

ارزیابی کمی شدت فرسایش آبی با استفاده از مدل

منطقه‌ای برآورد فرسایش و تولید رسوب

(مطالعه موردی: حوزه آبخیز نیر، اردبیل)

- ❖ ابادر اسمعیلی؛ استادیار دانشکده کشاورزی، دانشگاه محقق اردبیلی
- ❖ حسن احمدی؛ استاد دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات
- ❖ محمد طهمورث*؛ دانشجوی دکتری تخصصی آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران

چکیده

در مطالعات فرسایش خاک نحوه ارزیابی خطر فرسایش و پهنه بندی اراضی به درجات با شدت های مختلف فرسایش از طریق مدل سازی اهمیت فراوانی دارد. در این تحقیق، مدل منطقه ای ارائه شده برای ارزیابی رفتار و خطر فرسایش آبی و نیز برآورد فرسایش و رسوب منطبق با ویژگی های منطقه تحقیق ارزیابی شد. این مدل نخست در حوزه آبخیز بالغلی چای، در مجاورت منطقه تحقیق، ارائه شد. مدل سازی فرسایش و تولید رسوب منطقه با الگوریتن از مدل MPSIAC به انجام رسید و در فرمول بندی مدل جدید از هشت عامل مؤثر در فرسایش آبی منطقه استفاده شد. این عوامل عبارت اند از: حساسیت به فرسایش سازند زمین شناسی، فرسایش پذیری خاک، فرساینده گی باران، فرساینده گی رواناب، پستی و بلندی، تراکم آبراهه ها، شاخص تفاوت پوشش گیاهی (NDVI)، و وضعیت زمینی فرسایش. در مدل ارائه شده، از مجموع امتیازات عوامل هشتگانه مقدار M به دست می آید که با استفاده از رابطه نمایی آن با مقدار رسوب، در نهایت، مقدار فرسایش و رسوب تولیدی منطقه محاسبه می شود. مقدار متوسط رسوب ویژه برآورد شده با استفاده از مدل ارائه شده برای حوزه آبخیز نیر ۷۰/۲۹ تن بر کیلومتر مربع در سال است. مقایسه این مقدار رسوب برآورد شده با مقدار اندازه گیری شده آن در ایستگاه هیدرومتری نیر نشان دهنده وجود اختلاف ۷/۱۱ تن بر کیلومتر مربع در سال است، که در واقع بیشتر برآورد شده است. بنابراین، درصد خطای مدل در منطقه مطالعاتی ۱۱/۲۵+ درصد است.

واژگان کلیدی: اردبیل، فرسایش آبی، مدل سازی، نقشه خطر، نیر.

مقدمه

زنجان از طریق مدل سازی و پهنه بندی نقشه خطر فرسایش خندقی بررسی شد. برای مدل سازی و تهیه نقشه خطر فرسایش خندقی از شش پارامتر اصلی و مؤثر در ایجاد فرسایش خندقی - شامل بارندگی، شیب، کاربری اراضی، حفاظ سطحی، سازند های زمین شناسی، و خاک - استفاده شد [۴].

هدف اصلی این تحقیق، تعیین میزان کارایی مدل سازی فرسایش و تولید رسوب در منطقه اردبیل و ارائه مدلی برای پیش بینی شکل گیری فرسایش آبی در منطقه از طریق ارزیابی آن در حوزه آبخیز نیر و تهیه نقشه خطر فرسایش آبی است. از این رو، مدل ارائه شده در حوزه آبخیز نیر ارزیابی شد و شدت فرسایش آبی به صورت کمی با استفاده از مدل منطقه ای برآورد فرسایش و تولید رسوب مطالعه شد.

روش شناسی تحقیق

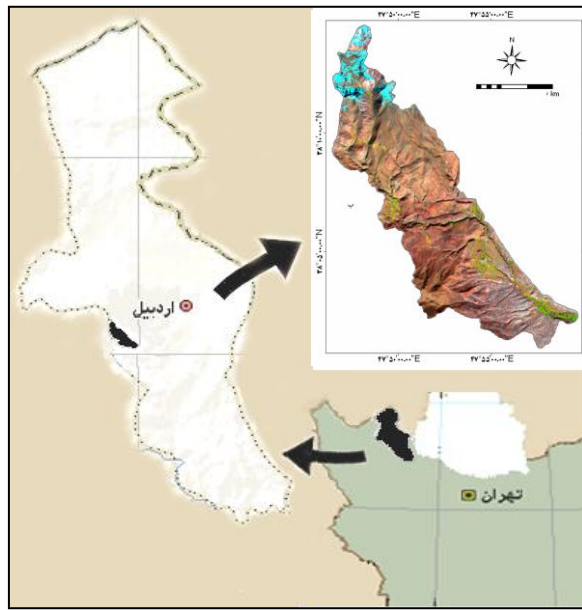
منطقه مطالعاتی

حوزه آبخیز نیر با مختصات جغرافیایی ۰۱، ۳۸ تا ۱۴، ۳۸ عرض شمالی و ۴۶، ۴۷ تا ۴۸، ۰۰ طول شرقی در واقع یکی از زیرحوزه های حوزه آبخیز بالغلی چای است که خروجی آن متصل به رودخانه بالغلی چای در محل شهرستان نیر است.

متوسط ارتفاع این حوزه از سطح دریا ۲۵۱۶ متر و دارای مساحت ۱۶۲۰۰ هکتار است. مرتفع ترین نقطه حوزه دارای ۴۴۰۰ متر ارتفاع در مجاورت قله سبلان و در قسمت شمالی حوزه واقع است. پست ترین نقطه حوزه ۱۶۱۵ متر ارتفاع دارد و قسمت خروجی حوزه را در سمت جنوب شرقی تشکیل می دهد. حوزه آبخیز نیر از شمال به ارتفاعات سبلان، از جنوب به گردنه صائین و محدوده سرشاخه رودخانه بالغلی چای، از غرب به استان آذربایجان شرقی، و از شرق به حوزه آبخیز رودخانه کمال آباد محدود می شود.

ارزیابی خطر فرسایش، شکل خاصی از ارزیابی منابع زمینی با هدف شناسایی مناطقی است که تولید آن ها بر اثر فرسایش در معرض تهدید قرار می گیرد. اهداف ارزیابی اراضی تقسیم اراضی به نواحی کوچک تر بر اساس مقدار و نوع فرسایش آن ها است که پایه و اساسی در برنامه ریزی های حفاظت خاک به حساب می آید. ارزیابی خطر فرسایش در مناطق وسیع تر و متنوع شامل انتخاب مدل و پارامترهای وابسته به آن است [۱۰].

ارزیابی خطرهای فرسایش آبی بر مبنای تعیین شدت فرسایش و با استفاده از روش های مختلف انجام شده است. نقشه کلی از خطر فرسایش در زیمباوه ارائه شد که بر پایه مقدار فرساینده متوسط سالانه بارش است [۱۲]. به منظور ارزیابی خطر فرسایش در سطح ملی، روش امتیازدهی فاکتوریل با تغییرات جزئی در کشور فرانسه به کار برده شد که، علاوه بر تهیه نقشه خطر فرسایش در اراضی کشاورزی، تغییرات خطر فرسایش در فصول مختلف سال بر اساس تغییرات بارندگی بررسی شد [۶]. برای پی بردن به درجه حساسیت خاک ها به فرسایش و رواناب ها، می توان از شاخص پایداری خاک دانه ها استفاده کرد [۵]. از تصاویر ماهواره ای و پارامترهای منتج از ترکیب باندهای مختلف آن ها، مثل شاخص پوشش گیاهی NDVI و تکنیک سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS)، به طور گسترده، در تحقیقات مربوط به فرسایش خاک و مدل سازی آن استفاده شده است [۷، ۹]. در ایران نیز به ارزیابی و تهیه نقشه فرسایش خاک در برخی از حوزه های آبخیز کشور با استفاده از روش ژئومورفولوژی اقدام شد؛ نتایج حاصل از آن در مقایسه با دیگر روش ها رضایت بخش و از دقت لازم برخوردار بود [۱]. وضعیت فرسایش حوزه آبخیز زنجان رود استان



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی حوزه آبخیز نیر

۴. تهیه نقشه واحد کاری ژئومورفولوژی به منظور تشخیص انواع فرسایش آبی و رخساره‌های ژئومورفولوژی بر اساس داده‌های حاصل از سنجش از دور (عکس‌های هوایی و تصاویر ماهواره‌ای). نقشه واحد کاری تهیه شده به عنوان نقشه پایه در مطالعات فرسایش مد نظر قرار گرفت، که با استفاده از نقشه توپوگرافی، نقشه مورفولوژی و از روی نقشه زمین‌شناسی و نقشه سنگ‌شناسی تهیه می‌شود. سپس، از روی عکس‌های هوایی و تصاویر ماهواره‌ای تیپ و رخساره مشخص می‌شود. با اضافه شدن لایه نقشه شیب واحد کاری به دست می‌آید؛

۵. تهیه نقشه‌های نظارت نشده شاخص‌های پوشش گیاهی ($NDVI$)، تراکم آبراهه‌ها، و استفاده از اراضی بر اساس داده‌های حاصل از سنجش از دور؛ گفتنی است نقشه‌های تراکم شبکه آبراهه‌ها، سیمای فرسایش، و استفاده از اراضی با استفاده از فن و دانش بارزسازی در محیط سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) از طریق تفسیرهای چشمی عکس‌های هوایی و تصاویر ماهواره‌ای در مقاطع مختلف زمانی تهیه شد.

روش تحقیق

روش اجرای این تحقیق به طور خلاصه به شرح زیر است:

- الف) اقدامات کتابخانه‌ای و مطالعات دفتری
 ۱. جمع‌آوری اطلاعات، گزارش‌های مطالعاتی، داده‌های هوا و اقلیم، هیدرومتری (آب‌سنجی و رسوب‌سنجی) مربوط به حوزه آبخیز نیر به عنوان پهنه تحقیق؛
 ۲. انتخاب و تهیه نقشه‌های پایه موجود از منطقه تحقیق شامل توپوگرافی و فیزیوگرافی، زمین‌شناسی و ژئومورفولوژی، خاک، پوشش گیاهی، استفاده از اراضی و هواشناسی و اقلیم؛
 ۳. تهیه یا تأمین عکس‌های هوایی و تصاویر ماهواره‌ای در تطبیق یا سازگاری با اطلاعات و آمار پایه. با توجه به اینکه اصولاً عکس‌های هوایی رقومی نیستند، عکس‌های هوایی از طریق اسکن به سیستم اطلاعات جغرافیایی وارد شد و به تهیه فتوموزائیک جهت همگون‌سازی آن‌ها با تصاویر ماهواره‌ای، که رقومی‌اند، اقدام شد؛

تولید رسوب در تطبیق با ویژگی‌های حوزه آبخیز
مورد مطالعه

ه) ارائه دستورالعمل نحوه استفاده از مدل و
چگونگی تهیه نقشه خطر فرسایش با استفاده از آن.

نتایج

تبیین ساختار مدل سازی فرسایش و تولید

رسوب

مدل فرسایشی ارائه شده در این تحقیق دارای ساختار
تجربی است 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 به دست آمده از طریق برقراری روابط
بین مقدار تولید رسوب با عوامل ایجاد رسوب
به دست آمده‌اند، به طوری که در انتخاب مؤثرترین
عوامل در بررسی آن‌ها در دو مقطع زمانی ۱۳۴۷ و
۱۳۸۵، نخست عواملی که ضریب همبستگی بالایی را
در روابط رگرسیونی نشان دادند با برآزش بهترین
رابطه ممکنه جدا شدند (جدول ۱).

هشت عامل مهم و مؤثر در فرسایش و تولید
رسوب منطقه، که از آن‌ها در مدل فرسایشی استفاده
شده است، عبارت‌اند از: ۱. عامل حساسیت به
فرسایش سازند زمین‌شناسی (Fs)؛ ۲. عامل
فرسایش پذیری خاک (Se)؛ ۳. عامل فرساینده‌گی باران
(Pe)؛ ۴. عامل فرساینده‌گی رواناب (Re)، ۵. عامل
پستی و بلندی (T)؛ ۶. عامل هیدروگرافی تراکم
آبراهه‌ها (Hd)؛ ۷. عامل پوشش گیاهی $NDVI$ (Vc)؛
۸. عامل وضعیت زمینی فرسایش (Ef).

۶. بررسی رابطه بین دبی آب و دبی رسوب با
استفاده از داده‌های مربوط به ایستگاه هیدرومتری نیر
و استخراج وضعیت و روند تولید آب و رسوب در
آبخیز بالادست ایستگاه.

ب) اقدامات میدانی و مطالعات تفصیلی

۱. تدقیق نقشه‌های پایه مندرج در بند «الف» بر
اساس گروه بندی آن‌ها در دو گروه اطلاعات مربوط
به عوامل زمین محیطی ثابت و متغیر در طول زمان
(در کوتاه مدت) در آبخیز شامل:

۱.۱ نقشه‌های مربوط به عوامل ثابت مشتمل بر
عوامل توپوگرافی، فیزیوگرافی (به استثنای نقشه یا
لایه اطلاعاتی شبکه آبراهه‌ها)، زمین‌شناسی،
ژئومورفولوژی، و خاک؛

۲.۱ نقشه‌های مربوط به عوامل متغیر، مشتمل بر
شبکه آبراهه‌ها، پوشش گیاهی، نوع استفاده از زمین،
و سیمای انواع فرسایش آبی؛

۲. تهیه نقشه عامل فرسایش پذیری خاک با
استفاده از داده‌های حاصل از نمونه برداری خاک به
شرح مندرج در بند ۱.۱ در محیط GIS. شایان ذکر
است که عامل فرسایش پذیری خاک بر اساس روش
اصلاح شده ویشمایر و اسمیت (مدل MUSLE)
تعیین می‌شود [۷، ۱۰، ۱۱]؛

۳. تهیه نقشه حساسیت سنگ‌ها به فرسایش با
استفاده از نقشه سنگ‌شناسی و به‌کارگیری روش
ارائه شده توسط فیض‌نیا [۳]؛

۴. تهیه نقشه طبقات بارش، طبقات ارتفاع،
طبقات شیب، و طبقات جهت جهت برای تکمیل داده‌های
مورد نیاز برای ارزیابی.

ج) برآورد مقادیر فرسایش و تولید رسوب با
استفاده از مدل ارائه شده ۲ به منظور برآورد مقادیر
فرسایش و رسوب و واسنجی آن با داده‌های
رسوب‌سنجی مشاهده و ثبت شده

د) تبیین و ارائه مدل مناسب برآورد فرسایش و

جدول ۱. انتخاب مؤثرترین عوامل در تولید رسوب و فرسایش منطقه پس از بررسی در دو مقطع زمانی ۱۳۴۷ و ۱۳۸۵

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 دوساله (میلی‌متر)	$P6$
$Q_s = 662.1(160)^2 - 1021.2(160) + 488.7, R^2 = 0.97$	حداکثر شدت بارندگی ۶۰ دقیقه‌ای با دوره بازگشت دوساله (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) $q =$	$P2max/Pa$
$Q_s = 0.1158(Ra) + 90.94, R^2 = 0.9513$	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 زمین‌شناسی	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 (متر مکعب 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

فرمول‌بندی مدل

پس از تعیین و محاسبه عوامل هشتگانه، مجموع امتیازهای به دست آمده مقدار M را به دست می‌دهد (رابطه ۱) که در مرحله اولیه و به طور کیفی می‌توان با استفاده از آن وضعیت فرسایشی منطقه را مشخص نمود.

(رابطه ۱)

$$M = Fs + Se + Pe + Re + T + Hp + Vc + Ef$$

به منظور تعیین کمی فرسایش و رسوب باید رابطه بین M و مقدار رسوب تولیدی به دست آید.

بدین منظور نقشه M تهیه شد (شکل ۶ الف) و مقدار متوسط آن در هر واحد کاری به دست آمد. با داشتن نقشه رسوب ویژه (شکل ۶ ب) 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 به صورت رابطه ۲ به دست آمد:

(رابطه ۲)

$$Q_s = 42.53e^{0.0253M}$$

که در آن:

عامل فرساینده‌گی رواناب

برای تهیه نقشه عامل فرساینده‌گی رواناب، از رابطه $Re = 0.2 (0.03R + 50QP)$ و اعمال آن به نقشه رواناب حوزه در محیط GIS استفاده شد.

همچنین، دبی پیک ویژه (QP) حوزه آبخیز نیر با توجه به مساحت ۱۶۲ کیلومتر مربعی آن از طریق فرمول دیکن محاسبه شد و در رابطه فوق اعمال شد.

عامل پستی و بلندی

نقشه عامل پستی و بلندی نیز با توجه به رابطه $T = 0.33\bar{S}$ و اعمال آن به نقشه شیب تهیه شد.

عامل تراکم آبراهه‌ها

عامل تراکم آبراهه‌ها با توجه به تراکم زه‌کشی حوزه آبخیز نیر، که ۲٫۴۶ کیلومتر بر کیلومتر مربع است، با استفاده از رابطه $Hd = 2.1705 (Dd)0.6634$ به صورت زیر محاسبه شد:

$$2,170.5 \times (2,46) \cdot 0,6634 = 3,9437 = Hd = 2.1705 (Dd)0.6634$$

عامل پوشش گیاهی NDVI

عامل پوشش گیاهی NDVI با استفاده از نقشه NDVI حوزه آبخیز نیر و رابطه $Vc = -10(NDVI)$ در محیط GIS به صورت شکل ۲ تهیه شد.

عامل وضعیت زمینی فرسایش

برای تعیین عامل وضعیت زمینی فرسایش حوزه آبخیز نیر، نخست نقشه واحد کاری تهیه شد که در مجموع شامل ۳۴ واحد کاری شد (شکل ۴).

نقشه سنگ‌شناسی با توجه به تلفیق سازندهایی با درجه مقاومت یکسان در نهایت شامل سه واحد سنگ‌شناسی شد که به ترتیب با کدهای $Q_1^1 - 1$ ، $Q_1^2 - 2$ و $Q_1^3 - 3$ مشخص گردید و در تهیه نقشه واحد کاری از آن استفاده شد. همچنین، حوزه آبخیز نیر

Q_s مقدار رسوب ویژه (تن بر کیلومتر مربع در سال) و M مجموع امتیازات عوامل هشتگانه است.

نتایج به کارگیری مدل تهیه‌شده در حوزه

آبخیز نیر

تهیه نقشه و تعیین عوامل مدل در حوزه

آبخیز نیر

عامل حساسیت سازند

برای محاسبه عامل حساسیت سازند با استفاده از نقشه زمین‌شناسی و جدول مقاومت سنگ‌ها و سازندها در مقابل فرسایش در اقالیم خشک و نیمه‌خشک [۳]، نخست ضریب مقاومت سازندهای حوزه به‌دست آمد. سپس، با استفاده از رابطه $Fs = 10 - 0.6667Sn$ و اعمال آن به نقشه ضریب مقاومت سازندها در محیط GIS نقشه عامل حساسیت سازند به‌دست آمد.

عامل فرسایش‌پذیری خاک

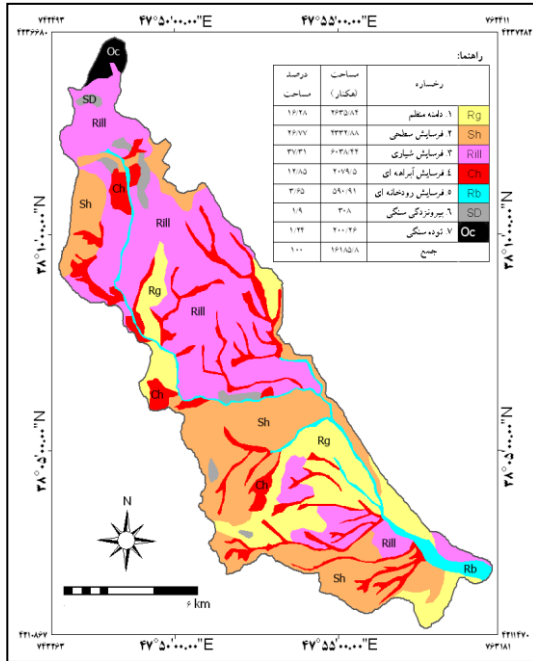
برای تهیه نقشه عامل فرسایش‌پذیری خاک با استفاده از نمونه‌های پروفیل خاک، نخست مقدار عامل K محاسبه شد. سپس، نقشه K با استفاده از تخمین‌گر درون‌یابی (Moving Average) در محیط GIS تهیه شد، و، در نهایت، با استفاده از رابطه $Se = 16.67K$ نقشه عامل فرسایش‌پذیری خاک حوزه آبخیز نیر به‌دست آمد.

عامل فرساینده‌گی باران

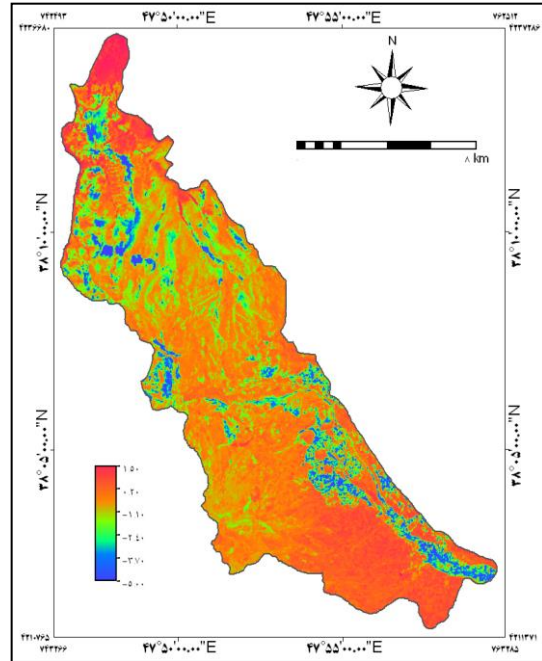
برای تهیه نقشه عامل فرساینده‌گی باران، از رابطه $Pe = 0.0069Pa$ و اعمال آن به نقشه مدل رقومی بارش (Pa) در محیط GIS استفاده شد.

فرسایش از طریق بازدیدهای زمینی تعیین گردید و به صورت شکل ۵ نقشه آن تهیه شد.

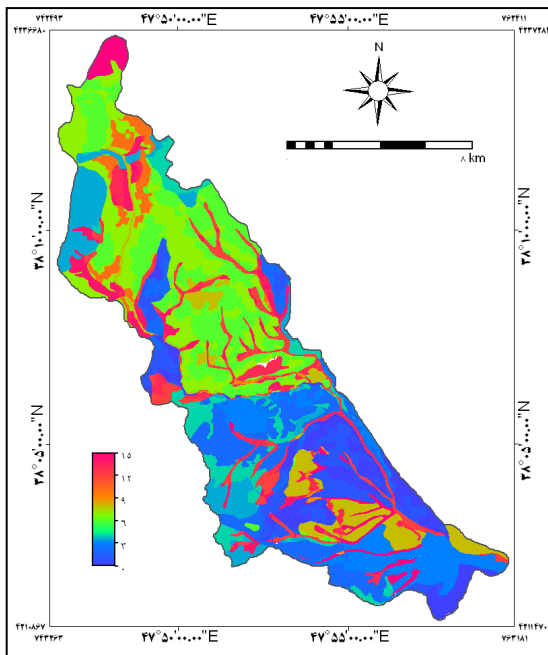
دارای هفت رخساره ژئومورفولوژی به شرح مندرج در شکل ۳ است. بدین ترتیب، با داشتن نقشه واحد کاری در هر واحد کاری عامل وضعیت زمینی



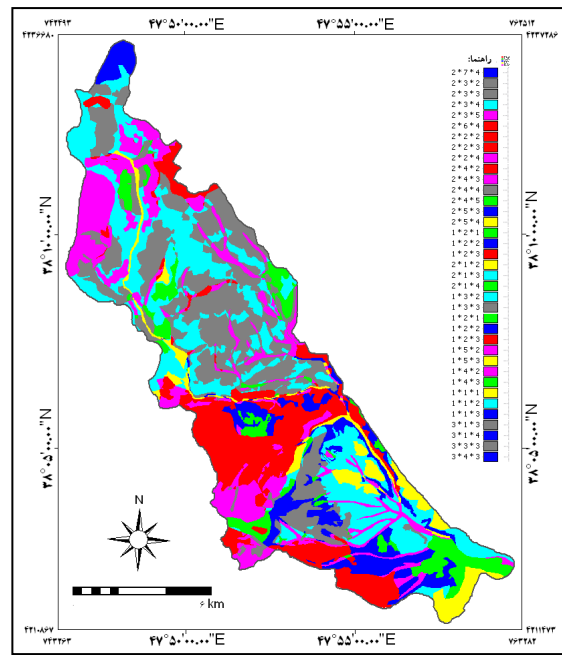
شکل ۳. نقشه رخساره‌های ژئومورفولوژی حوزه آبخیز نیر



شکل ۲. نقشه عامل پوشش گیاهی NDVI حوزه آبخیز نیر



شکل ۵. نقشه عامل وضعیت زمینی فرسایش حوزه آبخیز نیر



شکل ۴. نقشه واحدهای کاری حوزه آبخیز نیر

اندازه‌گیری شده آن در ایستگاه هیدرومتری نیر نشان‌دهنده وجود اختلاف ۷/۱۱ تن بر کیلومتر مربع در سال است که در واقع بیشتر برآورد شده است. بنابراین، درصد خطای مدل به صورت زیر محاسبه می‌شود:

تن بر کیلومتر مربع در سال ۷۰/۲۹: مقدار رسوب ویژه برآوردشده از طریق مدل
تن بر کیلومتر مربع در سال ۶۳/۱۸: مقدار رسوب ویژه اندازه‌گیری شده

$$+ 7,11 = 63,18 - 70,29 \text{ مقدار اختلاف}$$

تن بر کیلومتر مربع در سال

$$+ 11,25 = 0,1125 = 63,18 \div 7,11 \text{ درصد اختلاف}$$

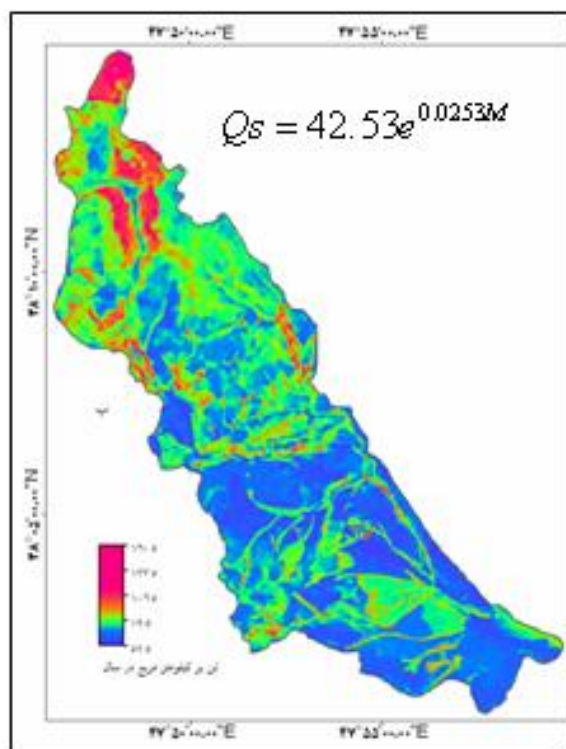
درصد

محاسبه مقدار رسوب ویژه حوزه آبخیز نیر با استفاده از مدل جدید

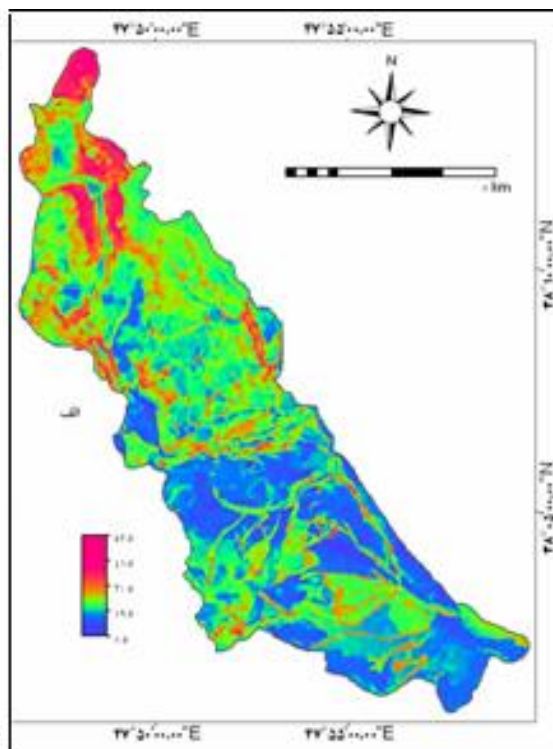
پس از تعیین عوامل مدل و تهیه نقشه آن‌ها، با جمع کردن این عوامل در محیط GIS نقشه M به صورت شکل ۶ به دست آمد، که با اعمال فرمول ارائه شده برای مدل ($Q_s = 42.53e^{0.0253M}$) نقشه رسوب ویژه حوزه آبخیز نیر با استفاده از مدل جدید فرسایش و رسوب به صورت شکل ۷ به دست آمد.

مقایسه مقدار رسوب برآوردی حوزه آبخیز نیر با مقدار اندازه‌گیری شده

مقدار متوسط رسوب ویژه برآوردشده با استفاده از مدل ارائه شده ۷۰/۲۹ تن بر کیلومتر مربع در سال است. مقایسه این مقدار رسوب برآوردشده با مقدار



شکل ۷. نقشه رسوب ویژه با استفاده از مدل جدید فرسایش و رسوب



شکل ۶. نقشه مقادیر M

بحث و نتیجه‌گیری

در این تحقیق با هدف مدل‌سازی فرسایش آبی منطقه و ارائه یک مدل منطقه‌ای، پس از مطالعاتی در زمینه شناخت منطقه و بررسی ویژگی‌های کلی آن (اعم از توپوگرافی، اقلیم، زمین‌شناسی، ژئومورفولوژی، پوشش گیاهی، و خاک‌شناسی) مراحل اجرای تحقیق به صورت سلسله‌مراتبی دنبال شد، به طوری که نتایج حاصل از هر بخش لازمه اجرای بخش بعدی می‌شد؛ بدین ترتیب، در نهایت، به ارائه مدل جدید فرسایش خاک منطبق با شرایط منطقه مورد تحقیق منجر شد. این مطالعه نشان‌دهنده ارتباط پیچیده و متفاوت بین احتمال انواع فرسایش آبی و تغییرات زیست‌محیطی در منطقه تحقیق است. نوع کاربری، پوشش زمین، و شاخص *NDVI* از پارامترهای بسیار متغیر مؤثر در فرسایش آبی در منطقه‌اند که به صورت زمانی و مکانی تغییرپذیرند. سایر پارامترها مثل پارامترهای مربوط به بارش، *K*، و شیب از عوامل متغیر زمانی یا مکانی‌اند. بنابراین، تشخیص عوامل تشدیدکننده هر یک از انواع فرسایش آبی می‌تواند در شناخت نوع عوامل، مدل‌سازی، و برآورد فرسایش مؤثر باشد.

با توجه به این تحقیق، می‌توان نتیجه‌گیری کرد که پارامتر *K* مدل *USLE* نقش بسیار زیادی در تشدید فرسایش‌های منطقه دارد، زیرا در رگرسیون چندمتغیره جزو اولین پارامترهایی است که وارد مدل می‌شود. مشابه همین استدلال نتیجه‌گیری می‌شود که پوشش سطحی زمین مهم‌ترین عامل کنترل‌کننده فرسایش شیاری است، در حالی که پارامترهای بارش و توپوگرافی در اولویت‌های بعدی قرار می‌گیرند. فرسایش رودخانه‌ای به طور متفاوتی نسبت به سایر فرسایش‌ها عمل می‌کند، به طوری که اولاً رابطه توانی و غیرخطی خوبی با پارامترهای مؤثر در آن - در مقایسه با رابطه خطی سایر فرسایش‌ها - از خود نشان

می‌دهد و این با نتایج حاصل از تحقیقات صورت‌پذیرفته در حوزه آبخیز موری - دارلینگ استرالیا مطابقت دارد [۸] و ثانیاً مهم‌ترین عوامل تشدیدکننده آن در مرحله اول مربوط به نوع کاربری و شاخص پوشش گیاهی *NDVI* و در مرحله بعدی مربوط به شیب زمین است که تا حد زیادی متفاوت با سایر فرسایش‌های آبی است. این مطالعه نشان می‌دهد که بررسی جداگانه انواع فرسایش آبی می‌تواند در تفکیک عوامل تشدیدکننده فرسایش و در نتیجه مدل‌سازی کردن آن مؤثر باشد. بررسی روابط بین عوامل زمین‌محیطی متغیر با تغییرات انواع فرسایش آبی در مقاطع مختلف زمانی نشان‌دهنده وجود رابطه قوی بین انواع مختلف فرسایش آبی و عوامل زمین‌محیطی متغیر، از قبیل تراکم آبراهه‌ها، پوشش گیاهی، و نوع استفاده از اراضی، است و این در واقع اهمیت بررسی تغییرات زمانی فرسایش و عوامل متغیر مؤثر در آن را نشان می‌دهد.

تأثیر تغییرات کاربری اراضی در بروز و تشدید فرسایش آبی از طریق روی هم‌اندازی نقشه‌های کاربری اراضی دو مقطع زمانی با نقشه‌های مساحت تحت تأثیر انواع فرسایش‌های آبی در نرم‌افزار *ILWIS* و تهیه جداول خروجی و نمودار آن‌ها در قالب مساحت و درصد مساحت انواع فرسایش‌ها در انواع استفاده از اراضی زمان‌های مختلف به انجام رسیده است. این بررسی نشان می‌دهد که تغییرات درصد انواع فرسایش آبی در کاربری‌های مختلف بسیار متفاوت است و در طی زمان نیز تغییرپذیری زیادی خواهد داشت و این در مورد همه فرسایش‌های آبی منطقه صادق است. بنابراین، در هر گونه بررسی فرسایش و رسوب منطقه و مدل‌سازی تولید فرسایش و رسوب آن باید از عوامل بسیاری کمک گرفت.

برآورد مقادیر فرسایش و رسوب منطقه با استفاده

در پایان موارد زیر پیشنهاد می‌شود:

- با توجه به اینکه مدل سازی محصول نهایی یک پروژه تحقیقاتی است، از ابتدا باید عوامل و نقشه پارامترهای مؤثر با دقت زیاد تعیین و تهیه شود تا نتیجه کار به نحو بهتری به انجام رسد؛

- بررسی های صحرایی و مطالعات مستقیم زمینی لازمه مطالعات منابع طبیعی است. بنابراین، باید در تحقیقات به این امر توجه کافی شده و تا حد امکان از روش های جایگزین کم دقت پرهیز شود؛

- با توجه به اینکه فرسایش آبی یک پدیده متغیر زمانی و مکانی است، بررسی وضعیت فرسایش در مقاطع مختلف زمانی و تعمیم نتایج حاصله و کسب رابطه تغییرات زمانی و مکانی آن با عوامل مؤثر در وقوع آن می‌تواند به نتایج دقیق تری منجر شود.

- برای اجرای بهتر کار مدل سازی برآورد فرسایش و تولید رسوب در ایران باید تحقیقات گسترده ای در نقاط مختلف ایران، مشابه روش ارائه شده در این تحقیق، در قالب یک پروژه تحقیقاتی ولی با شاخه های متعدد انجام پذیرد تا تحقیقات از انسجام لازم برخوردار باشد و در این تحقیقات شرایط مختلف اقلیمی و منطقه ای را نیز باید در نظر گرفت.

از مدل های وارداتی نتایج ضد و نقیضی را به دست داد که این امر ناشی از تغییر شرایط اولیه ابداع این مدل ها و به کارگیری آن ها در یک منطقه بیگانه است. بنابراین، لزوم ایجاد و ساخت مدل های فرسایشی جدید منطبق با شرایط ایران آشکار می‌شود [۵].

مدل فرسایشی ارائه شده در این تحقیق دارای پارامترهای مشخص و معلوم است که به سادگی و با دقت بالایی از طریق امکانات GIS قابل تهیه است و، در عین حال، از تنوع زیادی برخوردار است که امکان برآورد دقیق تر فرسایش و رسوب را فراهم می‌نماید (رابطه ۳).

$$Qs = 42.53e^{0.0253M} \text{ و } M = Fs + Se + Pe + Re + T + Hd + Vc + Ef \quad (\text{رابطه } 3)$$

که در آن:

Qs مقدار رسوب ویژه (تن بر کیلومتر مربع در سال)، M مجموع امتیازات عوامل هشتگانه مدل، Fs عامل حساسیت به فرسایش سازند زمین شناسی، Se عامل فرسایش پذیری خاک، Pe عامل فرسایش پذیری خاک، Re عامل فرسایش پذیری رواناب، T عامل پستی و بلندی، Hd عامل هیدروگرافی تراکم آبراهه ها، Vc عامل پوشش گیاهی، و Ef عامل وضعیت زمینی فرسایش خاک است.

References

- [1] Ahmadi, H. (1999). *Applied Geomorphology*. Vol. 1 (Water Erosion), 3rd Edition. University of Tehran Press, 688 p. (In Persian).
- [2] Esmali, A. (2007). Modeling and mapping erosion risk prediction (Case study: Baleghli Chay, Ardebil). PhD Thesis, 250 p. (In Persian).
- [3] Feyznia, S. (1995). Rocks resistance to erosion in different climates of Iran. *Journal of Natural Resources*, 47(1), 95-116 (In Persian).
- [4] Ghodoosi, J. (2003). Morphological Modeling and gully erosion hazard. PhD Thesis, University of Tehran, 224 p. (In Persian).
- [5] Barthes, B. and Roose, E. (2002). Aggregate stability as an indicator of soil susceptibility to runoff and erosion, *Catena*, 47, 133-149.
- [6] Bissonnais, Y.L., Monitor, C., Jamagne, M., Daroussin, J. and King, D. (2001). Mapping erosion risk for cultivated soil in France, *Catena*, 46, 207-220.
- [7] Bou Kheir, R., Cerdan, O. and Abdallah, C. (2006). Regional soil erosion risk mapping in Lebanon. *Journal of Geomorphology*, 82, 347-359.
- [8] Hughes, A.O. and Prosser, I.P. (2003). Gully and riverbank erosion mapping for the Murray-Darling basin, CSIRO land and water, Canberra, Technical report 3/03.
- [9] Miller, S.N., Semmens, D.J., Goodrich, D.C., Hernandez, M., Miller, R.C., Kepner, W.G. and Guertin, D.P. (2007). The Automated Geospatial Watershed Assessment tool. *Environmental Modelling & Software*, 22, 365-377.
- [10] Morgan, R.P.C. (2001). A simple approach to soil loss prediction, a revised Morgan–Morgan–Finney model. *Catena*, 44, 305-322.
- [11] Najmoddini, N. (2003). Assessment of Erosion and Sediment Yield Processes, Using RS & GIS, A case study in Rose Chai sub-catchment of Orumieh basin, W. Azarbaijan, Iran.
- [12] Stoching, M.A. and Elwell, H.A. (1976). Rainfall erosivity over Rhodesia. *Transactions of the Institute of British Geographers New Series*, 1, 231-245.