نشریه پژوهش‌های حفاظت آب و خاک
جلد بیست و دوم، شماره چهارم، ۱۳۹٤
http://jwsc.gau.ac.ir

مدل‌سازی برخی از عوامل مؤثر بر فرسایش شیاری با استفاده از منطق فازی

سیده‌مطهره حسینی[۱]، *ابوالفضل مساعدی[۲]، علی گلکاریان[۳] و کمال‌الدین ناصری[۳]

[۱]دانش‌آموخته کارشناسی ارشد گروه مرتع و آبخیزداری، دانشگاه فردوسی مشهد، [۲]استاد گروه مرتع و آبخیزداری، دانشگاه فردوسی مشهد، [۳]استادیار گروه مرتع و آبخیزداری، دانشگاه فردوسی مشهد

تاریخ دریافت: ۹۲/۱۰/۲۸ ؛ تاریخ پذیرش: ۹۳/۲/۱۵

چکیده

سابقه و هدف: فرسایش شیاری علاوه بر تخریب خاک و کاهش پتانسیل اکوسیستم‌های مرتعی، باعث بروز شرایط نامطلوب برای استقرار گیاهان می‌شود. بنابراین شناخت، مدل‌سازی و پیش‌بینی این نوع فرسایش در مدیریت اکوسیستم‌های مرتعی و منابع طبیعی ضروری به‌نظر می‌رسد. یکی از چالش‌های بزرگ در فرآیند برنامه‌ریزی و مدیریت اکوسیستم‌های طبیعی از جمله مراتع، عدم درک پیچیدگی‌ها و پویایی این اکوسیستم‌ها در مدل‌های مرسوم می‌باشد، اما براساس ایده اساسی تئوری فازی می‌توان این محدودیت را وارد مدل نمود. این پژوهش با هدف طراحی و بررسی عملکرد مدل پیش‌بینی فرسایش شیاری به کمک سیستم استنتاج فازی در بخشی از مراتع منطقه احمدآباد مشهد انجام گرفته است.

مواد و روش‌ها: با استقرار ترانسکت‌های ۵۰ متری در دامنه‌های تپه‌ماهوری منطقه احمدآباد مشهد با فرسایش شیاری کاملًا مشهود، در هر یک از طول‌های مختلف دامنه، پارامترهای مؤثر در شکل‌گیری شیارها شامل: تاج‌پوشش گیاهی، پوشش سطح زمین، سنگریزه سطح زمین، شن، سیلت و رس موجود در خاک، شیب و اثر مشترک طول شیب و مقدار شیب تعیین شدند. فراوانی شیارها، عرض و عمق آن‌ها اندازه‌گیری و اندازه سطح مقطع شیارها با توجه به شکل آن‌ها، محاسبه شد. سپس با استفاده از آزمون گاما، ترکیب بهینه متغیرهای "درصد سنگریزه سطح زمین"، "اثر مشترک طول شیب و درصد شیب" و "درصد سیلت موجود در خاک" به‌عنوان عوامل ورودی و "سطح مقطع شیار در واحد طول" به‌عنوان متغیر خروجی (تابع)، به‌منظور مدل‌سازی فازی انتخاب شد. ۹ ترکیب متنوع از توابع عضویت به‌منظور فازی‌سازی متغیرهای ورودی و خروجی با ۵ روش غیرفازی‌ساز با استفاده از روابط ترکیب ماکزیمم- مینیمم فازی مورد سعی و خطا قرار گرفتند، تا مدلی انتخاب شود که علاوه بر کوچک بودن مقدار IPE، از تعمیم‌پذیری مناسبی نیز برخوردار باشد.

یافته‌ها: نتایج نشان دادند که روش دفازی کوچک‌ترین ماکزیمم (SOM) با کم‌ترین میزان IPE روش مناسبی برای غیرفازی‌سازی نتایج پیش‌بینی فرسایش در مدل‌های فازی ساخته‌شده می‌باشد، پس از آن روش میانگین ماکزیمم (MOM) با کم‌ترین میزان IPE در اولویت دوم استفاده قرار گرفت. در تمامی روش‌های دفازی‌سازی، به‌جز روش

* مسئول مکاتبه: mosaedi@um.ac.ir

بزرگ‌ترین ماکزیمم، مدل‌های فازی با ترکیب توابع عضویت "گوسی و ذوزنقه"، "گوسی ۲ و ذوزنقه" و تابع عضویت "گوسی ۲" جزء مدل‌های منتخب از نظر کم‌ترین میزان IPE شناخته شده‌اند. آن‌چه که در میان مدل‌های بهینه قابل‌توجه می‌باشد، حضور تابع گوسی به تنهایی یا در ترکیب با سایر توابع است. همچنین نتایج نشان دادند که در مدل‌سازی فرسایش شیاری، استفاده از توابع نرم‌تر نظیر توابع گوسی نتایج بهتری نسبت به توابع تیز و ساده نظیر ذوزنقه و مثلث به دنبال دارد. همچنین براساس نتایج به‌دست آمده، اگر تنها سادگی مدل مد نظر باشد ترکیب دو تابع ذوزنقه و مثلث از نتایج بهتری نسبت به استفاده از هر یک به تنهایی، برخوردار است.

نتیجه‌گیری: تابع عضویت گوسی با روش دفازی کوچک‌ترین ماکزیمم به‌عنوان مدل بهینه در پیش‌بینی فرسایش شیاری در منطقه احمدآباد مشهد انتخاب شد.

واژه‌های کلیدی: تابع عضویت، منطق فازی، فرسایش شیاری، مرتع، احمدآباد مشهد

مقدمه

آب و خاک مهم‌ترین منابع ملی هر کشوری محسوب می‌شوند. امروزه خاک یکی از مهم‌ترین منابعی است که می‌تواند بسیاری از نیازهای جمعیت امروزه جهان را برآورده سازد. در این راستا یکی از مهم‌ترین مسایل و مشکلاتی که در زمینه استفاده مفید از خاک به‌وجود می‌آید، مسأله فرسایش آن است. فرسایش[1] فرایندی است که طی آن ذرات خاک از بستر اصلی خود جدا شده و به کمک یک عامل انتقال‌دهنده به مکان دیگر حمل می‌شوند. فرسایش شیاری از جمله فرسایش‌های آبی روی دامنه است که در اثر نیرو و انرژی آب ایجاد می‌گردد (21). گسترش ابعاد شیارها با تمرکز بیش از پیش جریان آب، آبراهه‌ها و خندق‌هایی را ایجاد می‌کند که علاوه بر تولید حجم زیادی از رسوب، به هدررفت خاک، کاهش حاصلخیزی آن، تخریب اراضی و بیابانی‌شدن می‌انجامد. بنابراین، ارزیابی مناسب عوامل اصلی فرسایش شیاری، اندازه‌گیری و برآورد دقیق شدت آن و پیش‌بینی این نوع فرسایش، در انتخاب راهکارهای کاهش و کنترل آن موثر است.

با توسعه و تخصصی‌شدن علوم، به‌ویژه علوم تجربی، پژوهش‌های امروزی حول مدل‌ها و قوانین مربوط به مدل‌ها، گسترش یافته‌اند. مدل‌ها مجموعه‌ای از کاربردی‌ترین یافته‌های علوم مختلف هستند که توان ارزیابی و پیش‌بینی پدیده‌های مختلف را فراهم می‌سازند. مدل‌سازی فرآیندهای فرسایش و رسوب، از جنبه‌های گوناگون مورد بررسی واقع شده‌اند، تجربه نشان داده است که این مدل‌ها در کنار نقاط قوت، دارای نقاط ضعف مهمی نیز هستند. ناتوانی بسیاری از مدل‌های موجود در بررسی ابهامات و عدم قطعیت‌ها، قیود و متغیرهای زبانی، روابط غیرخطی بین متغیرها که ویژگی ذاتی سیستم‌های فرسایش هستند، همچنین پیچیدگی و پویایی اکوسیستم‌های طبیعی و نیاز بسیاری از این مدل‌ها به اطلاعات فراوان، پارامترهای گوناگون و واسنجی وقت‌گیر آن‌ها، رویکرد به تئوری فازی[2] و سایر مدل‌های هوشمند را به‌عنوان تکنیک‌های جدید و ابزاری توانمند در فرآیندهایی پیچیده نظیر پیش‌بینی فرسایش، توجیه‌پذیر می‌نماید.

1- Erosion

2- Fuzzy Theory

سیستم استنتاج فازی[1] ابزاری توانمند جهت حل مسایل مربوط به سیستم‌های غیرخطی و پیچیده‌ای که درک آن‌ها مشکل و یا مسایلی که وابسته به استدلال، تصمیم‌گیری و استنباط بشری می‌باشند، به‌شمار می‌آید (12). به‌منظور ارزیابی دقیق درجه تأثیرگذاری هر یک از عوامل مؤثر بر فرسایش شیاری و شناخت بیش‌تر الگوی فرسایش شیاری می‌توان از منطق فازی استفاده نمود. الگوی مذکور به‌دلیل در نظر گرفتن محدوده‌ای از اعداد به‌جای اختصاص به یک عدد قطعی برای وزن‌دهی به عوامل، می‌تواند تجزیه و تحلیل دقیق‌تری را از نقش عوامل طبیعی و انسانی ارائه نماید. بنابراین تکنیک فازی به خوبی می‌تواند با استفاده از متغیرهای زبانی و عادی روزمره که در توصیف پدیده‌های طبیعی به‌کار می‌روند، به مدل‌سازی این پدیده‌ها پرداخته و نتایج را به طرف قضاوتی درست‌تر و واقعی‌تر سوق دهد.

با توجه به بررسی‌های صورت گرفته، مدل‌های اندکی برای برآورد فرسایش شیاری وجود دارند که غالباً پیچیدگی‌ها یا محدودیت‌های خاص خود را دارند و فاقد توانایی مدل‌سازی متغیرهای کیفی می‌باشند، در حالی‌که توانایی منطق فازی به لحاظ سهولت بیان و تنوع متغیرها، سبب ارجحیت آن می‌شود. از سویی دیگر، روش‌های فازی در علوم منابع طبیعی به‌ویژه در زمینه فرسایش کم‌تر مورد استفاده قرار گرفته‌اند. پژوهشگرانی هم‌چون توری و همکاران (1997)، میترا و همکاران (1998)، کومار و همکاران (2000) و لارک (2000)، در موضوعات مختلف فرسایش خاک، تئوری مجموعه‌های فازی را به‌کار گرفته‌اند (27, 17, 13, 14). ترن و همکاران (2002) در ایالات متحده آمریکا به‌منظور بررسی ارتباط هر یک از عوامل یا فاکتورهای موجود در مدل RUSLE با هدررفت خاک، از تئوری مجموعه‌های فازی استفاده نمودند. نتایج ایشان نشان داد که مدل‌سازی با اعمال رویکرد منطق فازی به مدل RUSLE نسبت به مدل‌سازی به روش سنتی آماری، قوی‌تر می‌باشد (29). روش مناسب دفازی‌سازی در پژوهش وی کوچک‌ترین ماکزیمم شناخته‌شد که بر طبق بررسی‌های ایشان با نتایج پژوهش ترن (1999) مطابقت دارد (28).

تیفر و همکاران (2003)، منطق فازی را به‌منظور تخمین بار رسوب از سطح خاک لخت به‌کار گرفتند و کارایی آن را با مدل شبکه عصبی مصنوعی و مدل‌های فیزیکی مقایسه نمودند. ایشان به این نتیجه رسیدند که استفاده از مدل فازی تحت شرایط بارندگی‌های شدید در شیب‌های متفاوت بهتر است و همچنین در شیب‌های زیاد دامنه، تحت بارندگی‌هایی با شدت‌های متفاوت، مدل فازی کارایی بهتری در توضیح قابلیت فرسایش خاک و میزان رسوب دارد (26). کیسی و همکاران (2006) با بهره‌گیری از مدل‌های فازی و رگرسیون آماری، رسوبات معلق رودخانه‌های واقع در ایالات متحده آمریکا را برآورد نمودند. مقایسه نتایج به‌دست آمده از مدل‌های یادشده با داده‌های به‌دست آمده از اندازه‌گیری صحرایی رسوبات معلق، بیانگر این بود که مقادیر ارائه شده توسط مدل فازی به مقادیر دیده شده نزدیک‌تر بوده و از خطای آماری کم‌تری برخوردار می‌باشند (11). مهدیان و همکاران (2013) از منطق فازی در برآورد مقادیر غیردقیق شاخص فرسایندگی باران در حوزه آبخیز دریای خزر استفاده نمودند، ایشان از تابع عضویت گوسی برای فازی‌سازی متغیرهای ورودی و خروجی استفاده نمودند و روش دفازی مرکز ثقل را به‌منظور غیرفازی سازی متغیر خروجی به‌کار بردند (16). صمدزاده و حدادی (2010) به‌منظور ارزیابی میزان فرسایش‌پذیری و رسوب‌زایی در حوضه آبخیز پیله‌رود اردبیل از تکنیک منطق فازی در محیط GIS

1- Fuzzy Inference System (FIS)

استفاده نمودند. مدل فازی ایشان شامل دو پارامتر ورودی به‌صورت نقشه‌های کاربری اراضی و شیب حوضه و پارامتر خروجی، نقشه تخمین فرسایش خاک و برآورد آن می‌باشد. ایشان در فازی‌سازی نقشه‌های مورد نظر از تابع عضویت ذوزنقه‌ای استفاده نموده‌اند. مدل پیش‌بینی منطق فازی در این پژوهش، کلاس‌های فرسایشی مشابه با روش پسیاک[1] را برای منطقه مورد نظر در برداشت (24). دهقانی و همکاران (2013) در پژوهشی با عنوان اولویت‌بندی مکانی عملیات کاهش سیل و کنترل فرسایش در حوزه آبخیز فورگ نشان دادند که تلفیق ابزارهای GIS با روش‌های منطق فازی دقت محاسبات را به‌نحو چشمگیری افزایش می‌دهد (6). بلانکو و همکاران (2009) با استفاده از تئوری مجموعه فازی، مدل فازی جدیدی برای ارزیابی اثرات زیست‌محیطی ارائه دادند که قابلیت ادغام کامل اطلاعات کمی وکیفی را دارد (5). با بررسی‌های صورت‌گرفته، پژوهش‌هایی در ارتباط با مقایسه مدل‌های مختلف فازی براساس پارامترهای متعدد یک سیستم استنتاج فازی به‌منظور دست‌یابی به حالت بهینه در هر یک از این پارامترها در مدل‌سازی فرسایش به‌ویژه فرسایش شیاری مشاهده نشد.

همان‌طورکه بیان شد در داخل کشور، منطق فازی در زمینه مطالعات فرسایش و رسوب، بیش‌تر در محیط GIS به‌منظور تولید نقشه‌های طبقه‌بندی فرسایش به‌صورت مطالعات موردی به‌کار گرفته شده است. با بررسی سابقه پژوهش در ارتباط با کاربرد منطق فازی در موضوعات مختلف مرتع، تنها پژوهش‌های اندکی در خارج از کشور پیرامون مباحث مدیریتی و تولید نقشه‌های پوشش گیاهی یا حاصلخیزی خاک با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای و نقشه‌های رستری با کاربرد تکنیک فازی در نرم‌افزارهای مختلف سنجش از دور به انجام رسیده است. آزادی‌نصرآباد و همکاران (2009) در تعیین نرخ واقعی دام‌گذاری، در سه منطقه از استان فارس از مدل فازی استفاده نمودند. نتایج ایشان نشان داد که مدل فازی از انعطاف‌پذیری بالایی نسبت به روش‌های آماری موجود برخوردار است و منطق فازی ابزاری جدید برای مدیریت و پیش‌بینی پایداری کل مراتع محسوب می‌شود (3). اکبرپور و همکاران (2006) نیز با مقایسه کارایی دو روش فازی و حداکثر احتمال، اقدام به تهیه نقشه کاربری اراضی مراتع حوزه آبریز کامه نمودند و در این زمینه، روش فازی را دارای کارایی بالا معرفی نمودند (2).

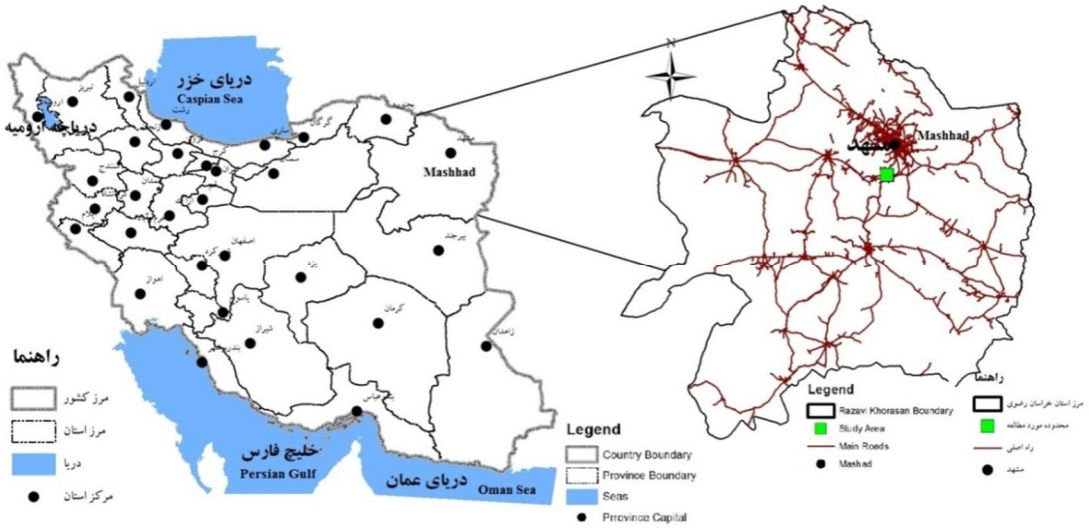
یکی از عوامل تخریب خاک در دامنه‌های تپه‌ماهوری منطقه احمدآباد مشهد، فرسایش شیاری است. به‌عبارت دیگر شکل‌گیری این نوع فرسایش در این دامنه‌ها، منجر به از دست رفتن حجم زیادی از خاک و ایجاد جریان آب توسط شبکه شیارها می‌شود که علاوه بر کاهش پتانسیل اکوسیستم، منجر به افزایش استرس آب در گیاهان در حال رشد و بروز شرایط نامطلوب برای استقرار آن‌ها می‌شود. با توجه به این‌که تاکنون، مطالعه‌ای در بررسی علل و عوامل فرسایش شیاری در این منطقه انجام نشده است، بنابراین شناخت و عملکرد این نوع فرسایش، جهت مدیریت و به حداقل رساندن هدررفت خاک، ضروری به‌نظر می‌رسد. ناتوانی بسیاری از مدل‌های موجود در بررسی ابهامات و عدم‌قطعیت‌ها، قیود و متغیرهای زبانی، روابط غیرخطی بین متغیرها، همچنین پیچیدگی و پویایی اکوسیستم‌های طبیعی، استفاده از منطق فازی را در فرآیندهایی نظیر پیش‌بینی و مدل‌سازی فرسایش توجیه‌پذیر می‌نماید. با توجه به این‌که از سیستم استنتاج فازی می‌توان به‌عنوان یک مدل پیش‌بینی برای شرایطی که داده‌های ورودی و خروجی دارای عدم‌قطعیت باشند، استفاده نمود و روش‌های کلاسیک پیش‌بینی نظیر رگرسیون نمی‌توانند

1- PSIAC

به‌خوبی عدم قطعیت‌های موجود در داده‌ها را در نظر بگیرند، این پژوهش با هدف طراحی و بررسی عملکرد مدل پیش‌بینی فرسایش شیاری به کمک سیستم استنتاج فازی در بخشی از مراتع منطقه احمدآباد مشهد انجام گرفته است.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه: منطقه احمدآباد، در حدود ٦٠ کیلومتری جنوب‌غربی شهر مشهد، در مسیر جاده مشهد به نیشابور قرار دارد. این منطقه بر روی سازند مارن (مارن قرمز، قهوه‌ای و دارای مقادیر زیاد آهک و رس) و کنگلومرا واقع شده است. حساسیت منطقه به فرسایش متوسط تا زیاد بوده و توپوگرافی عمومی آن تپه‌ماهورهای کم ارتفاع می‌باشد. منطقه مورد مطالعه در محدوده طول شرقی ۵۹ درجه و ۲۸ دقیقه تا ۵۹ درجه و ۳۵ دقیقه و عرض شمالی ۳۵ درجه و ۵۸ دقیقه تا ٣٦ درجه قرار گرفته است. متوسط بارندگی سالیانه منطقه حدود ۲۵۱ میلی‌متر برآورد شده است که عمدتاً به‌صورت باران می‌باشد. با توجه به‌میزان بارندگی و دمای متوسط محاسبه‌شده، اقلیم آن، براساس روش دومارتن، نیمه‌خشک می‌باشد. سیمای پوشش گیاهی منطقه، از تنوع کمی برخوردار است. همچنین میزان پوشش گیاهی در همه سایت‌های مطالعاتی منطقه مذکور پراکنده و اندک است و بیش‌تر شامل بوته‌زارهایی است که می‌توان آن‌ها را در دسته پوشش‌های نزدیک به سطح زمین دانست. موقعیت محدوده مورد مطالعه در کشور، استان خراسان رضوی و شهرستان مشهد در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱- موقعیت محدوده مورد مطالعه در کشور، استان خراسان‌رضوی و شهرستان مشهد.

Figure 1. Location of the study area in Iran, Khorasan Razavi province and Mashhad city.

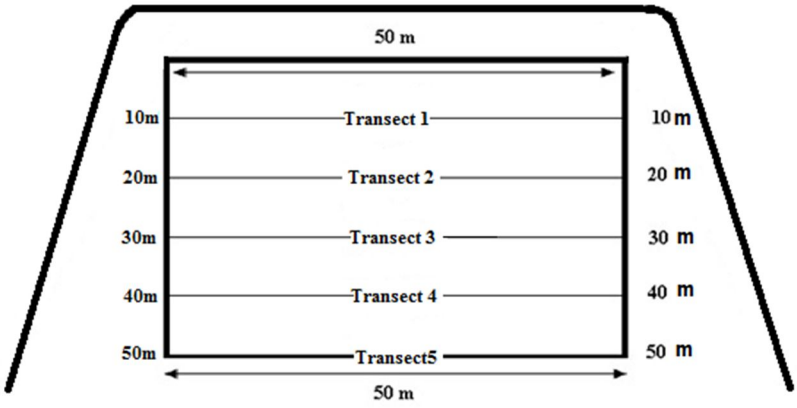
انتخاب مکان‌های مطالعاتی: سایت‌های مطالعاتی (۷ سایت) در داخل منطقه مورد مطالعه، شامل دامنه‌هایی با طول متفاوت و دارای گرادیانی از درصد شیب (عامل مؤثر بر سرعت رواناب، انرژی جنبشی آن و پایداری خاک)، طول شیب (عامل مؤثر بر قدرت فرسایندگی رواناب و حجم و سرعت آن)، میزان پوشش سطح زمین (عامل مؤثر بر جذب انرژی جنبشی باران، سرعت حرکت رواناب و ایجاد انحراف

در مسیر آن، نفوذ باران و رواناب) و بافت خاک (عامل مؤثر بر سرعت نفوذ، ظرفیت ذخیره و ظرفیت نگهداری آب خاک) انتخاب شدند. با توجه به این‌که وسعت منطقه مورد مطالعه اندک و در حدود ۷۸/۵ کیلومترمربع می‌باشد، عوامل جهت دامنه، نوع سازند زمین‌شناسی، اقلیم، بارندگی و خصوصیات آن، کاربری اراضی و نوع و میزان دخالت‌های انسانی در محدوده این سایت‌ها می‌توانند یکسان در نظر گرفته شوند. همچنین در انتخاب سایت‌ها، حتی‌المقدور ویژگی یکنواختی شکل دامنه مورد توجه قرار گرفت. به‌عبارت دیگر سعی شد دامنه‌های مورد مطالعه از نظر مورفولوژیکی از تحدب و تقعر برخوردار نباشند به‌عبارت دیگر تحدب و تقعر در شکل دامنه‌ها ناچیز و قابل صرف‌نظر کردن باشد. شکل ۲، بخشی از سایت‌های مورد مطالعه در منطقه احمدآباد مشهد (که در آن‌ها فرسایش شیاری کاملاً مشهود است) را نشان می‌دهد.

شکل ۲- بخشی از سایت‌های مورد مطالعه در منطقه احمدآباد مشهد.

Figure 2. Part of the studied sites in Mashhad-Ahmadabad region.

روش نمونه‌برداری و اندازه‌گیری: در این پژوهش، نحوه گردآوری داده‌ها با استفاده از نمونه‌گیری صورت گرفته است. ابتدا از طریق پیمایش عرصه و پس از شناخت منطقه مورد مطالعه، ۷ سایت مطالعاتی به‌عنوان توده‌های معرف انتخاب شدند. سپس در هر سایت به شیوه سیستماتیک- تصادفی، اقدام به استقرار ترانسکت و اندازه‌گیری عوامل مؤثر بر فرسایش شیاری شد. در هر یک از سایت‌های مطالعاتی از خط‌الرأس دامنه (بالاترین نقطه خط تقسیم آب و حرکت آب به‌سمت دامنه) به‌سمت پایین دامنه، ابتدا اقدام به مشخص نمودن یک مربع ۵۰×۵۰ مترمربعی بر روی دامنه شد (دو ضلع مربع در جهت شیب و دو ضلع دیگر عمود بر جهت شیب). سپس از محل خط‌الرأس به فواصل ۱۰ متر در دو ضلع قائم مربع، میخ‌های چوبی (پیکه) در زمین کوبیده شدند. به‌طوری‌که بتوان ۵ ترانسکت ۵۰ متری با طول شیب‌های ۱۰، ۲۰، ۳۰، ٤٠ و۵۰ متر، به‌طور موازی و تقریباً عمود بر جهت شیب بر روی دامنه مستقر نمود (شکل ۳). بنابراین در هر سایت، ۵ ترانسکت ۵۰ متری موازی مستقر و در مجموع ۷ سایت، ۳۵ ترانسکت در طول شیب‌های ۱۰ تا ۵۰ متر (به‌منظور بررسی اثر طول شیب بر ویژگی‌های فرسایش شیاری) مستقر شدند. در شکل ۳ وضعیت استقرار ترانسکت‌ها در هر یک از سایت‌های مورد مطالعه به‌صورت شماتیک نشان داده شده است.



شکل ۳- وضعیت شماتیکی استقرار ترانسکت‌ها در هر یک از سایت‌های مورد مطالعه.

Figure 3. Positioning of transects in each sites.

در هر ترانسکت، شیب از ابتدای آن و در فواصل ۱۰ متری مورد اندازه‌گیری قرارگرفت. به‌طوری‌که در طول هر ترانسکت در ٦ نقطه، شیب در فواصل ۰، ۱۰، ۲۰، ۳۰، ٤٠ و ۵۰ متری اندازه‌گیری شد. با مشخص بودن میزان شیب در هر یک از این فواصل، این میزان در طول دامنه مربوط به قطعه مورد نظر ضرب، تا عامل اثر مشترک طول شیب و میزان شیب محاسبه شود. شکل پوشش غالب گیاهان منطقه به‌گونه‌ای است که در اندازه‌گیری تاج‌پوشش گیاهان، پوشش یقه نیز لحاظ می‌شود، بنابراین عامل میزان تاج‌پوشش گیاهان برای اندازه‌گیری مقدار پوشش گیاهی انتخاب شد. درصد پوشش سطح زمین، شامل مجموع درصد سنگریزه سطحی (به قطر ۲ سانتی‌متر و بیش‌تر) و درصد تاج پوشش گیاهان علفی و بوته‌ای است. این فاکتور با استفاده از روش نمونه‌گیری برخورد نقطه‌ای (الزینگا، 1998) اندازه‌گیری شد (8). بر این اساس در طول هر ترانسکت به فاصله هر ۲۰ سانتی‌متر، میله‌ای به‌صورت عمودی فرود آمده و برخورد آن با هر یک از اجزاء پوشش، سنگریزه یا خاک لخت ثبت شد. سپس داده‌های حاصل برای هر یک از اجزاء به درصد تبدیل شدند. عرض و عمق هر یک از شیارهای موجود در طول تمامی ترانسکت‌های استقراریافته، اندازه‌گیری و فاصله هر یک از این شیارها از ابتدای ترانسکت ثبت شد. ضمن آن‌که شکل هر یک از شیارها (با فرض یکی از اشکال ذوزنقه، مستطیل یا مثلث) تعیین شد.

با توجه به تغییر پذیری ویژگی‌های فیزیکی خاک‌ها در طول دامنه‌های مختلف و ثبات تقریبی این ویژگی‌ها در طول یک ترانسکت، برای تعیین بافت خاک، نمونه‌برداری در ۳ نقطه از طول دامنه شامل بالا دست (طول ۱۰ متر)، وسط (طول ۳۰ متر) و پایین‌دست دامنه (طول ۵۰ متر) انجام شد. مشاهدات میدانی نشان دادند که خاک منطقه تا عمق ۲۰ سانتی‌متر تحت‌تأثیر فرسایش شیاری قرار گرفته است. بنابراین، تعداد ۳ نمونه خاک از هر سایت به عمق ۲۰ سانتی‌متر برداشت شده و به آزمایشگاه منتقل و بافت نمونه‌ها به روش هیدرومتری (USDA-NRCS, 1996) تعیین شد (30).

اندازه‌گیری شیب در شش نقطه از طول هر ترانسکت، انجام شد، بنابراین طول همه ترانسکت‌ها به شش قطعه تقسیم شد، که با توجه به تعداد ۳۵ ترانسکت، ۲۱۰ قطعه ایجاد شد. از این‌رو، قطعات اول و آخر ۵ متر و ٤ قطعه میانی، ۱۰ متر طول دارند. شیبی که در ابتدای هر ترانسکت اندازه‌گیری شده

است، به اولین قطعه با طول ۵ متر (فاصله صفر تا پنج متری از ابتدای ترانسکت) مربوط می‌باشد. شیب اندازه‌گیری شده در فواصل ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ٤۰ متر از طول هر ترانسکت به‌ترتیب به قطعات ۲ (فاصله ۵ تا ۱۵ متری از ابتدای ترانسکت)، ۳ (فاصله ۱۵ تا ۲۵ متری از ابتدای ترانسکت)، ٤ (فاصله ۲۵ تا ۳۵ متری از ابتدای ترانسکت) و ۵ (فاصله ۳۵ تا ٤۵ متری از ابتدای ترانسکت) تعلق دارد. شیب در فاصله ٤۵ تا ۵۰ متری در طول هر ترانسکت معادل شیبی است که در انتهای ترانسکت (در فاصله ۵۰ متری از ابتدای ترانسکت) اندازه‌گیری شد.

با توجه به اندازه‌گیری پوشش در فواصل ۲۰ سانتی‌متری در طول هر ترانسکت، قطعات ۵ متری دارای ۲۵ نقطه برخورد و قطعات ۱۰ متری شامل ۵۰ نقطه برخورد می‌باشند. بنابراین، هر نقطه برخورد به اجزاء پوشش سطح زمین یا خاک لخت، در قطعات ۵ متری معادل ٤ درصد و در قطعات ۱۰ متری معادل ۲ درصد ارزش‌گذاری می‌شوند.

با در اختیار داشتن فاصله شروع هر یک از شیارها از ابتدای ترانسکت، تعداد شیارهای هر قطعه مشخص شد. برای هر یک از این قطعات، سطح مقطع هر یک از شیارها، با توجه به شکل شیار و عرض و عمق آن محاسبه شد. پس از تعیین و محاسبه فاکتورهای فراوانی و سطح مقطع شیار برای هر یک از قطعات در طول ترانسکت، این فاکتورها بر طول قطعه تقسیم و میزان آن‌ها در واحد طول (متر) محاسبه شد.

با توجه به این‌که، ویژگی سطح مقطع شیارها در واحد طول، دربردارنده فراوانی شیارها و عرض و عمق هر یک از آن‌ها بوده و میزان هدررفت خاک را به شیوه کامل‌تری مورد ارزیابی و مدل‌سازی قرار می‌دهد، این ویژگی به‌عنوان خروجی مدل فازی در نظر گرفته شد. بنابراین داده‌های اندازه‌گیری شده در هر یک از قطعات، شامل عوامل درصد پوشش سطح زمین، درصد تاج‌پوشش گیاهی، درصد سنگریزه سطح زمین (سنگریزه سطحی)، طول شیب، درصد شیب، اثر مشترک طول شیب و درصد شیب، درصد شن، سیلت و رس موجود در خاک به‌عنوان عوامل مؤثر بر سطح مقطع شیارها در واحد طول و ورودی‌های مدل فازی محسوب می‌شوند.

انتخاب ترکیب بهینه به‌منظور ساخت مدل فازی: اگر N پارامتر ورودی بر وقوع پدیده‌ای مؤثر باشند، تعداد ۲^N-۱ ترکیب معنی‌دار از پارامترهای ورودی به‌وجود می‌آید. با تعیین ۹ عامل مؤثر بر سطح مقطع شیارها در واحد طول، تعداد ۵۱۱ ترکیب ($۲^۹$-۱) از عوامل ورودی مؤثر حاصل می‌شود. هر یک از این ترکیبات می‌توانند به‌منظور مدل‌سازی فازی مورد استفاده قرار گیرند. بنابراین به‌منظور دست‌یابی به یک مدل ساده با عملکرد بالا، لازم است ترکیبی با کم‌ترین، مؤثرترین و مهم‌ترین تعداد عوامل ورودی انتخاب شود. بدین منظور از آزمون گاما[1] استفاده شد. آزمون گاما یک ابزار مدل‌سازی غیرخطی است که به کمک آن می‌توان ترکیب مناسب از پارامترهای ورودی برای مدل‌سازی داده‌های خروجی و ایجاد یک مدل هموار را قبل از ایجاد مدل بررسی نمود. بنابراین، با استفاده از این تکنیک می‌توان ترتیب اهمیت پارامترهای ورودی و بهترین ترکیب از میان تمام ترکیب‌های ممکن را به‌دست آورد. شرح کامل این روش در مقالات مختلف ارائه شده است که از آن جمله می‌توان به مقدم‌نیا و همکاران (2008)، ریمسان و همکاران (2008)، احمدی و همکاران (2009) و نوری و همکاران (2011) اشاره نمود (18, 22, 1, 19). بنابراین، به‌منظور رعایت اختصار از شرح معادلات و اثبات آن‌ها خودداری می‌شود. در این روش با تعیین مقدار نزدیک‌ترین همسایگی p، مقادیر $\gamma_M(k)$ و $\delta_M(k)$ از روی داده‌های خروجی و ورودی محاسبه

1- GT

می‌شود. سپس با ایجاد رابطه رگرسیون خطی بین P مجموعه $\gamma_M(k),\delta_M(k)$، معادله آن از رابطه ۱ به‌دست می‌آید (22).

$$\gamma = A\delta + \Gamma \qquad (۱)$$

عرض از مبدأ خط رگرسیون فوق برابر مقدار آزمون گاما و شیب بیش‌تر آن بیانگر پیچیدگی بیش‌تر مدل می‌باشد. همچنین مقدار خطای استاندارد[1] آن هرچه به عدد صفر نزدیک‌تر باشد با اطمینان بیش‌تری می‌توان مقدار گاما را نشان‌دهنده اغتشاش موجود در داده‌ها دانست (18). آزمون گاما برای ترکیبات مختلف حاصل از پارامترهای ورودی، مقادیر آماره‌های گاما، VRatio، گرادیان و خطای استاندارد را محاسبه می‌نماید که هرچه مقادیر این آماره‌ها در مدلی مشخص، کم‌تر باشد، نشانگر دقت بالای آن برای یافتن خروجی‌های مطلوب از روی ورودی‌ها است (31). در این پژوهش ابتدا ترکیب بهینه براساس هر یک از آماره‌های مذکور تعیین شد، سپس به‌منظور در نظر گرفتن تمامی آماره‌های مذکور در گزینش ترکیب بهینه، از آماره ترکیبی MIPE[2] استفاده شد (رابطه ۲).

$$\mathrm{MIPE} = \left\{ 0.25\left[\frac{\mathrm{SE_j}}{\max \mathrm{SE_j}}\right]^2 + \left[\frac{\Gamma_j}{\max \Gamma_j}\right]^2 + \left[\frac{\mathrm{Grad_j}}{\max\left|\mathrm{Grad_j}\right|}\right]^2 + \left[\frac{\mathrm{VRatio_j}}{\max \mathrm{VRatio_j}}\right]^2 \right\}^{1/2} \qquad (۲)$$

$\mathrm{VRatio_j}$: نسبت گاما به واریانس داده‌های خروجی مدل j ام، $\mathrm{Grad_j}$: شیب خط رگرسیون یا گرادیان در مدل j ام، Γ_j: مقدار آماره گاما در مدل شماره j و $\mathrm{SE_j}$: خطای استاندارد مدل j ام می‌باشند.

تئوری و منطق فازی: واژه فازی در فرهنگ لغت آکسفورد به‌صورت «مبهم، گنگ، نادقیق، مغشوش، درهم و نامشخص» تعریف شده است (4). نظریه فازی که اساس آن بر زبان طبیعت بنا گذارده شده است، قادر است بسیاری از مفاهیم و متغیرها و سیستم‌هایی را که نادقیق و مبهم هستند صورت‌بندی ریاضی ببخشد و زمینه را برای استدلال، استنتاج، کنترل و تصمیم‌گیری در شرایط عدم اطمینان فراهم آورد (25). بنیاد منطق فازی بر شالوده نظریه فازی استوار است. این نظریه تعمیمی از نظریه کلاسیک مجموعه‌ها در علم ریاضیات است. عضویت عناصر از یک الگوی صفر و یک و دو وضعیتی تبعیت می‌کند. اما تئوری مجموعه‌های فازی این مفهوم را بسط می‌دهد و عضویت درجه‌بندی شده را مطرح می‌کند. تابع عضویت[3] از اهمیت ویژه‌ای در تئوری مجموعه‌های فازی برخوردار می‌باشد. زیرا، تمام اطلاعات مربوط به یک مجموعه فازی به‌وسیله تابع عضویت آن توصیف می‌شود. تابع عضویت یک منحنی است که میزان درجه عضویت المان‌های مختلف را به یک مجموعه نشان می‌دهد و مقداری در محدوده صفر تا یک اختیار می‌کند (12). بحث توابع عضویت در بخش فازی‌سازی[4] ورودی‌ها و خروجی‌ها به کمک کاربر می‌آید. شکل این تابع می‌تواند از نقطه‌نظر سادگی، راحت بودن، سرعت و بازده تغییر کند تا رضایت کاربر جلب شود. ساده‌ترین توابع عضویت از خط‌های راست تشکیل می‌شوند. برخی از رایج‌ترین انواع آن، توابع عضویت مثلثی[5] و ذوزنقه‌ای[6] می‌باشند. توابع گوسی[7]، زنگوله‌ای[8]، منحنی حلقوی، توابع چندجمله‌ای درجه دو، سه و ... از انواع دیگر توابع عضویت محسوب می‌شوند.

سیستم استنتاج فازی از عبارت‌های زبانی برای ارائه ارتباط بین ورودی‌ها و خروجی‌های مشاهده‌ای

1- Standard Error
2- Modified Ideal Point Error

3- Membership function
4- Fuzzification
5- Trimf
6- Trapmf
7- Gaussmf
8- Gbellmf

یک سیستم استفاده می‌نماید. عبارت‌های زبانی به‌طور ذاتی به‌گونه‌ای می‌باشند که می‌توانند به‌وسیله مجموعه‌های فازی بیان شوند. رایج‌ترین شکل ارائه عبارت‌های زبانی برای بیان دانش و معلومات بشری، استفاده از عبارت‌های شرطی به‌صورت قوانین "اگر – آنگاه" می‌باشد. با استفاده از شیوه مذکور، می‌توان از یک واقعیت که معلوم می‌باشد یک واقعیت دیگر را استنتاج نمود. در این سیستم، چند قانون اگر – آنگاه فازی بیانگر تعاملات بین ورودی و خروجی سیستم می‌باشد. خروجی‌های نهایی سیستم با استفاده از میزان ارضای این قوانین توسط ورودی‌ها و ترکیب خروجی‌های آن محاسبه می‌شود. هر قانون فازی شامل دو بخش مقدم (ورودی‌های مدل) و تالی (خروجی‌های مدل) می‌باشد. هر یک از این بخش‌ها می‌توانند دارای بیش از یک قسمت باشند. وزن هر قانون بیانگر میزان و درجه درستی آن قانون می‌باشد و بر عدد به‌دست آمده از مقدم اعمال می‌شود تا در میزان خروجی آن قانون سهیم باشد.

بر خلاف این‌که بسیاری از مسایل موجود در زندگی روزمره، فازی می‌باشند، اما اغلب تصمیماتی که به‌وسیله انسان‌ها یا ماشین‌ها (مثلاً کامپیوترها) گرفته می‌شود به‌صورت صفر و یک می‌باشد و از آن جایی که ماشین، قدرت درک زبان انسان را ندارد، باید نتایج حاصله از تحلیل‌های فازی به اعداد کلاسیک (معمولی) تبدیل شوند. به بیان دیگر، ورودی هر فرآیند دفازی، یک مجموعه فازی است (حاصل اجتماع مجموعه‌های فازی خروجی) که در این فرآیند به یک عدد خروجی تبدیل می‌شود. برای این منظور روش‌های مختلفی وجود دارد، که می‌توان به روش‌های اولین (یا آخرین) ماکزیمم، مرکز سطح، میانگین وزنی، روش میانه ماکزیمم، مرکز مجموع‌ها و ... اشاره کرد (12).

مدل‌سازی فرسایش شیاری با استفاده از سیستم استنتاج فازی: همان‌طورکه قبلاً بیان شد، در این پژوهش به نحوه طراحی یک سیستم استنتاج فازی جهت پیش‌بینی فرسایش شیاری پرداخته شده است. تمامی محاسبات و پیش‌بینی‌های انجام شده با سیستم استنتاج فازی با استفاده از نرم‌افزار متلب[1] (2008) و واسطه‌های گرافیکی در این نرم‌افزار انجام گرفته است. ضمن آن‌که از ویرایشگرهای FIS، تابع عضویت، قانون و نمایشگرهای قانون و سطح، در ساخت و نمایش مراحل مختلف یک سیستم استنتاج فازی استفاده شده است.

ابتدا، با استفاده از آزمون گاما بهترین ترکیب از میان عوامل مؤثر بر سطح مقطع شیارها در واحد طول به‌عنوان ورودی‌های مدل‌های فازی تعیین شد. هر یک از پارامترهای ورودی و خروجی مدل‌ها، با توجه به بازه تغییرات داده‌های هر یک از این پارامترها و میزان تغییرپذیری داده‌ها در این بازه‌ها و نظرات کارشناسی موجود، بازه‌بندی شدند. با توجه به تعداد پارامترهای موجود در بخش مقدم و تالی قوانین و بازه‌های مربوط به هر یک از آن‌ها، تعداد ۳٦ قانون فازی (قوانین اگر– آنگاه فازی ($۳^{۲}\times۲^{۲}$)) موجود می‌باشد. سپس با استفاده از برنامه‌نویسی در نرم‌افزار اکسل ۲۰۰۷[2]، قوانین موجود در بین داده‌ها (۲۱۰ داده) استخراج شد و فراوانی هر یک از این قوانین محاسبه شد. در ادامه، تعدادی از قوانین با فراوانی صفر و یک و داده‌های مربوط به آن‌ها حذف شدند و تعداد قوانین به ۳۰ قانون و داده‌ها به ۲۰۵ داده کاهش یافت.

به‌منظور وزن‌دهی قوانین، با در نظر گرفتن چگونگی تأثیر هر یک از پارامترهای بخش مقدم بر پارامتر تالی قانون، چگونگی تأثیر متقابل پارامترهای ورودی هر قانون بر پارامتر خروجی آن و در نهایت

1- MATLAB
2- Excel 2007

اعتبار و درستی رخداد آن قانون در طبیعت، هر یک از قوانین موجود، با نظر کارشناسی با عددی بین صفر و یک وزن‌دهی شدند. در این پژوهش سه شیوه وزن‌دهی مورد آزمون و خطا قرار گرفت که در نهایت یک شیوه وزن‌دهی با کم‌ترین خطا در ساخت مدل انتخاب شد. در این شیوه، میزان تأثیر هر یک از عوامل ورودی مؤثر بر فرسایش، با یک ضریب، تعیین شد. از سوی دیگر میزان درستی رابطه تأثیر منفرد هر یک از عوامل درصد سنگریزه سطح زمین، اثر مشترک طول شیب و میزان شیب و درصد سیلت خاک بر میزان سطح مقطع شیارها توسط ضرایب صفر، ۰/۵ و یک مشخص شدند. با ضرب میزان تأثیر هر یک از عوامل مؤثر در میزان درستی تأثیر آن‌ها بر پارامتر خروجی، وزن آن عامل در تعیین وزن کلی هر قانون تعیین شد.

مدل‌های فازی متعددی براساس روش سعی و خطا مورد آزمایش قرار گرفتند. به‌عبارت دیگر آن‌چه که در این مدل‌ها مورد آزمون قرار گرفت، انواع توابع عضویت، نحوه وزن‌دهی قانون‌ها، روش‌های غیرفازی‌سازی و دیگر عملگرهای سیستم استنتاج فازی بود تا به حالت مناسب و بهینه در هر یک از آن‌ها استخراج شد. در این پژوهش، توابع عضویت مثلثی، ذوزنقه‌ای، زنگوله‌ای، گوسی و گوسی ۲ مورد استفاده قرار گرفتند. روش ترکیب روابط فازی در این پژوهش روش استلزام ممدانی (ماکزیمم- مینیمم) می‌باشد.

تعداد داده‌های مورد استفاده در ساخت مدل‌های فازی، ۱۵٤ داده است که به روش تصادفی- انتخابی، گزینش شدند. در این روش سعی شد داده‌های مربوط به آموزش و تست مدل به‌گونه‌ای انتخاب شوند که مدل برای هر سایت نه تنها مورد آموزش بلکه مورد آزمون نیز قرار گیرد. به‌منظور صحت‌سنجی مدل‌ها، براساس سیستمی که با ۱۵٤ داده، آموزش دیده بود، میزان خروجی مدل‌ها برای ۵۱ داده آزمون محاسبه شد. در مرحله نهایی و گام آخر هر سیستم استنتاج فازی، جواب نهایی سیستم که به‌صورت یک عدد فازی است، با استفاده از یکی از روش‌های غیرفازی‌ساز به یک عدد معمولی تبدیل می‌شود. در این بخش از پژوهش روش‌های گوناگون دفازی‌سازی (مرکز ثقل، نیمساز، میانگین ماکزیمم، کوچک‌ترین ماکزیمم و بزرگ‌ترین ماکزیمم) به‌صورت سعی و خطا مورد آزمایش قرار گرفتند تا بهترین آن‌ها انتخاب شود. ملاک این انتخاب کم‌ترین میزان خطا توسط این روش‌های دفازی‌سازی در جواب نهایی سیستم فازی براساس آماره ارزیابی IPE[1] می‌باشد.

ارزیابی عملکرد مدل‌های پیش‌بینی: به‌منظور ارزیابی دقت مدل‌های پیش‌بینیاز آماره IPE (رابطه ۷)، استفاده شده است. این آماره نسبتاً جدید با وزن دادن به آماره‌های میانگین خطای مطلق[2] (رابطه ۳)، ریشه میانگین مربعات خطا[3] (رابطه ٤)، میانگین قدرمطلق خطای نسبی[4] (رابطه ۵) و ضریب همبستگی R (رابطه ٦)، از ترکیب آن‌ها مطابق رابطه ۷ محاسبه می‌شود. بهترین عملکرد براساس این آماره برابر صفر است (7). بنابراین از میان آماره‌های مختلف، ملاک ارزیابی مدل، آماره ترکیبی IPE می‌باشد.

$$MBE = \frac{1}{M}\sum_{i=1}^{M}(O_i - P_i) \qquad (۳)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{M}\sum_{i=1}^{M}(O_i - P_i)} \qquad (٤)$$

$$MARE = \frac{1}{M}\sum_{i=1}^{N}\left|\frac{O_i - P_i}{O_i}\right| \qquad (۵)$$

$$R = \frac{\sum_{i=1}^{M}(O_i - \bar{O}_i)(P_i - \bar{P}_i)}{\sqrt{\sum_{i=1}^{M}(O_i - \bar{O}_i)^2 \sum_{i=1}^{M}(P_i - \bar{P}_i)^2}} \qquad (٦)$$

1- Ideal Point Error
2- MBE
3- RMSE
4- MARE

$$IPE=\left\{0.25\left[\left[\frac{RMSE_{ij}}{\max RMSE_{ij}}\right]^2+\left[\frac{MARE_{ij}}{\max MARE_{ij}}\right]^2+\left[\frac{MBE_{ij}}{\max\left|MBE_{ij}\right|}\right]^2+\left[\frac{R_{ij}-1}{1/\max R_{ij}}\right]^2\right]\right\}^{1/2} \quad (۷)$$

در رابطه‌های ۳ تا ٦ پارامترهای O_i، P_i به‌ترتیب مقادیر مشاهداتی و برآوردی و $\overline{O}_i$ و $\overline{P}_i$ نیز به‌ترتیب میانگین مقادیر مشاهداتی و برآوردی می‌باشند. در رابطه ۷، j به شماره مدل ساخته‌شده اشاره دارد.

نتایج و بحث

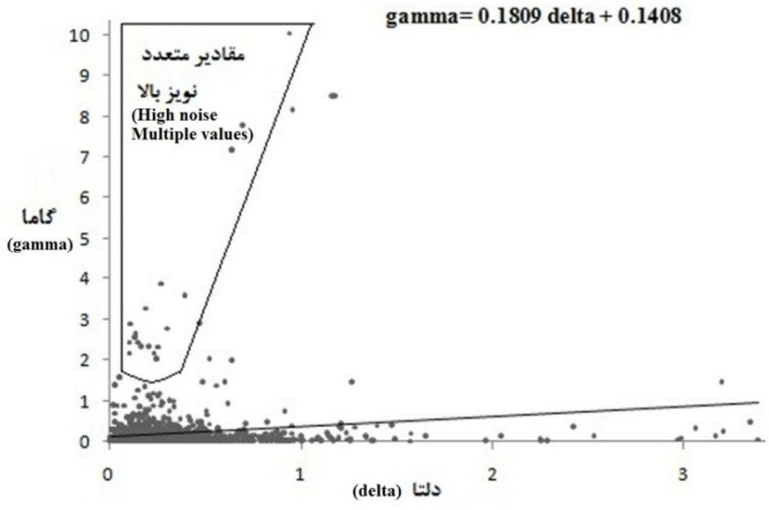
آزمون گاما: همان‌طورکه قبلاً گفته شد، در این پژوهش با در نظر گرفتن ۹ عامل مؤثر بر فاکتور سطح مقطع شیار در واحد طول، تعداد ۵۱۱ ترکیب مختلف ایجاد شد. به‌منظور انتخاب ترکیب بهینه از میان آن‌ها جهت مدل‌سازی فازی، با استفاده از آزمون گاما ابتدا با ملاک قرار دادن هر یک از آماره‌های Γ، VRatio، گرادیان و خطای استاندارد ترکیب بهینه انتخاب شد. با توجه به تفاوت در نتایج حاصل از انتخاب ترکیب بهینه براساس هر یک از آماره‌های مذکور با یکدیگر، آماره ترکیبی MIPE، به‌منظور تصمیم‌گیری در انتخاب ترکیب بهینه محاسبه شد. براساس آماره ترکیبی MIPE ترکیب بهینه به‌منظور مدل‌سازی فازی با حضور عوامل درصد شیب، میزان سنگریزه سطح زمین، اثر مشترک طول شیب و درصد شیب و میزان سیلت موجود در خاک برای مدل‌سازی سطح مقطع شیار در واحد طول تعیین شد.

حضور عامل میزان شیب در ترکیب بهینه و نقش آن در فرسایش‌پذیری خاک مورد تأیید پژوهشگرانی چون کنگ و همکاران (2001) و زانک و همکاران (2002)، می‌باشد (10, 33). همچنین اثر حاصل‌ضرب دو عامل طول شیب و درصد شیب بر فرسایش به‌عنوان یکی از عوامل مؤثر در انتخاب ترکیب بهینه نقش دارد که مورد تأیید گیتاس و همکاران (2009) و رودریگزوسوارز (2010) نیز می‌باشد (9, 23). حضور فاکتور سنگریزه موجود در سطح زمین در ترکیب بهینه و نقش آن در فرسایش‌پذیری خاک مورد تأیید پژوهشگرانی چون رفاهی (2007)، زنگی‌آبادی و همکاران (2010)، پوزن و اینجلموسانچز (1992) و لی (2003) می‌باشد (21, 32, 20, 15).

در ترکیب بهینه حاصل، از میان عناصر بافت خاک تنها میزان سیلت موجود در خاک حضور دارد، مطالعات ویشمایر و مانرینگ نشان داده است که تغییر جزئی در درصد سیلت خاک غالباً با تغییر قابل‌توجهی در میزان فرسایش‌پذیری خاک همراه است. ریشتر و نگندانک نیز در پژوهش‌های خود نشان داده‌اند، خاک‌هایی که دارای ٤۰ تا ٦۰ درصد سیلت می‌باشند، حساس‌ترین خاک نسبت به فرسایش به‌شمار می‌روند (به نقل از 21).

با توجه به این‌که در مدل‌سازی فازی، دست یافتن به یک مدل دقیق اما ساده بسیار ارزشمند است و کم‌بودن تعداد متغیرهای ورودی و توابع عضویت و به تبع آن سادگی تحلیل FIS در یک مدل در سادگی آن نقش دارند، در اینجا ٤ پارامتر ورودی به تعداد ۳ پارامتر کاهش یافت. به‌عبارت دیگر عامل درصد شیب از میان عوامل ورودی حذف شد، زیرا این عامل در ورودی اثر مشترک طول شیب و میزان شیب نقش خود را ایفا می‌کند، همچنین با بررسی هم‌بستگی عوامل مذکور با سطح مقطع شیارها در واحد طول، عامل اثر مشترک طول شیب و درصد شیب بیش‌ترین میزان هم‌بستگی با سطح مقطع شیارها را داراست. بنابراین عوامل ورودی مدل فازی شامل درصد سنگریزه سطح زمین، اثر مشترک طول شیب و درصد شیب و درصد سیلت موجود در خاک می‌باشند و خروجی مدل ویژگی سطح مقطع شیارها در واحد طول است.

با محاسبه مقادیر دلتا و گاما از روی پارامترهای ورودی و خروجی، پراکنش آن‌ها حول خط رگرسیون برای ترکیب منتخب در شکل ٤ رسم شده است. مطابق این شکل، هرچه تجمع نقاط در حاشیه گوه‌ای شکل در اطراف محور گاما بیش‌تر باشد، تعداد نقاطی که به‌ازای ورودی‌های یکسان، خروجی‌های متفاوتی دارند، بیش‌تر می‌باشد که در شکل ٤ تجمع نقاط در حاشیه گوه‌ای کم می‌باشد.



شکل ٤- نمودار پراکنش نقاط در اطراف خط رگرسیون براساس آزمون گاما.

Figure 4. The disperse plot of points around the regression line based on gamma test.

مدل‌سازی فرسایش شیاری با استفاده از سیستم استنتاج فازی: پس از آن‌که عوامل میزان سنگریزه سطح زمین و سطح مقطع شیارها در واحد طول در سه بازه کم (L)، متوسط (M) و زیاد (H) بازه‌بندی و داده‌های مربوط به دو عامل درصد سیلت موجود در خاک و اثر مشترک طول شیب و درصد شیب در دو بازه کم و زیاد قرار گرفتند، این داده‌ها وارد سیستم استنتاج فازی شده و ابتدا تعداد بهینه قوانین و وزن مناسب آن‌ها با استفاده از روش سعی و خطا به‌دست آمد.

به‌منظور انتخاب مدل بهینه، ۹ ترکیب متنوع از توابع عضویت به‌منظور فازی‌سازی متغیرهای ورودی و خروجی با ۵ روش غیرفازی‌ساز با استفاده از روابط ترکیب ماکزیمم- مینیمم فازی و قوانین بهینه مورد سعی و خطا قرار گرفتند. همچنین آماره‌های ارزیابی خطا (رابطه‌های ۳ تا ٦) برای هر یک از مدل‌ها محاسبه شدند. از آن‌جا که در بسیاری موارد نتایج این آماره‌ها با یکدیگر متفاوت بود از آماره ارزیابی ترکیبی IPE (رابطه ۷) به‌منظور تصمیم‌گیری سریع‌تر و صحیح‌تر استفاده شد.

نتایج به‌دست آمده نشان دادند که در ۸ مدل از ترکیب توابع عضویت فازی، روش دفازی کوچک‌ترین ماکزیمم[1] کم‌ترین میزان IPE را در مقایسه با سایر روش‌ها به خود اختصاص داد. همچنین در هر یک از روش‌های دفازی‌سازی نیز مدل‌های ساخته‌شده از نظر ترکیب توابع عضویت مقایسه شده‌اند. در تمامی این روش‌ها، به‌جز روش بزرگ‌ترین ماکزیمم، مدل‌های فازی با ترکیب توابع عضویت "گوسی و ذوزنقه"، "گوسی ۲ و ذوزنقه" و تابع عضویت "گوسی ۲" جزء مدل‌های منتخب از نظر کم‌ترین میزان IPE شناخته شده‌اند.

1- SOM

آن‌چه که در میان مدل‌های بهینه قابل‌توجه می‌باشد، حضور تابع گوسی به تنهایی یا در ترکیب با سایر توابع است. همچنین با مقایسه تمامی مدل‌ها در هر یک از روش‌های دفازی، استفاده از توابع ساده خط راست نظیر توابع ذوزنقه‌ای و مثلثی یا ترکیب این دو تابع، میزان IPE بالایی تولید نموده و نتایج رضایت‌بخشی به‌همراه نداشته است. به‌عبارت دیگر نتایج نشان دادند که در مدل‌سازی فرسایش استفاده از توابع نرم‌تر نظیر توابع گوسی نتایج بهتری نسبت به توابع شارپ و ساده نظیر ذوزنقه و مثلث به دنبال دارد. همچنین براساس نتایج به‌دست آمده، اگر تنها سادگی مدل مدنظر باشد ترکیب دو تابع ذوزنقه و مثلث از نتایج بهتری نسبت به استفاده از هر یک به تنهایی، برخوردار است. آزادی نصرآباد و همکاران (2009) در پژوهش خود به‌منظور تعیین نرخ واقعی دام‌گذاری در سه منطقه از استان فارس، از ترکیب دو تابع ذوزنقه و مثلث در فرآیند فازی‌سازی متغیرهای ورودی تعداد دامداران موجود در مرتع، تراکم پوشش گیاهی در هر هکتار مرتع و تعداد دام موجود در واحد سطح آن، استفاده نمودند (3).

همان‌گونه که در قسمت اول این بخش از نتایج اشاره شد، روش دفازی کوچک‌ترین ماکزیمم به‌عنوان روش بهینه انتخاب شد، که بیانگر نتایج پژوهش‌های ترن (1999) و ترن و همکاران (2002) می‌باشد (28, 29). بنابراین، در این روش، به‌منظور انتخاب مدل بهینه، مطابق با جدول ۱ مدل‌های ساخته‌شده با استفاده از توابع عضویت مختلف با یکدیگر مقایسه شده‌اند. مدل فازی با ترکیب توابع گوسی و ذوزنقه کم‌ترین میزان IPE را داراست. ضمن آن‌که مدل فازی ساخته‌شده با استفاده از تابع عضویت گوسی از بیش‌ترین میزان IPE برخوردار است (جدول ۱).

با وجود آن‌که برخی از این مدل‌ها، مطابق با جدول ۱ از IPE کمی برخوردار هستند، اما از تعمیم‌پذیری لازم برخوردار نیستند. به‌عبارت دیگر، بازه تغییرات داده‌های محاسباتی توسط این مدل‌ها اندک است و داده‌های خروجی به لحاظ کمّی از تنوع زیادی برخوردار نیستند. بنابراین، با توجه به موارد ذکر شده، در این پژوهش سعی شد، پس از انتخاب روش کوچک‌ترین ماکزیمم به‌عنوان مناسب‌ترین روش دفازی‌سازی، از میان ۹ وضعیت مختلف از توابع عضویت مورد استفاده، مدل و یا وضعیتی انتخاب شود که نه تنها حتی‌الامکان کم‌ترین مقدار IPE و خطا را دارد (جدول ۱)، بلکه از تعمیم‌پذیری مناسبی نیز برخوردار باشد. در نتیجه مدل فازی گوسی انتخاب شد.

جدول ۱- مقادیر آماره IPE در برخی از مدل‌های فازی ساخته‌شده براساس روش دفازی کوچکترین ماکزیمم.

Table 1. The IPE values for some models of applying the method of the smallest maximum of defuzzification.

توابع عضویت مورد استفاده Membership functions used	خطای نقطه ایده‌آل Ideal Point Error (IPE)
گوسی- ذوزنقه‌ای (Gaussian - trapezoidal)	0.2346
گوسی ۲ (Gaussian 2)	0.3412
گوسی ۲- ذوزنقه‌ای (Gaussian 2 - trapezoidal)	0.3536
ذوزنقه‌ای- مثلثی به همراه مثلثی (trapezoidal - triangular & triangular)	0.3550
ذوزنقه‌ای- مثلثی به همراه ذوزنقه‌ای (trapezoidal - triangular &trapezoidal)	0.3569
ذوزنقه‌ای (trapezoidal)	0.3580
گوسی (Gaussian)	0.6516

نتیجه‌گیری

در این پژوهش یک سیستم استنتاج فازی به‌منظور پیش‌بینی فرسایش شیاری به‌عنوان یکی از عوامل تخریب خاک در دامنه‌های تپه‌ماهوری مراتع منطقه احمدآباد مشهد طراحی و عملکرد آن مورد بررسی قرار گرفت. در هر یک از طول‌های مختلف دامنه، عوامل مؤثر در شکل‌گیری شیارها شامل تاج‌پوشش گیاهی، پوشش سطح زمین، سنگریزه سطح زمین، شن، سیلت و رس موجود در خاک، شیب و اثر مشترک طول شیب و مقدار شیب تعیین شدند. سپس با استفاده از نتایج آزمون گاما، ترکیب بهینه متغیرهای "درصد سنگریزه سطح زمین"، "اثر مشترک طول شیب و درصد شیب" و "درصد سیلت موجود در خاک" به‌عنوان عوامل ورودی و "سطح مقطع شیار در واحد طول" به‌عنوان متغیر خروجی (تابع)، به‌منظور مدل‌سازی فازی انتخاب شد. از میان ۹ ترکیب متنوع از توابع عضویت به‌منظور فازی‌سازی متغیرهای ورودی و خروجی با ۵ روش غیرفازی‌ساز با استفاده از روابط ترکیب ماکزیمم- مینیمم فازی، روش دفازی کوچک‌ترین ماکزیمم کم‌ترین میزان IPE را در مقایسه با سایر روش‌ها به خود اختصاص داده است. همچنین براساس نتایج به‌دست آمده، در مدل‌سازی فرسایش استفاده از توابع نرم‌تر نظیر توابع گوسی نتایج بهتری نسبت به توابع شارپ و ساده نظیر ذوزنقه و مثلث به دنبال دارد. اگر تنها سادگی مدل مدنظر باشد ترکیب دو تابع ذوزنقه و مثلث از نتایج بهتری نسبت به استفاده از هر یک به تنهایی، برخوردار است. در این پژوهش، تابع عضویت گوسی با روش دفازی کوچک‌ترین ماکزیمم به‌عنوان مدل بهینه در پیش‌بینی فرسایش شیاری در منطقه احمدآباد مشهد انتخاب شد. پیشنهاد می‌شود، پژوهش‌هایی مشابه این پژوهش، در سایر مناطق کشور، با شرایط متفاوت آب و هوایی، زمین‌شناسی، توپوگرافی و ... انجام شود تا بتوان در ارتباط با مدل‌سازی فرسایش شیاری و عوامل مؤثر بر این نوع فرسایش با استفاده از سیستم استنتاج فازی به یک مدل منطقه‌ای، عمومی‌تر و کلی دست یافت. همچنین در مدل‌سازی فرسایش به کمک سیستم استنتاج فازی پارامترهای مورد استفاده به لحاظ کمی و کیفی از طیف گسترده‌ای برخوردار باشند و مدل‌سازی فرسایش شیاری به کمک سایر روش‌های هوشمند نظیر شبکه‌های عصبی و سیستم استنتاج فازی عصبی- تطبیقی نیز انجام شود و نتایج آن با مدل‌سازی فازی مقایسه شود.

منابع

1.Ahmadi, A., Han, D., Karamouz, M., and Remesan, R. 2009. Input data selection for solar radiation estimation. Hydrol. Proc. J. 23: 2754-2764.

2.Akbarpour, A., Sharifi, M.B., and Memarian Khalilabad, H. 2006. The comparison of fuzzy and maximum likelihood methods in preparing of land use layer using ETM+ data (case study: kameh watershed). J. Range Desert Res. 13: 1. 27-38. (In Persian)

3.Azadi, H., Van den Berg, J., Shahvali, M., and Hosseininia, G. 2009. Sustainable rangeland management using fuzzy logic: A case study in Southwest Iran. Agriculture, Ecosyst. Environ. J. 131: 193-200.

4.Azar, A., and Faraji, H. 2008. Fuzzy management science. Mehrban book, Tehran, 308p. (In Persian)

5.Blanco, A., Morón, M., Delgado Calvo-Flores, J.M., Martín Ramos, M.P., and Polo Almohano, A. 2009. AIEIA: software for fuzzy environmental impact assessment. Expert Systems with Applications. 36: 9135-9149.

6.Dehghani, M., Ghasemi, H., and Malekian, A. 2013. Spatial prioritization of flood mitigation and soil erosion control practices using fuzzy logic approach (Case study: Foorg Watershed). Range and watershed management J. 66: 1. 73-88. (In Persian)
7.Elshorbagy, A., Corzo, G., Srinivasulu, S., and Solomatine, D. 2009. Experimental investigation of the predictive capabilities of soft computing techniques in hydrology. Centre for Advanced Numerical Simulation (CANSIM), Department of civil & geological engineering, University of Saskatchewan, Saskatoon, SK, CANADA.
8.Elzinga, C.L., Salzer, D.W., and Willoughby, J.W. 1998. Measuring and monitoring plant population. BLM Technical reference, USA, 1730p.
9.Gitas, I.Z., Douros, K., Minakou, C., and Silleos, G.N. 2009. Multi-temporal soil erosion risk assessment in N. Chalkidiki using a modified USLE raster model. European Association Remote Sensing Labratories Proceedings J. 1: 40-52.
10.Kang, S., Zhang, L., Song, X., Zhang, S., Liu, X., Liang, Y., and Zheng, S. 2001. Runoff and sediment loss responses to rainfall and land use in two agricultural catchments on the Loess Plateau of China. Hydrol. Proc. J. 15: 977-988.
11.Kisi, O., Karahan, M.E., and Sen, Z. 2006. River Suspended sediment modelling using a fuzzy logic approach. Hydrol. Proc. J. 20: 20. 4351-4362.
12.Koorehpazan Dezfuli, A. 2005. Fuzzy Set Theory and its Applications in the Modeling of Water Engineering Problems. Amirkabir Jahad Daneshgahi Press, Tehran. 261p. (In Persian)
13.Kumar, J.K., Konno, M., and Yasuda, N. 2000. Subsurface soil-geology interpolation using fuzzy neural network. Geotech. Geoenviron. Engin. J. 126: 6. 32-639.
14.Lark, R.M. 2000. Designing sampling grids from imprecise information on soil variability, an approach based on the fuzzy kriging variance. Geoderma J. 98: 1/2. 35-39.
15.Li, X.Y. 2003. Gravel-sand mulch for soil and water conservation in the semiarid loess region of northwest China. Catena J. 52: 105-127.
16.Mahdian, M.H., Khorsandi, N., Nikkami, D., Pazira., E., and Sarreshtedari, A. 2013. Application of fuzzy logic to some imprecise data of rainfall erosivity and its spatial variability in Caspian Sea Watershed. Soil Res. J. 27: 3. 397-404. (In Persian)
17.Mitra, B., Scott, H.D., Dixon, J.C., and McKimmey, J.M. 1998. Applications of fuzzy logic to the prediction of soil erosion in a large watershed. Geoderma J. 86: 183-209.
18.Moghaddamnia, A., GhafariGousheh, M., Piri, J., Amin, S., and Han D. 2008. Evaporation estimation using artificial neural networks and adaptive neuro-fuzzy inference system techniques. Advances in Water Resources. 32: 88-97.
19.Noori, R., Karbassi, A.R., Moghaddamnia, A., Han, D., Zokaei-Ashtiani, M.H., Farokhnia, A., and Ghafari Gousheh, M. 2011. Assessment of input variables determination on the SVM model performance using PCA, Gamma test, and forward selection techniques for monthly stream flow prediction. Hydrol. J. 401: 177-189.
20.Poesen, J., and Ingelmo-Sanchez, F. 1992. Runoff and sediment yield from topsoil with different porosity and affected by rock fragment cover and position. Catena J. 19: 451-474.
21.Refahi, H.Gh. 2007. Water Erosion and Conservation. Tehran University Press, 671p. (In Persian)
22.Remesan, R., Shamim, M.A., and Han, D. 2008. Model data selection using gamma test for daily solar radiation estimation. Hydrol. Proc. J. 22: 4301-4309.
23.Rodríguez, J.L.G., and Suárez, M.C.G. 2010. Historical review of topographical factor LS of water erosion models. Aqua-LAC J. 2: 56-61.
24.Samadzadeh, R., and Haddadi, SH. 2010. Assessment of erodibility and sedimentation in Pilleh rooud watershed of Ardabil using fuzzy logic. J. Geograph. Perspective. 4: 10. 75-99.
25.Shabani Nia, F., and Saeed Nia, S. 2009. Fundamental of Fuzzy Control Toolbox Using MATLAB. Khaniran, Tehran, 135p. (In Persian)
26.Tayfur, G., Ozdemir, S., and Singh, V. 2003. Fuzzy logic algorithm for runoff-induced sediment transport from bare soil surfaces. Adv. Water Resour. J. 26: 1249-1256.

27.Torri, D., Poesen, J., and Borselli, L. 1997. Predictability and uncertainty of the soil erodibility factor using a global dataset. Catena J. 31: 1-22.
28.Tran, L. 1999. Multiobjective Fuzzy Regression and its Application to Erosion Prediction. PhD Dissertation. Department of Geography, the University of Hawaii.
29.Tran, L.T., Ridgley, M.A., Duckstein, L., and Sutherland, R. 2002. Application of fuzzy logic-basic modeling to improve the performance of the Revised Universal Soil Loss Equation. Catena J. 47: 203-226.
30.USDA-NRCS. 1996. Manual Soil Survey Investigations Report; Nebraska.
31.Zahiri, A., Ghabaei-Sough, M., and Mosaedi, A. 2011. Determination of Influence Parameters and its Optimal Combination in Order to Model Flood Rivers Discharge. J. Water Soil. 25: 6. 1480-1493. (In Persian)
32.Zangiabadi, M., Rangavar, A., Refahi, H.Gh., Shorafa, M., and Bihamta, M.R. 2010. Investigation of the most important factors affecting on soil erosion in Kalat semi-arid rangelands. J. Water Soil. 24: 2. 737-744. (In Persian)
33.Zhang, G.H., Liu, B.Y., Nearing, M.A., Huang, C.H., and Zhang, K.L. 2002. Soil detachment by shallow flow. Trans. ASAE J. 45: 351-357.

Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources

J. of Water and Soil Conservation, Vol. 22(4), 2015
http://jwsc.gau.ac.ir

Modeling some factors of affecting rill erosions using fuzzy inference system

S.M. Hosseini[1], *A. Mosaedi[2], A. Golkarian[3] and K. Nasseri[3]

[1]M.Sc. Graduate, Dept. of Rangeland and Watershed Management, Ferdowsi University of Mashhad,
[2]Professor, Dept. of Rangeland and Watershed Management, Ferdowsi University of Mashhad,
[3]Assistant Prof., Dept. of Rangeland and Watershed Management, Ferdowsi University of Mashhad
Received: 01/18/2014; Accepted: 05/05/2014

Abstract

Background and Objectives: Rill erosion is causes soil degradation, loss of rangeland potential and unfavorable conditions for plant establishment. So understanding, modeling and predicting this type of erosion on rangeland and natural resource management is important. One of the major challenges in planning and management of natural ecosystems such as rangelands is lack of understanding the complexities and dynamics of these ecosystems in conventional models. That based on basic idea of fuzzy theory, this limit can be entered in the model. The main aim of this study is to design and evaluate the performance of rill erosion prediction model using fuzzy inference systems on a part of Ahmadabad- Mashhad rangelands.

Materials and Methods: In this study by establishing 50-m transects in each different slope length, the number of rills and effective parameters in shaping rills, including canopy cover, ground cover, gravel, sand, silt, clay, slope and mutual effects between length and degree of slope have been measured. By measuring, width and depth of any rill and their geometric section, cross-section of rills have been calculated. Then by using Gamma test, the optimal combination of variables "percentage of gravel surface", "mutual effects between length and degree of slope" and "amount of silt available in soil" as inputs factors and "cross-section of rills per unit length" as variable Output (Function) were chosen for the fuzzy modeling. Some (9) different combinations of membership functions to fuzzification of input and output variables with 5 defuzzification approach combined maximum - minimum of fuzzy were trial and error. Model is chosen so that the addition of small amounts of IPE, the generalizability also is appropriate.

Results: Results showed that the defuzzification of smallest maximum (SOM) has the lowest IPE compared with the other methods and then the mean of maximum method (MOM) with the lowest IPE was used in second priority. In all methods of defuzzification (except the mean of maximum method), models such as “Gaussian – trapezoidal” “Gaussian 2 – trapezoidal” and “Gaussian 2” selected models are known. According to the results obtained, in the erosion modeling using the softer functions such as Gaussian, will lead to better results than the sharp and simple functions such as trapezoidal and triangular. The combination of two trapezoids and triangles will have better results than using each alone, if only the simplicity of the model has to be considered.

Conclusion: Gaussian membership function with the defuzzification of smallest maximum is the optimal model for predicting rill erosion in Ahmad-Abad area of Mashhad.

Keywords: Membership function, Fuzzy logic, Rill erosion, Rangeland, Ahmad-Abad Mashhad

* Corresponding Author; Email: mosaedi@um.ac.ir