پژوهش‌های آبخیزداری
(پژوهش و سازندگی)
شماره ۱۰۸، پاییز ۱۳۹۴

برآورد تولید رسوب جاده با استفاده از تلفیق روش‌های نمونه‌گیری آماری با مدل WARSEM

• سرور عبیات
دانش‌آموخته کارشناسی ارشد علوم خاک، دانشگاه تبریز
• محمود عرب‌خدری
دانشیار، پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی (نویسنده مسئول)
• عباس احمدی
استادیار دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز
تاریخ دریافت: شهریور ماه ۱۳۹۲ تاریخ پذیرش: شهریور ماه ۱۳۹۳
Email: arabkhedri@scwmri.ac.ir

چکیده

در زمان احداث جاده ، ماشین‌آلات راهسازی آسیب شدیدی به پوشش گیاهی می‌زنند. با حذف پوشش طبیعی، عرصه به ویژه در جاده‌های کوهستانی دچار فرسایش تشدیدی می‌شود. این مسئله در ایران کمتر مورد توجه قرار گرفته است. یکی از مدل‌های معرفی شده برای کمّی‌سازی تولید رسوب ناشی از جاده، مدل WARSEM است که برای برآورد میزان متوسط سالیانه تولید رسوب در ۱۲ کیلومتر جاده کوهستانی حوضه بالادست وردآورد، استان تهران، استفاده شد. پیش‌نیاز برآورد دقیق در هر مطالعه‌ای، جمع‌آوری اطلاعات کافی از تمام جامعه آماری (در اینجا طول جاده) است که زمان و هزینه زیادی می‌طلبد. یک راه جایگزین، کاربرد روش‌های نمونه‌گیری آماری است. با انتخاب و بررسی تعدادی عضو جامعه (در اینجا قطعه‌هایی از جاده) می‌توان با صرفه‌جویی در هزینه و زمان جمع‌آوری داده‌های صحرایی، تولید رسوب را برآورد کرد. با این ملاحظات، در این پژوهش، ابتدا اندازه مناسب نمونه (تعداد قطعه جاده) با استفاده از معادله کوکران معادل ۱۷ قطعه یکصدمتری محاسبه و سپس، با استفاده از روش نمونه‌گیری سیستماتیک محل آن‌ها معین شد. در ادامه، عاملهای مورد نیاز مدل مانند عرض جاده، شیب دیواره‌ها، جنس سنگ‌ها و میزان پوشش سطحی در دو دیواره خاکبرداری و خاکریزی در محل قطعه‌های منتخب اندازه‌گیری و مقدار تولید رسوب برآورد شد. نتایج نشان داد که میزان تولید رسوب برآوردی توسط مدل تقریبا برابر ۳۳۸۴ تن در سال، معادل ۱۵۷ تن بر هکتار در سال در محدوده تحت اثر جاده می‌باشد. از این میزان، ۹۸۹ تن در سال مربوط به دیواره خاکبرداری و ۲۳۱۷ تن در سال نیز مربوط به دیواره خاکریزی است. همچنین، مشخص شد که سه عامل ارتفاع دیواره، پوشش سطحی و فرسایش‌پذیری سازند زمین‌شناسی منطقه، مؤثرترین عامل‌ها در تولید رسوب می‌باشد. اعتبارسنجی نتایج با استفاده از پارامتر خطای استاندارد برآورد کل، همچنین مقایسه با حجم واریزه پای دیواره خاکبرداری و آمار رسوب ارائه شده توسط سازمان راه و شهرسازی استان تهران انجام گرفت. نتایج نشان می‌دهد که به رغم بررسی حدود ۱۴ درصد از طول جاده و صرفه‌جویی قابل توجه در زمان و هزینه، دقت آماری برآوردها مناسب است. با این همه اختلافاتی بین نتایج به دست آمده و آمار رسوب مشاهده‌ای وجود دارد که مهمترین دلیل آن عدم سنخیت دوره مشاهده‌ای کوتاه با میانگین طولانی‌مدت رسوب برآوردی با مدل است.

کلمات کلیدی: فرسایش جاده، رسوب‌دهی، نمونه‌گیری آماری، WARSEM.

Watershed Management Research (Pajouhesh & Sazandegi) No 108 pp:26-39

Estimation of sediment yield in roads by combining survey sampling design and WARSEM

By: S. Abiat, Graduated Master Student in Soil Science, University of Tabriz, Tabriz, Iran. M. Arabkhedri, Associate Professor, Soil Conservation and Watershed Management Research Institute, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Tehran, Iran (Corresponding Author). A. Ahmadi, Assistant Professor, Faculty of Agriculture, University of Tabriz, Tabriz, Iran.

Excavation and embankment machineries removes vegetation cover during construction of roads, which is resulted in accelerated erosion particularly in mountainous areas. This issue has received little attention in Iran so far. In this study, WARSEM model was used in order to quantify sediment production from 12 km road in Vard-Avarad's upstream mountainous basin, Tehran providence. To achieve an accurate estimate in any study, collecting adequate data from all population (in this case the road) is prerequisite which resulting in an increase in both time and cost of the project. Survey sampling techniques can be used to reduce the time and cost by studying a few elements (selected road segments) of the population (whole length of the road). As the first step, each 100 meters of road segments was considered as a sampling unit followed by determining the sample size equal to 17 using Cochran equation. In the next step, the selected road segments were located on the road by systematic sampling design and all model factors such as road width, gradient, lithology, surface cover of both cutslope and fillslope were measured. Sediment production was then estimated in each road segment using WARSEM model. The results showed that total annual sediment yield originated from roads is about 3384 ton (989 and 2137 ton from cutslope and fillslope respectively) and specific average load is 157 ton/ha/yr. The findings demonstrate the importance of three factors including surface cover, height of slope, erodibility of geologic formations compared to the other factors. The validation of results was tested based on standard error of estimates, comparison to the volume of debris in the foot of cutslopes and the amount of sediment excavation conducted by Tehran Roads and Urban Development Organization. The relatively low standard error of estimations and the lower cost and time spent as well suggest the privileged performance of sampling design in estimating of sediment yield despite studying only about 14% of the road length. The remained differences between the observed and estimated sediment can be explained by considering the short period of observations compared to the long-term average of sediment yield calculated by the model.

Keywords: road erosion, sediment yield, WARSEM, sampling design.

مقدمه

فرسایش خاک یک فرآیند طبیعی است که در اثر فعالیت‌های انسانی تشـــدید می‌شود (صادقی و کهنه شهری، ۱۳۸۴). عامل اصلی تشدید فرســـایش در دهه‌های اخیر، افزایش جمعیت و اســـتفاده بیش از حد از زمین اســـت (احمدی، ۱۳۷۴). با رشد جمعیت و نیازهای روزافزون مردم به مسکن، رفت و آمد و انتقال انرژی، عملیات عمرانی و ساخت و ساز بیشتری در مقایسه با گذشته در مناطق شیب‌دار انجام می‌گیرد. این عملیات با به هم زدن شـــرایط طبیعی ســـطح خاک، تشدید نرخ فرسایش خاک را به دنبال دارد (عرب‌خدری و جافریان، ۱۳۹۱). یکی از این بهره‌برداری‌ها که به شـــدت در حال افزایش است احداث جاده می‌باشد. اگر چه جاده‌ها به جهت تسهیل رفت و آمد افراد و همچنین نقل و انتقال مایحتاج مردم در نقاط مختلف، نقش بسیار مهمی در هر جامعه ایفا می‌کنند، اما اثرات مضری هم دارند؛ به طور مثال می‌توانند منبع مهمی از رسوب باشند (فو و همکاران، ۲۰۰۷). علاوه بر خسارت وارده از دیدگاه فرســـایش، هزینه نگهداری و ترمیم جاده‌ها نیز همه ساله خســـارات و مبالغ هنگفتی را به وزارت راه و شهرسازی تحمیل می‌کند. چنانچه فرسایش بسیار شدید و عمیق باشد، ترمیم خرابی‌ها مســـتلزم صرف وقت و هزینه بیشتر و در شرایط فوق‌العاده حتی بعید به نظر می‌رسد (عرب‌خدری و جافریان، ۱۳۹۱).

احداث جاده‌ها منجر به آســـیب شـــدید به پوشش گیاهی مستقر در محدوده عملیات ســـاختمانی جاده، یعنی عرض بســـتر و دیواره های خاکبرداری و خاکریزی، می‌شـــود و عرصه در معرض فرســـایش قرار می‌گیـــرد (بینکلی و بـــران، ۱۹۹۳). بعلاوه، پیامد فشـــردگی خاک ســـطحی در راه‌های شوســـه و وجود روکش در جاده‌های آســـفالته، کاهش نفوذپذیری خاک، افزایش مقدار و ســـرعت رواناب انتقال یافته از ســـطح جاده به حاشیه و پائین دست است که می‌تواند به فرسایش بیشتری منجر شود (کینگ و تنیسون، ۱۹۸۴). در مطالعه‌ای، کول و لاندرز (۱۹۹۶) نشـــان دادند که برخی از جاده‌های کوهستانی احداث

شـــده در مجاورت رودخانه‌ها، منبع اصلی انتقال رسوب به رودخانه‌ها می‌باشند. اهمیت جاده‌های حفاظت نشده در کاهش کیفیت آب‌های روان در صورتی که خاک‌های فرسایش یافته آلوده باشند، دو چندان می‌شود (گریسون و همکاران، ۱۹۹۳).

منشا رســـوب جاده‌ها می‌تواند از انواع فرســـایش سطحی، خندقی و یـــا حرکات توده‌ایِ باشـــد (دوب و همـــکاران، ۲۰۰۴). در جاده‌های خاکـــی که معمولاً بـــدون خاکبرداری و خاکریزی وســـیع ســـاخته می‌شوند؛ فرسایش سطحی جاده نســـبت به حرکات توده‌ای غالبیت دارد (کچســـون و همکاران، ۱۹۹۹). میزان تولید رســـوب ناشـــی از احداث جاده به فرســـایش‌پذیری خاک‌ها، وضعیت پوشش دیواره‌های خاکبرداری و خاکریزی، روسازی جاده، شیب دیواره‌ها، شیب عرضی و طولی جاده، کیفیت زهکشـــی، طـــول راه، درجه راه، میزان ترافیک و ... بستگی دارد (جارسما، ۱۹۹۴ و گریس، ۲۰۰۲). فرسایش‌پذیری خاک سطحی خود به فاکتورهای زیادی چون نیروی چسبندگی بین ذرات، توزیع اندازه ذرات، میزان ماده آلی و نفوذپذیری، بســـتگی دارد (ریجسدیجک و همکاران، ۲۰۰۷). هر چه درصد ذرات ریز غیرچسبنده نظیر ســـیلت و ماسه نرم در ســـطح بیشتر باشد فرسایش سطح جاده در اثر رفت و آمد خودروها بیشتر خواهد بود (فولتز و تروب، ۲۰۰۳). فرسیت و همکاران (۲۰۰۶)، در جنگل‌های سوزنی برگ استرالیا و در شـــرایط بارندگی طبیعی، مقدار کل رسوب تولیدی در جاده اصلی با بـــار ترافیکی زیاد را طی یک دوره دو ســـاله، ۱/۵ برابر جاده فرعی با بار ترافیکی کم برآورد کردند. در یک تحقیق، مهم‌ترین عوامل تعیین کننده میزان رسوب حاصل از ســـطح یک جاده جنگلی در مازندارن و انتقال آن به آبراهه، میزان اســـتفاده از جاده، درصد و نوع پوشـــش سطحی جاده، فاکتورهای شیب، فاصله جاده از آبراهه و ارتفاع دیواره خاکبرداری می‌باشند (حسینی و همکاران، ۱۳۹۱).

نظر به اهمیت فرسایش جاده‌ای در حوضه‌ها، فهم فرآیندهای فرسایش جاده و تحویل رســـوب و همچنین کمی کردن سهم رسوب حاصل از آن ضروری اســـت (راموس- شـــارون و مک دونالـــد، ۲۰۰۷). در این مسیر می‌توان از ســـه روش آزمایش‌های ردیابی رسوب، اندازه‌گیری رسوبات نهشته شده در کنار جاده یا درون مسیل و مدل‌ها بهره گرفت (فو و همکاران، ۲۰۱۰). در این بین، مناســـب‌ترین روش کمی‌سازی این فرســـایش استفاده از مدل‌هاســـت (الیوت، ۲۰۰۹). با استفاده از مدل، علاوه بر برآورد مقدار فرســـایش و رســـوب، می‌توان مؤثرترین عوامل را شناســـایی کرده و از آن‌ها در تصمیم‌گیری هوشـــمندانه در مورد برنامه‌های حفاظتی در نقاط مختلف اســـتفاده کرد (ویشمایر و همکاران، ۱۹۷۸).

مدل WARSEM، مدلی اســـت که به طور ویژه برای برآورد تولید رسوب جاده‌ای معرفی شده است. این مدل در خارج و داخل ایران در مطالعات و پژوهش‌ها مورد اســـتفاده قرار گرفته و نتایج رضایتبخشی داده اســـت (دوب و همکاران، ۲۰۰۴؛ فو و همکاران، ۲۰۰۷؛ پارساخو و همکاران، ۲۰۰۹؛ حســـینی و همکاران، ۱۳۹۱). برای اجرای مدل، اندازه‌گیـــری پارامترهای مدل در تمام طول جاده ضروری اســـت؛ که هزینـــه و وقت زیادی می‌طلبد. یـــک راه برای کاهش زمان و هزینه و در عین حال به دســـت آوردن برآورد قابل قبول از نظر اصول آماری، اســـتفاده از روش‌های نمونه‌گیری آماری است. روش‌های نمونه‌گیری آماری در زمینه‌های مختلف اجتماعی، اقتصادی، فنی و حتی سیاسی به کار می‌روند (Cochran، 2007). ولی از کاربرد آن‌ها در بررســـی فرسایش جاده‌ها تا کنون گزارشی در دسترس قرار نگرفته است.

بـــا توجه به مباحث فوق، این پژوهش بر آن اســـت که کارایی تلفیق مدل WARSEM بـــا روش‌های آمارگیری نمونـــه‌ای را در برآورد رسوبدهی ناشی از احداث جاده بررسی نماید.

شکل ۱- دو نمونه از دیواره خاکبرداری پوشیده از سنگ و صخره

منطقه مورد مطالعه:

این پژوهش در حوضه بالادست وردآورد که منطقه‌ای کوهستانی بین تهران و کرج است؛ انجام گرفت. از نظر سیاسی این حوضه تابع استان تهران و در حد فاصل طول جغرافیایی "۵۱°۱۱'۱۸/۴۹ و "۵۱°۰۹'۵۷/۳۲ شرقی و عرض جغرافیایی "۳۵°۵۲'۱۸/۷۵ و "۳۵°۴۵'۳۷/۴۵ شمالی قرار دارد. نقاط ارتفاعی حداکثر و حداقل آن به ترتیب ۲۹۰۱ و ۱۳۵۴ متر از سطح دریا می‌باشد. مطابق اطلاعات ارائه شده در گزارش جاماب (۱۳۷۸)، این حوضه از نظر شرایط اقلیمی، جزء مناطق نیمه خشک با میانگین بارندگی ۳۲۰ میلی‌متر در سال است. راه آسفالته این حوضه به‌طول ۱۲ کیلومتر که در سال ۱۳۷۴ ساخته شده از نوع درجه دو است و حد فاصل اتوبان جدید همت تا روستای واریش قرار دارد. در مناطق تحت تاثیر این جاده، انواع فرسایش مشتمل بر بین‌شیاری، شیاری، خندقی، واریزه‌ای و لغزشی مشاهده می‌شود. وجود آمار و اطلاعات از مقادیر رسوبات سالانه جابجا شده به‌وسیله اداره راه و ترابری نیز از دلایل انتخاب این حوضه برای مطالعه است.

به دلیل ماهیت کوهستانی منطقه، درصد صخره و سنگ‌های درشت در برخی از دامنه‌ها و دیواره‌های خاکبرداری زیاد است (شکل ۱). کاربری اصلی اراضی مجاور جاده، مرتعی با پوشش گیاهی ضعیف و عمدتاً از انواع بوته‌ای یا درختچه‌ای نظیر بادام تلخ با پوشش ناچیز در تماس با سطح زمین می‌باشد. اگرچه در بعضی نقاط، پوششی از گندمیان نیز به صورت لکه‌ای قابل مشاهده است (شکل ۲).

شکل ۲- وضعیت پوشش طبیعی مرتعی در مجاورت جاده در دو ناحیه حوضه

شرح مدل 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 می کند (فو و همکاران، ۲۰۱۰). روابط ۱ الی ۳ معادلات اصلی این مدل هستند که برای محاسبه رسوبدهی ناشی از جاده‌ها به کار می‌روند (دوب و همکاران، ۲۰۰۴):

رابطه ۱: $E = (R_s + C_s) \times A_g$

رابطه ۲: $R_s = G \times S_f \times T \times L \times W \times S \times R \times SDR_{R-S}$

رابطه ۳ :

$C_s = G \times C_f \times L \times H \times R \times SDR_{R-S}$

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 دیواره خاکبرداری 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 شانه قطعه جاده بر حسب متر
S: عامل شیب جاده
SDRR-S: عامل تجربی تحویل رسوب از سطح هر قطعه جاده
Cf: عامل پوشش بخش خاکبرداری
H: ارتفاع خاکبرداری بر حسب متر
R: عامل بارندگی که با رابطه خاصی بر اساس متوسط بارندگی سالانه بر حسب میلی‌متر محاسبه می‌شود

اصولا، مدل WARSEM برای محاسبه میزان رسوب مربوط به دیواره خاکبرداری، سطح جاده و شانه‌ها ارائه شده است. دوب و همکاران (۲۰۰۴) پیشنهاد داده‌اند که با جایگذاری عوامل ارتفاع، شیب و درصد پوشش سنگی و گیاهی، مربوط به دیواره خاکریزی می‌توان مدل را برای دیواره خاکریزی نیز به کار برد. شیوه تعیین هر یک از عوامل در ادامه تشریح می‌شود:

عامل فرسایش‌پذیری زمین‌شناسی(G): فرسایش‌پذیری ذاتی هر بخش جاده بر مبنای خواص سازندهای زمین‌شناسی بین یک تا پنج تعیین می‌شود (دوب و همکاران، ۲۰۰۴). عوامل موثر از قبیل سختی و نرمی سنگ، میزان هوازدگی و سن سنگ می‌باشد. در جدول ۱ راهنمای کلی برای امتیاز تعدادی از واحدهای سنگ‌شناسی مشابه آنچه در منطقه وجود دارد از دوب و همکاران (۲۰۰۴) تلخیص شده است. در منطقه مورد بررسی امتیازدهی با استفاده از نقشه‌های زمین‌شناسی با مقیاس ۱:۲۰۰۰۰ تهیه شده در قالب مطالعات سیل حوضه بالادست وردآورد (پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری، ۱۳۷۳) و بررسی‌های صحرایی انجام شد. کلیه واحدهای سنگی در حوضه به دوره ترشیاری مربوط است. بر اساس دستورالعمل روش WARSEM و با لحاظ معیارهای بیان شده توسط شریعت‌جعفری و همکاران (۱۳۸۵) در مورد خصوصیات سنگ‌ها، امتیازدهی برای هر یک از قطعات انجام شد. پوشش دیواره خاکریزی، حاصل تخلیه مواد برش یافته از دیواره خاکبرداری است که این پوشش از بُعد سنگ‌شناسی، از نوع واریزه‌های پایکوهی و کوهرفت می‌باشد که حساسیت آن‌ها نسبت به فرسایش، به دلیل خرد شدن، خیلی بیشتر از سازند اولیه است و در رده سازندهای ضعیف قرار می‌گیرند. امتیاز عامل زمین‌شناسی برای این گروه برابر ۴/۵ در نظر گرفته شد.

جدول ۱- امتیاز عامل زمین‌شناسی برای تعدادی از واحدهای سنگ‌شناسی (تلخیص از دوب و همکاران، ۲۰۰۴)

سنگ‌شناسی	مساحت به هکتار		
	کواترنری	ترشیاری	مزوزوئیک، پالئوزوئیک، پرکامبرین
متامرفیک بدون هوادیدگی، سنگ آذرین درونی، رسوبات سخت	-	۱	۱
شیست یا گنیس هوادیده	-	۲	۲
بازالت، آندزیت	۱	۱	۱
توف، خاکستر آتش‌فشانی	۵	۵	۱
گرانیت یا سنگ آذرین بیرونی	-	۵	۵
رسوبات گراولی	۱	۱	-
رسوبات ریز دانه	۵	۵	-

عامل پوشش سطح جاده (Sf): نوع و کیفیت پوشش سطحی بین ۰/۰۳ برای جاده‌های با پوشش آسفالت تا ۲ برای بستر طبیعی همراه با شیار متفاوت است (دوب و همکاران، ۲۰۰۴). از آن جا که این مطالعه در جاده آسفالته انجام شده است، امتیاز عامل پوشش سطحی در همه قطعات برابر ۰/۰۳ می‌باشد.

عرض جاده (W) و عامل ترافیک (T): عرض جاده و فشار ترافیکی وارد بر آن، هر دو شدت فرسایش در سطح و شانه‌های جاده را تحت تأثیر قرار می‌دهد. در هر بخش از جاده، عرض آن که شامل سطح و شانه‌ها است، به طور مستقیم با متر، اندازه‌گیری شد. عامل ترافیکی که در مدل مورد استفاده قرار می‌گیرد؛ تاثیر حرکت خودروها بر فرسایش را بیان می‌کند و بین ۰/۱ در جاده‌های متروکه تا ۱۲۰ در بزرگراه‌ها متفاوت است. از آن جا که جاده مورد بررسی از نوع درجه ۲ است، عامل ترافیک در همه قطعات بر اساس دستورالعمل برابر ۲ می‌باشد (دوب و همکاران، ۲۰۰۴).

عامل شیب جاده (S): شیب سطح جاده بر روی سرعت فرسایش تأثیر می‌گذارد و با افزایش شیب، قدرت فرسایندگی رواناب افزایش می‌یابد. شکل ۳ جریان گل‌آلود در سطح جاده را پس از وقوع باران نشان می‌دهد. بر اساس مطالعات لوسه و بلک (۲۰۰۱)، میزان فرسایش با مربع شیب جاده در طول هر قطعه، رابطه مستقیم دارد. مقدار این عامل در شیب‌های سطحی کمتر از پنج درصد معادل ۰/۲، و در کلاس شیب‌های ۱۰-۵ درصد و ۱۰< به ترتیب معادل یک و ۲/۵ می‌باشد (دوب و همکاران، ۲۰۰۴). در جاده مورد بررسی، چون شیب سطح جاده در همه قطعه‌ها کمتر از ۵ درصد است؛ عامل شیب سطحی در همه آن‌ها برابر ۰/۲ در نظر گرفته شد.

عامل ارتفاع دیواره (H): در مدل WARSEM، عامل ارتفاع دیواره بر مبنای شـــیب آن، مطابق جدول ۲، در چهار گروه تقسیم می‌شود (دوب و همکاران، ۲۰۰۴). ملاحظه می‌شود که بیشترین امتیاز عامل ارتفاع ۱۰ برابر کمترین امتیاز است.

شکل ۳-جریان گل‌الود در سطح و شانه جاده

جدول ۲- مقادیر عامل ارتفاع برای شیب‌های مختلف (دوب و همکاران، ۲۰۰۴)

شیب دیواره (٪)	۰-۱۵	۱۵-۳۰	۳۰-۶۰	>۶۰
عامل ارتفاع دیواره	۰/۷۵	۱/۵	۳	۷/۵

عامل پوشش دیواره(Cf): میزان پوشـــش گیاهی و سنگی یا هرگونه پوشـــش سطحی در دیواره، تأثیر بسیاری بر میزان تولید رسوب دارد. با اطلاع از درصد پوشـــش گیاهی وســـنگی در دیواره‌ها، با استفاده از جدول۳ می‌توان عامل پوشش دیواره را تعیین کرد (دوب و همکاران، ۲۰۰۴).

جدول ۳ - توزیع فراوانی مساحتی کلاس‌های مدیریت زمین‌لغزش سناریوی عادی و بحرانی در حوضه آبخیز زیارت

شیب دیواره (٪)	۰-۱۵	۱۵-۳۰	۳۰-۶۰	>۶۰
عامل ارتفاع دیواره	۰/۷۵	۱/۵	۳	۷/۵

عامل بارندگی (R): برخورد قطرات باران می‌تواند ذرات رسوب را از جا بکَند و رواناب حاصل، رسوبات را انتقال دهد. با داشتن میانگین بارندگی سالیانه در هر منطقه، می‌توان عامل بارندگی را از رابطه ۴ به دست آورد (رید و همکاران، ۱۹۸۱).

رابطه ۴

$$R= 3\times10^{-5}\times(R_{ave})^{1.2}$$

که در این رابطه:

R: عامل بارندگی بر حسب تن در مترمربع در سال.

R_{ave}: متوسط بارندگی سالیانه بر حسب میلی¬متر.

در حوضه بالادست وردآورد میانگین بارندگی سالیانه برابر ۳۲۰ میلی‌متر است که طبق رابطه ۴ عامل بارندگی برابر ۰/۲۸۷ به دست می‌آید.

طول قطعه (L): این پارامتر به طور مستقیم در جاده بر حسب متر اندازه‌گیری و وارد مدل شد.

عامل سن جاده (Ag): نرخ فرسایش و تولید رسوب در جاده‌های نوساز بیشتر است و با گذشت زمان به تدریج مقدار فرسایش کمتر می‌شود. عامل سن برای جاده‌ها در سال اول ۱۰، در سال دوم معادل دو، و در سال‌های پس از آن به یک تقلیل می‌یابد (دوب و همکاران، ۲۰۰۴). با توجه به گذشت ۱۸ سال از زمان احداث، عامل سن جاده معادل یک در نظر گرفته شد.

عامل انتقال رسوب (SDR_{R-S}): برای محاسبه عامل انتقال رسوب، از میزان فاصله نقطه مرکزی جاده تا نقطه مرکزی رودخانه استفاده می‌شود. هنگامی که جاده به طور مستقیم رودخانه را قطع می‌کند، عامل انتقال رسوب ۱۰۰ درصد است و با افزایش فاصله تحویل رسوب کمتر می‌شود. از آن جا که هدف از انجام این مطالعه برآورد تولید رسوب ناشی از جاده است و مقدار رسیده به رودخانه مدنظر نمی‌باشد؛ در محاسبات از عامل انتقال رسوب صرف نظر شد.

در ادامه، با اندازه‌گیری طول متوسط خاکبرداری و خاکریزی در هر قطعه ۱۰۰ متری، مساحت تحت تاثیر جاده‌سازی محاسبه شد و با تقسیم رسوب کل سالانه به مساحت، تولید رسوب ویژه بر حسب تن بر هکتار در سال محاسبه شد.

روش انطباق آمارگیری نمونه‌ای در مطالعه فرسایش جاده:

نوآوری این پژوهش تلفیق آمارگیری نمونه‌ای با مدل برآورد فرسایش جاده‌ای است با هدف صرفه‌جویی در زمان و هزینه، سهولت اجرا و کاهش خطرات می‌شود. نکته مهم، نحوه انطباق آمارگیری نمونه‌ای با موضوع تولید رسوب جاده‌ای است. در هر برنامه آمارگیری نمونه‌ای، ابتدا باید اندازه جامعه و نمونه مشخص شود. جامعه مورد مطالعه، ۱۲ هزار متر از طول جاده است که ویژگی خطی دارد. در چنین جامعه‌ای، ابتدا باید عضو جامعه تعریف شود. اگر، هر متر از طول جاده یک عضو در نظر گرفته شود؛ جامعه ۱۲۰۰۰ عضو خواهد داشت. تعاریف مشابه در کاربرد آمارگیری نمونه‌ای در علوم مختلف مشاهده می‌شود. مثلا در موضوع برآورد رسوب معلق، عضو به صورت بازه زمانی معین که تغییرات غلظت رسوب معلق قابل توجه نیست (مثلا یک ساعت یا یک روز)؛ تعریف شده است (توماس، ۱۹۸۵ و عرب‌خدری، ۱۳۹۰). در این پژوهش، عضو به قطعه‌ای از جاده که از نظر زمین‌شناسی، پوشش، اشکال فرسایش و ... یکنواخت باشد؛ اطلاق شد. اصولا، یکنواختی مطلق در طول یک قطعه امکان‌پذیر نیست. لذا، طی مشاهدات اولیه مشخص شد که به طور متوسط در هر ۱۰۰ متر، شرایط دیواره‌های خاکبرداری و خاکریزی از نظر عوامل موثر تشابه نسبی دارد. این یکنواختی نسبی در هر عضو، با مفهوم قطعه همگن در مدل WARSEM که بر اساس محل تقاطع با جاده دیگر و یا رسیدن به نقاط زهکشی تعریف می‌شود (دوب و همکاران، ۲۰۰۴) نیز تا حدی قابل انطباق است. با در نظر گرفتن هر قطعه ۱۰۰ متری به عنوان یک عضو، جامعه مورد نظر مشتمل بر ۱۲۰ عضو می‌شود.

برای تعیین اندازه مناسب نمونه در طول مسیر، از معادله کوکران (رابطه ۵) استفاده شد (کوکران، ۲۰۰۷).

$$n=\frac{N\ z^2S^2}{N\ d^2+Z^2S^2}$$

رابطه ۵

در این رابطه:

n = اندازه مناسب نمونه

N= اندازه جامعه

z= شاخص نرمال استاندارد در سطح احتمال مورد نظر

d = مقدار خطای قابل قبول

S^2: واریانس برآورد فرسایش در قطعات نمونه

در این مطالعه، اندازه جامعه یا تعداد کل قطعات ۱۰۰ متری در جاده معادل ۱۲۰ و مقدار z برابر ۱/۹۶ (ضریب اطمینان ۹۵٪) است. نحوه تعیین d و S۲ نیاز به توضیحاتی جداگانه دارد.

برای تعیین مقدار واریانس، می‌توان از واریانس اندازه‌گیری‌ها در مطالعات قبلی و یا بررسی‌های اولیه استفاده کرد (کوکران، ۲۰۰۷). نظر به فقدان مطالعه قبلی در مورد فرسایش جاده در این حوضه، بر اساس بازدید صحرایی و با فرضیاتی، حداقل فرسایش تقریبا معادل صفر در قطعه‌ای با دیواره کاملا سنگی، و حداکثر فرسایش معادل ۳۲۰ تن به شرط وقوع حرکت توده‌ای در آن قطعه منظور شد. در نهایت، با تعیین حداقل و حداکثر فرسایش، مقدار واریانس از رابطه ۶ محاسبه گردید (کوکران، ۲۰۰۷).

$$S=\frac{R}{6}$$

رابطه ۶

که در آن R دامنه تغییرات فرسایش (۳۲۰=۰-۳۲۰) و S انحراف معیار یا جذر واریانس (۵۳/۳ تن) می‌باشد. با لحاظ داده‌های فوق، واریانس معادل ۲۸۴۴ بدست آمد.

توی و همکاران (۲۰۰۲) خطای قابل قبول در برآورد فرسایش را در صورتی‌که نرخ متوسط فرسایش بین ۶۰-۶ تن بر هکتار در سال باشد؛ حداکثر ۲۵٪± و در حالتی که نرخ متوسط فرسایش بیش از ۱۰۰ تن بر هکتار در سال باشد؛ حداکثر ۵۰٪± بیان کرده‌اند. در این پژوهش، برای افزایش دقت، سه حد پایین‌تر یعنی ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصد مورد بررسی اولیه قرار گرفتند. اندازه نمونه محاسبه شده در خطای ۱۰ درصد، خیلی زیاد (۳۲ قطعه) و در خطای ۲۰ درصد، خیلی کم (۱۰ قطعه) به دست آمد. به همین دلیل ۱۵ درصد با ۱۷

قطعه یکصدمتری به عنوان حد بهینه خطا (d) انتخاب شد.
پس از محاسبه اندازه نمونه، محل قطعات با استفاده از روش نمونه‌گیری سیستماتیک تعیین شد. این روش نسبت به روش نمونه‌گیری کاملا تصادفی بازده بیشتری دارد (Thompson، 1994).

روش برآورد مشخصه‌های جامعه:

پارامترهای مورد نظر در این پژوهش شامل میانگین فرسایش در قطعات ۱۰۰ متری، کل فرسایش ۱۲ کیلومتر جاده و میزان خطا برای بررسی دقت برآوردها می‌باشند. معادلات برآورد این پارامترها در سیستم نمونه‌گیری سیستماتیک به صورت روابط ۷ الی ۹ می‌باشند (Thompson، 1994).

$$A=\frac{\sum_{i=1}^{n} x_i}{n}$$

رابطه ۷

$$T=\frac{N\sum_{i=1}^{n} x_i}{n}$$

رابطه ۸

$$S\ E=N\sqrt{\frac{N-n}{N}}\left(\frac{S_x}{\sqrt{n}}\right)$$

رابطه ۹

در این روابط:
A: میانگین فرسایش اندازه‌گیری شده (ton/ha)
x_i: مقدار فرسایش اندازه‌گیری شده در هر قطعه (ton/ha)
T: مجموع فرسایش در هر گروه از جاده‌ها (ton/ha)
SE: خطای استاندارد برآورد T
s_x: جذر واریانس جامعه

روش ارزیابی نتایج

دو روش برای ارزیابی صحت نتیجه اصلی یعنی تولید رسوب کل از ۱۲ کیلومتر جاده به کار رفت. یک روش، استفاده از حدود اعتماد است. مزیت استفاده از روش‌های نمونه‌گیری آماری، امکان تعیین حدود اعتماد برای آماره برآورد شده است. حدود اعتماد برآورد کل از رابطه ۱۰ بدست آمد (کوکران، ۲۰۰۷).
رابطه ۱۰

$$C\ I=\pm t_a \times N\sqrt{\frac{N-n}{N}}\left(\frac{S_x}{\sqrt{n}}\right)$$

که در آن CI حدود اعتماد بالا و پایین، مقدار t در سطح احتمال ۹۷/۵ درصد (معادل ۲/۱۲) و سایر پارامترها، مشابه موارد تشریح شده در روابط قبل می‌باشد. دلیل استفاده از t به جای z، کوچک بودن (۵۰>) اندازه نمونه است. هر چه نسبت CI محاسبه شده به برآورد کل کمتر باشد؛ نتیجه قابل قبول‌تر است. در مسائل فرسایش و رسوب، ۲۵ تا ۵۰ درصد خطا متناسب با نرخ فرسایش قابل قبول می‌باشد (توی و همکاران، ۲۰۰۲).
روش دوم برای ارزیابی صحت نتایج، مقایسه مقدار رسوب برآورد شده مربوط به دیواره خاکبرداری با رسوب سالانه تجمیع شده در پای دیواره‌های خاکبرداری است. حجم رسوبات در هر قطعه ۱۰۰ متری با اندازه‌گیری عمق و عرض توده رسوب پای دیواره خاکبرداری محاسبه شد. در نهایت، با لحاظ وزن مخصوص ۱/۴ تن بر متر مکعب (با توجه به خصوصیات دانه‌بندی رسوبات)، وزن تقریبی رسوب سالانه تعیین گردید. فقدان گیاه روی رسوبات مذبور، نشانه جدید بودن این رسوبات می‌باشد (شکل ۴). این مقایسه، با توجه به اینکه اداره نگهداری راه و ابنیه (زیر مجموعه سازمان راه و شهرسازی استان) برنامه منظم و اعتبارات ویژه‌ای برای نگهداری و مرمت جاده‌ها در قالب پاکسازی رسوبات و لایروبی مسیرهای مسدود شده دارد؛ منطقی است. البته ممکن است درصدی از رسوبات بسیار ریز به صورت معلق از دسترس خارج شوند. بعلاوه، اخذ آمار رسوب پاکسازی شده برای کل جاده‌های حوضه مورد مطالعه (آسفالته و شوسه)، از سازمان راه و شهرسازی استان تهران، فرصتی برای تکمیل تحلیل وضعیت رسوب ناشی از جاده‌ها به وجود آورد.

شکل ۴- رسوبات واریزه‌ای جدید در پای دیواره خاکبرداری؛ به فقدان پوشش گیاهی توجه شود.

نتایج و بحث:

در مواد و روش‌ها، ضمن تشـریح عوامل مدل WARSEM، مقدار برخـی از عوامل که در تمـام قطعات ثابت بودند ذکر شـد. در این قسـمت، نتایـج اندازه‌گیری‌های مسـتقیم تعـدادی از عوامل مدل WARSEM مشتمل بر زمین‌شناسی، شیب، درصد پوشش گیاهی و سـنگی دیواره‌ها کـه از قطعه‌ای به قطعه دیگر متغیر اسـت؛ ارائه می‌شود. با توجه به جدول ۱ که نوع سنگ و امتیاز عامل زمین‌شناسی مربوطه را مشخص کرده است؛ در جدول ۴، امتیاز عامل زمین‌شناسی دیواره خاکبرداری در ۱۷ قطعه جاده ملاحظه می‌شود. مطابق جدول، امتیاز ۱۳ قطعه، ۲/۵ است و فقط دو قطعه امتیاز ۱/۵ و دوقطعه امتیاز ۳ را به خود اختصاص داده‌اند.

جدول ۴- نوع سنگ شناسی و میزان عامل زمین شناسی در دیواره خاکبرداری ۱۷ قطعه مورد مطالعه

شماره قطعه جاده	نوع سنگ‌شناسی	متوسط عامل زمین‌شناسی
۱،۲،۳،۱۰،۱۱،۱۲،۱۳،۱۴،۱۵	کریستال لیتیک توف و خاکستر توف سبز رنگ، توف برش و به طور محلی با میان لایه‌های سنگ آهک	۲/۵
۴	ماسه‌سنگ، کنگلومرا و توف سبز	۲/۵
۵،۶،۷	گدازه‌های برش آندزیتی و جریان‌های گدازه	۱/۵
۸	شیل با میان لایه‌های سنگ توفی و سیلنستون	۳
۹	توف برش سبز روشن و خاکستر توف	۲/۵
۱۶	توف های سبز به حالت توده‌ای و شیل همراه با گدازه‌های داسیتی و آندزیتی-بازالتی	۳
۱۷	گدازه های برشی و هیالوکلاستیک آندزیتی - بازالتی	۱/۵

جدول ۵ نتایج اندازه‌گیری‌های شیب و پوشش را به تفکیک دیواره‌های خاکبـرداری و خاکریزی، و عرض جاده در ۱۷ قطعه منتخب نشـان می‌دهد. ملاحظه می‌شـود که شـیب‌ها به غیر از قطعه ۱۷، بیش از ۴۰ درصد می‌باشـد و گاهی از ۱۰۰ درصد نیز که مبین شـیب ۴۵ درجه اسـت؛ تجاوز می‌کند. به طور کلی، هـر دو دیواره خاکبرداری و خاکریزی شـیبی تند دارند؛ اگرچه شیب دیواره خاکبرداری، کمی بیشتر اسـت. حداقل پوشش گیاهی و سنگی، ۳۲ درصد است که در برخی از مـوارد در دیواره‌های خاکبرداری، کاملا سـنگی و به ۱۰۰ درصد نیز می رسد.

بر اسـاس اندازه‌گیری‌هـای مذکور در جـداول ۴ و ۵، مطابق روش تحقیق، مقدار سه عامل زمین‌شناسی، ارتفاع و پوشش سطحی تعیین شـد که در جدول ۶ به همراه تولید رسوب دیواره‌های خاکبرداری و خاکریزی و سطح و شانه جاده ملاحظه می‌شود.

همانگونه که قبلا گفته شد، در تمام قطعه‌ها، همه عوامل به‌غیر از سه عامل زمین‌شناسی، پوشش سنگ و گیاه و ارتفاع دیواره ثابت هستند. ایـن موضوع، نقش و اهمیت عوامل مذکور را در جاده مورد مطالعه از نظر تاثیر بر فرسـایش و تولید رسوب نشان می‌دهد. به عنوان مثال، مقایسه نتایج محاسبات در قطعات ۵ و ۶، بیانگر اثر تغییر شیب دیواره خاکبرداری در شـرایط ثابت بودن پوشـش و زمین‌شناسی بر میزان رسوب حاصل است. در حالی که، در دیواره خاکریزی همین دو قطعه، تغییر جزئی در درصد پوشش سطحی، میزان رسوب‌دهی را تقریباً دو برابر کرده اسـت. بنابراین، در دیواره خاکبرداری، اولین عامل کنترل کننده فرسایش، درصد شیب دیواره و بعد از آن فرسایش‌پذیری و در نهایت نوع و درصد پوشـش دیواره اسـت. ولی، در دیواره خاکریزی، درصد پوشش سطحی نسبت به دو عامل دیگر در اولویت می‌باشد.

حداکثر کل تولید رسـوب قطعه ۱۰۰ متری (جمع سـه ستون آخر جدول ۶)، بالغ بر ۵۰ تن در سال است که به مفهوم نیم تن از هر متر طولی جاده اسـت. بیشترین سـهم تولید رسوب، به ترتیب مربوط به دیواره خاکریزی و خاکبرداری و با تفاوت خیلی زیاد مربوط به سـطح و شانه خاکی جاده می‌باشد. تغییرات نرخ تولید رسوب از قطعه‌ای به قطعه دیگر در دیواره‌های خاکبرداری و خاکریزی تا ۲۰ برابر می‌رسد. این تغییرات در سطح و شـانه خاکی جاده کمتر از دو برابر است که نشانه یکنواختی بیشـتر آن می‌باشد. در حالی‌که، جمع تولید رسوب (سـه بخش جاده)، تغییری در حدود ۱۰ برابر را بین قطعات نشـان می‌دهد.

پس از محاسـبه رسوب هر قطعه، مقدار کل و میانگین رسوب‌دهی از مساحت متأثر از جاده‌سـازی در حوضه و همچنین خطای استاندارد برآورد کل با استفاده از معادلات ۷ تا ۹ برآورد شد که نتایج در جدول ۷ ملاحظه می‌شود.

جدول ۴- نوع سنگ شناسی و میزان عامل زمین شناسی در دیواره خاکبرداری ۱۷ قطعه مورد مطالعه

شمارهٔ قطعه	شیب دیواره (٪)		پوشش گیاهی و سنگی (٪)		عرض جاده (m)
	دیوارهٔ خاکبرداری	دیوارهٔ خاکبرداری	دیوارهٔ خاکبرداری	دیوارهٔ خاکبرداری	
۱	۵۱/۱	۵۹/۹	۹۰	۶۰	۶
۲	۹۵/۵	۱۰۶/۶	۱۰۰	۵۵	۵/۵
۳	۱۰۰/۰	۱۱۱/۰	۵۵	۹۰	۵/۵
۴	۶۲/۲	۶۸/۸	۱۰۰	۹۰	۵/۲
۵	۵۵/۵	۶۲/۲	۱۰۰	۹۵	۵/۸
۶	۹۳/۲	۱۰۶/۶	۹۵	۸۰	۶
۷	۶۶/۶	۷۷/۷	۵۵	۵۵	۴/۵
۸	۷۱/۰	۷۵/۵	۶۰	۶۰	۶
۹	۴۸/۸	۵۵/۵	۸۵	۳۲	۶
۱۰	۶۴/۴	۶۸/۸	۹۵	۳۲	۵
۱۱	۴۰/۰	۴۲/۲	۹۵	۸۰	۶
۱۲	۷۹/۹	۸۶/۶	۱۰۰	۸۵	۶
۱۳	۸۸/۸	۹۳/۲	۵۲	۵۲	۵/۵
۱۴	۸۸/۸	۹۷/۷	۷۰	۷۰	۵
۱۵	۱۳۱/۰	۱۳۰/۱	۹۰	۷۰	۵/۳
۱۶	۷۵/۵	۷۷/۷	۹۰	۵۲	۶
۱۷	۲۵/۰	۰/۰	۹۰	۸۵	۷

جدول ۶- مقادیر عوامل مدل WARSEM در قطعات مورد مطالعه به تفکیک دیواره خاکبرداری و خاکریزی

شمارهٔ قطعه	عامل زمین‌شناسی		عامل ارتفاع		عامل پوشش سطحی		رسوب‌دهی (ton/year)		
	دیوارهٔخاکبرداری	دیوارهٔخاکبرداری	دیوارهٔخاکبرداری	دیوارهٔخاکبرداری	دیوارهٔخاکبرداری	دیوارهٔخاکبرداری	دیوارهٔخاکبرداری	دیوارهٔخاکبرداری	سطح و شانه جاده
۱	۲/۵	۴/۵	۳/۰	۳/۰	۰/۱۰۲	۰/۳۱۳	۳/۰	۱۱/۹۷	۰/۷
۲	۲/۵	۴/۵	۷/۵	۷/۵	۰/۱۰۲	۰/۳۱۳	۶/۳۸	۲۸/۸۱	۰/۶۴
۳	۲/۵	۴/۵	۷/۵	۷/۵	۰/۳۱۳	۰/۱۰۲	۱۸/۲۵	۹/۸۲	۰/۶۴
۴	۲/۵	۴/۵	۷/۵	۷/۵	۰/۱۰۲	۰/۱۰۲	۶/۳۵	۹/۷۹	۰/۶۱
۵	۱/۵	۴/۵	۷/۵	۳/۰	۰/۱۰۲	۰/۱۰۲	۱/۹۵	۹/۷۵	۰/۵۷
۶	۱/۵	۴/۵	۷/۵	۷/۵	۰/۱۰۲	۰/۲۰۱	۴/۰۴	۱۸/۶۸	۰/۵۹
۷	۱/۵	۴/۵	۷/۵	۷/۵	۰/۳۱۳	۰/۳۱۳	۳/۸۹	۲۸/۶۲	۰/۴۵
۸	۳/۰	۴/۵	۷/۵	۷/۵	۰/۳۱۳	۰/۳۱۳	۲۱/۸۸	۲۸/۹۳	۰/۷۶
۹	۲/۵	۴/۵	۳/۰	۳/۰	۰/۲۰۱	۰/۴۴۶	۵/۲۲	۱۶/۷۶	۰/۷
۱۰	۲/۵	۴/۵	۷/۵	۷/۵	۰/۱۰۲	۰/۴۴۶	۶/۳۲	۴۰/۷۳	۰/۵۹
۱۱	۲/۵	۴/۵	۳/۰	۳/۰	۰/۱۰۲	۰/۲۰۱	۳/۰	۷/۹۴	۰/۷
۱۲	۲/۵	۴/۵	۷/۵	۷/۵	۰/۱۰۲	۰/۲۰۱	۶/۴۴	۱۸/۷۹	۰/۷
۱۳	۲/۵	۴/۵	۷/۵	۷/۵	۰/۳۱۳	۰/۳۱۳	۱۱/۹۵	۲۸/۸۱	۰/۶۴
۱۴	۲/۵	۴/۵	۷/۵	۷/۵	۰/۲۰۱	۰/۲۰۱	۱۱/۸۹	۱۸/۶۸	۰/۵۹
۱۵	۲/۵	۴/۵	۷/۵	۷/۵	۰/۱۰۲	۰/۲۰۱	۶/۳۶	۱۸/۷۱	۰/۶۲
۱۶	۳/۰	۴/۵	۷/۵	۷/۵	۰/۳۱۳	۰/۳۱۳	۲۱/۸۸	۲۸/۹۳	۰/۷۶
۱۷	۱/۵	۴/۵	۰/۷۵	۱/۵	۰/۱۰۲	۰/۲۰۱	۱/۳۸	۲/۵	۰/۶۹

جدول ۷- برآورد مقدار کل، میانگین و ضریب اطمینان در هر دیواره

رسوب	کل رسوب (ton/yr)	متوسط رسوب ویژه (ton/ha.yr)	میانگین رسوب قطعه (ton/yr)	خطای استاندارد برآورد کل (ton/yr)
سطح و شانه جاده	۷۷/۳	۱۱/۵	۰/۶	۲/۱
دیواره خاکبرداری	۹۸۹/۵	۱۳۷/۴	۸/۲	۱۷۸/۹
دیواره خاکریزی	۲۳۱۶/۸	۳۰۴/۹	۱۹/۳	۲۷۴/۴
کل رسوب	۳۳۸۳/۶	۱۵۷/۱	۲۸/۲	۳۷۹/۸

به این ترتیب کل رسوب سالانه تولید شده از ۱۲ کیلومتر جاده مورد مطالعه، بالغ بر ۳۳۸۳ تن است. با لحاظ خطای استاندارد و رابطه حدود اعتماد (رابطه ۱۰)، مقدار تولید رسوب از حداقل ۲۵۷۸ تا حداکثر ۴۱۸۹ تن در سال برآورد می‌شود که حاکی از خطایی در حدود ۲۴ درصد است. بنابراین، با توجه به توصیه توی و همکاران (۲۰۰۲)، می‌توان نتیجه گرفت که برآورد قابل اعتماد است. اگر مقدار تولید رسوب به ۲۱/۵۴ هکتار مساحت کل تحت اثر جاده سازی (سطح دیواره خاکبرداری، جاده و شانه، دیواره خاکریزی) تقسیم شود؛ رسوبدهی ویژه تقریبا معادل ۱۵۷ تن بر هکتار در سال می‌شود که رسوب بسیار بالایی است و نشاندهنده بحرانی بودن شرایط می‌باشد. این نتیجه در مقایسه با نتیجه پارساخو و همکاران (۲۰۰۹) که متوسط تولید رسوب از سطح دیواره‌های خاکی در دو جاده جنگلی استان مازندران را با استفاده از مدل WARSEM، بالغ بر ۱۶۰ و ۴۲۹ تن بر هکتار در سال به دست آوردند و همچنین مطالعه انجام شده توسط حسینی و همکاران (۱۳۹۱) در ۲۲۶۰ متر از جاده‌های جنگلی سری یک جنگل‌های دارابکلا با همین مدل، که میزان تولید رسوب حدود ۷۷ تن بر هکتار در سال به دست آمد، منطقی به نظر می‌رسد. از نظر اقلیمی، حوضه بالادست وردآورد، خشک‌تر از حوضه‌های جنگلی شمال است. باران بیشتر، در جاده مورد مطالعه پارساخو و همکاران (۲۰۰۹)، می‌تواند سبب افزایش فرسایش از دیواره‌های جاده در سال اول که فاقد پوشش کافی هستند؛ شود. در حالی که فرسایش کمتر در حوضه مورد مطالعه حسینی و همکاران (۱۳۹۱)، مربوط به جاده ای با طول عمر بیش از دو سال است. به نظر می‌رسد استقرار گیاهان طی این مدت، سبب تقلیل فرسایش شده است.

جدول ۸ وزن سالانه واریزه در پای دیواره خاکبرداری ۱۷ قطعه مورد مطالعه را نشان می‌دهد. مقایسه این ارقام با رسوب دیواره خاکبرداری در قطعات متناظر (جدول ۶) اختلاف زیادی را در برخی از قطعات نشان می‌دهد. چند دلیل برای این اختلافات وجود دارد. اولا، اگر چه پاکسازی رسوبات به طور مداوم از زمان ساخت انجام می‌گیرد؛ لیکن، ممکن است به‌دلیل وجود فضای کافی، رسوب بعضی از قطعه‌ها برای مدت طولانی تمیز نشود و در مقابل در برخی قطعات جمع‌آوری و حمل رسوب به دفعات انجام گیرد. در ثانی، مدل، متوسط تولید رسوب را محاسبه می‌کند. در حالی‌که، واریزه اندازه‌گیری شده، بیان‌کننده رسوب در سال(های) اخیر است. چه بسا، فعالیت یک خندق روی دیواره خاکبرداری در سال(های) اخیر رسوب زیادی را در پای دیواره تخلیه کند. در حالیکه، قبلا این محل فرسایش زیادی نداشته باشد. ثالثا، ممکن است بخشی از رسوب از دامنه بالادست دیواره خاکبرداری تامین شود. البته با توجه به مشاهدات صحرایی از وضعیت پوشش طبیعی و اشکال فرسایش، سهم دامنه بالادست نمی‌تواند قابل توجه باشد.

کل واریزه سالانه برای ۱۲ کیلومتر با استفاده از رابطه ۳، معادل ۴۱۶۸ تن محاسبه شد که بیش از چهار برابر کل رسوب برآوردی با مدل WARSEM از دیواره خاکبرداری است. این موضوع، بیانگر عدم همخوانی نتایج مشاهده‌ای با برآوردی است. با لحاظ بخشی از رسوبات بسیار ریز روی واریزه که در اثر فرسایش مجدد سطحی به خارج از محل حمل می‌شود؛ اختلاف مقادیر برآوردی و مشاهده‌ای افزایش می‌یابد.

آمار سال ۱۳۹۱ رسوبات جمع‌آوری و حمل شده در حوضه بالادست وردآورد از سازمان راه و شهرسازی استان تهران اخذ شد (جدول ۹). از مجموع ۶۶ هزارتن عملیات خاکی، ۲۸۰۰۰ تن رسوب مربوط به دیواره‌های (خاکبرداری) ۴۴ کیلومتر جاده‌های آسفالته و شوسه این حوضه است. با فرض یکنواخت بودن نقش هر دو نوع جاده، سهم رسوب ۱۲ کیلومتر جاده آسفالت ۷۶۳۶ تن می‌شود که بسیار بیشتر از ۴۱۶۸ تن واریزه اندازه‌گیری شده مربوط به دیواره خاکبرداری و ۹۸۹ تن رسوب برآوردی همین دیواره است.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش، تنها با مطالعه ۱۷۰۰ متر از یک جاده ۱۲ کیلومتری (۱۴ درصد)، مقدار رسوب کل جاده با دقت قابل قبول برآورد شد. اگر انواع هزینه‌های مطالعه فرسایش جاده از قبیل جمع‌آوری و خرید داده‌ها و نقشه‌ها، حمل و نقل، کارشناس مطالعات صحرایی، آزمایشگاه و غیره تجزیه شود؛ هزینه مربوط به مطالعه صحرایی و آزمایشگاه تقریبا به همین نسبت کاهش می‌یابد. در مقابل، هزینه داده‌ها تغییری نکرده و بخشی از هزینه حمل و نقل کم می‌شود. بنابراین می‌توان گفت که با تلفیق روش آمارگیری نمونه‌ای با مدل WARSEM، تا حد زیادی در هزینه‌ها صرفه‌جویی می‌شود. با استدلالی مشابه، صرفه‌جویی در زمان مطالعه نیز قابل اثبات است.

جدول ۸- وزن واریزه اندازه‌گیری شده به روش حجم‌سنجی

شمارهٔ قطعه	وزن واریزه (تن)	شمارهٔ قطعه	وزن واریزه (تن)
۱	۶/۰	۱۰	۴۳/۲
۲	۴/۸	۱۱	۶/۷
۳	۹/۶	۱۲	۱۶/۰
۴	۶/۴	۱۳	۱۶۸/۰
۵	۳/۲	۱۴	۱۷۲/۱
۶	۹/۶	۱۵	۷۹/۶
۷	۰/۲۴	۱۶	۲۰/۰
۸	۶۰/۰	۱۷	۰/۰
۹	۶۰/۰		

از سوی دیگر، با توجه به شیب‌های تند دیواره‌های خاکبرداری و خاکریزی جاده‌ها، انجام پیمایش با هدف نمونه‌گیری و اندازه‌گیری پارامترهای مدل کاری مشکل و گاه طاقت‌فرسا می‌باشد که ممکن است با خطراتی نیز همراه باشد. به این مسئله، ضرورت توقف خودرو و تردد کارشناس در حاشیه جاده، را که ممکن است خطرات جانی برای پژوهشگر به ویژه در جاده‌های پر ترافیک و باریک کوهستانی در پی داشته باشد را اضافه کرد. بنابراین می‌توان گفت استفاده از روش نمونه‌گیری آماری در مطالعات فرسایش می‌تواند بسیار مقرون به صرفه باشد، به خصوص اگر در تعیین اندازه نمونه میزان خطای کمتری در نظر گرفته شود.

در این پژوهش، از روش نمونه‌گیری سیستماتیک استفاده شد. در صورت غیر یکنواختی گروه‌های جاده‌ای در حوضه، بهتر است از انواع روش‌های طبقه‌بندی شده و در صورت تشابه ویژگی‌های جاده‌ها، از روش نمونه گیری خوشه‌ای استفاده شود. روش‌های نمونه‌گیری مذکور در صورت امکان‌پذیر بودن، ضمن صرفه جویی در زمان و هزینه، دقت برآوردها را نسبت به روش نمونه‌گیری کاملا تصادفی افزایش می‌دهند (Thompson ، ۱۹۹۴).

جدول ۹- رسوبات جمع‌آوری شده در حوضه بالادست وردآورد در هر سال (طبق گزارش سازمان راه وشهرسازی استان تهران)

حجم رسوبات و محل جمع‌آوری آن‌ها	مقدار (تن)
تخریب و اصلاحات اعمال شده در سطح جاده	۱۸۰۰۰
رسوبات حاصل از دیواره‌ها	۲۸۰۰۰
رسوبات زیرگذرها و باقیمانده در مسیرهای میانی	۲۰۰۰۰
مجموع (کل رسوبات فرسایش یافته)	۶۶۰۰۰

نکته قابل ذکر، عدم قطعیت کامل در نتایج مدل‌سازی فرسایش است. این عدم قطعیت می‌تواند ناشی از ساختار مدل، ورودی‌ها، پارامترهای مدل و همچنین به دلایل پیش‌بینی نشده باشد (ماسکی، ۲۰۰۴). در این مطالعه سعی گردیده که منابع عدم قطعیت مرتبط با اندازه‌گیری داده‌های ورودی و پارامترهای مدل، دارای حداقل خطا باشند. در این راستا، بعضی داده‌ها طی بازدید صحرایی و با دقت برداشت گردید. با این وجود برخی دیگر، از نقشه‌های موجود استخراج شده که خطاهای موجود در آن‌ها می‌تواند سبب ایجاد عدم قطعیت در نتایج به دست آمده از پیش‌بینی مدل شود. همچنین طی بررسی حساسیت مدل WARSEM به عوامل متغیر اندازه‌گیری شده در دیواره‌ها، مشاهده شد که عاملهای شیب و ارتفاع دیواره، پوشش سطحی و فرسایش‌پذیری سازند زمین‌شناسی منطقه، مؤثرترین عوامل تعیین کننده تولید رسوب می‌باشند. بنابراین، با مدیریت عوامل مذکور به ویژه پوشش و شیب در هنگام احداث جاده‌ها، میزان رسوب‌دهی بخش¬های متأثر از آن جاده به حداقل می‌رسد

منابع مورد استفاده

۱. احمدی ح. ۱۳۷۴. ژئومورفولوژی کاربردی. جلد اول (فرسایش آبی). انتشارات دانشگاه تهران.

۲. پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری. ۱۳۷۳. مطالعات سیل حوضه بالادست وردآورد. مرکز تحقیقات مهندسی.

۳. حسینی ع.ا، نقوی ح و پارساخو آ. ۱۳۹۱. برآورد مقدار رسوب به دست آمده از جاده‌های جنگلی به کمک SEDMODL. مجله پژوهش‌های علوم و فناوری چوب و جنگل. جلد نوزدهم، شماره اول. ۴۱-۲۳.
۴. جاماب (شرکت مهندسین مشاور). ۱۳۷۸. طرح جامع آب کشور؛ حوزه آبریز دریاچه نمک. وزارت نیرو.
۵. شریعت جعفری م، غیومیان ج، پیروان ح.ر. ۱۳۸۵. حساسیت ذاتی سازندهای زمین‌شناسی به هوازدگی و فرسایش در حوضه‌های واقع در پهنه رسوب- ساختاری خرده قاره ایران مرکزی. نشریه علوم دانشگاه تربیت معلم. جلد ۶. شماره ۲. ۷۲۲-۷۰۹.
۶. صادقی س.ح.ر، عاقلی کهنه شهری ل. ۱۳۸۴. برآورد آثار اقتصادی فرسایش خاک در ایران. فصلنامه پژوهش‌های اقتصادی ایران، شماره ۱۵. ۹۸-۹۳.
۷. عرب خدری، محمود. ۱۳۹۰. بهبود برآورد منحنی سنجه رسوب حد وسط دسته‌ها با کاربرد برنامه آمارگیری نمونه‌ای سازوار خوشه‌ای. چهارمین کنفرانس مدیریت منابع آب ایران. ۱۳-۱۴ اردیبهشت ماه ۱۳۹۰، دانشگاه صنعتی امیرکبیر. تهران.
۸. عرب‌خدری م. جافریان م. ۱۳۹۱. تأثیر جاده ها بر فرسایش و رسوب‌زایی. روزنامه ایران، شماره ۵۱۸۰، ص۷.
9. Binkley, D., Brown, T.C., 1993. Forest practices as nonpoint sources of pollution in North America. JAWRA Journal of the American Water Resources Association 740-729 ,29.
10. Cochran, W.G., 2007. Sampling techniques. John Wiley & Sons.
11. Cole, D.N., Landres, P.B., 1996. Threats to wilderness ecosystems: impacts and research needs. Ecological Applications, 184-168.
12. Dube, K., Megahan, W., McCalmon, M., 2004. Washington road surface erosion model. State of Washington Department of Natural Resources.
13. Foltz, R. B. and M. Truebe. 2003. Locally available aggregate and sediment production. Transportation Research Record 1819 Paper No. LVR1095-8. Washington DC: National Academy of Sciences. -185 193.
14. Forsyth, A.R. and Bubb, K.A. and Cox, M.E. (2006) Runoff, sediment loss and water quality from forest roads in a southeast Queensland coastal plain Pinus plantation. Forest Ecology and Management, 3-1) 221). pp. 206-194.
15. Fu, B., Newham, L.T., Ramos-Scharron, C., 2010. A review of surface erosion and sediment delivery models for unsealed roads. Environmental Modelling & Software 14-1 ,25.
16. Elliot, W. J.; Foltz, R. B.; Robichaud, P. R. 2009. Recent findings related to measuring and modeling forest road erosion. In: Anderssen, R. S.; Braddock, R. D.; Newham, L. T. H., eds. 18th World IMACS Congress and MODSIM09 International Congress on modelling and simulation; July 2009 ,17-13; Cairns, Australia. Modelling and Simulation Society of Australia and New Zealand; and International Association for Mathematics and Computers in Simulation: 4084-4078.
17. Grace, J., 2002. Control of sediment export from the forest road prism. Transactions of the ASAE -1127 ,45 1132.
18. Grayson, R., Haydon, S., Jayasuriya, M., Finlayson, B., 1993. Water quality in mountain ash forests—separating the impacts of roads from those of logging operations. Journal of Hydrology 480-459 ,150.
19. Jaarsma, C.F., 1994. Rural low-traffic roads (LTRs): the challenge for improvement of traffic safety for all road users. In: Proceedings for the Dedicated Conference on Road and Vehicle Safety, 27th ISATA, Aachen, Germany, 31 October- 4 November, pp. –177 183.
20. Ketcheson, G.L., W.F. Megahan, and J.G. King. 1999. "R-1R4" and "BOISED" sediment prediction model tests using forest roads in granitics. Journal of American Water Resources Association 98-83 :(1)35.
21. King, J.G., Tennyson, L.C., 1984. Alteration of streamflow characteristics following road construction in north central Idaho. Water Resources Research ,20 1163-1159.
22. Luce, C.H., Black, T.A., 2001. Spatial and temporal patterns in erosion from forest roads. Water Science and Application 178-165 ,2.
23. Maskey, S. 2004. Modeling uncertainty in flood forecasting systems. Published in Taylor & Francis Routledge. 177p.
24. Parsakhoo, A., hosseini, S.A., lotfalian, M., jalilvand, H., 2009. Soil loss and displacement by heavy equipment in forest road subgrading projects. International Journal of Sediment Research -227 ,24 235.
25. Ramos-Scharrón, C.E., MacDonald, L.H., 2007. Measurement and prediction of natural and anthropogenic sediment sources, St. John, US Virgin Islands. Catena 266-250 ,71.

Resources Research, 1388-1381 :(9)21.
29. Thompson, S.K., 1992. Sampling. Wiley, New York, 343 pp.
30. Toy T.J, Foster G.R, Renard K. G. Soil Erosion, Processes, Prediction, Measurement and Control, 2002. John Wiley & Sons.
31. Wischmeier, W.H., Smith, D.D., 1978. Predicting rainfall erosion losses-a guide to conservation planning. U.S. Department of Agriculture, Agriculture. Handbook No. 537.
26. Reid, L.M., Cederholm, C.J., Salo, E.O., 1981. Sediment Production from Gravel-surfaced Forest Roads, Clearwater Basin, Washington: Final Report. Fisheries Research Institute, College of Fisheries, University of Washington.
27. Rijsdijk, A., Sampurno Bruijnzeel, L., Sutoto, C.K., 2007. Runoff and sediment yield from rural roads, trails and settlements in the upper Konto catchment, East Java, Indonesia. Geomorphology 37-28 ,87.
28. Thomas, R., 1985. Estimating total suspended sediment yield with probability sampling. Water