

مقدمه

هر ساله مطالعات گسترده‌ای در شرایط آزمایشگاهی و مزرعه‌ای تحت باران‌های شبیه‌سازی شده و طبیعی انجام می‌شود. در شرایط آزمایشگاهی، از یک سو از فنجان‌های پاشمان (با قطر چند سانتی‌متر) و سینی‌های پاشمان تا فلوم‌های چند متری برای در معرض باران قرار دادن خاک استفاده شده است و از سوی دیگر شدت و مدت‌های مختلف باران شبیه‌سازی شده با مشخصات گوناگون به کار رفته است. در شرایط مزرعه‌ای نیز کرت‌های فرسایش در ابعاد و اندازه‌های گوناگونی بوده و در اکثر موارد از باران شبیه‌سازی شده با ویژگی‌های متفاوت استفاده شده است. مواردی از اندازه‌گیری فرسایش در یک دامنه یا حوضه کوچک نیز وجود دارد. علاوه بر تفاوت در نوع و مشخصات باران و مقیاس مکانی (اندازه کرت)، مطالعات در مقیاس‌های زمانی مختلف نیز انجام شده‌اند. همچنین این مطالعات در انواع مختلف خاک و در شرایط متفاوت از نظر پوشش سطحی نیز صورت پذیرفته است. دو سوال مهم در این مورد وجود دارد، اول اینکه این داده‌ها را چگونه می‌توان به یکدیگر مرتبط ساخت و دوم اینکه نتایج نهایی حاصل از مجموع روش‌ها به ویژه از نظر تعیین عوامل موثر و نرخ فرسایش را چگونه می‌توان به سطح دامنه و حوضه آبخیز تعمیم داد.

جمع‌بندی و تجزیه و تحلیل نتایج اندازه‌گیری/برآورد نرخ فرسایش خاک در ایران بیانگر اختلاف بسیار زیاد در داده‌ها است [۱۲]. به عنوان نمونه میزان تلفات خاک اندازه‌گیری شده در کرت‌های فرسایش بین صفر تا ۳۴ تن در هکتار در سال متغیر است. البته بخش زیادی از این تغییرات می‌تواند ناشی از تغییر عوامل فرسایش (نظیر نوع خاک، پوشش گیاهی و اقلیم) باشد. اما از سوی دیگر قطعیتی نیز در مورد این که، (۱) در هر یک از اندازه‌گیری‌ها چه نوع یا فرآیندی از فرسایش خاک اندازه‌گیری شده؟، (۲) در مورد داده‌های حاصل از شبیه‌سازی باران، استانداردهای لازم برای شبیه‌سازی (از نظر شدت، مدت، قطر قطرات، یکنواختی و انرژی جنبشی) چقدر رعایت شده؟، (۳) سایر اطلاعات مربوطه از قبیل نوع خاک، وضعیت پوشش سطحی و آمار اقلیمی چقدر و با چه دقتی ثبت شده‌اند؟، و (۴) آیا استانداردهای لازم در مورد اندازه‌گیری غلظت رسوب یا تلفات خاک رعایت شده؟، وجود ندارد.

بررسی و تحلیل داده‌های موجود در سطح جهانی توسط محققین مختلفی [به عنوان نمونه؛ ۳۱، ۵۷، ۶۹ و ۷۳] انجام شده است. محمدی و کاویان [۱۷] نیز به بررسی منابع و گردآوری مطالب در این زمینه پرداخته‌اند. بررسی این تجزیه و تحلیل‌ها

مقیاس‌بندی در فرسایش خاک (فرآیندها، اثر مقیاس و مدل‌سازی فرسایش خاک)

حسین اسدی^۱

تاریخ دریافت: ۹۳/۱۰/۱ تاریخ پذیرش: ۹۴/۵/۲

چکیده

هدف از تدوین مقاله حاضر بررسی و معرفی راه‌حل‌هایی برای مدیریت و تلفیق داده‌های حاصل از کرت‌های فرسایش در شرایط بارش طبیعی و شبیه‌سازی شده و چگونگی تعمیم نتایج حاصل به سطح دامنه و حوضه است. در این راستا در ابتدا عوامل موثر بر وضعیت و تغییرات داده‌ها بیان و سپس ضرورت بحث مقیاس‌بندی مطرح شده است. مقیاس‌بندی به عنوان مجموعه‌ای از عملگرها برای یافتن فاکتورهای مقیاسی به منظور مرتبط نمودن ویژگی‌های یک سیستم به ویژگی‌های متناظر سیستم دیگر تعریف می‌شود. تعیین فاکتورهای مقیاسی با بهره‌گیری از مفاهیم آنالیز ابعادی انجام می‌شود. در ادامه، انواع و فرآیندهای فرسایش خاک بیان شده و بحث مدل‌های فرسایش خاک که بر مبنای انواع و فرآیندهای فرسایش بوده و متشکل از فاکتورهای مقیاسی هستند، مختصراً مورد تحلیل قرار گرفته است. مدل‌ها در واقع ابزار مدیریت، تلفیق و تعمیم

داده‌ها هستند. بر این اساس معیارهای عملی انتخاب مدل مناسب بیان شده است. با توجه به تجربیات جهانی و شرایط کشور از نظر آمار و اطلاعات، تلفیق مدل RUSLE با سنجش از دور و بر مبنای مجموعه‌ای از اندازه‌گیری‌های مزرعه‌ای هدفمند برای ارزیابی و پهنه‌بندی بلندمدت فرسایش خاک کشور در مقیاس دامنه و حوضه آبخیز پیشنهاد شده است.

واژه‌های کلیدی: آنالیز ابعادی، اعتبار مدل، فرآیندهای فرسایش،

USLE

۱- دانشیار گروه علوم خاک، دانشکده علوم کشاورزی، دانشگاه گیلان، رشت، asadi@guilan.ac.ir

بیانگر اعتقاد محققین به تغییرات زیاد در مقادیر اندازه‌گیری شده فرسایش خاک در سطح جهانی است. مهم‌ترین عوامل تغییرات از نظر بویکس‌فایوس و همکاران [۳۱] عبارت از؛ (۱) مقیاس زمانی اندازه‌گیری‌ها، (۲) مقیاس مکانی متفاوت، (۳) آشفتگی طبیعی ناشی از به کارگیری ابزار اندازه‌گیری و (۴) پیچیدگی برهمکنش‌های اکوسیستم هستند. مقیاس مکانی اندازه‌گیری‌ها شاید مهم‌ترین این عوامل باشد که بر پیچیدگی پدیده فرسایش خاک (چهارمین عامل) نیز تاثیر گذار است. در حقیقت مقیاس مکانی (یا به بیان ساده‌تر اندازه یا مساحت کرت یا محدوده‌ای که اندازه‌گیری در آن صورت می‌گیرد)، تعیین کننده فرآیندهای فعال فرسایش و نیز نوع فرسایش (مرحله پیشرفت فرسایش) است. البته این اثر مقیاس را نباید با اثر مقیاس بر تغییرپذیری عوامل فرسایش نظیر توپوگرافی، نوع پوشش و بارندگی ادغام کرده و دچار اشتباه شد. تغییرات مکانی عوامل موثر بر فرسایش بسیار مهم است و در تعمیم نتایج حاصل از اندازه‌گیری در کرت به دامنه و حوضه، از طریق عملگرهای مقیاسی (ضرایب تناسبی) بایستی مدنظر قرار گیرد. بنابراین در مورد هر داده یا اندازه‌گیری ضروری است که مشخص شود چه نوع (ورقه‌ای و/یا شیاری) یا فرآیندی (باران‌زا و/یا جریان‌زا) از فرسایش خاک اندازه‌گیری شده؟ که این موضوع خود تابع ابعاد کرت (مقیاس) است. در غیر این صورت، نمی‌توان هیچ داده‌ای را با داده دیگر مقایسه کرد و یا داده‌ای را به سطحی که در آن فرآیندها و نوع دیگری از فرسایش رخ می‌دهد، تعمیم داد.

در مجموع و به طور خلاصه می‌توان بیان داشت که بحث مقیاس و مقیاس‌بندی، و به تبع آن بحث ریز و بزرگ مقیاس‌نمایی از جمله مباحث بسیار مهم و اساسی در مطالعات فرسایش خاک و تعمیم نتایج حاصل از اندازه‌گیری‌ها است. در این زمینه و به منظور (الف) تعیین کوچک‌ترین مقیاس مورد اندازه‌گیری و (ب) تعیین فاکتورهای مقیاسی برای تعمیم نتایج، ضروری است که، (۱) شناخت و درک صحیحی از فرآیندهای فرسایش وجود داشته باشد، (۲) درک مشترک و واژه‌شناسی یکسانی از انواع فرسایش فراهم باشد و (۳) با مفاهیم آنالیز ابعادی و مقیاس‌بندی آشنایی وجود داشته باشد. از سوی دیگر نباید فراموش کرد که تجربیات بسیار زیاد و گرانسنگی در سرتاسر دنیا در صد سال گذشته وجود دارد که باید به بهترین نحو از آن بهره برد. در این مورد تلاش‌های جهانی برای توسعه مدل‌ها (به عنوان بسته یک‌پارچه فاکتورهای مقیاسی) و در نتیجه شناخت مبانی این مدل‌ها می‌تواند راه‌گشا باشد. همچنین معیارهای مختلفی برای انتخاب یک مدل مناسب وجود دارد، که باید با آنها آشنا بود و در نهایت بتوان بر اساس آن و وضعیت موجود مدل مناسب را برای مدیریت، تلفیق و تعمیم داده‌ها انتخاب، واسنجی و ارزیابی نمود و در نهایت به‌کار برد.

آنالیز ابعادی

آنالیز ابعادی به مطالعه ابعادی که کمیت‌های فیزیکی همچون

جرم، نیرو و انرژی را توصیف می‌کند، می‌پردازد. مکانیک کلاسیک بر مبنای سه کمیت بنیادین با ابعاد MLT ، جرم M ، طول L و زمان T استوار است. ترکیب این کمیت‌ها موجب دستیابی به کمیت‌های دیگر مثل حجم، سرعت و نیرو با ابعاد L^3 ، LT^{-1} و MLT^{-2} می‌شود. در دیگر جنبه‌های فیزیک، کمیت‌های بنیادی دیگر مانند دما (θ) و جریان الکتریکی (I) نیز تعریف می‌شود.

برای معرفی موضوع مقیاس‌بندی و آنالیز ابعادی، در منابع [۶۲] از یک مثال کلاسیک از ادبیات تخیلی استفاده می‌شود که در آن دین‌سوئیفت^۱ در "ماجراهای گالیور" سفر دریایی تخیلی لیموئل گالیور را به سرزمین‌های لیلیپوت^۲ و برودینگ^۳ شرح می‌دهد. در این دو مکان، زندگی دقیقاً شبیه زندگی عادی است، اما ابعاد هندسی آنها متفاوت است. در لیلیپوت مردم، خانه‌ها، سگ‌ها و درختان، دوازده بار کوچک‌تر و در برودینگ، همه چیز دوازده بار بزرگ‌تر است. مردم لیلیپوت با مقیاس ۱۲:۱ مدل هندسی گالیور، و در برودینگ مدلی با مقیاس ۱۲:۱ بودند (شکل ۱).

تحلیل داستان دین‌سوئیفت از طریق آنالیز ابعادی دو سرزمین می‌تواند جالب باشد. بسیار پیش‌تر از دین سوئیفت، گالیله دریافته بود که مدل‌های بزرگ‌نمایی یا کوچک‌نمایی افراد نمی‌تواند شبیه آنچه ما هستیم باشد. بدن انسان از ستون فقرات، ربات‌ها، استخوان‌ها و ماهیچه‌ها تشکیل شده است. وزن بدنی که اسکلت انسان باید تحمل کند، متناسب با حجم (L^3) آن است و مقاومت استخوان برای متراکم‌شدن یا ماهیچه برای کشش، متناسب با L^2 است. اگر گالیور با غول سرزمین برودینگ مقایسه شود که همه ابعاد آن دوازده بار بزرگ‌تر است، مقاومت پاها ۱۴۴ برابر بیشتر از گالیور و وزن (حجم) ۱۷۲۸ برابر بزرگ‌تر خواهد بود. لذا نسبت مقاومت به وزن غول دوازده بار کم‌تر از گالیور است (شکل ۲). بنابراین غول برای تحمل وزنش باید تلاشی معادل آنچه لازم است ما برای حمل (بر دوش کشیدن) ۱۱ نفر دیگر انجام دهیم، انجام دهد. اگر قرار باشد غولی با همان نسبت پا به دست شبیه انسان عادی وجود داشته باشد، لازم است از مواد سخت‌تر و قوی‌تری برای ساخت استخوان استفاده شود یا باید به مقاومت کم‌تر در مقایسه با یک قامت طبیعی رضایت داد. از سوی دیگر، اگر اندازه بدن کاهش یابد، مقاومت به همان نسبت کاهش نمی‌یابد. هرچه بدن کوچک‌تر باشد، مقاومت نسبی آن بزرگ‌تر خواهد بود. به همین دلیل یک سگ خیلی کوچک احتمالاً دو یا سه سگ کوچک دیگر را می‌تواند بر پشتش حمل کند اما یک فیل نمی‌تواند حتی یک فیل دیگر هم‌اندازه را حمل کند.

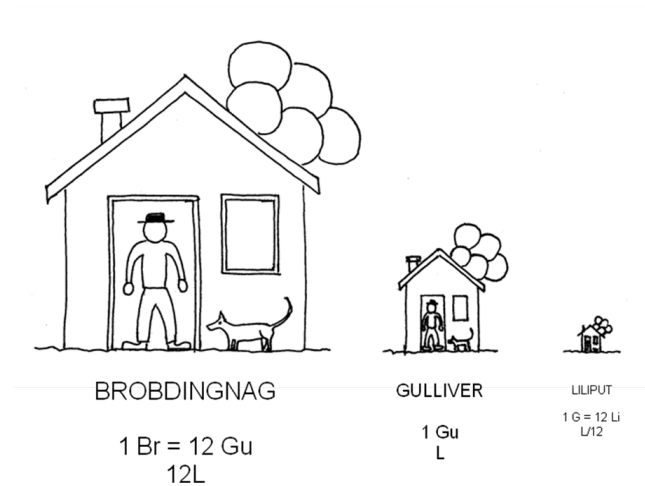
مسئله لیلیپوتی‌ها را نیز می‌توان آنالیز نمود. میزان تلفات گرمای بدن به محیط از طریق پوست، با ثابت فرض کردن دمای بدن و ویژگی‌های پوست، متناسب با مساحت پوست (L^2) است. این انرژی از هضم غذا به دست می‌آید. بنابراین، حداقل حجم غذا که باید هضم شود، متناسب با L^2 است. اگر گالیور با یک سیخ

1. Dean Swift
2. Liliput
3. Brobdingnag

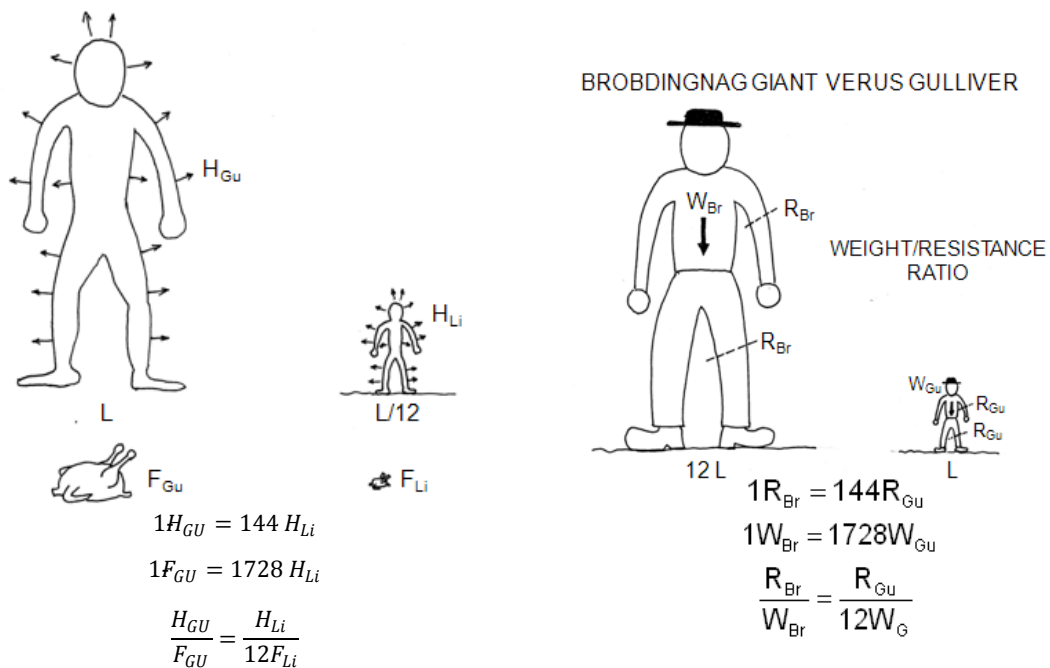
روشننگری قوانین مقیاس که بیان شد، این حیوانات مجبورند آن قدر غذا بخورند که دستیابی به آن مشکل است و یا اینکه در زمان قابل قبولی نمی‌توانند آن را هضم کنند.

این تحلیل ساده نشان می‌دهد که برای تخمین میزان یک مشخصه از یک سیستم با استفاده از مقدار آن مشخصه در سیستم دیگر (یعنی مقدار مشخصه در سیستم دیگر اندازه‌گیری یا تعیین شده است)، به یک ضریب تناسبی (فاکتور مقیاسی) نیاز است و این ضریب تناسبی بر اساس نوع مشخصه (فرآیند فیزیکی حاکم) و نسبت ابعاد دو سیستم به هم دست می‌آید.

کباب، یک نان و یک میوه راضی باشد، یکی لیلیپوتی باید (۱۲/۱)^۳ کم‌تر حجم غذا دریافت کند. این در حالی است که سطح پوست او (۱۲/۱)^۲ کوچک‌تر از گالیور است. بنابراین شخص لیلیپوتی به دوازده سیخ کباب، دوازده نان و دوازده میوه نیاز دارد تا به اندازه گالیور راضی باشد. زیرا حجم غذا (۱۲/۱)^۳ کوچک‌تر شده اما نیاز به انرژی (سطح بدن) او (۱۲/۱)^۲ کوچک‌تر شده است (شکل ۲). این کیفیت‌ها (پر غذایی) در پستانداران کوچکی مثل موش‌ها دیده می‌شود. جالب است که یادآوری شود که تعداد زیادی جانور خون‌گرم کوچک‌تر از موش وجود ندارد، احتمالاً به دلیل



شکل ۱- نمای شماتیک سرزمین‌های لیلیپوت و برودینگ در مقایسه با گالیور



شکل ۲- مقایسه غول برودینگ با گالیور (راست) و مقایسه کوتوله لیلیپوت با گالیور (چپ)

معادله جهانی هدررفت خاک

برای بسط معادله جهانی هدررفت خاک (USLE)، با فرض اینکه علت اصلی فرسایش آبی اعمالی است که باران بر روی خاک انجام می‌دهد، مطالعه فرسایش خاک به دو بخش تفکیک گردید [۷۹]. اول اینکه، چطور فرسایش تحت تأثیر انواع مختلف باران قرار می‌گیرد و دوم اینکه، شرایط و انواع مختلف خاک چگونه آن را تغییر می‌دهد. بر این اساس استدلال شد که میزان فرسایش به ترکیبی از قدرت باران در ایجاد فرسایش و توانایی خاک در تحمل بارندگی بستگی دارد. به بیان ریاضی:

$$\text{فرسایش پذیری خاک و فرساینده‌گی باران} = f(\text{فرسایش})$$

با این دانش که عوامل مختلف دیگری نیز بر میزان فرسایش خاک اثرگذارند، برای توسعه مدل، ابتدا کرت استاندارد تعریف شد. کرت استاندارد یا مبناء، کرتی است با مساحت ۰/۰۱ ایگر، طول شیب ۲۲/۱ متر (۷۲/۶ فوت)، عرض ۱/۸۳ متر (۶ فوت)، با شیب یکسان ۹ درصد (۵ درجه)، که به طور دائم آیش بوده، عاری از هر گونه باقیمانده گیاهی و یا علف هرز باشد و در جهت شیب شخم خورده است. کرت استاندارد در حقیقت در آنالیز ابعادی داستان گالیور، انسان عادی یا خود گالیور است. در آنالیز ابعادی داستان گالیور، یک حالت مبناء وجود دارد و برای بررسی هر فرآیند در سرزمین‌های دیگر (مثل مقاومت اسکلت غول یا میزان نیاز به غذای کوتوله) تناسبی با حالت مبناء برقرار می‌شود. ضریب تناسب با توجه به نوع فرآیند و بر مبنای اصول فیزیکی است. در کرت استاندارد USLE معادله زیر برای برآورد میزان تلفات خاک ارائه شد:

$$A = R \times K \quad (1)$$

که در آن؛ A ، متوسط بلندمدت تلفات سالانه خاک بر حسب تن در هکتار در سال که به وسیله فرسایش ورقه‌ای و شیاری به وجود می‌آید، R ، عامل فرساینده‌گی باران - رواناب (بر حسب MJ.mm.K⁻¹.ha⁻¹.h⁻¹.y⁻¹)، عامل فرسایش‌پذیری خاک که حساسیت ذاتی خاک را نشان می‌دهد و برابر با شدت تلفات خاک به ازای یک واحد از شاخص فرساینده‌گی برای یک خاک معین در کرت مبناء است (بر حسب t.ha.h.MJ⁻¹.ha⁻¹.mm⁻¹).

فرسایش خاک در اراضی کشاورزی عمدتاً شامل فرسایش شیاری و بین‌شیاری است. در تعریف کرت استاندارد و به عنوان مثال، حداقل طولی که بتواند این نوع فرسایش‌ها را به عنوان یک مبناء بروز دهد، برابر ۲۲/۱ متر فرض شده است و میزان تلفات خاک برای این طول اندازه‌گیری شده (قابل برآورد) است (معادله ۱). حال چنانچه طول شیب فرض کنید سه برابر کوتاه‌تر یا طولانی‌تر شود، برای برآورد میزان تلفات خاک به یک ضریب تناسب نیاز است (ضریب L) تا در میزان تلفات خاک طول مبناء ضرب شود:

$$A = R \times K \times L \quad (2)$$

که در آن؛ L ، ضریب (فاکتور مقیاسی) طول شیب که عبارت از نسبت تلفات خاک در قطعه زمین با طول شیب معین به مقدار تلفات در قطعه‌ای با طول ۲۲/۱ متر با شرایط یکسان است (بدون

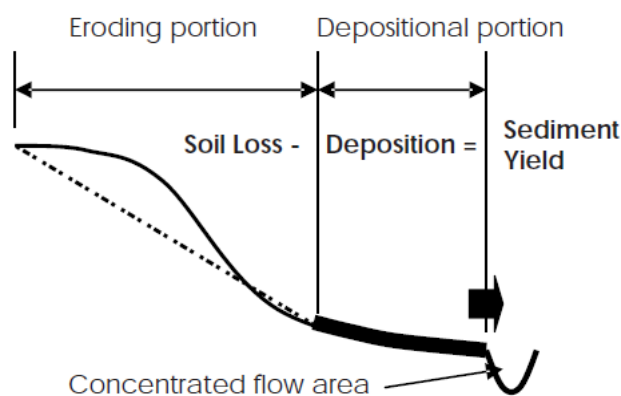
بعد). مشابه این ضریب برای سایر عوامل موثر بر فرسایش نیز وجود خواهد داشت و بنابراین:

$$A = R \times K \times L \times S \times C \times P \quad (3)$$

که در آن؛ S ، C و P به ترتیب ضرایب (فاکتورهای مقیاسی) درجه شیب، پوشش و مدیریت می‌باشند. این معادله بعد از دستیابی به حدود ۱۰۰۰۰ داده (تحت باران طبیعی و شبیه‌سازی شده) به ویژه برای تعیین ضرایب تناسب (فاکتورهای مقیاسی) بسط داده شد. بر این اساس و با استفاده از معادله ۳ می‌توان با داشتن ضرایب تناسب از یک سو و اندازه‌گیری میزان تلفات خاک در یک کرت (کرت استاندارد)، میزان تلفات خاک را در اقلیم و خاکی مشخص برای مزارع با ابعاد، شیب، مدیریت و نوع کشت‌های متفاوت تخمین زد (تعمیم داد). البته کاری که در آمریکا انجام شده است، مشخص نمودن مقادیر R و K برای اقلیم و خاک‌های مختلف است و بنابراین در آنجا لازم نیست که در هر موردی ابتدا میزان تلفات خاک در کرت استاندارد اندازه‌گیری شود و سپس تعمیم داده شود. به بیان دیگر و در حقیقت این اندازه‌گیری قبلاً انجام شده است. اما این‌که آیا مقادیر R و K که با استفاده از روابط پیشنهادی در آمریکا برای سایر مناطق اقلیمی و خاک‌ها تخمین زده می‌شوند، صحیح و قابل اعتماد هستند، مورد سوال بوده و باید مورد بحث قرار گیرد.

معادله جهانی هدررفت خاک تجدیدنظر شده (RUSLE) برای تخمین متوسط بلندمدت تلفات سالانه‌ی خاک حاصل از بارندگی و رواناب در زمینی با شیب معین و در سیستم‌های با مدیریت و کشت مشخص، توسعه یافت [۶۳]. این مدل در شرایط غیر زراعی، همانند جنگل‌ها و مراتع و حتی مکان‌های ساختمانی نیز کاربرد دارد. مدل RUSLE دارای همان ساختار و مبانی USLE است و تفاوت عمده آن در باز تعریف ضرایب تناسبی (مقیاسی) است. در مدل USLE ضرایب تناسبی مربوط به نوع پوشش تنها برای اراضی کشاورزی تعریف و تعیین شده بود.

نسخه دوم معادله جهانی هدررفت خاک تجدیدنظر شده (RUSLE2) قادر است تلفات خاک، تولید رسوب و ویژگی‌های رسوب حاصل از فرسایش شیاری و بین‌شیاری (ورقه‌ای و



شکل ۳- دامنه شیب با نیمرخ محدب- مقعر واحد محاسباتی در RUSLE2

شیاری) ناشی از بارندگی و رواناب منتج از آن را تخمین بزنند. در این نسخه از مدل RUSLE تلاش شده است شرایط طبیعی دامنه‌ها که در آن سه مرحله تلفات، رسوبگذاری و انتقال رسوب وجود دارد، شبیه‌سازی شود (شکل ۳).

انواع و فرآیندهای فرسایش خاک

۱- انواع فرسایش خاک و عوامل اثرگذار بر آن
فرسایش خاک فرآیندی است که در آن ذرات و اجزاء خاک توسط یک عامل یا نیروی فرساینده از بستر اصلی خود جدا شده و به مکان دیگری منتقل می‌شوند. در فرسایش آبی عوامل فرساینده خاک بارندگی و رواناب می‌باشند. در فرآیند فرسایش خاک سه فاز مشخص و مجزای؛ (۱) جدا شدن ذرات خاک، (۲) انتقال ذرات و (۳) ترسیب مواد حمل شده، وجود دارد. فرسایش آبی خاک در اثر دو عامل بارندگی و رواناب با گذشت زمان و گسترش مکانی فرسایش ممکن است در سه مرحله فرسایش ورقه‌ای^۱، فرسایش شیاری^۲ و فرسایش خندق^۳ رخ دهد. مکانیسم فرآیند فرسایش در هر یک از این مراحل متفاوت است. همچنین اهمیت و میزان پیشرفت هر مرحله از فرسایش بسته به مکان، زمان و موقعیت توپوگرافی متفاوت است. این مراحل در زمان ظهور در هر نقطه در پی یکدیگر به وقوع می‌پیوندند و در زمانی مشخص تا حد معینی به سمت پایین شیب گسترش می‌یابند.

در مرحله فرسایش ورقه‌ای، جدا شدن ذرات عمدتاً نتیجه اثر برخورد قطرات باران است و جریان رواناب به علت عمق و سرعت کم و در نتیجه نیروی برشی پایین نقش کمی در این مورد دارد. انتقال ذرات در این مرحله بیشتر توسط جریان رواناب است، اما بخشی نیز به علت پاشمان قطرات باران می‌باشد. در فرسایش شیاری نقش رواناب در جدا کردن ذرات اهمیت یافته و از نقش قطرات باران کاسته می‌شود. در مرحله سوم، جریان تعداد زیادی از شیارها به هم پیوسته که به علت تنش برشی بیشتر باعث حفر بیشتر خاک و تشکیل کانال‌های بزرگ‌تر و عمیق‌تری می‌شود که به آنها خندق گفته می‌شود. خندق‌ها عوارض توپوگرافی نسبتاً دائمی هستند. در فرسایش خندقی تأثیر بارندگی در جدا نمودن و انتقال مواد ناچیز است.

بنت [۲۹] فرآیند فرسایش و تولید رسوب را به دو مقوله کلی تقسیم‌بندی می‌کند: (۱) فاز اراضی بالادست^۴ که شامل سه مرحله فوق است و کاملاً وابسته به وقایع بارندگی‌های قابل تشخیص و مجزا است و (۲) فاز درون رودخانه‌ها در اراضی پایین‌دست^۵ که وابسته به مقدار ناخالص آب در دسترس و توزیع زمانی ورود آن به رودخانه است.

1. Sheet erosion
2. Rill erosion
3. Gully erosion
4. Upland
5. Lowland

۲- فرآیندهای فرسایش خاک

جدا شدن ذرات خاک اساساً تابعی از نیروهای فرساینده قطرات باران و آب جاری، حساسیت خاک به جدا شدن، حضور مواد کاهنده نیروهای فرساینده، و مدیریت خاک می‌باشد. انتقال ذرات نیز تابعی از نیروی عوامل انتقال دهنده، انتقال‌پذیری^۶ ذرات جدا شده، و حضور مواد کاهنده نیروهای منتقل کننده است [۳۹]. در هر نقطه از شیب اگر مقدار رسوب در دسترس برای انتقال که توسط فرآیندهای جدا شدن ایجاد شده کم‌تر از توان حمل باشد آنگاه بار رسوب برابر با مقدار رسوبات جدا شده در دسترس (ظرفیت جدا شدن) می‌باشد. اما چنانچه مقدار رسوب جدا شده بیش از توان حمل باشد، فرآیند ترسیب رخ داده و توان حمل، بار رسوب را کنترل می‌کند [۳۹ و ۵۰]. این موضوع با مفهوم دیگری نیز بیان شده است که به شرایط حاکم بر فرسایش معروف است و با دو واژه محدودیت انتقال^۷ و محدودیت جدا شدن^۸ توصیف می‌شود [۵۴]. در طی یک رخداد بارندگی ممکن است بارها شرایط بین این دو حالت نوسان نماید. از سوی دیگر در رخدادهای متوالی نیز ممکن است از رخداد نخست تا رخداد پایانی (یعنی با گذشت زمان)، شرایط از محدودیت انتقال و محدودیت جدا شدن تغییر نماید.

در تقسیم‌بندی الیسون [۳۸] برای پدیده فرسایش خاک، چهار فرآیند: (الف) جدا شدن ذرات خاک توسط بارندگی، (ب) جدا شدن ذرات خاک توسط رواناب، (ج) انتقال ذرات جدا شده توسط بارندگی و (د) انتقال ذرات توسط رواناب را تعریف شده است. بعدها و به ویژه برای بسط مدل‌های فرآیندی، فرآیندهای دخیل در فرسایش به دو دسته، فرآیندهای ناشی از بارندگی و فرآیندهای ناشی از جریان گروهبندی شده و بسط معادلات بر این اساس صورت گرفته است [۱]. البته در این مورد و در اغلب مدل‌های توسعه یافته، برهمکنش بین این فرآیندها در نظر گرفته نشده است. روحی‌پور و همکاران [۶۶] و اسدی و همکاران [۲۴] برهمکنش بین این فرآیندها را بررسی و بر اهمیت موضوع تاکید کرده‌اند. موضوع بررسی فرآیندهای فرسایش با وجود سابقه بسیار طولانی به ویژه در مورد فرآیندهای ناشی از بارندگی و مکانیسم‌های برخورد قطرات باران و پیامدهای آن [۷۴]، همچنان جزء موضوعات روز و رو به تکامل در زمینه تحقیقات فرسایش خاک است. در زمینه فرآیندهای ناشی از جریان، مکانیسم انتقال ذرات [۲۵، ۲۶، ۷۱ و ۷۸] و اثر زبری [۶۴ و ۷۲]، و در زمینه فرآیندهای ناشی از بارندگی اثر بارندگی‌های متوالی و نیز بارندگی غیریکنواخت [۲۳، ۳۷ و ۵۹] مورد توجه و بررسی هستند. همچنین تشکیل اندوده سطحی^۹ و اثرات آن بر نفوذ، رواناب و فرآیندهای فرسایش مورد توجه و نیازمند بررسی‌های پیش‌تری است [۵۳].

6. Transportability
7. Transport limit
8. Detachment limit
9. Surface sealing

مدل‌های فرآیندهای فرسایش خاک

در بسیاری از مطالعات فرسایش خاک به‌ویژه در مدل‌سازی‌ها، پدیده فرسایش خاک و تولید رسوب را در قسمتی یا بخشی از دامنه مورد توجه قرار داده‌اند. در اکثر این موارد، گسترش فرسایش تا پس از تشکیل شیار در نظر گرفته شده است. در این مورد فرآیندهای مختلفی از جمله؛ (۱) فرآیند جدا شدن ذرات خاک توسط بارندگی و رواناب سطحی، (۲) انتقال ذرات جدا شده توسط رواناب سطحی در نواحی بین شیارها، (۳) فرآیندهای جدا شدن و انتقال ذرات توسط جریان متمرکز شده در درون شیارها و (۴) فرآیند ترسیب در درون شیار تعریف شده‌اند. جدا کردن فرسایش خاک به دو جزء شیار و بین شیار برای بسط بسیاری از مدل‌های فرسایش به کار رفته است. علاوه بر موارد مذکور، فعال بودن پیوسته فرآیند ترسیب مواد در تمام مراحل فرسایش چه در رواناب سطحی جاری در سطوح بین شیارها و چه در رواناب متمرکز شده در شیارها، که ناشی از ته نشینی ذرات به علت نیروی ثقل می‌باشد، توسط رز و همکاران [۶۵] بیان شده و مورد تاکید قرار گرفته است.

از تحولات عمده‌ای که در زمینه مدل‌سازی فرسایش خاک رخ داد، تغییر نگرش مدل‌سازی و روی‌آوری به مدل‌های با مبنای فیزیکی یا به اصطلاح فرآیندی بود که از دهه ۱۹۸۰ شروع شده است. ادعا شده است که مدل‌های فرآیندی فرسایش خاک در مقایسه با مدل‌های تجربی مزیت‌هایی دارند: (الف) توانایی‌هایی برای تخمین (برآورد) توزیع مکانی و زمانی تلفات خالص خاک (یا رسوب خالص در مکان‌هایی که فرآیند رسوب رخ می‌دهد)، این تخمین می‌تواند برای کل دامنه یا برای هر نقطه از آن و بر پایه زمانی یک رویداد، روزانه، ماهانه، یا سالانه باشد، (ب) از آن‌جا که مدل فرآیندی است، لذا می‌تواند برای دامنه وسیعی از شرایط که ممکن است به علل عملی یا اقتصادی، مدل در آن شرایط آزمون مزرعه‌ای نشده باشد نیز به کار رود [۵۶].

مفاهیم به کار رفته در مدل‌های فرآیندی به تدریج از زمانی که مایر و ویشمایر [۵۰] توصیفاتی ریاضی برای جدا شدن و انتقال ذرات خاک توسط بارندگی و جدا شدن و انتقال ذرات توسط رواناب به کار بردند، توسعه یافته‌اند. جدا کردن مفاهیم مدل‌های تجربی از مدل‌های فرآیندی، به علت فقدان داده‌های پایه‌ای مناسب مورد نیاز برای بسط روابطی که پارامترهای معادلات را بتوان با آن‌ها تخمین زد، تدریجی بوده است. به عنوان مثال، مدل فرآیندی فرسایش خاکی که در CREAMS [۴۱ و ۴۲] به کار رفته، از روابط USLE برای تعیین پارامترهای فرسایش‌پذیری خاک استفاده می‌کند [۵۶]. از مدل‌های فرآیندی اولیه دیگر می‌توان ANSWERS [۲۸] را نیز نام برد.

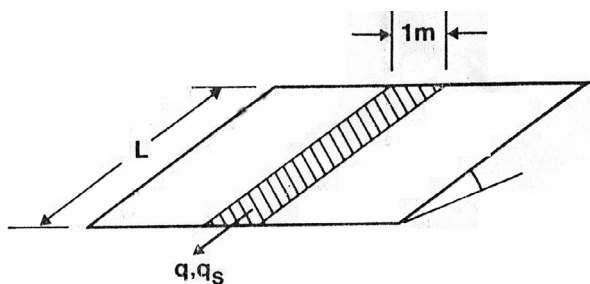
در دهه‌های اخیر نسل جدیدی از مدل‌های فرآیندی نظیر WEPP [۴۰ و ۵۶]، EUROSEM [۵۵] و GUEST [۵۲] برای توصیف و کمی کردن فرآیندهای فرسایش توسعه یافته‌اند. ادعا شده که

این مدل‌ها به طور خاصی برای سازگار شدن در عرصه‌های با مقیاس‌های مختلف مناسب هستند، زیرا مفاهیم فیزیکی را به کار برده‌اند و پارامترهای موجود دارای معنای فیزیکی هستند [۸۰]. در حقیقت در مدل‌های فرآیندی، برای فرآیند مد نظر بر اساس مفاهیم فیزیکی و با لحاظ نمودن عوامل موثر در معادلات قانون بقای جرم یا انرژی، مدلی توسعه می‌یابد که مستقل از مقیاس یا محیط است. به بیان دیگر و در مفهوم آنالیز ابعادی بیان شده و به عنوان مثال، چنانچه بر اساس مفاهیم و مبانی فیزیکی، بتوان مدلی برای تخمین میزان هدر رفت انرژی از سطح بدن با توجه ویژگی‌های بدن شخص و عوامل محیطی بسط داد، دیگر نیازی به داشتن یک مقدار مبناء (مقدار هدر رفت انرژی از بدن گالیور) وجود نخواهد داشت. مدل‌های فرآیندی فرسایش در ذات خود فاکتورهای مقیاس‌بندی را دارند، چرا که معمولاً در مقیاس‌های مکانی و زمانی انتگرال‌گیری می‌شوند. در ادامه به عنوان نمونه و برای درک راه‌کار تخمین توزیع مکانی و زمانی فرسایش در مدل‌های فرآیندی، مبانی مدل هیرساین و رز [۴۳ و ۴۴] که بر اساس قانون بقای جرم توسعه یافته مختصراً ارائه می‌شود.

برای بیان این مدل، سطح یکنواختی بر روی شیب معینی همانند شکل ۴ در نظر گرفته شده است. شدت جریان در واحد عرض صفحه، شار نامیده می‌شود. شار رسوب (q_s) عبارت از جرم رسوب جاری در واحد زمان از واحد عرضی عمود بر جهت شار جریان می‌باشد. شار حجمی آب (q) نیز شدت جریان حجمی آب در واحد عرض نوار ($m^3 m^{-1} s^{-1}$ یا $m^2 s^{-1}$) می‌باشد. غلظت رسوب (c) بر حسب جرم خشک شده رسوب (در آن) در واحد حجم سوسپانسون بیان می‌شود، بنابراین:

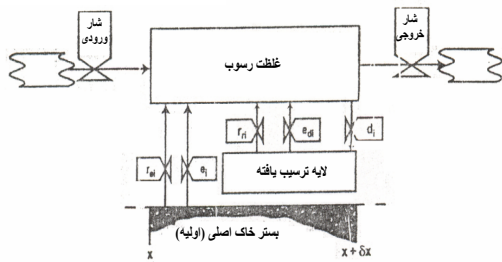
$$q_s = q \cdot c \quad (\text{kgm}^{-1} \text{s}^{-1}) \quad (4)$$

تلفات خاک از سطح یک زمین معین در طول یک رخداد فرسایشی با جمع q_s زمان‌های مختلف در انتهای آن قطعه محاسبه می‌شود. از معادله (۴) می‌توان دریافت که توصیف فرآیندهای فرسایش خاک مستلزم توصیف هیدرولوژی جریان سطحی (به علت وجود ترم q)، و توصیفی از فرآیندهای مختلف فرسایشی افزایش یافته یا کاهش یافته رسوب (c) می‌باشد. میزان غلظت رسوب حاصل موازنه بین فرآیندهای افزایش یافته و کاهش یافته آن می‌باشد. همه این کمیت‌ها می‌توانند با گذشت زمان و تغییر مکانی فرسایش در طول شیب تغییر نمایند.



شکل ۴- جریان رواناب (q) و رسوب (q_s) در واحد عرض یک قطعه مسطح از طول (L) شیب

1. Settling



به نظر می‌رسد مرحله توسعه و تکامل آنها هنوز ادامه دارد و راه زیادی تا تکامل آنها وجود دارد.

معیارهای عملی انتخاب یک مدل مناسب

انتخاب یک مدل برای هدفی خاص نیازمند در نظر گرفتن چهار موضوع اصلی؛ (۱) اهداف کلی کاربرد مدل، (۲) سطح دسترسی به داده‌ها، (۳) میزان مهارت و دانش و (۴) فراهمی منابع (زمان و بودجه) است. نقصان یا محدودیت در هر یک از این موارد، انتخاب مدل را محدود می‌کند و یا منجر به خطای فاحش می‌شود. بنابراین لازم است در صورت وجود محدودیت، تجدید نظر لازم در اهداف، افراد درگیر و منابع صورت پذیرد (شکل ۶). نکته بسیار مهم در مدل‌سازی در علوم محیطی توجه به این واقعیت است که علوم محیطی موضوعی چند تخصصی است [۲].

در صورتی که هدف کاربرد مدل مشخص باشد، از نظر تخصص مهارت نیز مشکلی وجود نداشته و محدودیتی نیز در تامین بودجه و زمان نباشد، عامل اصلی انتخاب مدل، سطح دسترسی به داده‌ها و البته دقت آن است. در شکل ۷ رابطه بین کارایی اجرای مدل با سطح داده‌های در دسترس و پیچیدگی مدل نشان داده شده است. اگر سطح معینی از دسترسی به داده وجود داشته باشد، سطح بهینه‌ای از پیچیدگی مدل وجود دارد که در فراتر از آن (با پیچیده‌تر شدن مدل)، تعیین دقیق مقادیر پارامترهای مدل (واسنجی) مسئله ساز شده و کارایی اجرای مدل کاهش می‌یابد (شکل ۷الف). در صورت استفاده از مدل پیچیده‌تر، تعداد پارامترهای مدل به قدری زیاد می‌شود که داده کافی برای واسنجی و ارزیابی مدل در دسترس نیست. از سوی دیگر، چنانچه مدلی ساده‌تر از مدل بهینه به کار رود، مقداری از اطلاعات موجود در داده‌ها کشف نشده است. شکل ۷ب نشان می‌دهد برای یک مدل با پیچیدگی معین، افزایش داده‌های در دسترس منجر به افزایش کارایی مدل می‌شود. این روند تا نقطه‌ای ادامه دارد که جمع‌آوری داده‌ی بیش‌تر برای تخمین، سودمندی بیش‌تر ندارد، چرا که مدل دیگر قادر به استخراج اطلاعات از داده‌ها نیست. به بیان دیگر، به نقطه‌ای رسیده‌ایم که مدل بالاترین کارایی را دارد و داده بیش‌تر کمکی به بهبود وضعیت نمی‌کند، مگر اینکه مدل با مدلی پیچیده‌تر جایگزین شود. وضعیتی که اغلب در مدل‌سازی حوضه‌های آبخیز با آن مواجه هستیم در شکل ۷ج به صورت سایه‌زده مشخص شده است، یعنی شرایطی که در آن مدل‌های خیلی پیچیده به کار می‌رود در حالی که داده‌های محدودی در دسترس

صرفنظر از زمین لغزش‌ها و خندق‌ها، پنج فرآیند زیر بر غلظت رسوب تاثیر می‌گذارند [۴۳ و ۴۴]:

الف - جداشدن^۱ توسط بارندگی، که در آن قطرات باران ذرات را از سطح خاک به‌درون جریان سطحی وارد می‌سازند.
ب - واجداشدن^۲ توسط بارندگی، که در آن قطرات باران ذرات را از لایه ترسیب‌یافته^۳ به‌درون جریان سطحی وارد می‌سازند.
پ - ترسیب ذرات^۴، که نتیجه ته‌نشینی ذرات رسوب تحت اثر نیروی ثقل است.

ت - کنده‌شدن^۵ ذرات، فرآیندی که طی آن جریان سطحی ذرات را از سطح زمین کنده و به‌درون جریان رواناب وارد می‌سازد. کنده‌شدن ذرات ممکن است از کف شیارها و یا در جریان ورقه‌ای از سطوح بین شیارها رخ دهد.

ث - واکنده‌شدن^۶ ذرات، فرآیندی که طی آن جریان سطحی ذرات را از لایه ترسیب یافته به‌درون جریان وارد می‌سازد.

فرآیندهای الف، ب، ت و ث غلظت رسوب را افزایش و فرآیند پ آنرا کاهش می‌دهد. هر پنج فرآیند بسته به شرایط موجود می‌توانند با شدت‌های مختلفی رخ دهند. غلظت رسوب در هر مقطع جریان سطحی توسط این پنج فرآیند و اختلاف بین شار ورودی و خروجی تعیین می‌شود (شکل ۵).

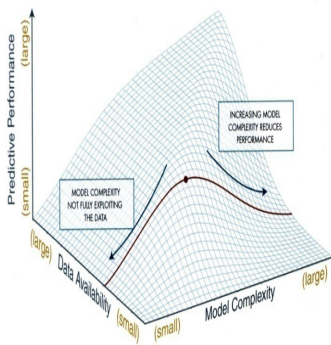
چنانچه مقطعی از سطح زمین (شکل ۴) با شدت جریان (شار) حجمی آب در واحد عرض q و با عمق جریان D در نظر گرفته شود، با توجه به فرآیندهای دخیل (شکل ۵)، معادله بقاء جرم ذرات در کلاس قطری i نیازمند برقراری رابطه زیر است:

$$\frac{\partial(q_s)}{\partial x} + \frac{\partial(c_i D)}{\partial t} = e_i + e_d + r_i + r_e - d_i \quad (5)$$

که در آن q_{si} شار رسوب x ، $(q_{si} = qc_i; \text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1})$ فاصله به سمت پایین شیب (m) و t زمان (s) است. ترم‌های r_e ، r_i ، e_d ، e_i و d_i به ترتیب شدت جداشدن، واجداشدن، کنده‌شدن، واکنده‌شدن و ترسیب هستند که وابسته به شدت بارندگی، شدت رواناب و ویژگی‌های آنها، و ویژگی‌های توپوگرافی و خاک بوده و تابع تغییرات مکانی و زمانی آنها هستند.

بدیهی است به طور نظری با روشن بودن شدت فرآیندهای پنج‌گانه، حل معادله و انتگرال‌گیری از آن، می‌توان تغییرات زمانی و مکانی تلفات خاک را برآورد نمود. اما این امر صرفنظر از مشکلات تکنیکی از جمله حل معادله فوق که از نظر ریاضی خیلی پیچیده است، نیازمند اطلاعات بسیار زیاد و دقیقی است که دستیابی به آن مشکل و پرهزینه است. در همین راستا و به عنوان نمونه دیگر، حجم اطلاعات مورد نیاز برای واسنجی و اجرای مدل WEPP نیز بی‌شمار است. مسئله دیگر در مورد مدل‌های فرآیندی این است که

1. Detachment
2. Re-detachment
3. Deposited layer
4. Sediment deposition
5. Entrainment
6. Re-entrainment



If we have a certain availability of data (eg. solid line in Figure 2B), there is an "optimum model complexity" beyond which the problems of properly defining the model parameter values described previously become important and reduce the predictive performance. There are too many model parameters and not enough data to test whether the model is working, or is working for the right reasons. If we use a simpler model than the optimum, we will not fully exploit the information in the data.

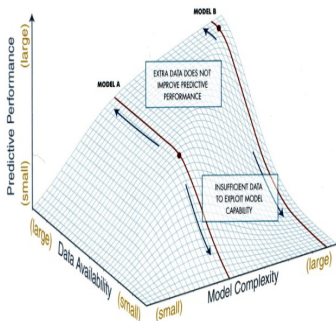
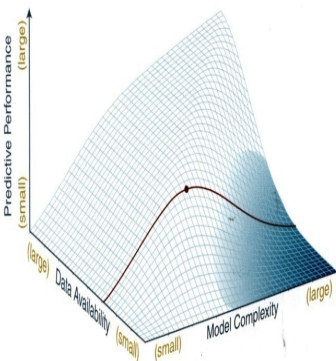


FIGURE 2C

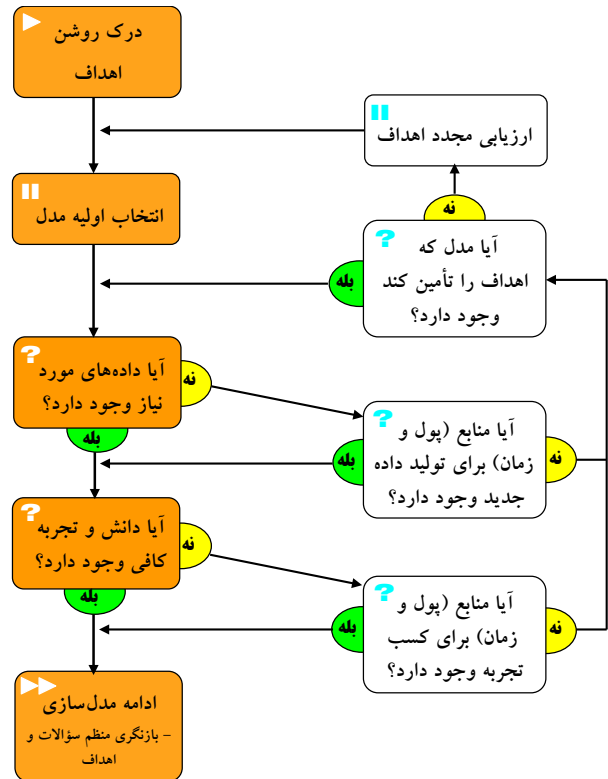
For given model complexities (eg. Model A and Model B in Figure 2C), increasing data availability leads to better predictive performance up to a point, after which the data contains no more "information" to improve predictions i.e. we have reached the best a particular model can do and more data does not help improve performance (the lines flatten out as data availability increases). This is not a particular problem, except that we could possibly do better. In this case, we could consider a more complex model to better exploit the information in the data.



The more common situation for practical applications of catchment modelling is represented by the shaded area in Figure 2D, where we are using too complex a model with limited data and so cannot define an optimum set of parameters with confidence.

شکل ۷- رابطه بین کارایی اجرای مدل با سطح داده‌های در دسترس و پیچیدگی مدل، (الف) چگونگی تعیین یا انتخاب مدل بالاترین کارایی اجرا با توجه به سطح دسترسی به داده، (ب) چگونگی تعیین حداکثر داده مورد نیاز برای دستیابی به بالاترین کارایی اجرای مدل با توجه به پیچیدگی آن، و (ج) وضعیت عمومی در مدل‌سازی حوضه‌های آبخیز

برآورد مدل می‌شود. در مقابل سیستم‌های استنتاج فازی بر مبنای روشی مشابه آنالیز رگرسیون در مدل‌های تجربی استوار هستند و در نتیجه ساختار پدیده و هر گونه برهمکنش احتمالی عوامل، هرچند به صورت نامشخص، از طریق داده‌های موجود در آن وارد می‌شود. بنابراین در بسیاری از موارد مشابه، ممکن است کارایی روش‌های مبتنی بر داده‌های اندازه‌گیری شده در مقایسه با روش‌ها یا مدل‌های نظری بالاتر باشد، اما نباید فراموش کرد که روش‌های داده-مبنای



شکل ۶- شمای سؤالات کلیدی در انتخاب مدل برای اهداف عملی

بوده و بنابراین امکان تخمین پارامترهای مناسب و مطمئن وجود ندارد.

به عنوان یک مثال می‌توان به مقایسه ارزیابی سه مدل، GUEST برای فرآیندهای ناشی از بارندگی [۲۷، شکل ۸]، WEPP برای فرسایش بین‌شیاری [۴؛ شکل ۹الف] و شبکه عصبی مصنوعی برای فرسایش بین‌شیاری [۳؛ شکل ۹ب] اشاره کرد. در این شکل‌ها به خوبی روشن است که کارایی مدل به ترتیب افزایش یافته است، از سوی دیگر، زمانی که به سطح پیچیدگی سه مدل نگاه شود، مدل GUEST برای فرسایش ناشی از بارندگی بر مبنای فرآیندهای جداشدن، واجداشدن و ترسیب استوار است و در آن فرض شده است که با گذشت زمان یک لایه ترسیب یافته بر سطح خاک تشکیل می‌شود، در حالی که جزء بین‌شیاری مدل WEPP معادله نسبتاً ساده‌ای بوده و در آن فرض شده است که تحویل رسوب از نواحی بین‌شیاری با حاصلضرب شدت بارندگی در شدت رواناب بین‌شیاری متناسب است.

نتایج این مقایسه نشان می‌دهد که مدل‌سازی فرسایش خاک با استفاده از سیستم استنتاج فازی در مقایسه با مدل‌های فرآیندی منجر به بهبود برآورد این پدیده می‌شود. مدل‌های فرآیندی با توجه به فرآیندهای دخیل در فرسایش بر مبنای قانون بقای جرم و در قالب معادلات پیوستگی توسعه می‌یابند. این مدل‌ها معمولاً نیازمند داده‌های زیادی هستند و هرگونه اشتباه در تشخیص اولیه و یا اهمیت فرآیندهای فرسایش منجر به ایجاد خطای قابل توجه در

پهنه‌بندی از جمله روش‌های زمین‌آماری از سوی دیگر قابل انجام است و در مطالعات مختلفی برای کل کشور یا محدوده‌های جغرافیایی مختلف قبلاً نیز بررسی شده است. سپس‌خواه [۱۰]، با ارائه رابطه‌ای بین نمایه فورنیه اصلاح‌شده و EI_p ، نسبت به تهیه نقشه فرساینده‌گی کل کشور اقدام نمود. سرخوش [۱۱]، با استفاده از نمایه فورنیه اصلاح‌شده و حداکثر بارش روزانه نقشه‌ی فرساینده‌گی باران را برای سه استان فارس، بوشهر و کهگیلویه و بویراحمد ارائه کرد. پناهی [۶] و دادکرمی [۸] با استفاده از نمایه فورنیه اصلاح‌شده و برآورد EI_p به ترتیب برای کل کشور (به غیر از استان‌های گیلان، آذربایجان شرقی و خوزستان) و حوزه دریاچه ارومیه، نقشه فرساینده‌گی را تهیه نمودند. تعیین و بررسی فرساینده‌گی باران در سطح کشور توسط حکیم‌خانی و همکاران [۷] نیز یکی از موارد مهم است. دیدترین نقشه فرساینده‌گی کشور توسط نیک‌کامی و مهدیان [۱۹] تهیه شده است. یکی از اشکالات اکثر مطالعات انجام گرفته در ایران این است که اثر فرساینده‌گی رواناب ناشی از ذوب برف در نظر گرفته نشده است. از آنجا که بخش‌های زیادی از مناطق کوهستانی کشور برف‌گیر می‌باشند، فرساینده‌گی رواناب ناشی از ذوب برف می‌تواند مهم باشد. هنرمند و همکاران [۲۲] ضمن تهیه نقشه فرساینده‌گی باران برای استان گیلان، اثر ذوب برف را نیز در نظر گرفتند. مشکل دیگر، مقیاس مطالعات پیشین است که در اکثر آن‌ها، فرساینده‌گی باران در کل کشور مورد بررسی بوده است و بنابراین نقشه‌های به دست آمده نمی‌توانند از نظر مدیریتی چندان قابل استفاده باشند. از سوی دیگر، با افزایش دوره آماری و تعداد ایستگاه‌های ثابت، لازم است نقشه‌های فرساینده‌گی را تصحیح و به‌روز نمود.

فرساینده‌گی باران دارای چرخه فصلی می‌باشد و این چرخه از مکانی به مکان دیگر متفاوت است. مرادی و همکاران [۱۸] در خوزستان، بوشهر و کهگیلویه و بویر احمد نشان دادند که در فصل زمستان و نیز ماه‌های بهمن، آذر، اسفند و دی در اولویت اول از نظر

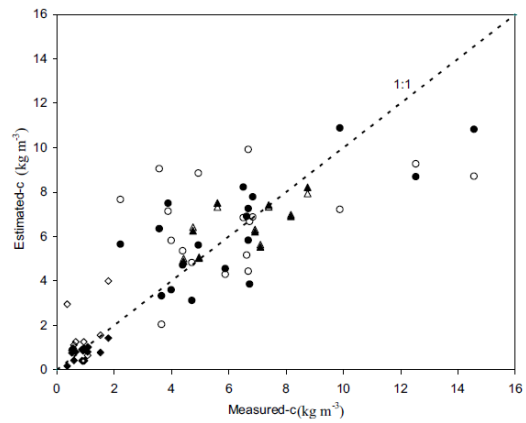


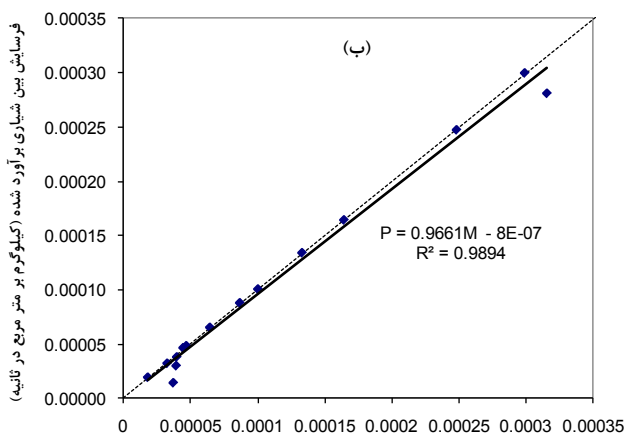
Figure 8. Estimated vs. measured sediment concentration. The square, triangle and circle symbols are for the Forest, Sandy and Quin soils respectively. Empty symbols are the results of Way I, and filled symbols are results of Way II.

شکل ۸- مقایسه مقادیر اندازه‌گیری شده و برآوردی غلظت رسوب با استفاده از مدل GUEST (داده‌ها مربوط به سه نمونه خاک مختلف هستند)

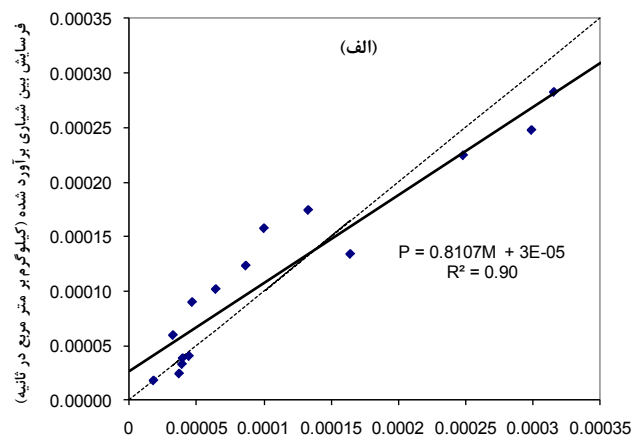
هیچ اطلاعاتی در مورد فرآیندها دخیل در پدیده مورد بررسی ارائه نمی‌دهند و اساساً دانش و اطلاعات ما را در زمینه مورد مطالعه ارتقاء نخواهند داد.

تلفیق مدل‌های فرسایش خاک با سنجش از دور و سامانه اطلاعات جغرافیایی

تمام عوامل موثر بر فرسایش در اراضی بالادست (دامنه‌ها و سطح حوضه‌ها) دارای تغییرات مکانی زیادی هستند. تغییرات مکانی توپوگرافی از بارزترین این عوامل است که البته امروزه با وجود نقشه‌های DEM و استفاده از GIS به راحتی و با دقت قابل قبول تعیین می‌شود. تعیین تغییرات مکانی پارامترهای اقلیمی و به تبع آن فرساینده‌گی باران نیز با استفاده از آمار ایستگاه‌های هواشناسی و انجام برخی محاسبات از یک سو و بهره‌گیری از روش‌های



فرسایش بین شیباری اندازه گیری شده (کیلوگرم بر متر مربع در ثانیه)



فرسایش بین شیباری اندازه گیری شده (کیلوگرم بر متر مربع در ثانیه)

شکل ۹- مقایسه کارایی مدل WEPP (الف) و ANFIS (ب) برای برآورد شدت فرسایش بین شیباری

خطر فرساینده‌گی قرار دارند. در پژوهشی دیگر صادقی و همکاران [۶۸] نشان دادند که بیشینه‌ی فرساینده‌گی در ایران در ماه‌های مارس، دسامبر و نوامبر رخ می‌دهد حال آن که کمینه آن طی ماه‌های جولای و اوت اتفاق می‌افتاد. گرمای لوشابی [۱۵] نیز چرخه‌های فرساینده‌گی باران را برای سه حوضه انتخابی سرخاب، لتیان و کسلیان مورد بررسی قرار داد و در هر سه حوضه، دو اوج در مقدار فرساینده‌گی باران و متوسط بارندگی ماهانه، یکی در اواخر پاییز و دیگری در اوایل بهار مشاهده نمود.

تغییرات مکانی و فصلی پوشش گیاهی به عنوان یکی دیگر از عوامل مهم و تاثیر گذار بر فرسایش خاک، نیز قابل توجه است و با توجه به میزان تاثیر آن، تعیین دقیق تغییرات این عامل در دقت برآورد (تعمیم) میزان فرسایش خاک در سطح دامنه و حوضه‌ها بسیار اثرگذار است. خوشبختانه با پیشرفت کمی و کیفی سنجنده‌ها و افزایش دقت مکانی آنها، استفاده از داده‌های سنجش از دور در این مورد کمک بسیار زیادی می‌کند. با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای می‌توان وضعیت پوشش گیاهی را به روش‌های مختلفی مانند تهیه نقشه‌های پوشش اراضی با استفاده از نمایه‌های گیاهی ارزیابی نمود، این موضوع نیز در مطالعات زیادی در خارج از کشور [به عنوان نمونه؛ ۴۷، ۴۹، ۷۵، ۷۶ و ۷۷] و نیز مطالعاتی در داخل کشور [به عنوان نمونه؛ ۵ و ۲۱] نشان داده شده است.

توجه به تغییرات مکانی و ویژگی‌های خاک نیز مسئله بسیار مهمی است. فرسایش‌پذیری خاک که متأثر از ویژگی‌های عمدتاً فیزیکی خاک است، به تبع تغییرات مکانی بسیار زیاد این ویژگی‌ها که خود معلول تغییرات عوامل خاکساز و مدیریتی است، بسیار زیاد است. در این مورد البته، مفهوم فرسایش‌پذیری خاک و چگونگی اندازه‌گیری و یا برآورد آن از روی ویژگی‌های خاک خود مسئله‌ای در خور توجه و نیازمند به بحث و بررسی فراوان است. علاوه بر این، سایر ویژگی‌های اثر گذار بر میزان رواناب از جمله نفوذپذیری نیز دارای تغییرات مکانی شدیدی است که تابع تغییر ویژگی‌های خاک، توپوگرافی و پوشش گیاهی است.

موضوع بررسی و پهنه‌بندی تغییرات مکانی ویژگی‌های خاک در دهه‌های اخیر بسیار مورد توجه خاکشناسان در سرتاسر دنیا بوده و پیشرفت‌های خوبی در این زمینه به دست آمده است. تغییرپذیری ویژگی‌های خاک را می‌توان با استفاده از روش‌های زمین‌آماری مانند نیم‌تغییرنما [۱۶] و یا سایر روش‌های تحلیل مکانی همانند خودهمبستگی [۵۸] کمی نمود. نمونه‌ای از بررسی تغییرات مکانی نفوذپذیری مطالعات سپاسخواه و عطایی [۷۰] و نیک‌قلیپور و همکاران [۲۰] است.

ارزیابی خطر فرسایش خاک در مقیاس حوضه به دلیل تغییرپذیری مکانی زیاد پارامترهای دخیل در آن، کار دشواری است. در چنین مواردی استفاده از ساختار شبکه‌ای GIS امکان پردازش سریع اطلاعات ورودی و نمایش این تغییرات مکانی را فراهم می‌سازد [۶۷]. از سوی دیگر همان طور که بیان شد، استخراج

اطلاعات و داده‌های مکانی توپوگرافی و پوشش گیاهی نیز به ترتیب با استفاده از DEM و تصاویر سنجش از دور با دقت‌های قابل قبولی امکان‌پذیر است. چنانچه داده‌های مورد نیاز خاک (مانند فرسایش‌پذیری و نفوذپذیری) نیز به صورت نقطه‌ای اندازه‌گیری و یا از نقشه‌های خاک در مناطقی که وجود دارد، استخراج شود، با بهره‌گیری از روش‌های آنالیز مکانی می‌توان تغییرات مکانی آن را کمی و پهنه‌بندی نمود. مدلی که می‌تواند با این سطح از اطلاعات در حد قابل قبولی برای ارزیابی میزان و خطر فرسایش در سطح دامنه و حوضه‌های آبخیز مورد استفاده قرار گیرد، مدل (USLE (RUSLE است. به طور کلی، تلفیق تکنولوژی‌های RS، GIS و روش‌ها و ابزارهای آنالیز مکانی با مدل (USLE (RUSLE، تخمین خطر فرسایش خاک را در مناطق بزرگ با دقت زیاد و هزینه‌های قابل قبول، امکان‌پذیر می‌سازد. ارزیابی میزان و خطر فرسایش با استفاده از روش ذکر شده به طور فزاینده‌ای در سطح دنیا (به عنوان نمونه؛ ۳۲، ۳۳، ۴۷، ۴۸، ۵۱ و ۶۰] و در مواردی در ایران (به عنوان نمونه؛ ۹ و ۲۱] مورد اقبال قرار گرفته است.

از بین مدل‌های فرایندی، مدل LISEM نیز مدلی توزیعی و تک‌رخدادی است که با GIS همخوانی پیدا کرده است. این مدل در حوضه‌های آبخیز بین ۱۰ تا ۳۰۰ هکتاری کاربرد دارد. مدل LISEM قادر به شبیه‌سازی اثرات کاربری فعلی زمین و اقدامات حفاظت خاک بر فرسایش و رسوب است. فرایندهایی که در LISEM بررسی می‌شوند عبارت از؛ بارش، برگاب، چالاب، نفوذ، جریان‌ات سطحی، جریان آبراهه‌ای، فرسایش توسط قطرات باران، فرسایش توسط جریان‌های سطحی و توان حمل جریان هستند. مدل LISEM از مدل‌های هولتان، گرین-آمپت (برای یک یا دولایه) و مدل SWATRE (حل عددی تفاضل محدود معادله ریچاردز) برای حل معادلات نفوذ آب به خاک استفاده می‌کند. در ضمن اثر چرخ‌های تراکتور و سطوح نفوذناپذیر نیز مد نظر قرار گرفته است. همچنین، این مدل برای شبیه‌سازی اثر چرخ تراکتور به عنوان یک کانال کوچک، گروه‌بندی فرسایش و رسوب، میزان هدررفت فسفر، نیترات و آمونیوم به صورت محلول و معلق و تشکیل و توسعه گالی نیز به کار می‌رود [۳۴، ۳۵، ۳۶ و ۴۵]. این مدل در ایران [۱۳، ۱۴ و ۶۱] نیز و عمدتاً برای برآورد رواناب مورد توجه قرار گرفته است.

جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

فرسایش خاک پدیده‌ای بسیار پیچیده است که در برگیرنده فرایندها و مکانیسم‌های مختلفی بوده و به شکل‌های متفلوتی از جمله ورقه‌ای، شیاری و خندقی رخ می‌دهد. عوامل گوناگونی بر روی این پدیده اثرگذار هستند که همه دارای تغییرات مکانی و زمانی بسیار زیادی بوده که باعث تغییرات مکانی و زمانی شدید فرسایش می‌شوند. ابزار مورد استفاده برای برآورد و پهنه‌بندی فرسایش خاک، مدل‌ها هستند که دارای انواع مختلفی هستند. مشهورترین مدل تجربی موجود، مدل (USLE (RUSLE است. همچنین مدل‌های

اهمیت است، هرچند در این مورد کورت استاندارد USLE به عنوان مبنا وجود دارد اما نباید فراموش کرد که فرض اساسی مدل USLE این بوده است که فرسایش بین‌شیاری و شیاری در این کورت رخ می‌دهد. در دامنه‌ها و سطح حوضه‌ها نیز هر دو نوع فرسایش رخ می‌دهند. اطمینان از پیش‌رفت فرسایش تا این مرحله بسیار مهم است زیرا میزان تلفات خاک بسیار وابسته به تشکیل شیاری است (شکل ۱۰). این موضوع نه تنها به دلیل تمرکز جریان و شدت این نوع فرسایش در مقایسه با فرسایش بین‌شیاری، بلکه به این دلیل است که انتقال تلفات خاک ناشی از فرسایش بین‌شیاری نیز عمدتاً از طریق شیاریها صورت می‌گیرد. بر این اساس تعیین آستانه تشکیل شیاری در شرایط اقلیمی کشور و تعیین ابعاد (به ویژه طول کورت) می‌تواند بسیار مهم باشد.

سپاسگزاری

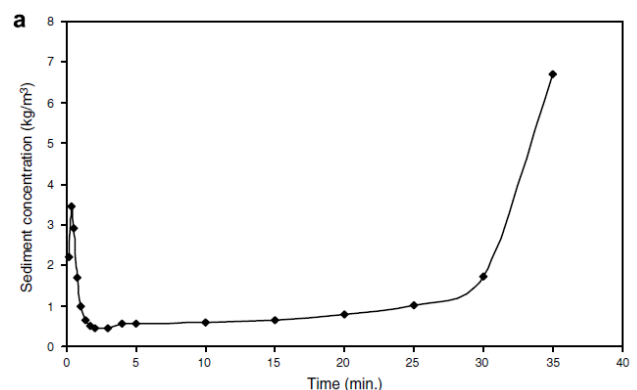
نگارنده بر خود لازم می‌داند که از پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری به دلیل برنامه‌ریزی و حمایت از برگزاری نشست علمی "مدیریت و تلفیق داده‌های حاصل از کورت‌های فرسایش در شرایط بارش طبیعی و شبیه‌سازی شده" که این مقاله برای ارائه در آن آماده گردید، ابراز دارد.

منابع

- ۱- اسدی، ح. ۱۳۸۴. بررسی فرآیندها و تئوری‌های پایه‌ای مدل‌های فرآیندی فرسایش خاک. رساله دکتری، دانشکده علوم کشاورزی، دانشگاه تهران.
- ۲- اسدی، ح. ۱۳۹۳. مدل و مدل‌سازی در فرسایش خاک. مجموعه مقالات کنگره ملی خاک و محیط زیست، ۸ و ۹ شهریور ۱۳۹۳، دانشگاه ارومیه، ارومیه.
- ۳- اسدی، ح. و اشرف‌زاده، ا. ۱۳۸۹. مقایسه کارایی مدل‌های فرآیندی و سیستم استنتاج فازی مبتنی بر شبکه تطبیقی در برآورد فرسایش بین‌شیاری در شرایط آزمایشگاهی. یازدهمین همایش علمی- پژوهشی دانشگاه گیلان، ۱۹ تا ۲۱ اردیبهشت ۱۳۹۰.
- ۴- اسدی، ح.، روحی پور، ح.، رفاهی، ح.، و شرفا، م. ۱۳۸۶. ارزیابی مدل WEPP برای برآورد فرسایش بین‌شیاری در شرایط آزمایشگاهی. مجله علوم کشاورزی ایران، ۳۸(۴): ۵۵۳ - ۵۶۳.
- ۵- اسلامی، ف.، اسدی، ح. و عرب‌خدری، م. ۱۳۹۲. ارزیابی مقایسه‌ای تغییرات دوره‌ای شاخص گیاهی با نوسانات تولید رسوب در حوضه آبخیز کسلیان. مجموعه مقالات سیزدهمین کنگره علوم خاک ایران، دانشگاه شهید چمران اهواز ۸-۱۰ بهمن‌ماه، اهواز، ایران.
- ۶- پناهی، ج. ۱۳۷۷. تعیین نمایه فرسایش‌زایی باران در جمهوری اسلامی ایران، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه شیراز، ۲۲۱ص.
- ۷- حکیم‌خانی، ش.، مهدیان، م.، ح. عرب‌خدری، م. و قربان‌پور، د. ۱۳۸۴. بررسی فرسایش باران در سطح کشور. سومین همایش ملی فرسایش و رسوب، مرکز تحقیقات حفاظت خاک و آبخیزداری.

فرآیندی مختلفی در حال توسعه و تکمیل شدن هستند. همه مدل‌ها نیازمند داده‌های اندازه‌گیری شده برای واسنجی و ارزیابی می‌باشند، اما نکته بسیار مهم این است که هر یک از این مدل‌ها بر اساس فرضیات و مبانی متفاوتی توسعه یافته و ممکن است نوع یا مکانیسم متفاوتی از فرسایش را شبیه‌سازی نمایند، بنابراین داده اندازه‌گیری شده برای هر یک دارای شرایط خاص مربوط به همان مدل است. از سوی دیگر مدل‌های فرآیندی به اطلاعات و داده‌های بسیار بیشتری برای واسنجی و ارزیابی نیاز دارند که نقصان یا خطا در هر داده به صورت تجمعی در کارایی نهایی مدل منعکس خواهد شد.

با توجه به موارد ذکر شده، اطلاع از سطح پیچیدگی مدل‌ها و نیز وضعیت اطلاعات و داده‌های موجود در سطح کشور شامل داده‌های مربوط به پوشش گیاهی، خاک، اقلیم و مدیریت از یک سو و داده‌های موجود و قابل دستیابی کورت‌های فرسایش در کوتاه و میان‌مدت از سوی دیگر، به نظر می‌رسد مدل USLE و شاید بعدتر RUSLE، بهترین گزینه برای ارزیابی و پهنه‌بندی میزان و خطر فرسایش در سطح دامنه‌ها و حوضه‌های آبخیز کشور باشد. یکی از مسائل شاید اساسی و مهم در این مورد، که نیازمند توجه و انجام اندازه‌گیری مزرعه‌ای در سطح کورت یا دامنه است، انتخاب شاخص فرسایش مناسب و/یا تصحیح یکی از شاخص‌های موجود است. هرچند که نیک‌کامی و مهدیان [۱۹] بر آن تاکید دارند، اما اینکه آیا EI_{30} واقعا شاخص مناسبی برای شرایط ایران است نیازمند بررسی‌های بیشتری است. مسئله اساسی دیگر فرسایش‌پذیری خاک است، بررسی‌های انجام شده نشان می‌دهد که در این مورد نیز استفاده از توابع موجود برای تخمین فرسایش‌پذیری به جای اندازه‌گیری مستقیم آن دارای خطا و غیر قابل اطمینان است. بر این اساس، ارزیابی و تعیین این دو عامل بر مبنای مجموعه‌ای از اندازه‌گیری‌های مزرعه‌ای هدفمند در اقلیم و خاک‌های مختلف کشور تحت بارش‌های طبیعی یا شبیه‌سازی شده با ابزارهای استاندارد و شناسنامه‌دار باید در اولویت قرار گیرد. در این راستا تعیین ابعاد کورت‌های صحرایی بسیار حائز



شکل ۱۰- تغییرات غلظت رسوب با زمان در فلوام آزمایشگاهی ۶ متری که در آن از زمان ۲۰ دقیقه به بعد تشکیل و توسعه شیاری داده است (Asadi و همکاران، 2007b)

- ۸- دادگرمی، ع. ۱۳۷۶. تعیین نمایه فرسایش‌زایی باران در حوزه دریاچه ارومیه. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تبریز، دانشکده کشاورزی، ۳۳۸ ص.
- ۹- زندگی، ج.، حبیب‌نژاد روشن، م.، و سلیمانی، ک. ۱۳۹۲. ارزیابی نقشه خطر فرسایش خاک و ارتباط آن با برخی عوامل محیطی (مطالعه موردی: حوزه آبخیز وازرود، مازندران). نشریه مرتع و آبخیزداری، ۶۶(۳): ۴۰۱-۴۱۵.
- ۱۰- سپاس‌خواه، ع. ر. ۱۳۷۳. تخمین ضریب فرسایش‌زایی باران در ایران. چهارمین کنگره علوم خاک ایران، ۶-۹ شهریور، دانشگاه صنعتی اصفهان، ص ۱۱۹.
- ۱۱- سرخوش، پ. ۱۳۷۴. تعیین نمایه فرسایش‌زایی باران در استان‌های فارس، بوشهر و کهگیلویه و بویر احمد. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه شیراز، ۱۸۹ ص.
- ۱۲- عرب‌خدری، م. ۱۳۹۳. مروری بر نرخ فرسایش آبی و تولید رسوب در ایران. نشریه ترویج و توسعه آبخیزداری، ۲(۴): ۲۳-۳۰.
- ۱۳- کلتی، آن.، بردی‌شیخ، و.، سعدالدین، ا. و ن. نورا. ۱۳۸۹. ارزیابی کارایی مدل فیزیکی LISEM به منظور برآورد سیل در حوضه معرف و زوجی کچیک استان گلستان. چهارمین همایش ملی فرسایش و رسوب، ۸ و ۹ اردیبهشت ۱۳۸۹، دانشکده منابع طبیعی و علوم دریایی دانشگاه تربیت مدرس، نور.
- ۱۴- کیانی، ف.، جلالیان، ا.، پاشایی اول، ع. و هسل، ر. ۱۳۸۶. اندازه‌گیری کمی میزان فرسایش خو رسوب با استفاده از مدل LISEM در اراضی لسی حوزه آبخیز پاسنگ استان گلستان. دهمین کنگره علوم خاک ایران، کرج ۴-۶ شهریور.
- ۱۵- گرامی لوشابی، ز. ۱۳۹۲. اثر نوسانات فصلی فرسایش‌دگی باران بر تغییرات زمانی رسوبدهی معلق. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده علوم کشاورزی دانشگاه گیلان.
- ۱۶- محمدی، ج. ۱۳۸۵. آمار مکانی (پدومتری). جلد دوم. انتشارات پلک.
- ۱۷- محمدی، م.ا.، و کاویان، ع. ۱۳۹۲. مروری بر مطالعات فرسایش خاک با تاکید بر مفهوم مقیاس. نشریه ترویج و توسعه آبخیزداری، ۱(۲): ۱۵-۲۵.
- ۱۸- مرادی، ح.، بهزادفر، م.، و صادقی، س.ح. ۱۳۸۵. بررسی ارتباط بین پارامترهای بارندگی و عامل فرسایش‌دگی باران در استان خوزستان. مجله علمی کشاورزی، ۲۹(۴): ۶۹-۸۳.
- ۱۹- نیک‌کامی، د. و م.ح. مهدیان. ۱۳۹۳. تهیه نقشه شاخص مناسب فرسایش‌دگی باران کشور. نشریه مهندسی و مدیریت آبخیز، جلد ۶(۴): ۳۶۴-۳۷۶.
- ۲۰- نیک‌قلب‌پور، م.، اسدی، ح.، و گرجی، م. ۱۳۹۲. تجزیه و تحلیل تغییرپذیری مکانی برخی از ویژگی‌های هیدرولیکی، فیزیکی و شیمیایی خاک در یک زمین‌نما. مجموعه مقالات سیزدهمین کنگره علوم خاک ایران، دانشگاه شهید چمران اهواز ۸-۱۰ بهمن‌ماه، اهواز.
- ۲۱- هنرمند، م.، اسدی، ح.، وظیفه‌دوست، م.، و موسوی، ع. ۱۳۹۰. ارزیابی خطر فرسایش خاک با استفاده از معادله جهانی تلفات خاک اصلاح شده، سامانه اطلاعات جغرافیایی و سنجش از دور در حوضه آبخیز ناورود. دوازدهمین کنگره علوم خاک ایران، دانشگاه تبریز ۱۲-۱۴ شهریورماه، تبریز.
- ۲۲- هنرمند، م.، اسدی، ح.، وظیفه‌دوست، م.، و موسوی، ع. ۱۳۹۰. بررسی شاخص فرسایش‌دگی باران در استان گیلان. دوازدهمین کنگره علوم خاک ایران، دانشگاه تبریز ۱۲-۱۴ شهریورماه، تبریز.
- 23- Ahmed S.I., Rudra R.P., Gharabaghi B., Mackenzie K. and Dickinson W.T. 2012. Within-storm rainfall distribution effect on soil erosion rate. ISRN Soil Science, 1-7, Article ID 310927.
- 24- Asadi, H., Ghadiri, H., Rose, C.W. and Rouhipour, H. 2007a. Interrill soil erosion processes and their interaction in low slopes. Earth Surface Processes and Landform, 32(5): 711-724.
- 25- Asadi, H., Ghadiri, H., Rose, C.W., Yu, B. and Hussein, J. 2007b. An investigation of flow-driven soil erosion processes at low streampowers. J. Hydrol. 342: 134-142.
- 26- Asadi, H., Moussavi, A., Ghadiri, H. and Rose, C.W. 2011. Flow-driven soil erosion processes and the size selectivity of sediment. Journal of Hydrology 406: 73-81.
- 27- Asadi, H., Rouhipour, H., Refahi, H.Gh. and Ghadiri, H. 2008. Testing a mechanistic soil erosion model for three selected soil types from Iran. JAST, 10(1): 79-91.
- 28- Beasley, D.B., Huggins, L. F. and Monke, E. J. 1980. ANSWERS: A model for watershed planning. Trans. of the ASAE, 23: 938-944.
- 29- Bennett, J. P. 1974. Concepts of mathematical modeling of sediment yield. Water Reso. Res. 10(3): 482-492.
- 30- Boardman, J. 2007. Soil erosion: the challenge of assessing variation through space and time. In, Goudie, A.S. and Kalvoda, J. (eds.) Geomorphological Variations. Nakladatelsti P3K, Prague. pp. 205-220. ISBN: 978-80-903584-6-1.
- 31- Boix-Fayos, C., Martínez-Mena, M., Arnau-Rosalén, E., Calvo-Cases, A., Castillo, V. and Albaladejo, J. 2006. Measuring soil erosion by field

- 41- Foster, G. R., Lane, L. J., Nowlin, J. D., Laflen, J. M. and Young, R. A. 1980. A model to estimate sediment yield from field-sized areas: Development of model, in *CREAMS: A Field Scale Model for Chemicals, Runoff and Erosion from Agricultural Management System*, edited by W. G. Knisel, Conserv. Res. Rep. 26, Chap. 3, pp 36-64, U.S. Dep. Of Agric., Washington, D. C.
- 42- Foster, G. R., Lane, L. J., Nowlin, J. D., Laflen, J. M. and Young, R. A. 1981. Estimating erosion and sediment yield on field-sized areas. *Trans. of the ASAE*, 24: 1253-1263.
- 43- Hairsine, P. B. and Rose, C. W. 1992a. Modeling water erosion due to overland flow using physical principles, I. Sheet flow. *Water Reso. Res.* 28(1): 237-243.
- 44- Hairsine, P. B. and Rose, C. W. 1992b. Modeling water erosion due to overland flow using physical principles, II- Rill flow. *Water Reso. Res.* 28(1): 245-250.
- 45- Hessel, R., Jetten, V., Baoyuan, L., Yan, Z. and Stole, J. 2003. Calibration of the LISEM model for a small Loess Plateau catchment. *Catena* 54: 235-254.
- 46- Jetten, V. 2002. LISEM User manual, version 2.x. Department of Physical Geography, Utrecht University, The Netherlands.
- 47- Kouli, M., Souplos, P. and Vallianatos, F. 2009. Soil erosion prediction using the revised universal soil loss equation (RUSLE) in a GIS framework, Chinia, Northwestern Crete, Greece. *Environ. Geol.* 57: 483-497.
- 48- Krishna Bahadur, K.C. 2009. Mapping soil erosion susceptibility using remote sensing and GIS: a case of the Upper Nam Wa Watershed, Nan Province, Thailand. *Environ. Geol.* 57, 695-705.
- 49- Maxwel, S. K., Nichols, J.R., Ward, M.H. and Hoffer R.M. 2003. An automated approach to mapping cover from Landsat Imagery, *Computers and Electronics in agriculture*, 43:14, 3-54.
- 50- Meyer, L. D. and Wischmeier, W. H. 1969. Mathematical simulation of the process of soil erosion by water. *Trans. of the ASAE*, 12(6): 754-758, 762.
- 51- Millward, A.A. and Mersey J.E. 1999. Adapting the RUSLE to model soil erosion potential in a plots: Understanding the sources of variation. *Earth-Science Reviews* 78: 267-285.
- 32- Borrelli, P., Märker, M., Panagos, P. and Schütt, B. 2014. Modeling soil erosion and river sediment yield for an intermountain drainage basin of the Central Apennines, Italy. *Catena* 114: 45-58.
- 33- Chen, T., Niu, R.Q., Li, P.X., Zhang, L.P. and Du, B. 2011. Regional soil erosion risk mapping using RUSLE, GIS, and remote sensing: a case study in Miyun Watershed, North China. *Environ. Earth Sci.* 63, 533-541.
- 34- de Barros, C.A.P., Minella, J.P.G., Dalbianco, L. and Ramon, R. 2014. Description of hydrological and erosion processes determined by applying the LISEM model in a rural catchment in southern Brazil. *J Soil Sediment.* 14:1298-1310.
- 35- De Roo, A. and Jetten, V. 1999. Calibrating and validating the LISEM model for two data sets from the Netherlands and South Africa. *Catena* 37: 477-493.
- 36- De Roo, A., Wesseling C. and Ritsema, C. 1996. LISEM: A Single-event physically based hydrological and soil erosion model for drainage basins. I: Theory, input and output. *Hydrological Processes.* 10: 1107-1117.
- 37- Dunkerley, D. 2012. Effects of rainfall intensity fluctuations on infiltration and runoff: rainfall simulation on dryland soils, Fowlers Gap, Australia. *Hydrological Processes*, 26: 2425-2439.
- 38- Ellison, W. D. 1947. Soil erosion studies. *Agricultural Engineering* 28, 145-146, 197-201, 245-248, 297-300, 349-351, 353. In: many references e.g. Foster 1982; Meyer and Wischmeier, 1969.
- 39- Foster, G. R. 1982. Modeling the soil erosion process. Chapter 8 In: C. T. Haan, H. P. Johnson, and D. L. Brakensiek, (eds.), *Hydrologic Modeling of Small Watersheds*, ASAE, St. Joseph, MI, pp 297-382.
- 40- Foster, G. R., Flanagan, D. C., Nearing, M. A., Lane, L. J., Risse, M. and Finkner, S.C. 1995. Hillslope erosion component. Chapter 11 In: D. C. Flanagan, and M. A. Nearing (eds.), *USDA-Water Erosion Prediction Project, Technical Documentation*. NSERL. Report No. 10, National Soil Erosion Research Laboratory, West Lafayette, Indiana.

under Climate Change, 30 August - 10 September 2010, International Center for Theoretical Physics, Trieste – Italy.

63- Renard, K.G., Foster, G.R., Weesies, G.A., McCool, D.K. and Yoder, D.C. 1997. Predicting soil erosion by water: a guide to conservation planning with the revised universal soil loss equation (RUSLE). Agriculture Handbook No. 703, USDA, Washington, DC, USA. 404 p.

64- Rodríguez-Caballero, E., Cantón, Y., Chamizo, S., Afana, A. and Solé-Benet, A. 2012. Effects of biological soil crusts on surface roughness and implications for runoff and erosion. *Geomorphology*, 145–146:81-89.

65- Rose, C.W., Williams, J. R., Sander, G. C. and Barry, D. A. 1983. A mathematical model of soil erosion and deposition processes: I. Theory for a plane land element. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 47:991-995.

66- Rouhipour, H., Ghadiri, H. and Rose, C.W. 2006. Relative contribution of flow-driven and rainfall-driven erosion processes to sediment concentration with their interaction. *Australian Journal of Soil Research* 44: 503–514.

67- Saavedra, C. 2005. Estimating spatial patterns of soil erosion and deposition in the Andean region using geo-information techniques, a case study in Cochabamba, Bolivia. PhD thesis, Wageningen University, Netherlands, 244p.

68- Sadeghi, S.H.R., Moatamednia, M. and Behzadfar, M. 2011. Spatial and temporal variation in the rainfall erosivity factor in Iran. *Journal of Agricultural Science and Technology* 13: 451-464.

69- Seeger, M. 2007. Uncertainty of factors determining runoff and erosion processes as quantified by rainfall simulation. *Catena* 71: 56-67.

70- Sepaskhah, A.R. and Ataee, J. 2004. A simple model to determine saturated hydraulic conductivity for large-scale subsurface drainage. *Biosystems Engineering* 89(4): 505-513.

71- Shi, Z. H., Fang, N. F., Wu, F. Z., Wang, L., Yue, B. J. and Wu, G. L. 2012. Soil erosion processes and sediment sorting associated with transport mechanisms on steep slopes. *J. Hydrology*, 454–455: 123–130.

mountainous tropical watershed. *Catena* 38: 109–129.

52- Misra, R. K. and Rose. C. W. 1996. Application and sensitivity analysis of process-based erosion model GUEST. *Euro. J. of Soil Sci.* 47:593-604.

53- Moncada, M.P., Gabriels, D., Beuf, K.D., Figueroa, R. and Cornelis, W. M. 2014. A comparison of methods to assess susceptibility to soil sealing. *Geoderma*, 226–227: 397-404.

54- Morgan, R. P. C. 2005. *Soil Erosion and Conservation*. Third Edition, Blackwell Publishing.

55- Morgan, R. P. C., Quinton, J. N., Smith, R. E., Govers, G., Poesen, J. W. A., Auerswald, K., Chisci, G., Torri, D. and Styczen, M. E. 1998. The European soil erosion model (EUROSEM): A dynamic approach for predicting sediment transport from fields and small catchments. *Earth Surface Processes and Landforms*, 23: 527-544.

56- Nearing, M. A., Foster, G. R., Lane, L. J. and Finkner, S. C. 1989. A process-based soil erosion model for USDA-Water Erosion Prediction Project Technology. *Trans. of the ASAE*, 32(5): 1587-1593.

57- Nearing, M. A., Govers, G. and Norton, L.D. 1999. Variability in soil erosion data from replicated plots. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 63:1829-1835.

58- Nielsen, D.R. and Wendroth, O. 2003. *Spatial and Temporal Statistics (Sampling field soils and their vegetation)*. Geoscience publisher, Germany.

59- Parsons, A.J. and Stone, P.M. 2006. Effects of intra-storm variations in rainfall intensity on interrill runoff and erosion. *Catena* 67: 68–78.

60- Prasuhn, V., Linigerb, H., Gisler, S., Herweg, K., Candinas, A. and Clément, J.P. 2013. A high-resolution soil erosion risk map of Switzerland as strategic policy support system. *Land Use Policy* 32, 281-291.

61- Rahmati, M., Neyshabouri, M.R., Fakhelifard, A., Mohammadi-Oskouei, M., Ahmadi, A. and Vahedberdi Sheikh, J. 2013. Rainfall-runoff prediction using LISEM model in Lighvan watershed, North West of Iran. *Tech. J. Engin. App. Sci.*, 3(16): 1893-1901, 2013

62- Reichardt, K., Bacchi, O.O.S., Timm, L.C. and Bortolotto, R.P. 2010. *Scaling in soil physics*. College on Soil Physics; Soil Physical Properties and Processes

- 77- Vrieling, A. 2006. Satellite remote sensing for water erosion assessment: A review. *Catena* 65(1): 2-18.
- 78- Wang, L., Shi, Z.H., Wang, J., Fang, N.F., Wu, G.L. and Zhang, H.Y. 2014. Rainfall kinetic energy controlling erosion processes and sediment sorting on steep hillslopes: A case study of clay loam soil from the Loess Plateau, China. *J. Hydrol.* 512: 168-176.
- 79- Whishmeier, W.H. and Smith, D.D. 1978. Predicting rainfall erosion losses- a guide to soil conservation planning. U.S Department of Agriculture, Agriculture, Handbook No.537.
- 80- Yu, B. and Rose, C.W. 1999. Application of a physically based soil erosion model, GUEST, in the absence of data on runoff rates, I. Theory and methodology. *Aus. J. of soil Res.* 37: 1-11.
- 72- Stoof, C. R., Ferreira, A. J.D., Mol, W., Van den Berg, J., De Kort, A., Drooger, S., Slingerland, E. C., Mansholt, A.U., Ferreira, C.S.S. and Ritsema, C. J. 2015. Soil surface changes increase runoff and erosion risk after a low-moderate severity fire. *Geoderma*, 239-240: 58-67.
- 73- Stroosnijder, L. 2005. Measurement of erosion. Is it possible? *Catena* 64: 162-173.
- 74- Terry, J. P. 1998. A rainsplash component analysis to define mechanisms of soil detachment and transportation. *Aus. J. Soil Res.* 36: 525-542.
- 75- Van der Knijff, M., Jones R.J.A. and Montanarella, L. 2000. Soil erosion risk assessment in Europe. EUR 19044 EN. Office for Official Publications of the European Communities, Luxembourg, 34p.
- 76- Van der Knijff, M., Jones, R.J.A. and Montanarella, L. 1999. Soil erosion risk in Italy. EUR19022 EN. Office for Official Publications of the European Communities, Luxembourg, 54p.

*Abstract***Scaling in soil erosion (processes, scale effect and modeling of soil erosion)**H. Asadi¹

Received: 2014/12/22 Accepted: 2015/04/22

This paper was prepared in order to present and assess the methodologies for management and synthesis of the data obtained from natural and simulated rainfalls, and for data extension to hillslope and catchment. Thus, the factors affecting the accuracy and variability of the data were firstly pointed out and the necessity of the scaling was proposed. Scaling is defined as a set of operations to find scale factors to relate characteristics of one system to corresponding characteristics of another system. Determining of the scale factors is based on the concepts of dimensional analysis. The soil erosion types and processes were then mentioned, and the process-based soil erosion models were briefly analyzed which are based on soil erosion processes and including scale factors. The models are actually data management, synthesis and extension tools. Therefore, the practical criteria were mentioned for model choice. Finally, considering the world experience and the country situation of data and information availability, it was suggested to use the combination of RUSLE and remote sensing based on a series of field data for long term evaluation and mapping of soil erosion across the country at hillslope and catchment scales.

Keywords: Dimensional analysis, model validation, erosion processes, USLE

1. Associate professor, Soil Sci. Dep., Faculty of Agricultural Sciences, University of Guilan, Rasht, Iran, asadi@guilan.ac.ir