

مدلسازی فرسایش و تولید رسوب و تهیه نقشه خطر فرسایش آبی

(مطالعه موردی: حوزه آبخیز بالغلی چای، اردبیل)

اباذر اسمعلی^۱ حسن احمدی^۲ سادات فیض نیا^۳ جمال قدوسی^۴

چکیده

در این تحقیق یک متدولوژی بر پایه دانش و اطلاعات موجود توسعه یافته و برای ارزیابی رفتار و خطر فرسایش آبی و نیز مدلسازی فرسایش و تولید رسوب، منطبق با ویژگیهای منطقه تحقیق بکار رفته است. بطوریکه رابطه بین مقدار تولید رسوب محاسبه‌ای در سطح واحدهای کاری با تغییرات عوامل زیست‌محیطی ثابت و متغیر، از طریق بررسیهای آماری بدست آمد و مؤثرترین عوامل در تولید رسوب و فرسایش منطقه مشخص شدند. سپس یک ساختار تجربی برای مدلسازی فرسایش و تولید رسوب منطقه تبیین شد که با الگو گرفتن از مدل MPSIAC به انجام رسید. در فرمول‌بندی مدل جدید، از هشت عامل مؤثر در فرسایش آبی منطقه استفاده شد که شامل عوامل حساسیت به فرسایش سازند زمین‌شناسی، فرسایش‌پذیری خاک، فرساینده‌ی باران، فرساینده‌ی رواناب، پستی و بلندی، تراکم آبراهه‌ها، شاخص تفاوت پوشش گیاهی (NDVI) و وضعیت زمینی فرسایش می‌باشند. در انتخاب مؤثرترین عوامل، در بررسی آنها در دو مقطع زمانی ۱۳۴۷ و ۱۳۸۵، ابتدا عواملی که ضریب همبستگی بالایی را در روابط رگرسیونی از خود نشان دادند، با برآزش بهترین رابطه ممکنه جدا شدند. سپس از بین عوامل انتخاب شده، پارامترهایی انتخاب شدند که در نهایت می‌توان با استفاده از آنها، ساختار مدل را بدست آورد. بطوریکه امکان استفاده از یک عامل بخصوص و عملی بودن برقراری ارتباط آن با میزان تولید رسوب، یکی از موارد مهمی می‌باشد که مد نظر قرار گرفته است. در مدل ارائه شده، از مجموع امتیازات عوامل هشت‌گانه، مقدار M بدست می‌آید که با استفاده از رابطه‌ی نمایشی آن با مقدار رسوب، در نهایت مقدار فرسایش و رسوب تولیدی منطقه محاسبه می‌شود. همچنین ارزیابی دقت مدل در حوزه آبخیز "نیر" به انجام رسید که نتایج حاصله نشان دهنده دقت نسبتاً بالای مدل می‌باشد. در آخر نیز نقشه خطر فرسایش آبی منطقه با استفاده از مدل جدید، تهیه و ارائه شد.

واژه‌های کلیدی: فرسایش آبی؛ تولید رسوب؛ مدلسازی؛ نقشه خطر فرسایش؛ بالغلی چای؛ اردبیل

مقدمه

ارزیابی خطرات فرسایش آبی بر مبنای تعیین شدت فرسایش و با استفاده از روشهای مختلف انجام شده است. بطور مثال از طریق بررسی تراکم و بافت شبکه زهکشی (مورگان، ۱۹۹۶)، تشخیص چگونگی تغییرات پتانسیل فرسایش، از طریق محاسبه شاخصهای فرساینده‌ی باران و روانابهای سطحی (رامکینز* و همکاران ۲۰۰۱). امروزه نیز

۱- استادیار دانشکده کشاورزی، دانشگاه محقق اردبیلی، تلفن: ۰۴۵۱۵۵۱۲۰۸۱-۹، موبایل: ۰۹۱۴۴۵۳۸۶۲۳، E-mail: abazar_esmali@yahoo.com

۲- استاد دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران

۳- استاد دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران

۴- استادیار پژوهشی بازنشسته مرکز تحقیقات حفاظت خاک و آبخیزداری

* - Romkens

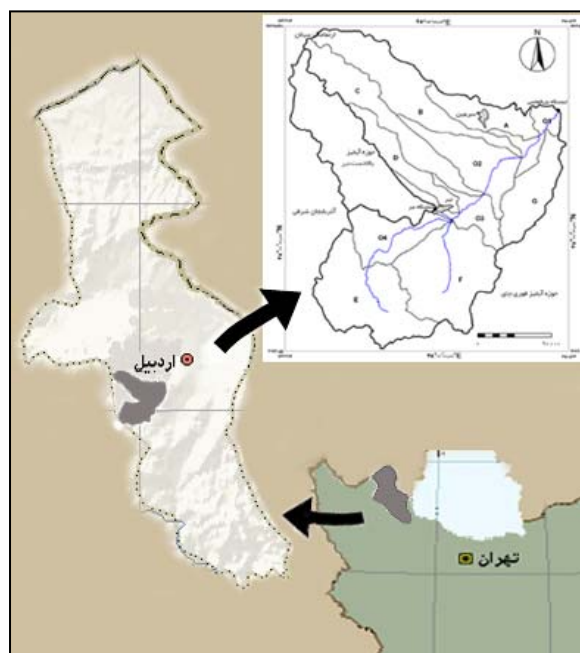
این روشها مبنای تهیه نقشه کلی فرسایش آبی صرفنظر از جامعیت یا عدم جامعیت روشهای یاد شده در بسیاری از نقاط جهان می باشد (قدوسی، ۱۳۸۲).

فرآیندهای فرسایشی از فاکتورهای بیشماری منتج می شوند و مدلیزه کردن آنها بدلیل پیچیدگی این عوامل مشکل است. معمولاً چهار فاکتور اصلی شامل خاک، توپوگرافی، پوشش زمین و اقلیم در این بررسیها مورد توجه قرار می گیرد (ویشمایر و اسمیت، ۱۹۷۸ و کینگ و همکاران، ۱۹۹۸). بنابراین بایستی دو گام اصلی در مدلیزه کردن فرآیندهای فرسایش و تهیه نقشه خطر تشخیص داده شود: ۱- انتخاب عوامل و مشخص کردن پارامترهای آنها و ۲- انتخاب مدل و تهیه نقشه خطر. که این دو مرحله در ارتباط با همدیگر هستند.

هدف از این مطالعه بررسی و توسعه عوامل مؤثر بر فرسایش آبی و پارامترهایی می باشد که به صور مختلف در مدلها و روشهای ملی و بین المللی بکار گرفته شده اند و برای ارزیابی خطر فرسایش در سطح ملی و منطقه ای می توانند بکار گرفته شوند. همچنین تبیین مدلی برای پیش بینی شکل گیری فرسایش آبی در حوزه آبخیز بالغلی چای بر اساس اشکال فرسایش در شرایط آب و هوایی حاکم بر منطقه و تهیه نقشه خطر فرسایش می باشد. از این رو بررسی رابطه بین ویژگیهای محیطی به ویژه خصوصیات ژئومورفولوژی زمین در شکل گیری و گسترش فرسایش آبی با توجه به وضعیت موجود، بیشتر مورد تأکید و توجه است.

مواد و روشها

منطقه مطالعه شده در نواحی جنوب شرقی کوههای سبلان در استان اردبیل بین طول های جغرافیایی 47° - 48° تا 12° - 48° و عرضهای جغرافیایی 37° - 51° تا 38° - 16° شمالی واقع می باشد. مساحت آن حدود ۸۷۰ کیلومترمربع است. رودخانه اصلی آن بالغلی چای می باشد که از طریق رود قره سو و دره رود به رود ارس و در نهایت به دریای خزر می ریزد (شکل ۱). اقلیم این منطقه نیمه خشک تا مدیترانه ای است که متوسط بارش سالانه آن بین ۳۵۰ تا ۹۷۶ میلیمتر است که با افزایش ارتفاع، در ارتفاعات بالا بارندگی تبدیل به برف شده و بعضاً دارای یخچالهای طبیعی است.



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی حوزه آبخیز بالغلی چای در استان اردبیل و کشور

۱- بررسی عوامل محیطی مؤثر در ایجاد انواع فرسایش آبی موجود در منطقه

در روند انجام تحقیق، ابتدا ویژگیهای منطقه مورد مطالعه، در قالب پنج گروه عوامل اصلی توپوگرافی، اقلیم، خاک و زمین، پوشش سطحی و تأثیرات انسانی مورد بررسی قرار گرفتند و با استفاده از نتایج حاصله پارامترهایی به منظور ارزیابی خطر فرسایش آبی انتخاب شدند و تحت عنوان شاخصهای مربوط به هر کدام از عوامل در نظر گرفته شدند (هوانگ^۱ و همکاران، ۲۰۰۱).

۲- تهیه نقشه واحدکاری و تشخیص انواع فرسایش

در ادامه کار تحقیق به منظور تشخیص انواع فرسایش و رخساره‌های ژئومورفولوژی، اقدام به تهیه نقشه واحدکاری شد که بدین منظور موزائیک عکسهای هوایی تهیه شد و با کمک تصاویر ماهواره‌ای، موقعیت و توزیع مکانی انواع فرسایش آبی منطقه مورد شناسایی قرار گرفتند. بطوریکه وضعیت پراکنش مکانی و سطح تحت تأثیر هر کدام از انواع فرسایش آبی موجود در منطقه بررسی شده و نقشه مناطق تحت تأثیر انواع فرسایش آبی تهیه شد. همچنین تغییرات سیمای فرسایش آبی در طی زمان و در دو مقطع زمانی ۱۳۴۷ و ۱۳۸۵ مطالعه شد (کینگ و همکاران، ۲۰۰۵؛ هیوز^۲ و پروسر^۳، ۲۰۰۳ و احمدی، ۱۳۸۵).

۳- بررسی آماری رابطه عوامل مؤثر و انواع الگوهای فرسایشی

این کار از طریق بررسی آماری رابطه عوامل مؤثر و انواع الگوهای فرسایشی به انجام رسید. بطوریکه پس از تعیین متغیرهای مستقل (شامل عوامل اقلیمی، توپوگرافی، لیتولوژی، فرسایش‌پذیری خاک، پوشش سطحی، نوع استفاده از اراضی و ...) و متغیر وابسته (مساحت تحت تأثیر هر یک از انواع فرسایش آبی) مراحل انجام آزمون در سه مرحله دنبال شد: ۱- تجزیه و تحلیل فراوانی، ۲- تجزیه و تحلیل انتزاعی و ۳- آزمون چند متغیره (قدوسی، ۱۳۸۲).

۴- بررسی روابط بین عوامل زمین‌محیطی متغیر با تغییرات انواع فرسایش آبی و رسوب ثبت شده در مقاطع مختلف زمانی

در این مرحله اقدام به بررسی روابط بین عوامل زمین‌محیطی متغیر با تغییرات انواع فرسایش آبی در مقاطع مختلف زمانی شد و وضعیت تغییرات شبکه هیدروگرافی، تغییرات پوشش گیاهی و تغییرات کاربری اراضی در طی زمان مورد بررسی قرار گرفت. همچنین رابطه بین عوامل مذکور با مقادیر ثبت شده رسوب مورد بررسی قرار گرفت.

۵- تشخیص مهمترین عوامل مؤثر در رخداد انواع فرسایش آبی منطقه

به منظور تعیین میزان اثر عوامل مؤثر در ایجاد فرسایش منطقه، مقادیر فرسایش و تولید رسوب حاصل از انواع فرسایشهای آبی با استفاده از مدل‌های موجود فرسایش و رسوب و در قالب سه گروه مدل‌های مربوط به فرسایشهای سطحی و شیبی (MUSLE, USLE و استلیک)، مدل‌های مربوط به برآورد کل فرسایشها (MPSIAC, EPM) و هیدروفیزیکی) و مدل‌های بر اساس خصوصیات فیزیکی حوزه (فورنیه و داگلاس)، میزان تولید رسوب منطقه برآورد شد و پس از مقایسه نتایج حاصل از برآورد مقادیر تولید رسوب با مقادیر مشاهده و ثبت شده، با کالیبراسیون مدل

^۱- Huang

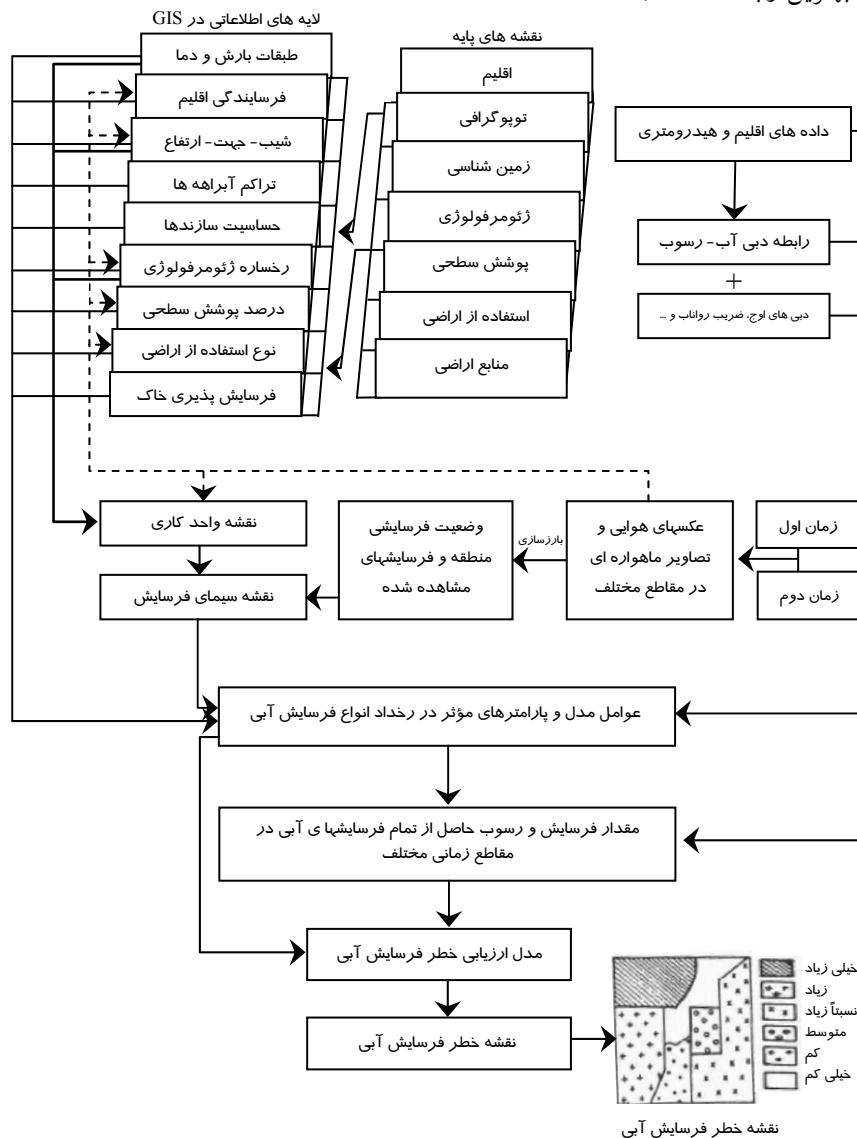
^۲- Hughes

^۳- Prosser

MPSIAC، مقدار فرسایش تولیدی منطقه در دو مقطع زمانی ۱۳۴۷ و ۱۳۸۵ محاسبه شد و رابطه مقدار تولید رسوب با تغییرات عوامل زیست محیطی متغیر در حوزه آبخیز از طریق بررسیهای آماری بدست آمد که بدین ترتیب مؤثرترین عوامل در تولید رسوب و فرسایش منطقه انتخاب شدند (تنگستانی، ۲۰۰۶؛ رفاهی، ۱۳۸۵ و احمدی، ۱۳۸۵).

۶- تبیین ساختار مدل سازی فرسایش و تولید رسوب

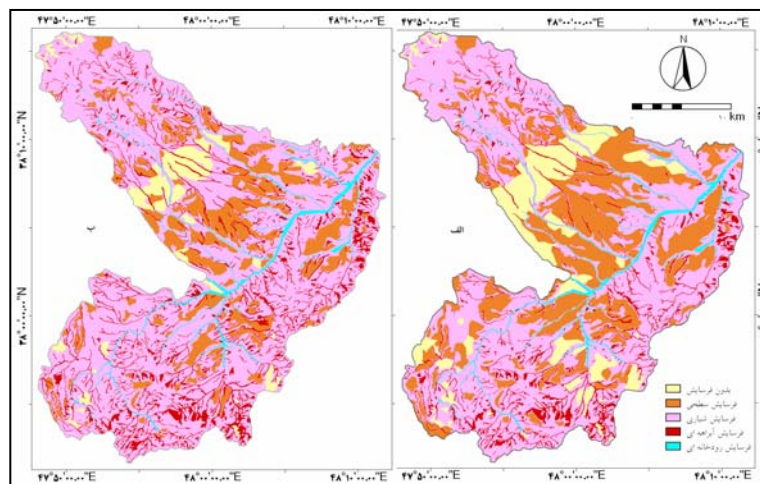
به طور کلی در روند اجرای طرح جهت انجام مدل سازی مقدار فرسایش و تولید رسوب منطقه، دیاگرام روندنمای ارائه شده در شکل ۲ مورد استفاده قرار گرفته است. مدل فرسایشی ارائه شده در این تحقیق دارای ساختار تجربی بوده و از مدل MPSIAC الگو گرفته است. در تبیین مدل جدید از هشت عامل مؤثر در تولید رسوب منطقه استفاده شده است که عوامل انتخاب شده پس از بررسی و تجزیه و تحلیل جداول و نمودارهای بدست آمده از طریق برقراری روابط بین مقدار تولید رسوب با عوامل ایجاد رسوب بدست آمده اند. بطوریکه در انتخاب مؤثرترین عوامل، در بررسی آنها در دو مقطع زمانی ۱۳۴۷ و ۱۳۸۵، عواملی را که ضریب همبستگی بالایی در روابط رگرسیونی از خود نشان دادند، با برازش بهترین رابطه ممکنه جدا شدند.



شکل ۲- دیاگرام روندنمای نحوه اجرای تحقیق جهت ارائه مدل فرسایش و رسوب منطقه

نتایج و بحث

بررسی تغییرات فرسایش آبی در طی زمان، نشاندهنده تغییرات قابل ملاحظه‌ای در الگوی پراکنش مکانی انواع فرسایشها است. شکل ۳ نقشه سیمای فرسایش آبی را در دو مقطع زمانی ۱۳۴۷ و ۱۳۸۵ نشان می‌دهد که نشاندهنده تغییرات مکانی سطوح تحت تأثیر هر کدام از انواع فرسایشها است.



شکل ۳- وضعیت سیمای فرسایش آبی در دو مقطع زمانی: الف- ۱۳۴۷ و ب- ۱۳۸۵

با برآورد مقدار رسوب ویژه منطقه مورد مطالعه با استفاده از مدل‌های مختلف برآورد رسوب و محاسبه رسوبدهی واقعی منطقه با استفاده از ایستگاههای هیدرومتری موجود، مقایسه کارایی مدل‌های مختلف بصورت جدول ۱ صورت گرفت که از نتایج حاصل از این جدول در محاسبه رسوب ویژه منطقه در زیرحوزه‌ها و شدت آن در بخشهای مختلف منطقه، در دو مقطع زمانی ۱۳۴۷ و ۱۳۸۵ استفاده شد. بدین ترتیب نقش و میزان اثر عوامل مختلف مؤثر در فرسایش و رسوبزایی نیز شناخته شده و مدل‌سازی با استفاده از مؤثرترین پارامترها به انجام می‌رسد (بوخیر و همکاران، ۲۰۰۶).

جدول ۱- میزان کارایی مدل‌های مختلف فرسایش و رسوب در تعیین مقدار رسوبزایی منطقه

روش	USLE (1)	USLE (2)	MUSLE	استلیک	MPSIAC	فورنیه	داگلاس	رسوبدهی واقعی
رسوب ویژه (تن بر کیلومتر مربع در سال)	۵۱۰	۷۸/۹	۲۶۴۴	۳۳۸	۱۴۸/۶	نامعقول	۹۹/۸۴	
درصد اختلاف	۴۱۰/۸	-۲۰/۹۷	۲۵۴۸/۲	۲۳۸/۵	۴۹/۱۴	-	-	
ضریب اصلاحی	۰/۱۹۵۸	۱/۲۶۵	۰/۰۳۷۸	۰/۲۹۵۴	۰/۶۷۱۹	-	-	

پس از برقراری روابط بین مقدار تولید رسوب با عوامل مؤثر، در مرحله بعدی اقدام به بررسی و تجزیه و تحلیل جداول و نمودارهای بدست آمده شد و عواملی را که ضریب همبستگی بالایی از خود نشان دادند، جهت استفاده در مدل فرسایش و رسوب منطقه بصورت جدول ۲ انتخاب شدند که البته نتایج حاصل از بررسی روابط بین عوامل ثابت و متغیر محیطی و هوا و اقلیم با تغییرات انواع فرسایش آبی و مساحت تحت تأثیر هر یک از انواع فرسایش و بررسی رابطه بین عوامل ثابت و متغیر زمین محیطی با مقادیر ثبت شده رسوب نیز در این امر دخیل بودند (واناکر^۱ و همکاران، ۲۰۰۳).

^۱. Vanacker

جدول ۲- انتخاب مؤثرترین عوامل در تولید رسوب و فرسایش منطقه پس از بررسی در دو مقطع زمانی ۱۳۸۵ و ۱۳۴۷

رابطه بهترین برازش	مؤثرترین پارامترها	رسوبدهی / Q_s ($ton/km^2.yr$)
$Q_s = 0.0002(Pa)^2 - 0.091(Pa) + 106.6, R^2 = 0.97$	متوسط بارش سالانه (میلیمتر)	Pa
$Q_s = 1.519(P6)^2 - 43.257(P6) + 401, R^2 = 0.967$	حداکثر بارش ۶ ساعته با دوره بازگشت دو ساله (میلیمتر)	$P6$
$Q_s = 662.1(160)^2 - 1021.2(160) + 488.7, R^2 = 0.97$	حداکثر شدت بارندگی ۶۰ دقیقه ای با دوره بازگشت دو ساله (سانتیمتر بر ساعت)	160
$Q_s = -5.4404q^2 + 230.17q - 2320.3, R^2 = 0.98$	متوسط حداکثر بارش پربارانترین ماه سال به توان ۲، تقسیم بر متوسط بارش سالانه (میلیمتر) $q =$	P^2max/P_a
$Q_s = 0.1158(Ra) + 90.94, R^2 = 0.9513$	ارتفاع رواناب سالانه (میلیمتر)	Ra
$Q_s = 107.83K + 81.462, R^2 = 0.4951$	عامل k مدل جهانی فرسایش	K
$Q_s = -6.9306Ln(Fs) + 127.78, R^2 = 0.6071$	حساسیت سازند زمین شناسی	Fs
$Q_s = 81.959e^{0.0145S}, R^2 = 0.9816$	متوسط شیب (درصد)	S
$Q_s = 0.000006H^2 - 0.0079H + 94.933, R^2 = 0.97$	ارتفاع از سطح دریا (متر)	H
$Q_s = 108.69e^{-0.7819(NDVI)}, R^2 = 0.8826$	شاخص پوشش گیاهی	$NDVI$
$Q_s = -1.1309Lc + 162.7, R^2 = 0.8115$	پوشش سطحی زمین (درصد)	Lc
-	نوع استفاده از اراضی	Lu
$Q_s = 45.097(Dd)^{0.6633}, R^2 = 0.8338$	تراکم زهکشی (کیلومتر بر کیلومتر مربع)	Dd
$Q_s = -3737.9(Qp)^2 + 1410.5(Qp) - 24.9, R^2 = 0.52$	دبی پیک ویژه (مترمکعب بر ثانیه در کیلومتر مربع)	Qp
$Q_s = -1.0103Lc + 143.33, R^2 = 0.7315$	پوشش سطحی زمین (درصد)	Lc
-	نوع استفاده از اراضی	Lu
$Q_s = 39.909(Dd)^{0.6759}, R^2 = 0.8341$	تراکم زهکشی (کیلومتر بر کیلومتر مربع)	Dd

مدل جدید از هشت عامل مهم و مؤثر در فرسایش و تولید رسوب منطقه تحقیق بهره می‌گیرد که پس از تشریح و بیان نحوه تهیه آنها، فرمول و نوع آن آورده خواهد شد:

۱- عامل حساسیت به فرسایش سازند زمین شناسی (Fs)

برای محاسبه عامل حساسیت سازند از فرمول زیر استفاده می‌شود و امتیاز آن بین صفر تا ۱۰ در نظر گرفته شده است. تعیین ضریب مقاومت برای این عامل از طریق جدول ارائه شده توسط فیض‌نیا (۱۳۷۴) برای اقلیم خشک و نیمه‌خشک انجام می‌گیرد و در آن Sn ضریب مقاومت سنگها و سازندها می‌باشد که از جدول ۳ بدست می‌آید:

$$Fs = 10 - 0.6667Sn \quad (1)$$

۲- عامل فرسایش‌پذیری خاک (Se)

برای تعیین عامل فرسایش‌پذیری خاک از رابطه زیر استفاده می‌شود که برای این عامل هم امتیاز صفر تا ۱۰ در نظر گرفته شده است و در آن K عامل فرسایش‌پذیری خاک در روش جهانی برآورد فرسایش خاک می‌باشد که آنرا می‌توان از طریق فرمول و یا شکل بدست آورد:

$$Se = 16.67K \quad (2)$$

^۱- Formation Susceptibility (Fs)

^۲- Soil Erodibility (Se)

جدول ۳- مقاومت سنگها و سازندها در مقابل فرسایش در اقالیم خشک و نیمه خشک (فیض نیا، ۱۳۷۴)

سنگهای آذرین	سنگهای رسوبی (خاک و رسوب)	سنگهای دگرگونی	ضریب مقاومت (Sn)
-	-	کوارتزیت متراکم	۱۵
ریولیت، داسیت، آندزیت و تراکیت متراکم	-	کوارتزیت	۱۴
ریولیت، داسیت، آندزیت، تراکیت، بازالت متراکم و گرانیت متراکم	ماسه سنگ با خمیره سیلیسی	هورنفلس	۱۳
گرانیت، گرانودیوریت و سینیت	چرت و ژاسپ	گرانولیت، گنیس، آمفیبولیت، مرمر متراکم دولومیتی، میگماتیت	۱۲
گابرو، دیوریت، توف اسیدی سیلیسی شده و سنگهای آذرین فوق بازیک	کنگلومرای سیلیسی با دانه های ماسه سنگ با سختی متوسط	گنیس	۱۱
-	سیلستون با سیمان سیلیسی، کنگلومرای سیلیسی با دانه های چرت و ژاسپ، دولومیت	شیست متراکم، مرمر کلسیتی	۱۰
-	ماسه سنگ با خمیره آهن دار، کنگلومرای آهنکی با قطعات سخت آهک	شیست، سرپانتینیت و اسکارن	۹
-	سنگهای رسوبی آهن دار، سنگهای آهنکی - دولومیتی معمولی، گلستگ توفی	فیلیت	۸
سنگهای با بافت شیشه ای نظیر اسیدین	سنگ آهک نازک لایه، ماسه سنگ با سیمان آهنکی و آهن دار نرم، کنگلومرای نرم و شیل	اسلیت	۷
-	لایه های متناوب آهک و مارن، آهنکهای نرم (چاک)	-	۶
-	مارن ژپسی، رس سنگ متراکم، سنگهای تبخیری مثل ژپس و نمک	-	۵
خاکستر آتشفشانی (سینزیت)	مارن نرم و نمکی، رس سنگ	-	۴
-	رس سنگ نرم، رسوبات سخت شده	-	۳
-	خاکها و رسوبات نسبتاً متراکم با پوشش گیاهی خوب و شیب کم	-	۲
-	خاکها و رسوبات نسبتاً سست، فاقد پوشش گیاهی و شیب متوسط	-	۱
-	خاکها و رسوبات سست، فاقد پوشش گیاهی و شیب زیاد	-	۰/۷

۳- عامل فرسایندهی باران (Pe)

برای تعیین عامل فرسایندهی باران، با استفاده از متوسط بارش سالانه و از طریق رابطه زیر عمل می شود که برای این عامل امتیاز بین صفر تا ۱۰ در نظر گرفته شده است.

$$Pe = 0.0069Pa \quad (۳)$$

و در آن Pa متوسط بارش سالانه به میلیمتر می باشد. ضریب $۰/۰۰۶۹$ در مقایسه با ضریب $۰/۲$ ارائه شده در مدل MPSIAC بدست آمده است. بدین صورت که با جایگزینی متوسط بارش سالانه به جای بارندگی ۶ ساعته با دوره بازگشت دو ساله، ضریب ارائه شده تعدیل شده است تا در نهایت جواب یکسان بدست آید. استفاده از بارش متوسط سالانه به جای حداکثر ۶ ساعته، از طرفی طبق نتایج بدست آمده از دقت یکسانی برخوردار بوده و از طرف دیگر راحتتر است.

۴- عامل فرسایندهی رواناب (Re)

برای تعیین عامل فرسایندهی رواناب از متوسط ارتفاع رواناب سالانه و دبی پیک ویژه استفاده شد (مثل روش MPSIAC) و امتیاز آن بین صفر تا ۱۰ بدست می آید که از طریق رابطه زیر محاسبه می شود و در آن R ارتفاع متوسط رواناب سالانه به میلیمتر و QP دبی پیک ویژه به مترمکعب بر ثانیه در کیلومتر مربع می باشد:

$$Re = 0.2 (0.03R + 50QP) \quad (۴)$$

^۱- Precipitation Erosivity (Pe)

^۲- Runoff Erosivity (Re)

۵- عامل پستی و بلندی (T)^۱

برای محاسبه عامل پستی و بلندی نیز از روش ارائه شده در روش MPSIAC استفاده شده است و امتیاز آن بین صفر تا ۲۰ در نظر گرفته شده که از طریق رابطه زیر بدست می‌آید و در آن \bar{S} متوسط شیب به درصد می‌باشد:

$$T = 0.33\bar{S} \quad (۵)$$

۶- عامل هیدروگرافی تراکم آبراهه‌ها (Hd)^۲

برای محاسبه این عامل از فرمول تجربی زیر استفاده می‌شود که پس از تجزیه و تحلیل روابط بین تراکم زهکشی و تولید رسوب در منطقه تحقیق بدست آمده است. امتیاز این عامل بین صفر تا ۱۰ بوده و اعتبار آن تا تراکم زهکشی ۱۰ کیلومتر بر کیلومتر مربع می‌باشد و در آن Dd متوسط تراکم زهکشی به کیلومتر بر کیلومتر مربع می‌باشد:

$$Hd = 2.1705(Dd)^{0.6634} \quad (۶)$$

رابطه (۶) در واقع همان روابط بدست آمده برای تراکم زهکشی و رسوب ویژه در دو مقطع زمانی ۱۳۴۷ و ۱۳۸۵ می‌باشد که بخاطر تأثیر ۱۰ درصدی در نظر گرفته شده برای عامل تراکم زهکشی، رابطه طوری تنظیم شده است که با در نظر گرفتن محدودیت ۱۰ کیلومتر بر کیلومتر مربع، امتیاز بدست آمده برای Hd بین صفر تا ۱۰ تعدیل گردد.

۷- عامل پوشش گیاهی $NDVI$ (Vc)^۳

یکی از معایب روش MPSIAC دوباره کاری در زمینه امتیازدهی به عوامل پوشش زمین و نحوه استفاده از اراضی می‌باشد که در هر دو حالت امتیازدهی آنها تابعی از درصد پوشش سطحی است. همچنین استفاده از شاخص $NDVI$ مشکل اندازه‌گیری‌های زمینی پوشش سطحی و عملیات صحرایی طاقت‌فرسا را رفع می‌نماید. چرا که برای محاسبه شاخص $NDVI$ از تصاویر ماهواره‌ای استفاده می‌شود که دستیابی به آن با تکنولوژی پیشرفته امروزی در زمینه سنجش از دور، به راحتی و در هر زمانی میسر است. بدین جهت به منظور اجتناب از مشکلات فوق‌الذکر و تسریع در انجام کار با دقت بالا، برای ارزیابی عامل پوشش، شاخص $NDVI$ انتخاب شد و امتیاز آن بین ۱۰- تا ۱۰ در نظر گرفته شد تا هم با مقادیر شاخص $NDVI$ - حاصل از GIS- که بین ۱- تا ۱ متغیر است، همخوانی داشته باشد و هم اینکه نقش تراکم پوشش گیاهی در کاهش فرسایش و رسوب ملحوظ گردد. برای محاسبه عامل پوشش گیاهی از رابطه زیر استفاده می‌شود و در آن $NDVI$ شاخص تفاوت پوشش گیاهی نرمال شده می‌باشد:

$$Vc = -10(NDVI) \quad (۷)$$

۸- عامل وضعیت زمینی فرسایش (Ef)^۴

عامل وضعیت زمینی فرسایش به عنوان یکی از مهمترین عوامل در نظر گرفته و امتیاز صفر تا ۲۰ به آن اختصاص داده شد. برای تعیین امتیاز عامل زمینی فرسایش خاک از جدول ۴ استفاده می‌شود که بایستی در سطح واحدهای کاری و یا واحدهای هیدرولوژی بکار گرفته شود. جدول به گونه‌ای تنظیم شده است تا فواصل امتیازات آن کم بوده و

^۱- Topography (T)

^۲- Hydrographic Drainage (Hd)

^۳- Vegetation Cover (Vc)

^۴- Erosion on Field (Ef)

دقت کار کارشناس بالاتر رود. همچنین سعی شده است تا در هر مورد تمامی احتمالات فرسایش در منطقه ذکر شود و به این ترتیب بررسی کننده دچار سردرگمی نشود.

جدول ۴- نحوه امتیازدهی به عامل وضعیت زمینی فرسایش برای مدلسازی فرسایش آبی

امتیاز	شرایط فرسایشی منطقه (Ef)	ردیف
۱۸-۲۰	<ul style="list-style-type: none"> - منطقه دارای خندق های زیاد و فرسایش شدید می باشد. - فرسایش هزاره ای توسعه یافته است. - قشر زیرین خاک در بیشتر مناطق بر اثر فرسایش پیدا شده است. - بقایای گیاهی در سطح زمین دیده نمی شود. - آبراه های با بریدگیهای تند بیشتر مناطق را پوشانده اند و در بیش از ۵۰ درصد فعال هستند. - فرسایشهای کنار رودخانه ای کاملاً توسعه یافته و فعال هستند. - در حدود ۸۰٪ منطقه دارای فرسایش شیاری و آبراه ای می باشد. 	۱
۱۶-۱۸	<ul style="list-style-type: none"> - حرکت شدید بقایای گیاهی و تجمع تعداد زیادی از آنها پشت موانع به وضوح دیده می شود. - سنگ یا سنگریزه وجود دارد ولی بوسیله شیارها یا خندق ها از هم جدا افتاده یا قبلاً شسته و انتقال یافته اند. - جریانات سطحی زیاد بوده و ممکن است رسوبات واریزه ای و بدون پوشش را رسوب دهد. - تعداد زیادی آبراه فرسایشی توسعه یافته و فرسایش فعال در حدود ۵۰ درصد طول آنها وجود دارد. - فرسایشهای کنار رودخانه ای توسعه یافته اند. - در حدود ۵۰٪ منطقه دارای فرسایش شیاری و آبراه ای می باشد. 	۲
۱۴-۱۶	<ul style="list-style-type: none"> - حرکت بقایای گیاهی و تجمع آنها پشت موانع به وضوح دیده می شود. - اغلب گیاهان و سنگها در روی ستون وجود داشته و ریشه ها آشکار هستند. - آبراه های فرسایشی توسعه یافته و فرسایش فعال در حدود ۲۰ درصد طول آنها و ۴۰ درصد کنار رودخانه ها وجود دارد. - کل منطقه دارای فرسایش سطحی بوده و رسوبات ناشی از فرسایش شیاری و آبراه ای وجود دارد. 	۳
۱۲-۱۴	<ul style="list-style-type: none"> - فرسایش شیاری با عمق ۱۵-۵ سانتی متر در اراضی لخت و به فاصله ۳ متر از یکدیگر وجود دارد. - تعداد محدودی آبراه که دارای فرسایش کمی در کف و شیبهای جانبی بوده و با مقدار کمی گیاه روی شیب ها دیده می شود. - فرسایشهای کنار رودخانه ای در حدود ۲۰ درصد طول آن فعال است. - منطقه دارای فرسایش سطحی بوده و در مواردی دارای فرسایش شیاری و کناررودخانه ای است ولی بدون آثار فرسایش عمیق (آبراه ها، خندق ها و...) می باشد. 	۴
۱۰-۱۲	<ul style="list-style-type: none"> - حرکت ذرات با هر رویدادی دیده می شود و ذرات پشت هر مانعی تجمع یافته اند. - سنگها و گیاهان روی ستون معمولاً وجود داشته و ریشه ها آشکار هستند. - بعضی از آبراه ها تثبیت شده اند. - منطقه دارای فرسایش سطحی، شیاری و کناررودخانه ای بوده ولی عمق شیارها کمتر از ۵ سانتیمتر است. 	۵
۸-۱۰	<ul style="list-style-type: none"> - حرکت جدید ذرات خاک بخوبی دیده می شود. - سنگ و سنگریزه کمی حرکت نموده و سنگریزه های کوچکتر پشت موانع جمع شده اند. - جریانات سطحی محتوی شن، سیلت و مواد واریزه ای رسوب کرده اند. - منطقه دارای فرسایش سطحی بوده و بعضاً فرسایش شیاری نیز موجود است. 	۶
۶-۸	<ul style="list-style-type: none"> - سنگهای کوچک و گیاهان در جریان سطحی دارای فرسایش ستونی گردیده اند. - تجمع رسوبات بخوبی و بطور متناوب دیده می شود. - فرسایش کناررودخانه ای در اندک مواردی مشاهده می شود. - سطح زمین فاقد فرسایش قابل رؤیت بوده ولی در کنار رودخانه ها بعضاً واریزه و لغزش مشاهده می شود. 	۷
۴-۶	<ul style="list-style-type: none"> - حرکت بقایای گیاهی در اثر رواناب دیده می شود و پشت هر مانعی تجمع یافته اند. - سنگ و سنگریزه کمی حرکت نموده و سنگریزه های کوچکتر پشت موانع جمع شده اند. - رسوب ذرات خاک ممکن است دیده شود. - سطح زمین فاقد فرسایش قابل رؤیت بوده و اغلب دارای پوشش زراعی است. 	۸
۲-۴	<ul style="list-style-type: none"> - در کنار رودخانه ها در اندک مواردی فرسایش کناری نمایان است. - قسمتی از ذرات خاک حرکت کرده اند و حضور سنگ و سنگریزه غیر یکنواخت بوده و در اثر جریان سطحی پدیدار شده است. - حرکت اتفاقی و بطنی بقایای گیاهی دیده می شود ولی هیچگونه نشانه آشکاری از فرسایش دیده نمی شود. 	۹
۰-۲	<ul style="list-style-type: none"> - سطح زمین فاقد فرسایش قابل رؤیت بوده و غالباً تحت پوشش جنگل، مرتع و گیاهان دائمی است. - در نگاه وسیعتر به سطح منطقه آثار قابل توجه فرسایشی به چشم نمی خورد و کنار رودخانه ها فاقد فرسایش کناری است. - تجمع بقایای گیاهی وجود داشته و حضور سنگ و سنگریزه بطور یکنواخت در سطح زمین دیده می شود. - هیچگونه اثری از جریانات سطحی وجود ندارد. 	۱۰

- فرمول بندی مدل

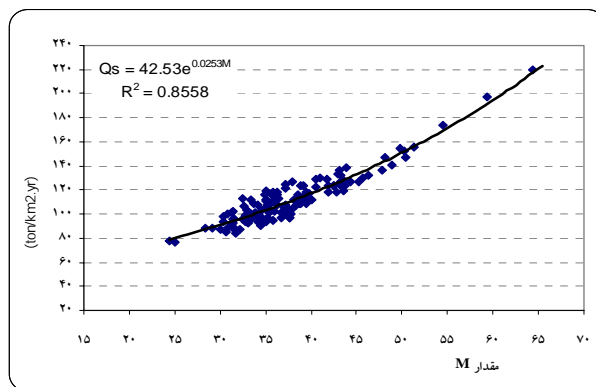
پس از تعیین و محاسبه عوامل هشت گانه، مجموع امتیازهای بدست آمده، مقدار M را بدست می دهد (رابطه ۸) که در مرحله اولیه و بطور کیفی می توان با استفاده از آن وضعیت فرسایشی منطقه را مشخص نمود (جدول ۳):

$$M = Fs + Se + Pe + Re + T + Hp + Vc + Ef \quad (8)$$

ولی به منظور تعیین کمی فرسایش و رسوب، بایستی رابطه بین M و مقدار رسوب تولیدی بدست آید. برای این منظور نقشه M تهیه شد و مقدار متوسط آن در هر واحدکاری بدست آمد. با داشتن نقشه رسوب ویژه، مقدار متوسط رسوب ویژه نیز در هر واحد کاری محاسبه شد. در نهایت با داشتن مقادیر متوسط M و رسوب ویژه در واحدهای کاری، رابطه آنها بصورت زیر بدست آمد (شکل ۴ و جدول ۵):

$$Q_s = 42.53e^{0.0253M} \quad (9)$$

که در آن: Q_s مقدار رسوب ویژه (تن بر کیلومتر مربع در سال) و M مجموع امتیازات عوامل هشت گانه می باشد.

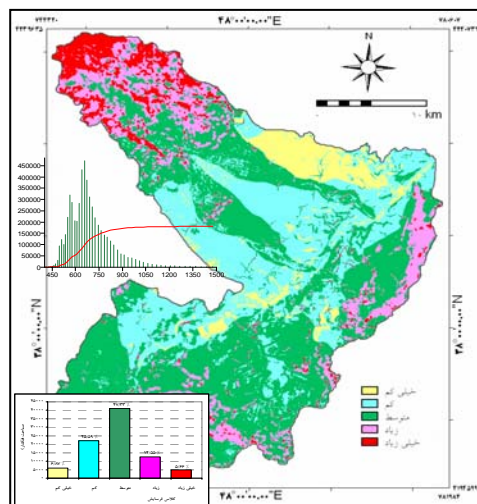


شکل ۴- رابطه بین M و متوسط رسوب ویژه

جدول ۵- وضعیت فرسایش بر حسب جمع نمرات عوامل هشت گانه

وضعیت فرسایش	جمع نمرات عوامل هشت گانه (M)
جزئی	0020
کم	21000
متوسط	01000
زیاد	01000
خیلی زیاد	> 01

با استفاده از مدل فرسایش و رسوب ارائه شده در اینجا، اقدام به برآورد مقدار رسوب ویژه و تهیه نقشه خطر فرسایش آبی منطقه مورد مطالعه شد که نقشه حاصله وضعیت فرسایشی منطقه را در نواحی مختلف آن بطور کمی نشان می دهد (شکل ۵ و جدول ۶). با توجه به این نقشه معلوم می شود که مناطق با فرسایش زیاد در منطقه شامل نواحی با ارتفاع و شیب زیاد در حوالی قله سبلان است که مقدار فرسایش ویژه در این مناطق تا ۱۵۵۰ تن بر کیلومتر مربع در سال نیز می رسد. پس از آن مناطق با فرسایش متوسط، شامل نواحی جنوبی و شرقی حوزه آبخیز بالغی چای است که مقدار فرسایش ویژه آن در حدود ۶۰۰ تا ۱۰۰۰ تن بر کیلومتر مربع در سال می باشد. همچنین مناطق با فرسایش کم در منطقه شامل دامنه های جنوبی پایین تر سبلان و نواحی مرکزی حوزه است که مقدار فرسایش ویژه در آنها از ۶۰۰ تن بر کیلومتر مربع در سال کمتر است.



شکل ۵- نقشه کلاسهای خطر فرسایش منطقه مورد مطالعه

جدول ۶- مساحت و درصد مساحت کلاسهای خطر فرسایش آبی

مقدار فرسایش ویژه ($ton/km^2.yr$)	کلاس فرسایش	مساحت (هکتار)	درصد مساحت
کمتر از ۵۲۵	خیلی کم	000000	0000
۵۲۵-۶۱۰	کم	2220001	20000
۶۱۰-۷۵۰	متوسط	0112000	00000
۷۵۰-۹۱۰	زیاد	1200200	10000
بیش از ۹۱۰	خیلی زیاد	001000	0000
جمع		0000000	100

نتیجه گیری

این مطالعه نشان دهنده ارتباط پیچیده و متفاوت بین احتمال انواع فرسایش آبی و تغییرات زیست محیطی در منطقه تحقیق است. نوع کاربری، پوشش زمین و شاخص $NDVI$ از پارامترهای بسیار متغیر مؤثر در فرسایش آبی در منطقه هستند که بصورت زمانی و مکانی تغییر پذیرند. سایر پارامترها مثل پارامترهای مربوط به بارش، K ، شیب و غیره از عوامل متغیر زمانی و یا مکانی می باشند. بنابراین تشخیص عوامل تشدید کننده هر یک از انواع فرسایش آبی می تواند کمک مؤثری در شناخت نوع عوامل، مدلسازی و برآورد فرسایش داشته باشد.

مدل فرسایشی ارائه شده در این تحقیق، دارای پارامترهای مشخص و معلوم است که بسادگی و با دقت بالایی از طریق امکانات GIS قابل تهیه هستند و در عین حال از تنوع زیادی برخوردار هستند که امکان برآورد دقیقتر فرسایش و رسوب را فراهم می نماید.

عامل حساسیت به فرسایش سازند زمین شناسی (Fs)، با توجه به نتایج تحقیقات فیض نیا (۱۳۷۴ و ۱۳۸۲) برای شرایط ایران انتخاب شده است و به منظور بررسی دقیق تر، فقط اقلیم خشک و نیمه خشک که اقلیم غالب محل ابداع مدل است، در نظر گرفته شده است.

عامل فرسایش پذیری خاک (Se)، از پارامتر K مدل جهانی فرسایش خاک بهره می گیرد که این پارامتر مختص به یک منطقه نبوده و از آن می توان در هر شرایط منطقه ای و اقلیمی استفاده کرد.

عامل فرساینده گی باران (Pe)، تابعی از متوسط بارش سالانه است که علاوه بر دارا بودن دقت قابل قبول، نحوه محاسبه آن نیز نسبت به سایر پارامترهای فرساینده گی بسیار راحت تر است.

عامل فرساینده گی رواناب (Re)، به شکلی که در مدل MPSIAC استفاده شده، بکار گرفته شد و علت آن وجود رابطه قوی بین ارتفاع متوسط رواناب سالانه و رابطه نسبتاً خوب دبی پیک ویژه با تولید رسوب در منطقه می باشد.

عامل پستی و بلندی (T) نیز به شکلی که در مدل MPSIAC استفاده شده، بکار گرفته شد. چرا که اولاً رابطه قوی بین درصد شیب و تولید رسوب در منطقه به اثبات رسید و ثانیاً عامل شیب یکی از مهمترین پارامترهای مربوط به پستی و بلندی می باشد که می توان آنرا بصورت اولیه بکار گرفت و در عین حال از دقت کافی برخوردار باشد.

عامل هیدروگرافی تراکم آبراهه ها (Hd) پس از تجزیه و تحلیل روابط بین تراکم زهکشی و تولید رسوب در مقاطع مختلف زمانی در منطقه تحقیق بدست آمد و رابطه آن تبیین شد. بطوریکه بررسی این عامل در دو مقطع زمانی، رابطه قوی آنرا با تولید رسوب به اثبات رساند.

عامل پوشش گیاهی (Vc)، به عنوان تابعی از شاخص $NDVI$ و پس از بررسی های مختلف و اثبات رابطه قوی این شاخص با تولید رسوب منطقه تبیین شده و رابطه آن بدست آمد. استفاده از شاخص $NDVI$ بعنوان پارامتری از پوشش گیاهی، بسیار راحت تر و سریعتر بوده و از دقت بالایی نسبت به شاخص درصد پوشش برخوردار است. چرا که همواره تعیین درصد پوشش های سطحی بخاطر عملیات زمینی و طاقت فرسا بودن آن همراه با خطاهای فنی و انسانی است.

عامل وضعیت زمینی فرسایش خاک (Ef)، با استفاده از جدولی بدست می آید که با توجه به وضعیت فرسایش خاک منطقه تهیه شده و فواصل امتیازدهی در آن بسیار کم در نظر گرفته شده است تا بدین ترتیب احتمال خطاهای ناشی از امتیازدهی کارشناسی در آن به حداقل برسد. این عامل، تنها عاملی است که به محقق امکان دخالت در برآورد

فرسایش را با توجه به تجربیات کارشناسی می‌دهد. بنابراین هم می‌تواند در برآورد دقیق‌تر فرسایش کمک نماید و هم اینکه با تغییر این جدول در مناطق با وضعیت فرسایشی متفاوت، امکان تطبیق مدل در سایر مناطق نیز وجود دارد. آزمون دقت مدل ارائه شده در حوزه آبخیز نیر، میزان کارایی آنرا بدست داد که نزدیک به ۹۰ درصد می‌باشد. بنابراین این مدل را می‌توان برای مناطق مشابه با محل اولیه ابداع آن، در سایر نقاط ایران نیز با اطمینان زیاد بکار برد و از حیث ناشناخته بودن وضعیت اکولوژیکی و اقلیمی محل اولیه ابداع مدل نگران نشد.

منابع

- احمدی، حسن. ۱۳۸۵، ژنومرفولوژی کاربردی، ج ۱ (فرسایش آبی)، انتشارات دانشگاه تهران.
- رفاهی، حسینقلی. ۱۳۸۵، فرسایش آبی و کنترل آن، انتشارات دانشگاه تهران.
- فیض‌نیا، سادات. ۱۳۷۴، مقاومت سنگها در مقابل فرسایش در اقلیم مختلف ایران، مجله منابع طبیعی ایران، جلد ۴۷ صفحات ۹۵ تا ۱۱۶.
- فیض‌نیا، سادات و مریم زارع. ۱۳۸۲، بررسی حساسیت سازندهای زمین شناسی نسبت به فرسایش و تولید رسوب در حوزه آبخیز میشان، مجله منابع طبیعی ایران، جلد ۵۶ شماره ۴، صفحات ۳۶۵ تا ۳۸۲.
- قدوسی، جمال. ۱۳۸۲، مدل‌سازی مرفولوژی فرسایش خندقی و پهنه‌بندی خطر آن، پایان‌نامه دکتری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران.
- Bou Kheir, R., O. Cerdan, and C. Abdallah, 2006. Regional soil erosion risk mapping in Lebanon. *Geomorphology* 82, 347-359.
- Huang, C., C. Gascuel-Oudoux and S. Cros-Cayot, 2001. Hillslope topographic and hydrologic effects on overland flow and erosion. *Catena* 46, 177-188.
- Hughes, A.O. and I.P. Prosser, 2003. Gully and riverbank erosion mapping for the Murray-Darling basin. CSIRO land and water, Canberra, Technical report 3/03.
- King, D., D.M. Fox, J. Daroussin, Y. Le Bissonnais and V. Danneels, 1998. Upscaling a simple erosion model from small areas to a large region. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 50: 143-149.
- King, C., N. Baghdadi, V. Lecomte, and O. Cerdan, 2005. The application of remote-sensing data to monitoring and modelling of soil erosion. *Catena* 62, 79-93.
- Morgan, R.P.C., 1996. Soil erosion and conservation. Second Edition. Silsoe College, Cranfield University. 198 pp.
- Romkens, M.J.M., K. Helming and S.N. Prasad, 2001. Soil erosion under different rainfall intensities, surface roughness, and soil water regimes.
- Tangestani, M., 2006, Comparison of EPM and PSIAC models in GIS for erosion and sediment yield assessment in a semi-arid environment: Afzar Catchment, Fars Province, Iran. *Journal of Asian Earth Sciences* 27, 585-597.
- Vanacker, V., G. Govers, J. Poesen, J. Deckers, G. Dercon, and G. Loaiza, 2003. The impact of environmental change on the intensity and spatial pattern of water erosion in a semi-arid mountainous Andean environment. *Catena* 51, 329-347.
- Wischmeier, W.H. and D.D. Smith, 1978. Predicting rainfall erosion loss: a guide to conservation planning. U.S. Department Agric. Washington D.C. Handb. No. 537, p. 58.

Modelling erosion and sediment yields to provide erosion hazard map (Case study: Baleghli Chay Watershed, Ardabil province)

A. Esmali¹ H. Ahmad² S. Feiznia³ J. Ghoddossi⁴

Abstract

The aim of this research is to describe the development of a methodology based on present knowledge and available data for evaluation of water erosion behavior and risk as well as modelling and estimation of soil erosion. Accordingly, the relations between sediment yield in each Terrain Mapping Unit (TMU) and environmental factors (constant & variable) determined through statistical analyses and selected the effective factors on erosion and sediment yields. Then an empirical structure was created for modelling erosion and sediment yields based on MPSIAC erosion model. In formulation of the new model, were used of eight effective factors on erosion in the area. These factors are susceptibility of geological formation, soil erodibility, rainfall erosivity, runoff erosivity, topography, hydrographic drainage, Normalized Difference of Vegetation Index (NDVI) and field conditions of erosion features. In order to determine the effective factors, in studying of them in two 1347 and 1385 time sections, at first defined the factors with best correlation and fitting in the multivariate statistical tests. Then the model parameters selected among them. As possibility of using a factor and its application in comparison of sediment yields was one of the reasons in the parameters selections. In the presented model, with summation of the scores of mentioned eight factors, obtains the M value, which can estimate the amount of erosion and sediment yields of the area, using exponential formula between sediment yield and M values. In addition, in order to obtain the confidence of presented model, it was used in "Nir" catchment for evaluation the precision. The results showed the acceptable values with the little difference. Therefore, the water erosion hazard map of the area was provided and presented using new model.

Key words: Water erosion; Sediment yield; Modelling; Erosion hazard map; Baleghli-Chay; Ardabil

1- Assistant Professor, Faculty of Agriculture, University of Mohaghegh Ardabili, (E-mail: abazar_esmali@yahoo.com).
Tel: +98-4515512081-9 (2247), Mobile: +98-9144538623.

2- Professor, Faculty of Natural Resources, University of Tehran.

3- Professor, Faculty of Natural Resources, University of Tehran.

4- Scientific Member of Soil Conservation and Watershed Management Research Institute, Iran.