸/۲۹ تن در سال بود که به طور کل، بین مقدار رسوب برآورد شده‌ی این دو مدل تفاوت معنی‌داری وجود نداشت. Abiat و همکاران (۲۰۱۴) برای بررسی میزان تولید متوسط رسوب حوضه بالا دست وردآور تهران، از مدل WARSEM استفاده کردند. نتایج نشان داد که میزان تولید رسوب برآوردی توسط این مدل تقریباً برابر ۳۳۸۴ تن در سال، معادل ۱۵۷ تن بر هکتار در سال در محدوده‌ی تحت اثر جاده است. از این میزان، ۹۸۹ تن در سال مربوط به دیواره‌ی خاک‌برداری و ۲۳۱۷ تن در سال نیز مربوط به دیواره‌ی خاک‌ریزی است. همچنین مشخص شد که سه عامل ارتفاع دیواره، پوشش سطحی و فرسایش‌پذیری سازند زمین‌شناسی منطقه، مؤثرترین عوامل در تولید رسوب است.

Parsakhoo (۲۰۱۲) با استفاده از شبیه‌ساز باران، به بررسی هدررفت خاک و رواناب در بخش‌های مختلف ساختمان جاده‌ی جنگلی 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 بیش از بخش‌های خاک‌ریزی و خاک‌برداری جاده است. Madadi and Piroozi (۲۰۱۶) با استفاده از مدل WEPP و مقایسه‌ی آن با روش مستقیم، به

برآورد فرسایش خاک و تولید رسوب در حوضه‌ی لای‌چای پرداختند. نتایج حاصل از این مطالعه نشان داد که مقدار برآورد فرسایش و رسوب با مدل WEPP و روش مستقیم، نزدیک به هم و به ترتیب برابر با ۰/۳۰۸ و ۰/۳۱۹ تن در هکتار در سال است و این روش برای برآورد میزان فرسایش و رسوب در منطقه‌ی مورد مطالعه مناسب می‌باشد. Akay و همکاران (۲۰۰۷)، مدل‌هایی را براساس روابط تجربی میان شاخص‌های محرک فرسایش تحت عنوان SEDMODL، برای حوضه آبخیز جنگلی باسکنوس واقع در غرب شهر کهرمنمرس ترکیه طراحی کردند که امکان محاسبه‌ی حجم سالانه‌ی رسوب حاصل از شبکه جاده‌های جنگلی را به کمک تکنیک‌های GIS فراهم می‌کند. در این 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 است. Fu و همکاران (۲۰۰۹) در حوضه‌های آبخیز مورویا - دوا و توروس در استرالیا، یکی از مدل‌های خاص فرسایش جاده‌ای با عنوان WARSEM را به کار بردند. نتایج نشان داد که تولید رسوب برآورد شده در حوضه‌های آبخیز مذکور، به ترتیب ۳۵ و ۲۱ هزار تن در کیلومتر مربع در سال و تحویل رسوب به رودخانه نیز به ترتیب ۶ و ۹ درصد بوده‌است. نتایج نشان داد که این مدل، میزان فرسایش خاک را بیش از مقدار واقعی برآورد می‌کند. Sugden (۲۰۱۸) نیز برای برآورد کاهش رسوب جاده‌های جنگلی با استفاده از شیوه‌های مدیریتی موجود در مناطق کوهستانی امریکا، از مدل WARSEM استفاده کرد. نتایج حاصل نشان داد که میزان رسوب برآورد شده با این مدل، حدود ۵ درصد بیش از مقدار واقعی است.

Thomas and Chen (۲۰۲۰) نیز برای بررسی میزان رسوب جاده و ارائه‌ی راهکاری مناسب برای حفظ پایداری خاک در کشور تایوان، از دو روش SEDMODL و نمونه‌گیری استفاده کردند. نتایج نشان داد که SEDMODL در اندازه‌گیری برخی از شاخص‌ها، اختلاف معنی‌داری با روش نمونه‌گیری دارد؛ بنابراین، آنها به اصلاح SEDMODL پرداختند و مدلی تحت عنوان RESDMODL ارائه کردند که این مدل می‌تواند نسبت به SEDMODL، میزان رسوب تولید شده را به طور دقیق‌تری پیش‌بینی کند. همچنین Foltz و همکاران (۱۹۹۹) به منظور تعیین میزان رواناب، نفوذ، فرسایش و غلظت رسوب در دو جاده‌ی جنگلی دارای عبور و مرور زیاد و کم در شمال امریکا، از شبیه‌ساز باران استفاده کردند. نتایج حاکی از آن بود که میزان رواناب و غلظت رسوب در جاده‌های جنگلی دارای عبور و مرور زیاد بیشتر است؛ این امر به دلیل کاهش پوشش گیاهی و تغییر در خصوصیات فیزیکی خاک می‌باشد. Sidle و همکاران (۲۰۰۴) در تحقیقات خود در جنگل‌های حاره‌ای مالزی نشان دادند که جاده‌های جنگلی با شیب زیاد (بیش از ۲۰ درصد)، میزان فرسایش‌پذیری بالاتری نسبت به جاده‌های جنگلی با شیب ملایم دارد. Dong و همکاران (۲۰۱۲) به پژوهشی در کشور چین پرداختند و جنس خاک را به عنوان مهم‌ترین عامل مؤثر در افزایش تولید رسوب معرفی کردند. Jordán-López و همکاران (۲۰۰۹)، اثرات قسمت‌های مختلف جاده در تولید رسوب را در جنگل‌های مدیترانه‌ای اندازه‌گیری کردند. نتایج آنان نشان داد که ترانشه‌ی خاک‌برداری به علت حذف پوشش گیاهی، مهم‌ترین منبع تولید رسوب در جاده‌ی جنگلی است. Skaugset و همکاران (۲۰۱۱) نیز میزان تولید رسوب ۴۴ قطعه از جاده‌های جنگلی مناطق معتدل و مرطوب ایالت ارگان کالیفرنیا را به کمک مدل‌های WEPP، RUSLE، SEDMODEL و WARSEM برآورد کردند. مدل‌های یاد شده، میزان رسوب را دو تا هشت برابر بزرگ‌تر از مقدار واقعی ارائه دادند. مقادیر به دست آمده توسط این چهار مدل

برای هر قطعه از جاده بسیار متنوع بود. Caliskan (۲۰۱۲) به کمک مدل‌های SEDMODL، WEPP و STJ-EROS، به بررسی میزان تولید رسوب جاده‌ی جنگلی در جنگل اندارباچ کشور ترکیه پرداخت. نتایج حاصل نشان داد که میزان رسوب اندازه‌گیری شده با SEDMODL، کمتر از دو مدل دیگر است و نتایج دو مدل WEPP و STJ-EROS به واقعیت نزدیک‌تر و استفاده از آنها نیز راحت‌تر است. Piscoya و همکاران (۲۰۲۰) در تحقیقی به بررسی میزان هدررفت و تعیین خصوصیات فیزیکی و هیدرولوژی خاک با استفاده از WEPPMODEL پرداختند. نتایج نشان داد که میزان هدررفت خاک با افزایش میزان جریان آب افزایش می‌یابد. Singh و همکاران (۲۰۱۱) با استفاده از مدل‌های SEDMODL، WEPP و WARSEM، مقدار رسوب و رواناب را در حوضه‌ی هیمالیای شرقی هند شبیه‌سازی کردند. نتایج نشان داد که از مدل WEPP می‌توان بهتر از دو مدل دیگر برای توسعه دادن شیوه‌های مدیریتی، شرایط بارندگی زیاد و شیب زیاد استفاده کرد. Varol و همکاران (۲۰۲۰) نیز به بررسی میزان فرسایش جاده‌ی جنگلی و عوامل مؤثر بر آن در کشور ترکیه پرداختند. نتایج حاصل از پژوهش آنها نشان داد که شیب مهم‌ترین عامل ایجادکننده‌ی فرسایش در جاده است.

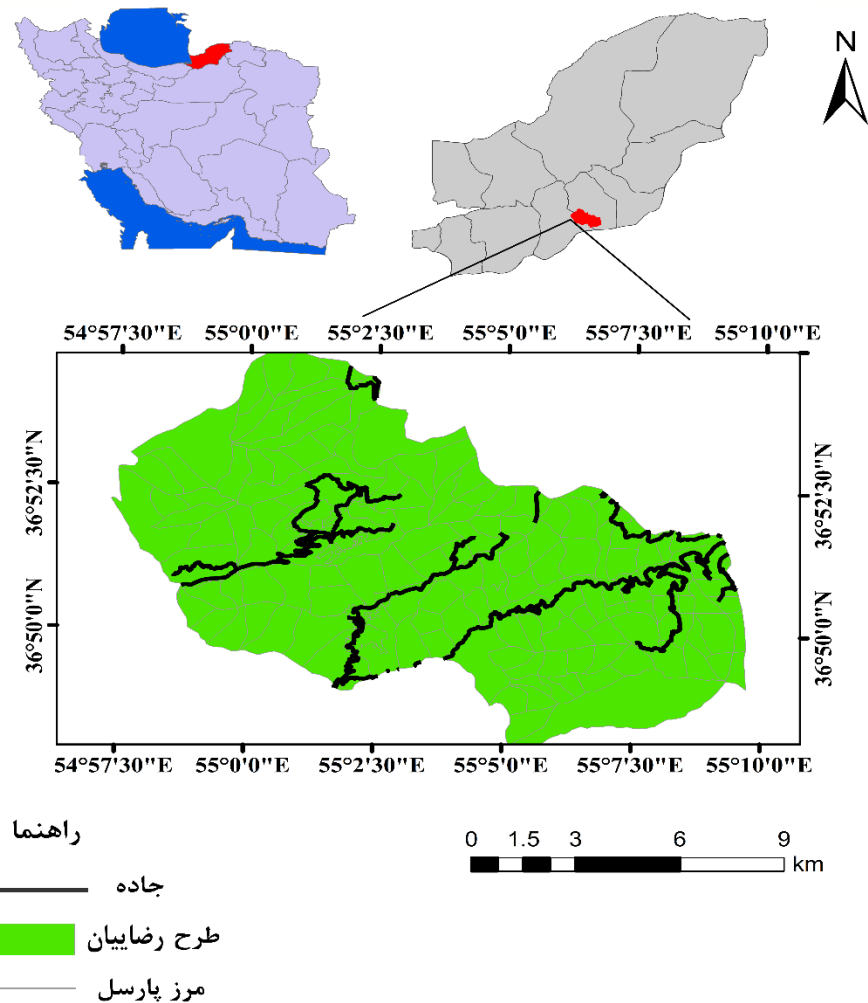
با توجه به اهمیت زیاد جنگل‌های شمال کشور از نظر اقتصادی، تجاری و زیست محیطی، تهیه و جمع‌آوری اطلاعات درباره‌ی میزان تأثیر جاده‌های جنگلی در تولید رسوب و هدررفت خاک در خروجی حوضه‌های آبخیز شمال کشور و مدیریت اصولی‌تر این جاده‌ها، ضروری و مهم است. بدیهی است که فقدان مدیریت اصولی، تهدیدی جدی برای اکوسیستم جنگل و حوضه آبخیز است. با توجه به اینکه مدل تجربی برآورد رسوب دارای قابلیت مدل‌سازی و برآورد فرآیند رسوب‌گذاری و هدررفت خاک در سطوح مختلف (یک حوضه آبخیز پهناور تا یک قطعه‌ی کوچک از جاده) است، می‌توان از آن به عنوان گزینه‌ای مناسب برای تدوین یک برنامه‌ی دراز مدت برای مدیریت پایدار جاده استفاده کرد. در مطالعه‌ی کنونی، از دو مدل SEDMODL و WARSEM برای برآورد میزان رسوب تولیدی سطح جاده استفاده شد. مقایسه‌ی نتایج مدل‌های مذکور ضمن ارزیابی مدل‌های مختلف برای دستیابی به مدل مناسب برای برآورد رسوب جاده‌های منطقه‌ی مورد مطالعه، به شناسایی مهم‌ترین شاخص‌های تولید رسوب در سطح جاده می‌پردازد و قسمت‌هایی از جاده را که حساسیت بیشتری در تولید رسوب دارد، شناسایی می‌کند. دانستن این موضوعات می‌تواند در تعمیر و نگهداری جاده‌های جنگلی و به حداقل رساندن میزان رسوب تولیدی، به مدیران جنگل‌های مورد مطالعه کمک کند.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- معرفی منطقه‌ی مورد مطالعه

این پژوهش در محدوده‌ی سری دو طرح جنگل‌داری رضاییان و در حوضه آبخیز ۸۸ طرح آبخیزداری زرین‌گل و در فاصله‌ی ۲۵ کیلومتری شرق شهرستان علی‌آباد، در محدوده‌ی جغرافیایی ۰' ۴۸" ۳۶° تا ۰' ۳۰" ۵۴" ۳۶° عرض شمالی و ۰' ۰" ۵۵° تا ۰' ۰۶" ۵۵° طول شرقی انجام شد. با استناد به اطلاعات و آمار هواشناسی منطقه و با استفاده از ضریب خشکی دومارتین و نقشه‌های پهنه‌بندی اقلیم، این منطقه جزء اقلیم نیمه مرطوب است. حداقل ارتفاع این منطقه از سطح دریا، ۲۸۰

متر و حداکثر ۲۴۷۰ متر است. کل جاده‌ی موجود در این سری، ۲۱/۷ کیلومتر است که به طور کامل از نوع جاده‌ی درجه دوم و تراکم جاده‌ای آن ۱۲/۲ متر در هکتار است



شکل ۱: موقعیت جغرافیایی منطقه‌ی مورد مطالعه

۲-۲- تهیه و جمع‌آوری داده‌ها

برای محاسبه‌ی هر کدام از شاخص‌ها در WARSEM و SEDMODL، به مجموعه‌ای از داده‌ها نیاز بود که برخی از آنها از نقشه‌های پایه‌ی توپوگرافی، جاده و آبراهه‌ی منطقه با مقیاس ۱:۲۵۰۰۰ و نقشه‌های پایه‌ی زمین‌شناسی با مقیاس ۱:۲۵۰۰۰ در محیط ARC GIS تهیه شد. مشخصات سطح جاده، وضعیت ترافیکی و بارندگی منطقه نیز از کتابچه‌ی طرح رضاییان استخراج شد. طی عملیات صحرایی، اطلاعات شیب طولی جاده، ارتفاع ترانشه‌ی خاک برداری، پوشش گیاهی و سنگی محافظ ترانشه‌های خاک برداری، جنس سطح جاده و طول و عرض جاده برداشت شد؛ به این صورت که ابتدا طول جاده به فاصله‌های کوتاهی تقسیم شد. این تقسیم‌بندی براساس بخش‌هایی از جاده که از نظر عرض، شیب، وجود ترانشه‌ی

خاک‌برداری یا فقدان آن، پوشش گیاهی و سنگی محافظ ترانشه‌های خاک‌برداری و ارتفاع ترانشه‌های خاک‌برداری وضعیت یکسانی داشتند، انجام و به عنوان یک واحد همگن در نظر گرفته شد. براساس این اطلاعات، جاده‌های مورد مطالعه به ۲۵ واحد همگن تقسیم و داده‌های لازم از هر کدام از این واحدها به صورت جداگانه برداشت شد.

۲-۳- مدل پیش‌بینی رسوب SEDMODL

چهار عامل اصلی تولید رسوب از جاده‌های جنگلی، سطح جاده، ترانشه‌ی خاک‌برداری، ترانشه‌ی خاک‌ریزی و شبکه هیدرولوژیکی منطقه است. اساس این مدل، بر مبنای تقسیم کل رسوب تولیدی به دو بخش رسوب مربوط به سطح جاده و جوی کناری آن همچنان رسوب حاصل از دیواره‌ی خاک‌برداری است. ذکر این امر لازم است که از رسوب حاصل از دیواره‌ی خاک‌ریزی به دلیل ناچیز بودن مقدار آن صرف‌نظر می‌شود؛ بنابراین، میزان کل انتقال رسوب توسط جاده از طریق رابطه‌ی ۱ محاسبه می‌شود (Duff, 2010):

$$E = (TS + CS) \times Af \quad \text{رابطه‌ی ۱}$$

E: میزان کل انتقال رسوب توسط جاده بر حسب تن در سال، TS: کل رسوب تولیدی مربوط به سطح جاده بر حسب تن در سال، CS: کل رسوب تولیدی مربوط به دیواره‌ی خاک‌برداری بر حسب تن در سال و Af: شاخص مربوط به سن جاده است که رسوب کل را تحت تأثیر قرار می‌دهد. 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، شاخص سن جاده در رابطه وارد می‌شود (Akay et al, 2007). میزان این شاخص برای جاده‌هایی که یک سال از ساخت آن می‌گذرد، ۱۰ و برای جاده‌هایی که بیش از دو سال از ساخت آنها گذشته باشد، ۲ است (Duff, 2010). برای محاسبه‌ی TS نیز از رابطه‌ی ۲ استفاده می‌شود:

$$TS = Lr \times Wr \times GEr \times Sf \times Tf \times Gf \times Pf \times Df \quad \text{رابطه‌ی ۲}$$

Lr: طول جاده، Wr: عرض جاده، GEr: میزان فرسایش زمین‌شناسی، Sf: شاخص مربوط به سطح جاده و Tf: شاخص ترافیک برای محاسبه‌ی CS از رابطه‌ی ۳ استفاده می‌شود:

$$CS = GEr \times CSf \times CSh \times Lr \times Df \quad \text{رابطه‌ی ۳}$$

CSf: شاخص پوشش دیواره‌ی خاک‌برداری، GEr: میزان فرسایش زمین‌شناسی، CSh: ارتفاع دیواره‌ی خاک‌برداری، Lr: طول جاده و Df: شاخص انتقال رسوب است.

۴-۲- مدل پیش‌بینی رسوب WARSEM

WARSEM مدلی تجربی است که مقدار تقریبی متوسط رسوب رسیده به آبراهه از جاده را در طولانی مدت، صرف نظر از نوع فرسایش برآورد می‌کند (Fu et al, 2010). روابط ۴ تا ۶، معادلات اصلی این مدل است که از آن برای محاسبه‌ی رسوب‌دهی ناشی از جاده‌ها استفاده می‌شود (Dub et al, 2004):

$$E = (Rs + Cs) \times Ag$$

رابطه‌ی ۴

$$Rs = G \times Sf \times T \times L \times W \times S \times R \times SDRR-S$$

رابطه‌ی ۵

$$Cs = G \times Cf \times L \times H \times R \times SDRR-S$$

رابطه‌ی ۶

که در این روابط، E : کل رسوب رسیده به آبراهه از هر قطعه جاده بر حسب تن در سال، Rs : رسوب رسیده به آبراهه از سطح جاده و شانه‌های هر قطعه جاده بر حسب تن در سال، Cs : رسوب رسیده به آبراهه از دیواره‌ی خاک برداری قطعه (بازه) جاده بر حسب تن در سال، Ag : عامل سن جاده، G : عامل زمین‌شناسی، Sf : عامل پوشش سطح جاده، T : عامل ترافیک، L : طول بخش مورد نظر بر حسب متر، W : عرض متوسط سطح و شانه‌ی قطعه جاده بر حسب متر، S : عامل شیب جاده، $SDRR-S$: عامل تجربی تحویل رسوب از سطح هر قطعه جاده، Cf : عامل پوشش بخش خاک برداری، H : ارتفاع خاک برداری بر حسب متر، R : عامل بارندگی که با رابطه‌ی خاصی بر اساس متوسط بارندگی سالانه بر حسب میلی‌متر محاسبه می‌شود.

۴-۵- شاخص فرسایش زمین‌شناسی (GER)

میزان تولید رسوب، با توجه به وضعیت زمین‌شناسی از جدول ۱ استخراج می‌شود. مطابق این جدول و خصوصیات زمین‌شناسی منطقه‌ی مورد مطالعه، میزان فرسایش زمین‌شناسی در این تحقیق ۳۷ تن در هکتار در سال در نظر گرفته شد.

جدول ۱: میزان فرسایش با توجه به وضعیت زمین‌شناسی و سنگ‌شناسی (تن در هکتار در سال) (Ketcheson and Megahan, 1996)

سن زمین‌شناسی تشکیلات					
سنگ‌شناسی	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 آذین نفوذی	-	۳۷	۳۷	۳۷	۳۷
رسوبات سخت	-	۳۷	۳۷	-	-
رسوبات گراولی	۳۷	۳۷	-	-	-
رسوبات نرم	۷۴	۷۴	-	-	-
رسوبات نرم دانه‌ریز	۱۴۸	۱۴۸	-	-	-

۶-۲- شاخص سطح جاده (Sf)

کیفیت مواد مادری سطح جاده، بر میزان رسوب‌دهی تأثیر مستقیمی دارد. میزان فرسایش سطح جاده برای بخش‌های مختلف، مطابق جدول ۲ است (Foltz and Burroughs, 1990). میزان فرسایش برای این عامل در تمام بخش‌های جاده‌ی مورد مطالعه نیز ۰/۲ در نظر گرفته شد.

جدول ۲: مقادیر شاخص سطح جاده (Foltz and Burroughs, 1990)

نوع سطح	آسفالت	شن	خاک‌درهم	پوشش علفی	بستر طبیعی	بستر طبیعی همراه با شیار
شاخص سطح	۰/۰۳	۰/۲	۰/۵	۰/۵	۱	۲

۷-۲- شاخص ترافیک (Tf)

نوع استفاده از جاده و وضعیت ترافیک، بر میزان رسوب‌دهی جاده نیز تأثیر دارد (Foltz, 1999). میزان ترافیک جاده-ی مزبور به عنوان جاده‌ی درجه دو با توجه به جدول شماره‌ی ۳ میزان فرسایش در منطقه، ۲ در نظر گرفته شد.

جدول ۳: میزان شاخص ترافیک برای جاده‌های مختلف (Foltz, 1999)

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

۸-۲- شاخص شیب جاده (Gf)

شیب یکی از عواملی است که در میزان رسوب‌دهی نقشی مؤثر دارد. مطابق جدول ۴، میزان فرسایش بر مبنای طبقات مختلف شیب تعریف شده است (Reinig et al, 1991).

جدول ۴: میزان شاخص شیب برای شیب‌های مختلف جاده‌ی جنگلی (Reinig et al, 1991)

درصد شیب	کمتر از ۵ درصد	۵ - ۱۰ درصد	بیش از ۱۰ درصد
شاخص شیب	۰/۲	۱	۲/۵

۹-۲- شاخص پوشش گیاهی و سنگی اطراف جاده (CSf)

این عامل می‌تواند به عنوان درصدی از پوشش گیاهی و سنگی تخریب نشده در بخش ترانشه‌ی خاک برداری، پشت‌هی خاک‌ریزی و بستر جاده بیان شود. بر این اساس، در جدول ۵ میزان فرسایش مربوط به درصدهای مختلف پوشش گیاهی و سنگی ترانشه‌ی خاک برداری ذکر شده است (Luce and Black, 1999).

جدول ۵: فاکتور پوشش دیواره‌ی خاک برداری (Luce and Black, 1999)

درصد پوشش گیاهی یا سنگ	۰	۱۰	۲۰	۳۰	۴۰	۵۰	۶۰	۷۰	۸۰	۹۰	۱۰۰
شاخص پوشش	۱	۰/۷۷	۰/۶۱	۰/۵۲	۰/۴۴	۰/۳۷	۰/۳۱	۰/۲۵	۰/۲۰	۰/۱۵	۰/۰۱

۱۰-۲- شاخص انتقال رسوب (Df)

برای محاسبه‌ی شاخص انتقال رسوب، از میزان فاصله‌ی نقطه‌ی مرکزی جاده تا نقطه‌ی مرکزی رودخانه استفاده می‌شود. با افزایش فاصله‌ی جاده نسبت به رودخانه، از میزان انتقال رسوب کاسته می‌شود (WDNR, 1995).

جدول ۶: شاخص انتقال رسوب (WDNR, 1995)

فاصله‌ی مرکز جاده از آبراهه	۰	کمتر از ۳۰ متر	۳۰ - ۶۰ متر	بیش از ۶۰ متر
شاخص انتقال رسوب	۱	۰/۳۵	۰/۱۰	۰

۱۱-۲- شاخص ارتفاع دیواره‌ی خاک برداری (CSH)

افزایش ارتفاع دیواره‌ی خاک برداری به تشدید خزش خاک، فرسایش ورقه‌ای و لغزش شده منجر می‌شود و در نتیجه، سبب بالا رفتن میزان انتقال رسوب از دیواره به زهکش می‌شود (WDNR, 1995) در مطالعات صورت گرفته، میانگین ارتفاع دیواره‌ی خاک برداری برای کلاس‌های شیب، مطابق جدول ۷ است.

جدول ۷: شاخص ارتفاع دیواره‌ی خاک‌برداری (WDNR, 1995)

کلاسه‌ی شیب	۱۵-۰ درصد	۳۰-۱۵ درصد	۶۰-۳۰ درصد	بالای ۶۰ درصد
ارتفاع دیواره‌ی خاک‌برداری	۰/۷۵	۱/۵	۳	۷/۵

۱۲-۲- شاخص بارندگی

میزان تولید رسوب جاده‌های جنگلی، تحت تأثیر بارندگی محل قرار دارد. شاخص بارندگی را می‌توان با توجه به میانگین بارندگی سالانه به میلی‌متر و از رابطه‌ی ۷ محاسبه کرد.

$$P_f = \left(\frac{P_{avr}}{1524} \right)^{1/8} \quad \text{رابطه‌ی ۷}$$

P_{avr} : میانگین بارندگی سالانه برحسب میلی‌متر.

پارامترهای مؤثر بر تولید رسوب مانند طول، عرض، ارتفاع دیواره‌ی خاک‌برداری با استفاده از متر، شیب جاده و دیواره‌ها با استفاده از شیب‌سنج و درصد پوشش، به صورت تخمینی در هر قطعه از جاده برداشت و سن جاده نیز از کتابچه‌ی طرح استخراج شد. با توجه به اینکه جاده از نوع جاده‌های درجه دو جنگلی است، عواملی مانند ترافیک و نوع مصالح به کار رفته در ساختمان جاده، برای کل مقاطع ثابت در نظر گرفته شد.

۱۳-۲- اندازه‌گیری رسوب به روش مستقیم

برای اندازه‌گیری مقدار واقعی رسوب سطح جاده، در انتهای هر قطعه با ایجاد یک تله‌ی رسوب‌گیر و قرار دادن ظرف مناسب پس از هر بارندگی به نمونه‌برداری پرداخته شد؛ به این صورت که پس از ته‌نشین شدن رسوب در ظرف، حجم آب برحسب لیتر اندازه‌گیری شد. سپس رسوب ته‌نشین شده از ظرف خارج و در داخل آون گذاشته شد و پس از خشک شدن، مقدار رسوب بر حسب گرم در مترمربع محاسبه شد. غلظت رسوب در آزمایشگاه، به روش فیلتراسیون نمونه بار معلق و عبور نمونه رواناب از کاغذ صافی واتمن ۴۲ به دست آمد. سپس نمونه‌های رسوب، به مدت ۲۴ ساعت در دستگاه آون و در دمای ۱۰۵ درجه‌ی سانتی‌گراد قرار داده شد. پس از این مدت، نمونه پس از سرد شدن در دسی‌کاتور با ترازوی دیجیتالی با دقت یک هزارم وزن شد و غلظت رسوب از طریق تقسیم جرم رسوب (گرم) به حجم رواناب (لیتر) به دست آمد. نتایج حاصل از این دو مدل در نرم‌افزار SPSS و از طریق T-Student با هم مقایسه شد.



شکل ۲: جمع‌آوری اطلاعات میدانی و نصب تله‌ی رسوب‌گیر در قطعات مورد مطالعه

۳- نتایج

نتایج بررسی نقشه‌ها در محیط GIS و بازدیدهای میدانی نشان داد که ۳۷۴ متر از طول جاده، در فاصله‌ی کمتر از ۳۰ متر از آبراهه و ۱۴۱ متر از آن در فاصله‌ی بین ۶۰ - ۳۰ متر از آبراهه واقع است. به‌علاوه، ۱۳۱۱ متر از جاده در فاصله‌ی بیش از ۶۰ متر از آبراهه قرار دارد که در این قسمت‌ها میزان شاخص انتقال رسوب صفر و در نتیجه میزان رسوب کل در این نقاط صفر است. همچنین ۹۱۶ متر از طول جاده نیز نقاطی بودند که در آن جاده و آبراهه همدیگر را به‌طور مستقیم قطع می‌کردند. این فاصله‌ها به تفکیک در هر سه قطعه مشخص و نتایج آن در جدول ۸ ارائه شد.

جدول ۸: طول جاده در فواصل مختلف جاده از آبراهه در پارسل‌های مختلف منطقه‌ی مورد مطالعه در دو مدل WARSEM و SEDMODL

شماره‌ی پارسل	قطع آبراهه	کمتر از ۳۰ متر	۶۰ - ۳۰ متر	بیش از ۶۰ متر	کل پارسل
۲۰۲	۲۵۰	۱۷۷	۱۴۱	۳۴۲	۹۱۰
۲۲۱	۴۹۲	۱۹۷	-	۲۱۹	۹۰۸
۲۴۴	۱۷۴	-	-	۶۱۰	۷۸۴
جمع	۹۱۶	۳۷۴	۱۴۱	۱۱۷۱	۲۶۰۲

جدول ۹: قطعه‌بندی شبکه‌ی جاده و تعیین فواصل مختلف جاده از آبراهه

تعداد قطعه	تحویل مستقیم	۰-۳۰	۳۰-۶۰	بدون تحویل
۲۵	۹	۳	۲	۱۱

۳-۱. محاسبه‌ی فرسایش و برآورد رسوب

با استفاده از شاخص‌های به دست آمده و فرمول‌های مربوطه، میزان تولید رسوب در جاده‌های جنگلی منطقه پیش‌بینی شد. نتایج محاسبه‌ی میزان فرسایش و تولید رسوب در جاده‌ها و قطعه‌های مختلف با استفاده از SEDMODL و WARSEM به ترتیب ۲۳/۸۷ و ۲۰/۰۷ تن در سال است. همچنین مقدار رسوب ویژه‌ی پیش‌بینی با استفاده از SEDMODL و WARSEM به ترتیب ۱۴/۱۱ و ۱۱/۸۷ تن در هکتار در سال است.

جدول ۱۰: مقدار رسوب قطعات سطح جاده در SEDMODL و WARSEM

شماره‌ی قطعه	طول جاده (متر)	شیب (درصد)	عرض جاده (متر)	مساحت جاده (مترمربع)	رسوب سطح جاده SEDMODL، تن در سال	رسوب سطح جاده WARSEM، تن در سال
۱	۶۱	۱	۶/۵	۳۹۶/۵	۰/۰۴	۰/۰۳
۲	۱۴۴	۵	۶/۵	۹۳۶	۰	۰
۳	۸۰	۱	۶/۵	۵۲۰	۰/۰۸	۰/۰۵
۴	۱۷۷	۶	۶/۵	۱۱۵۰/۵	۱/۲۴	۱/۱۶
۵	۱۳۸	۰	۶/۵	۸۹۷	۰	۰
۶	۶۷	۶	۶/۵	۴۳۵/۵	۱/۴۹	۱/۳۳
۷	۹۸	۹	۶/۵	۶۳۷	۴/۵۳	۴/۴۴
۸	۶۰	۵	۶/۵	۳۹۰	۰	۰
۹	۸۵	۳	۶/۵	۵۵۲/۵	۲/۱۹	۱/۱۷
۱۰	۱۰۱	۵	۶/۵	۶۵۶/۵	۰	۰
۱۱	۱۱۲	۳	۶/۵	۷۲۸	۱/۳۹	۰/۸۶
۱۲	۱۱۸	۶	۶/۵	۷۶۷	۰	۰
۱۳	۱۲۹	۷	۶/۵	۸۳۸/۵	۲/۳۲	۲/۱۵
۱۴	۶۸	۵	۶/۵	۴۴۲	۱/۱۰	۱/۰۷
۱۵	۱۴۲	۴	۶/۵	۹۲۳	۰/۷۴	۰/۶۱
۱۶	۱۴۳	۷	۶/۵	۹۲۹/۵	۳/۰۲	۲/۷۷
۱۷	۹۵	۶	۶/۵	۶۱۷/۵	۲/۳۲	۱/۹۸
۱۸	۷۳	۰	۶/۵	۴۷۴/۵	۰	۰
۱۹	۱۱۵	۵	۶/۵	۷۴۷/۵	۰	۰
۲۰	۸۷	۰	۶/۵	۵۶۵/۵	۰	۰
۲۱	۱۱۱	۳	۶/۵	۷۲۱/۵	۱/۷۲	۱/۳۳
۲۲	۹۸	۵	۶/۵	۶۳۷	۰	۰
۲۳	۱۰۳	۵	۶/۵	۶۶۹/۵	۰	۰

۰	۰	۸۷۱	۶/۵	۵	۱۳۴	۲۴
۱/۶۰	۱/۶۳	۴۰۹/۵	۶/۵	۲	۶۳	۲۵

نتایج نشان می‌دهد که شیب طولی بر میزان تولید رسوب برآورد شده توسط دو مدل WARSEM و SEDMODL، در سطح احتمال پنج درصد تأثیر معنی‌داری دارد؛ در حالی که این شاخص بر مقدار رسوب اندازه‌گیری شده در شرایط واقعی تأثیری نداشته است (جدول ۱۱).

جدول ۱۱: آنالیز واریانس تأثیر شیب طولی بر رسوب برآوردی توسط SEDMODL، WARSEM و مقدار واقعی

مقدار F	میانگین مربعات	درجه آزادی	مدل
۵/۳۲*	۹۷۶۱	۱	SADMODL
۳/۹۶*	۸۸۰۴	۱	WARSEM
۱/۸۷ ^{ns}	۴۶۷۲	۱	مقدار اندازه‌گیری شده

ns بیانگر غیرمعنی‌داری و * بیانگر معنی‌داری در سطح احتمال ۵ درصد است.

همچنین مقدار رسوب برآورد شده توسط مدل‌ها در کلاس‌های شیب ۵-۱۰، به طور معنی‌داری بیش از کلاس‌های شیب ۵-۰ درصد است (جدول ۱۲).

جدول ۱۲: مقایسه‌ی میانگین رسوب اندازه‌گیری شده و برآوردی در کلاس‌های مختلف شیب طولی جاده

۱۰-۵	۰-۵	شیب
		رسوب (تن در هکتار در سال)
۲/۱۳	۰/۴۹	SEDMODL
۳/۴۶	۰/۳۴	WARSEM
۱/۳۴	۰/۲۹	مقدار اندازه‌گیری شده

بین مقدار رسوب برآورد شده توسط دو مدل WARSEM و SEDMODL تفاوت معنی‌داری وجود نداشت، ولی این مقدار برآوردی در سطح احتمال پنج درصد بیش از مقدار اندازه‌گیری شده بود (جدول ۱۳).

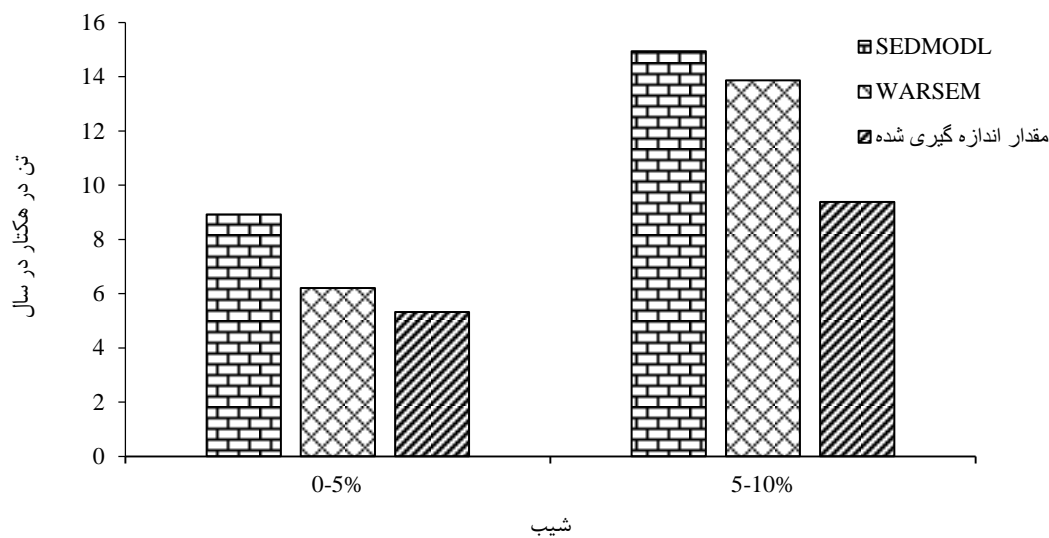
جدول ۱۳: مقایسه‌ی مقادیر رسوب ویژه‌ی برآوردی و اندازه‌گیری شده

تن در هکتار در سال	مدل
۱۴/۱۱	SEDMODL
۱۱/۸۷	WARSEM
۸/۶۹	مقدار اندازه‌گیری شده

اعتبارسنجی دو مدل WARSEM و SEDMODL و مقایسه‌ی آنها با مقدار اندازه‌گیری شده نشان داد که بین این دو با مقدار واقعی اختلاف معنی‌داری وجود دارد و هر دو مدل، مقدار رسوب را بیش از مقدار واقعی برآورد می‌کنند (جدول ۱۴ و شکل ۳).

جدول ۱۴: مقایسه‌ی میانگین رسوب اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده در کلاسه‌های مختلف شیب طولی جاده

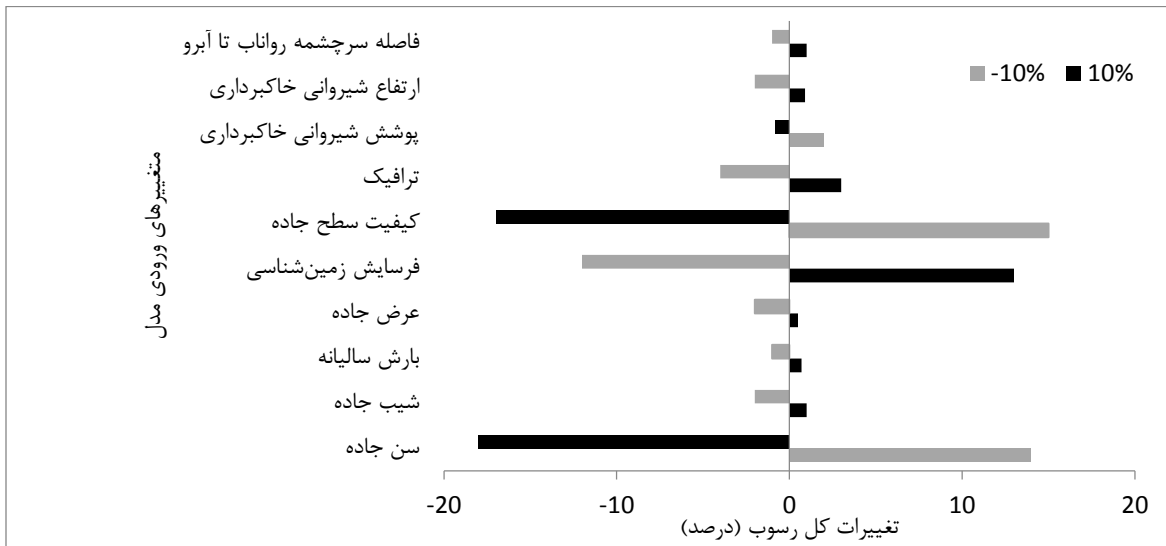
رسوب		شیب
۵-۱۰	۰-۵	
۲/۱۳ ^b	۰/۴۹ ^a	SEDMODL (تن در هکتار در سال)
۳/۴۶ ^b	۰/۳۴ ^a	WARSEM (تن در هکتار در سال)
۱/۳۴ ^b	۰/۲۹ ^a	مقدار اندازه‌گیری شده (تن در هکتار در سال)



شکل ۳: تغییرات رسوب تولیدی در دو مدل WARSEM و SEDMODL در دو کلاسه شیب و مقدار اندازه‌گیری شده

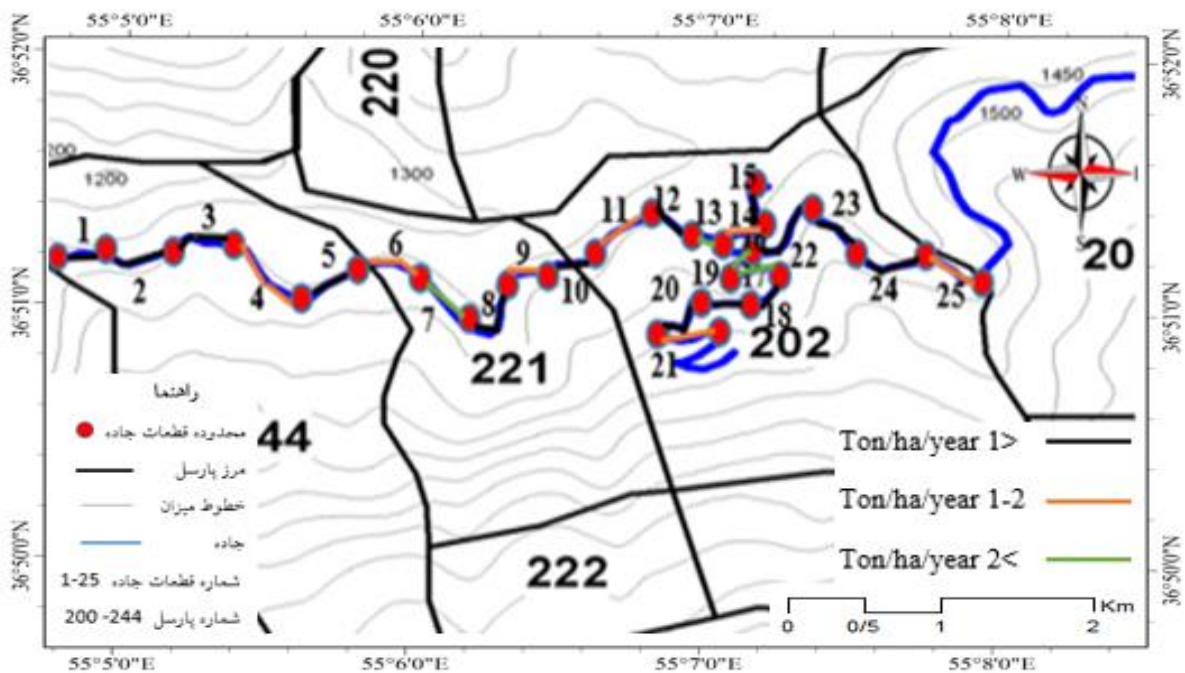
نتایج درصد تغییرات کل رسوب برآورد شده توسط مدل‌ها نسبت به متغیرهای ورودی نشان می‌دهد که بیشترین حساسیت کل رسوب نسبت به سن جاده، کیفیت سطح جاده و فرسایش زمین‌شناسی است. با افزایش ۱۰ درصدی کیفیت سطح جاده، میزان کل رسوب ۱۷ درصد کاهش و با کاهش ۱۰ درصدی این عامل، کل رسوب ۱۵ درصد افزایش یافت. همچنین با افزایش ۱۰ درصدی سن جاده، میزان کل رسوب ۱۸ درصد کاهش و با کاهش ۱۰ درصدی این عامل، کل رسوب ۱۴ درصد افزایش یافت. با افزایش ۱۰ درصدی فرسایش زمین‌شناسی، میزان کل رسوب ۱۳ درصد افزایش و با کاهش ۱۰ درصدی این عامل، کل رسوب ۱۲ درصد کاهش یافت. مقدار رسوب برآورد شده، حساسیت کمی را نسبت به

سایر متغیرهای ورودی نشان می‌دهد. با توجه به حساسیت مدل‌ها به متغیرهای اشاره شده و ویژگی‌های جاده‌ی مورد بررسی، میزان کل رسوب بیش از میزان واقعی است (شکل ۴).



شکل ۴: حساسیت کل رسوب برآورد شده توسط مدل‌ها به متغیرهای ورودی مدل

همچنین نتایج نشان می‌دهد که پتانسیل تحویل رسوب برآورد شده توسط WARSEM و SEDMODL، به قسمتی از جاده بازمی‌گردد که در پارسل ۲۰۲ قرار دارد (شکل ۵).



شکل ۵: نقشه‌ی خطر رسوب‌دهی جاده‌ی مورد مطالعه

۴- بحث و نتیجه‌گیری

نتایج نشان داد که میزان فرسایش در جاده‌های منطقه با استفاده از دو مدل WARSEM و SEDMODL به ترتیب برابر با ۲۰/۰۷ و ۲۳/۸۷ تن در سال است و با مقدار واقعی اندازه‌گیری شده تفاوت معنی‌داری دارد که این امر می‌تواند ناشی از عملکرد این دو مدل باشد. WARSEM و SEDMODL بیشتر داده‌ها در قالب کد به مدل وارد می‌شود و به کمک این مدل‌ها، کل شبکه‌ی جاده‌ی جنگلی منطقه‌ی مورد مطالعه ارزیابی می‌شود، ولی در اندازه‌گیری زمینی، جمع‌آوری رواناب از قطعات ممکن نیست و دلیل آن هم این است که بخشی از رواناب در فرورفتگی و شیارهای سطح جاده جمع شده‌است و امکان نمونه‌گیری وجود ندارد. این مسئله سبب شده‌است که مقدار اندازه‌گیری شده، دقت بالایی نداشته و اختلاف معنی‌داری با مدل‌ها داشته باشد که با نتایج Hosseini و همکاران (۲۰۱۲) مطابقت دارد. نتایج حاصل از اعتبارسنجی نشان داد که WARSEM و SEDMODL، میزان فرسایش خاک را بیش از مقدار واقعی برآورد می‌کند که با نتایج Rezaei (۲۰۱۳) و SKausgset و همکاران (۲۰۱۱) مطابقت دارد.

میزان تحویل رسوب جاده در این منطقه توسط مدل WARSEM، برابر با ۲۰/۰۷ تن در سال است که با نتایج حاصل از Fu و همکاران (۲۰۰۸)، Rezaei (۲۰۱۳) و Abiat و همکاران (۲۰۱۴) مطابقت ندارد. دلیل اختلاف مقادیر به دست آمده توسط این مدل در مناطق مختلف، به عواملی همچون خصوصیات فیزیوگرافی، اقلیم، زمین‌شناسی و مشخصات فنی جاده‌ها بازمی‌گردد.

نتایج حاصل از این تحقیق نشان داد که میزان تولید رسوب در جاده‌های جنگلی به عواملی مانند نوع جاده، میزان شیب و فاصله‌ی جاده از آبراهه بستگی دارد. از آن جایی که یکی از کاربردهای SEDMODL، تعیین سطوحی از جاده است که حساسیت بالایی نسبت به فرسایش و تولید رسوب دارد، نتایج تحقیق نشان داد که واحدهای همگن جاده که در قسمت‌های بالا دست مسیر قرار داشتند، میزان تحویل رسوب و حساسیت بالایی دارند. بنابراین در اجرای عملیات کنترل، باید این واحدها در اولویت قرار گیرند.

نتایج حاصل از این بررسی نشان داد که بین شاخص شیب طولی جاده و مقدار رسوب برآورد شده توسط مدل‌های تجربی، در سطح احتمال پنج درصد تأثیر معنی‌داری وجود داشت؛ در حالی که این فاکتور بر مقدار رسوب اندازه‌گیری شده‌ی واقعی تأثیری نداشت. مقدار رسوب برآورد شده توسط مدل‌ها در کلاسه شیب ۵-۱۰ درصد، به طور معنی‌داری کمتر از کلاسه شیب ۱۰-۵ درصد بود که با نتایج حسینی و همکاران (۱۳۹۱)، Akay و همکاران (۲۰۰۷) و Fu و همکاران (۲۰۰۸) مطابقت داشت. دلیل این امر این است که همه‌ی متغیرهای ورودی مدل، به جز شاخص شیب و فاصله‌ی جاده تا آبراهه در تمام قطعات یکسان بود و در اندازه‌گیری مقدار واقعی رسوب، عامل شیب معنی‌دار نشد؛ به این دلیل که میزان کوبیدگی و تعداد چاله در شیب کم بیشتر است و به دلیل کیفیت پایین مصالح روسازی و حل شدن آنها در آب، رسوب ایجاد می‌شود. نتایج این بررسی نشان داد که در جاده‌های جنگلی منطقه‌ی مورد مطالعه از بین شاخص‌های مؤثر بر تولید و تحویل رسوب به آبراهه، شاخص شیب و فاصله از جاده مؤثرترین شاخص‌ها است که این نتایج با نتایج حاصل از تحقیق

Hosseini و همکاران (۲۰۱۲)، farokhzadeh و همکاران (۲۰۱۷) و Sidle و همکاران (۲۰۰۴) مطابقت دارد. اگر برای تهیه نقشه‌ی پایداری زمین از روی هم‌گذاری لایه‌های مختلف اطلاعاتی استفاده شود، نقشه‌ی فرسایش خاک منطقه به-عنوان یک لایه‌ی ارزشمند اطلاعاتی در طراحی مسیر جاده، می‌تواند مانع از مشکلات مربوط به فرسایش و رسوب بعد از ساخت شود.

با محاسبه‌ی میزان فرسایش و تولید رسوب در جاده و قطعات مختلف با استفاده از WARSEM و SEDMODL و مقایسه‌ی آنها با مقدار اندازه‌گیری شده، مشخص شد که کل میزان فرسایش در جاده‌های منطقه با استفاده از WARSEM و SEDMODL به ترتیب ۲۰/۰۷ و ۲۳/۸۷ تن در سال است. به طور کلی، بین مقدار رسوب برآورد شده توسط WARSEM و SEDMODL تفاوت معنی‌داری وجود نداشت، اما این مقادیر برآوردی در سطح احتمال پنج درصد بیش از مقدار اندازه‌گیری شده بود. همچنین شیب طولی جاده بر مقدار رسوب برآورد شد. متوسط مدل‌های تجربی در سطح احتمال پنج درصد تأثیر معنی‌داری داشت. با توجه به شاخص‌های اندازه‌گیری شده WARSEM و SEDMODL به منظور برآورد رسوب جاده و میزان تأثیر آنها، به این نتیجه می‌رسیم که آنچه در قالب عملیات مدیریتی می‌توان انجام داد؛ شامل طراحی و عبور جاده از سازندهای مقاوم زمین‌شناسی، بهبود کیفیت روسازی، کاهش سطح تحویل‌دهنده‌ی رسوب و کاهش ترافیک است.

منابع

1. Abiat, S.; Arabkhedri, M.; & A. Ahmadi, 2014. Estimation of sediment yield in roads by combining survey sampling design and WARSEM, *Watershed Management Research (Pajouhesh & Sazandegi)*, 108, 26-39. (In Persian).
2. Akay, A. E.; Boston, K.; & J. Sessions, 2005. Forest operations: roading and transport operations. In: Burley J, Youngquist Ja, editors. *Encyclopedia of forest sciences*, Oxford, UK: Elsevier Limited.
3. Akay, A. E.; Erdas, O.; Reis, M.; & A. Yuksel, 2007. Estimating sediment yield from a forest road network by using a sediment prediction model and GIS techniques, *Journal of Building and Environment*, 43(5), 687-695.
4. Asadollahi, Z.; Niazi, A.; Yosefi, S.; Asadollahi, Z.; & M. Mohammady, 2013. Determination of roads quota in watershed sediment yield using SEDMODEL and GIS, *E.E.R.*, 3(2), 13-26. (in Persian).
5. Binkley, D., & T. C. Brown., (1993). Forest practices as nonpoint sources of pollution in North America. *Journal of the American Water Resources Association*. 29, 729-740.
6. Caliskan, E., 2012. Evaluation of Sediment Erosion Prediction Models to Forest Road in Mountain Area, *Journal of Applied Environmental and Biological Sciences*, 2(11), 567-580.
7. Chen, W., & K. Thomas., (2020). Revised SEDD (RSEDD) Model for Sediment Delivery Processes at the Basin Scale. *Journal of Sustainability*. 12(12), 4928.
8. Christopher, S.; Arne, S.; & W. Matthew, 2011. Road runoff and sediments sampling for determining road sediment yield at the watershed scale, *Canadian Journal of Forest Research*, 41(10), 1970-1980.

9. Demir, M., & M. Hasdemir., (2005). Functional planning criterion of forest road network systems according to recent forestry development and suggestion in Turkey. *American Journal of Environmental Sciences*. 1(1), 22-8.
10. Dong, J.; Zhang, K.; & Z. Guo, 2012. Runoff and soil erosion from highway construction spoil deposits: A rainfall simulation study, *Journal of Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 17(1), 8-14.
11. Dube, K.; Megahan, W.; & M. Mcalmon, 2004. Washington road surface erosion model, State of Washington Department of Natural Resources, 190 p.
12. Duff, M. J., 2010. Evaluation of road erosion prediction models applied to unpaved roads in a small tropical watershed in Eastern Brazil, Thesis submitted to the faculty of Virginia Polytechnic Institute and State University in partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science in Biological Systems Engineering, 138pp.
13. Farokhzadeh, B.; Ghasemi Aghbash, F.; & A. karami, 2017. An Estimation of the Sediment Yield from a Forest Road (A Case Study of Shabankare Watershed in Kermanshah), *Quarterly journal of Environmental Erosion Research*, 7(3), 70-85. (In Persian).
14. Foltz, R. B., & E. R. Burroughs., (1990). Sediment production from forest roads with wheel ruts. In: Proceedings of a symposium on watershed planning and analysis, Durango CO. ASCE, Pp: 266-75.
15. 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.
16. Forsyth, A. R.; Bubb, K. A.; & M. E. Cox, 2006. Runoff, sediment loss and water quality from forest roads in a southeast Queensland coastal plain Pinus plantation, *Journal of Forest Ecology and Management*, 221, 194-206.
17. Fu, B.; Newham, L. T.; & J. B. Field, 2009. Modelling erosion and sediment delivery from unsealed roads in southeast Australia, *Journal of Mathematics and Computers in Simulation*, 79(9), 2679-2688.
18. Fu, B.; Newham, L.T.; & C. Ramos-Scharron, 2010. A review of surface erosion and sediment delivery models for unsealed roads, *Environmental Modelling and Software*, 25, 1-14.
19. Grace, J. M., 2002. Control of sediment export from the forest road prism, *Transactions of the ASAE*, 45(4), 1-6.
20. Hosseini, S. A.; Omidvar, E.; Naghavi, H; & A. Parsakhoo, 2012. Estimation of Sediment Yield from Forest Roads Using SEDMODL, *Wood and Forest Science and Technology*, 19(1), 23-42. (In Persian).
21. 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.
22. Jordan-Lopez, A.; Martinez-Zavala, L.; & N. Bellinfante, 2009. Impact of different parts of unpaved forest roads on runoff and sediment yield in a Mediterranean area, *Science of the total environment*, 407(2), 937-944.
23. Ketcheson, G. L., & 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, 11p.
24. Luce, C. H., & T. A. Black., (1999). Sediment production from forest roads in western Oregon. *Water Resources Research*. 35(8), 2561-2570.

25. Madadi, A., & A. Piroozi., (2016). Estimation of soil erosion and sediment production in Lai Chai basin of Golestan province. *Journal of Applied Research in Geographical Sciences*. 16(42), 177- 195. (In Persian).
26. Mostafa, M., & Sh. Shataee Jouibary., (2016). Investigation of abilities and limitations of estimation model of forest roads erosion soil. *Extension and Development of Watershed Management*. 3(11), 11P. (In Persian).
27. Parsakhoo, A., 2012. Investigation of soil and runoff loss in different parts of forest road building using rain simulator. PhD thesis, Department of Forest Engineering, Sari Faculty of Natural Resources, 169 p. (In Persian).
28. Piscoya, V. C.; Piscoya, W. C.; Cantalil, J. R. B.; Filho, M. C.; Melo, R. C. P. D.; & R. N. D. A. Filho, 2020. WEPPMODEL for Rill Erosion Estimation in a Brazilian Semiarid, *Journal of Watershed*, 33(3), 835- 843.
29. Reinig, L.; Beveridge, R. L.; Potyondy, J. P.; & F. M. Hernandez, 1991. BOISED user's guide and program documentation. USDA Forest Service, Boise National Forest 12 p.
30. Rezaei Jarati, F., .Evaluation and comparison of the sediment estimation for forest road surface by two models WARSEM and SEDMODEL (case study: Darabkola Forest). Master Thesis, Department of Forest Engineering, Sari University of Agricultural Sciences and Natural Resources, 73 p. (In Persian).
31. Sarykhany, N. A., & B. Mjnuanian., (2005). projects in the forest instructions. *Publication Management and Planning*. 148(2), 42-84. (In Persian).
32. Sidle, R. C.; Sasaki, S.; Otsuki, M.; Noguchi, S.; & A. R. Nic, 2004. Sediment pathways in a tropical Forest: Effects of logging roads and skid trails, *Hydrological Processes*, 18(1), 703- 720.
33. Skaugset, A. E.; Surfleet, C .G.; Meadows, M. W.; & J. Amann, 2011. Evaluation of Erosion Prediction Models For Forest Road, *Jornul of the Transportation Research Board*, 1(1), 3-12.
34. Sugden, B., 2018. Estimated Sediment Reduction with Forestry Best Management Practices Implementation on a Legacy Forest Road Network in the Northern Rocky Mountains, *Journal of Forest Science*, 64(2), 214-224.
35. Surfleet, C. G., 2011. Road runoff and sediment sampling for determining road sediment yield at the watershed scale , *Canadian Journal of Forest Research*, 41(10), 1970-1980.
36. Vahabzadeh, G.; Safari, A.; Farhoudi, M.; Abdollahi, H.; Fathizad, H.; & G. Khosravi, 2015. Assessment of Erosion Value and Sediment Delivery Ratio in the Unsealed and Forest Roads, *Journal of Agricultural Science and Technology and Natural Resources, Soil and Water Sciences*, 18(70), 295-313. (in Persian).
37. Varol, T.; Ertugrul, M.; Ozel, H. B.; Emir, T.; & M. Cetin, 2018. The effects of rill erosion on unpaved forest road, *Applied ecology and Environmental Research*, 17(1), 825-839.
38. WDNR, 1995. Standard methodology for conducting watershed analysis. Version 3.0. Washington Forest Practices Board.
39. Singh, P. K.; Panda, P. K.; Satapathy, K. K.; & SV. Ngachan, 2011. Simulation of Runoff and Sediment Yield From A Hilly Watershed in the Eastern Himalya India Using the WEPP Modl, *Journal of Hydrology*, 405(3-4), 261-276.

Investigation of forest road surface sediment estimation using two experimental models of SEDMODL and WARSEM

Aiub Rezaei Motlagh¹ : *Ph.D. student of forest management, Faculty of Natural Resources, Gorgan University of Agricultural Sciences & Natural Resources, Gorgan*

Aidin Parsakhoo: *Associate professor, Department of Forestry, Faculty of Forest Resources, Gorgan University of Agricultural Sciences & Natural Resources, Gorgan*

Fatemeh Fallah Nejad: *M.Sc. Student, Department of Forestry, Faculty of Forest Science, Gorgan University of Agricultural Sciences & Natural Resources, Gorgan*

Article History (Received: 2021/02/25

Accepted: 2021/07/13)

Extended abstract

1- Introduction

A bare surface on forest roads is created due to road construction. This surface is the main source of erosion and sediment yield to streams in forest areas. The increase of sediment in streams causes dramatic damage to the quality of water ecosystems and the life of aquatic organisms. Therefore, road engineers should pay attention not only to the cost of road construction but also to its environmental damage. So, it is necessary to reduce the amount of erosion and sediment produced by these roads. With the accurate prediction of erosion and sediment yield of roads, it is possible to mitigate the negative effects of sedimentation and manage the region, sustainability. In this regard, several models such as WARSEM and SEDMODEL have been introduced to estimate the sediment and to identify the sensitive erosion points. These models are often used to estimate road surface erosion in forest regions. Therefore, the purpose of this study was to evaluate different models in estimating forest road sediment and compare them to field measurements. The findings of the study are useful in finding a suitable and realistic model in the estimation of erosion and sediment of the forest road.

2- Methodology

Two prediction models, including WARSEM and SEDMODEL, were used to estimate the amount of annual sediment production of forest roads. For this purpose, 2602 m of roads in compartments 202, 212, and 244 in the Rezaian forestry plan of ZarrinGol forests were selected. The total length of roads in the region was divided into homogeneous units, and then factors of road length and width, geological condition, road surface, traffic, longitudinal road slope, rainfall, and sediment transport were calculated using GIS maps (road layer, river, waterway, geology, edaphic and topography), forestry plan booklet and field measurements. A sediment trap and suitable container were installed at the end of each unit to measure the actual amount of

¹ Corresponding Author: aiubrezaee@yahoo.com

road sediment after each rainfall. The volume of water was measured (in L) after the deposition of sediment in the container, and then the deposited sediment was taken out of the container and placed in an oven. After drying, the amount of sediment was calculated (in g/m²). In the laboratory, the sediment concentration was obtained by filtering the suspended load sample and passing the runoff sample through the Whatman 42 filter paper. The sediment samples were then placed in the oven at 105 °C for 24 hours. The samples were weighed in a Desiccator using a digital scale (one-thousandth accuracy), and the sediment concentration was obtained by dividing the sediment mass (g) by the runoff volume (L).

3- Results

Results showed that the estimated sediment by SEDMODL and WARSEM for different roads and compartments were 23.87 and 20.07 tons per year, respectively. In addition, the longitudinal slope had a significant effect on the amount of sediment production estimated by the two models WARSEM and SEDMODL, at a probability level of 5%. While this factor has no effect on the amount of sediment measured in real conditions amount of sediment estimated by the models in the slope class of 5-10% was significantly higher than the slope class of 0-5%. There was no significant difference between the amount of sediment estimated by WARSEM and SEDMODL models; however, estimated values were significantly higher than the measured value at the probability level of 5%. Validation of WARSEM and SEDMODL models and their comparison with the field measured value showed a significant difference. Both models estimated the amount of sediment more than the field measured value. The results also showed that the sediment delivery potential estimated by WARSEM and SEDMODL was related to the part of the road located in parcel No. 202.

4- Discussion & Conclusion

By calculating the amount of sediment production in the road and various parts using WARSEM and SEDMODL and comparing them with the measured value, it was found that the total amount of sediment estimated by WARSEM and SEDMODL was 20.07 and 23.87 tons per year, respectively. In general, there was no significant difference between the amounts of sediment estimated by WARSEM and SEDMODL, but these estimated values were higher than the field measured value at the probability level of 5%. Moreover, the effect of the longitudinal slope of the road on sediment production was also studied. According to the factors measured by WARSEM and SEDMODL, it is necessary to design roads on geologically resistant formations, improve the pavement quality, decrease the level of sediment delivery and reduce the traffic.

Key Words: Empirical models, Erosion, Field measurement, Forest roads, Longitudinal slope, Sediment.