

نقشه‌بندی فرساینده‌گی باران در استان کرمان با روش‌های زمین‌آماري

عطالله کاویان* - دانشیار دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، گروه آبخیزداری
زینب جعفریان - دانشیار دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، گروه مرتعداری
افشین جهانشاهی، دانشجوی دکتری آبخیزداری دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری
محمد گلشن - دانشجوی دکتری آبخیزداری دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری

پذیرش مقاله: ۱۳۹۴/۰۴/۰۴ تأیید نهایی: ۱۳۹۴/۰۸/۱۰

چکیده

این پژوهش با هدف تعیین شاخص فرساینده‌گی باران (EI_{30}) در اقلیم نیمه‌خشک استان کرمان انجام گرفت. بدین منظور برای مناطق فاقد ایستگاه‌های باران‌نگار از تحلیل رگرسیونی بین این شاخص و بعضی شاخص‌های زودیاقت برای ۱۷ ایستگاه مجهز به باران‌نگار استفاده شد. مناسب‌ترین رابطه رگرسیونی بر مبنای شاخص متوسط حداکثر بارندگی ماهانه به میزان ($R^2 = 0.882$) بود. سپس، با بررسی تمامی ایستگاه‌های هواشناسی در استان کرمان (آمار شدت و روزانه بارندگی)، ۱۳۵ ایستگاه با بیش از ۲۰ سال آمار برای تهیه نقشه فرساینده‌گی باران انتخاب شد. نتایج نشان داد حداکثر و حداقل شاخص مورد نظر به ترتیب برابر با ۲۱۳/۷۴ و ۲۴/۹۱ مگاژول-میلی‌متر بر هکتار در ساعت و در سال برای ایستگاه‌های سلطانی و دولت‌آباد اسفندقه بود. در نهایت، با استفاده از تکنیک ارزیابی متقابل، روش زمین‌آماري کربجینگ ساده مناسب‌ترین روش پهنه‌بندی انتخاب و نقشه پهنه‌بندی شاخص فرساینده‌گی باران برای استان کرمان در نرم‌افزار ArcGIS 10.3 تهیه شد. نتایج نشان داد مقدار این شاخص در غرب و جنوب‌غربی استان دارای بیشترین و در شرق، جنوب و شمال استان دارای کمترین مقدار است. همچنین، معادلات مربوط به همبستگی شاخص‌های مورد بررسی با شاخص EI_{30} به دست آمد که نشان‌دهنده همبستگی قوی این شاخص با شاخص‌های زودیاقت بود.

کلیدواژه‌ها: ارزیابی متقابل، استان کرمان، باران‌نگار، شاخص EI_{30} .

مقدمه

فرساینده‌گی باران نیروی محرکه یا توان عوامل فرسایش‌زا در جداسازی و انتقال ذرات خاک در ارتباط با فرسایش آبی است (لال و البوت، ۱۹۹۴). فرسایش بارانی موجب هدررفت خاک، آسیب به کشاورزی و زیربناها می‌شود و آلودگی آب را به دنبال دارد. تغییرات در الگوهای بارش خطر فرسایش در سرتاسر جهان را تشدید می‌کند (برنستین، ۲۰۰۷؛ سانچز مورنو و همکاران، ۲۰۱۴). قدرت فرساینده‌گی باران نقش زیادی در فرسایش خاک دارد نشان‌دهنده پتانسیل فرسایش در مناطق مورد نظر است (مورگان، ۱۹۹۵). به دنبال فرساینده‌گی باران انواع فرسایش آبی صورت می‌گیرد که نه تنها باعث ازبین‌رفتن خاک به منزله ثروتی طبیعی می‌شود، بلکه مشکلات دیگری را نیز در پی خواهد داشت که پرشدن مخازن

سدها، کانال‌ها، آلودگی آب و تغییرات اکولوژیکی بخش کوچکی از مشکلات شناخته‌شده بشر است. با توجه به مشکلات یادشده، بررسی جنبه‌های مختلف فرسایش آبی ضروری به نظر می‌رسد (علی‌پور و همکاران، ۱۳۸۹). اگر سایر خصوصیات مؤثر بر بارش ثابت در نظر گرفته شود، میزان تلفات خاک مستقیماً متناسب با میزان فرساینده‌گی باران خواهد بود. این عامل معمولاً در قالب شاخص‌های فرساینده‌گی مبتنی بر خصوصیات بارنده‌گی بیان می‌شود (حکیم‌خانی و حکیم‌خانی، ۱۳۸۹). محققان مختلف با اندازه‌گیری هم‌زمان میزان پاشمان یا تلفات خاک و خصوصیات بارنده‌گی و برقراری روابطی بین آن‌ها، اقدام به ارائه شاخص‌هایی کرده‌اند که مبتنی بر خصوصیات بارنده‌گی است. تاکنون شاخص‌های مختلفی در دنیا ارائه شده است که بسته به منطقه جغرافیایی، مقیاس، شرایط محلی و نوع اندازه‌گیری متفاوت با یکدیگرند (سالس و پوسن، ۲۰۰۰؛ ویشمایر و اسمیت، ۱۹۷۸).

مفهوم عبارت فرساینده‌گی باران را ویشمایر و اسمیت (۱۹۷۸) در سال ۱۹۵۸ به منظور لحاظ تأثیر اقلیم بر فرسایش خاک بیان کردند. فرساینده‌گی باران را می‌توان با استفاده از دو روش اندازه‌گیری مستقیم و استفاده از شاخص‌ها تعیین کرد (لال و الیوت، ۱۹۹۴). روش اندازه‌گیری مستقیم روشی مناسب برای تعیین قدرت فرساینده‌گی باران است که از طریق اندازه‌گیری میزان پاشمان صورت می‌گیرد. به دلیل اینکه اندازه‌گیری مستقیم قدرت فرساینده‌گی باران در سطح وسیع و برای تمام بارنده‌گی‌ها کاری دشوار و زمان‌بر است، محققان مختلف (لال و الیوت، ۱۹۹۴؛ سالس و پوسن، ۲۰۰۰؛ ویشمایر و اسمیت، ۱۹۷۸) با اندازه‌گیری هم‌زمان میزان پاشمان یا تلفات خاک و خصوصیات بارنده‌گی و برقراری روابطی بین آن‌ها، به شاخص‌هایی مبتنی بر خصوصیات بارنده‌گی دست یافته‌اند. با استفاده از این شاخص‌ها و بدون نیاز به اندازه‌گیری مستقیم می‌توان قدرت فرساینده‌گی باران برای مناطق مختلف را تعیین کرد.

به‌طور کلی، شاخص‌های فرساینده‌گی باران را می‌توان در قالب دو گروه شاخص‌های مبتنی بر انرژی و شدت بارنده‌گی و شاخص‌های مبتنی بر آمار زودیافت بارنده‌گی تقسیم کرد (حکیم‌خانی و همکاران، ۱۳۸۴). از معروف‌ترین شاخص‌های این گروه می‌توان به EI_{30} (ویشمایر و اسمیت، ۱۹۷۸) اشاره کرد که در آن به نحوی از شدت بارنده‌گی و انرژی جنبشی استفاده شده است. یکی از محدودیت‌های این شاخص و دیگر شاخص‌های مبتنی بر انرژی جنبشی و شدت بارنده‌گی، نیاز به داده‌های بارنده‌گی با فواصل زمانی کوتاه‌مدت و آمار طولانی‌مدت (بالاتر از ۲۰ سال) است که به ایستگاه‌های هواشناسی مجهز به باران‌نگار احتیاج دارد (ویشمایر و اسمیت، ۱۹۷۸). به دلیل اینکه چنین آماری در بیشتر نقاط دنیا وجود ندارد و فرایند محاسبه آن وقت‌گیر و مشکل است (سیلوا، ۲۰۰۴)، از این‌رو محققان مختلف با استفاده از آمار زودیافت بارنده‌گی (روزانه و ماهانه) که در ایستگاه‌های باران‌سنج در دسترس است، توانسته‌اند شاخص‌های ساده‌تر و زودیافت ارائه کنند. این شاخص‌ها یا از طریق تحلیل منطقه‌ای تولید رسوب یا از طریق برقراری همبستگی و رابطه با EI_{30} به دست آمده‌اند. ویشمایر و اسمیت (۱۹۷۸) نشان دادند هنگامی که دیگر فاکتورهای مرتبط با بارش ثابت است، تلفات خاک متناسب با بارش ثابت است و تلفات خاک متناسب با انرژی بارش (E) در زمان‌های حداکثر ۳۰ دقیقه در مقادیر مربوط به شدت I_{30} است (برآورد دقیق این شاخص نیاز به داده‌های مداوم و طولانی‌مدت بارش دارد).

برای مقابله با فقدان و کمبود داده‌ها دیگر شاخص‌ها گاه همبستگی‌های بهتری جهت اندازه‌گیری فرساینده‌گی نسبت به R دارد که بعضی از معروف‌ترین این شاخص‌ها عبارت است از ضرایب بارش‌های ماهانه و سالانه از قبیل

KE>25 (هادسون، ۱۹۷۱)، شاخص Alm (لال، ۱۹۷۶)، شاخص فورنیه (فورنیه، ۱۹۶۰)، شاخص فورنیۀ اصلاح‌شده^۱ (آرنولدز، ۱۹۷۷) و شاخص با پایه فیزیکی A (سوخانوسکی و همکاران، ۲۰۰۲).

اودنگب و همکاران (۲۰۰۸) برای تهیه نقشۀ فرساینده‌گی باران از شاخص فرساینده‌گی باران مدل‌های USLE و RUSLE استفاده کردند. همبستگی بین شاخص فرساینده‌گی سالانه و میزان بارندگی سالانه به میزان $r^2=0/۸۳$ نشان‌دهنده همبستگی بالای این دو است. افگیون و همکاران (۲۰۱۱) در منطقه اوگان^۲ در نیجریه با استفاده از آمار بارندگی ۲۰ ساله به بررسی میزان فرساینده‌گی باران با استفاده از شاخص فورنیۀ اصلاح‌شده پرداختند. مقدار فرساینده‌گی سالانه $۱۹۵۸۳/۸۲$ (MJ.mm/ha.h.yr) و ضریب همبستگی بین مقدار فرساینده‌گی سالانه و بارندگی سالانه $r^2=0/۷۷$ به دست آمد. با رسم نقشه‌های فرساینده‌گی مشخص شد بیشترین مقدار آن مربوط به جنوب غرب منطقه است. کاویان و همکاران (۲۰۱۱) در تحقیقی به تهیه نقشۀ فرساینده‌گی باران در حوضۀ آبخیز گرگان‌رود پرداختند. ایشان از آمار شش ایستگاه باران‌نگار (فواصل زمانی ۱۵ دقیقه‌ای) و یازده ایستگاه باران‌سنج استفاده کردند. نتایج آنالیز آماری نشان داد که مقادیر EI_{30} اختلاف معناداری بین فصل‌های پاییز/ زمستان و زمستان/ بهار دارد. همچنین، نتایج حاکی از این بود که طی فصل تر، فرساینده‌گی از ۴۳۸ میلی‌ژول بر میلی‌متر در ساعت در غرب منطقه یا مقدار ۱۰۱۵ میلی‌ژول در میلی‌متر در ساعت در میانه منطقه متفاوت است. اما در فصل خشک، مقدار آن کمتر از مقادیر مربوط به فصل تر و بیشترین مقدار مربوط به مرکز منطقه و کمترین آن مربوط به غرب و شرق منطقه مورد مطالعه است.

مرادی و همکاران (۱۳۸۵) در تحقیقی به منظور بررسی ارتباط بین پارامترهای بارندگی و شاخص EI_{30} ، از آمار ۱۳ ساله سه ایستگاه هواشناسی در استان خوزستان و یک ایستگاه در هر یک از استان‌های بوشهر و کهگیلویه و بویراحمد استفاده کردند. آن‌ها رابطه رگرسیونی بین خصوصیات بارندگی و فرساینده‌گی را در مقاطع زمانی، ماهانه، فصلی و سالانه بررسی کردند. نتایج نشان‌دهنده ارتباط بالای فرساینده‌گی با مقدار حداکثر شدت ۳۰ دقیقه‌ای بود و مشخص شد که فصل زمستان و نیز ماه‌های بهمن، آذر، اسفند و دی در اولویت اول از نظر خطر فرساینده‌گی قرار دارد.

شریفیان (۱۳۸۶) در ایستگاه سینوپتیک گرگان (۱۹۸۳-۱۹۷۳) به منظور محاسبه شاخص R در روش ویشمایر از آمار ۱۰ دقیقه‌ای استفاده کرد. وی با استفاده از نتایج به دست آمده، و تعیین روابطی بین R محاسبه‌شده و پارامترهای مختلف بارندگی نظیر میزان بارندگی، باران روزانه، حداکثر باران روزانه، حداکثر شدت باران یک ساعته، باران شش ساعته و باران سالانه، معادلاتی برای برآورد ضریب فرساینده‌گی به دست آورد که بعضی از این معادلات از ضریب همبستگی بالا و دقت مناسبی برخوردار است.

همتی و همکاران (۱۳۸۶) با استفاده از آمار تلفات ۲۴ پلات احداث‌شده در منطقه کبوده علیا در استان کرمانشاه، به این نتیجه رسیدند که شاخص EI_{60} بیشترین همبستگی را با مقادیر تلفات خاک دارد. حکیم‌خانی و حکیم‌خانی (۱۳۸۸) در استان لرستان با استفاده از شاخص R (EI_{30}) در مدل USLE به تهیه نقشۀ فرساینده‌گی باران پرداختند. آن‌ها به منظور برآورد این شاخص در مناطق فاقد داده‌های ایستگاه‌های باران‌نگار، رابطه رگرسیونی بین شاخص EI_{30} و

1. Modified Fournier

2. Ogun

شاخص‌های زودیافت را بررسی کردند که مناسب‌ترین رابطه رگرسیونی بر مبنای متغیر شاخص فورنیه به ضریب تعیین و اشتباه استاندارد به ترتیب برابر با ۰/۹۵۵ و ۱۱۲ به دست آمد.

علی‌پور و همکاران (۱۳۸۹) در تحقیقی شاخص‌های EI_{30} ، Lal، هادسون و Onchev را در شانزده ایستگاه ثبت بارندگی و سه ایستگاه نزدیک به حوضه دریاچه نمک در دوره آماری ۱۶ تا ۲۶ ساله به دست آوردند. سپس، با بررسی رابطه همبستگی بین این شاخص‌ها و خصوصیات زودیافت بارندگی، مدل‌های رگرسیونی مختلف را در ایستگاه‌های فاقد باران سنج و آمار به دست آوردند. نیک‌کامی و مهدیان (۱۳۹۳) به تهیه نقشه فرسایندهای باران در ایران پرداختند. ایشان ابتدا به منظور بررسی شاخص‌های فرسایندهای باران و انتخاب مناسب‌ترین آن‌ها ۶۴ شاخص مختلف را محاسبه و همبستگی آن‌ها را با تلفات خاک در هفت استان بررسی کردند و EI_{30} مناسب‌ترین شاخص معرفی شد. سپس، شاخص مذکور در ایستگاه‌های دارای باران‌نگار محاسبه و رابطه‌ای بین این شاخص و تعدادی از شاخص‌های زودیافت نظیر فورنیه، فورنیه اصلاح‌شده، باران متوسط سالانه، حداکثر بارندگی روزانه برقرار شد. سپس، با استفاده از شاخص فورنیه اصلاح‌شده به منزله شاخص انتخابی، شاخص EI_{30} برای تمامی ایستگاه‌های باران‌سنج فاقد باران‌نگار محاسبه و نقشه پهنه‌بندی فرسایندهای با استفاده از روش اسپلاین^۱ برای کل ایران رسم شد.

سانچز و همکاران (۲۰۱۴) به تهیه نقشه فرسایندهای باران در منطقه Cape Verde پرداختند. نقشه فرسایندهای از آمار ۷ ساله بارش با تداوم زمانی ۱۵ دقیقه‌ای و با استفاده از روابط سینتیک انرژی^۰ شدت به دست آمد. بین فاکتور فرسایندهای R سالانه حاصل از مقادیر EI_{30} با مقادیر بارش سالانه و شاخص فورنیه اصلاح‌شده و حاصل از داده‌های درازمدت ماهانه رابطه همبستگی برقرار شد. سرانجام، فرسایندهای درازمدت سالانه با استفاده از شاخص فورنیه اصلاح‌شده به نقشه تبدیل شد و مقدار سالانه فاکتور فرسایندهای R به بیش از $1700 (J.mm.m^{-2}.h^{-1})$ رسید. با توجه به رابطه همبستگی بین ارتفاع و بارش در منطقه مورد مطالعه، بیشترین مقادیر فرسایندهای مربوط به ارتفاعات بالا، شیب‌های تند و خاک‌های کم‌عمق است.

ما و همکاران (۲۰۱۴) به بررسی تغییرات مکانی و زمانی فرسایندهای باران در حوضه آبخیز کیجی^۲ در منطقه هیمالیا پرداختند. ایشان با استفاده از داده‌های بارش با تداوم ۱۰ دقیقه‌ای ضریب فرسایندهای R در معادله جهانی فرسایش خاک را برآورد کردند. مقدار میانگین آن $3264 (Mj.mm.ha^{-1}.h^{-1}.yr^{-1})$ و محدوده آن ۲۵۰۵ تا ۵۵۳۸ $(Mj.mm.ha^{-1}.h^{-1}.yr^{-1})$ به دست آمد. رابطه همبستگی قوی‌ای بین ضریب R و بارش سالانه به دست آمد.

صادقی و توانگر (۲۰۱۵) با استفاده از آمار ۲۳ ساله مربوط به ۱۴ ایستگاه در ایران به تهیه نقشه فرسایندهای باران با روش ویشمایر و اسمیت پرداختند. این شاخص با شاخص‌های مختلف فورنیه، فورنیه اصلاح‌شده، Roose و Lo تخمین زده شد. نتایج نشان داد که شاخص Roose و Lo انطباق بیشتری در تخمین شاخص ویشمایر و اسمیت با ضریب تبیین ۳۱ تا ۹۸ درصد ($P < 0.32$) و خطای نسبی ۹ و ۹۸/۳ درصد دارد.

پاناگوس و همکاران (۲۰۱۵) به بررسی ضریب فرسایندهای باران (R) مورد استفاده در معادله جهانی فرسایش خاک

1. Spline
2. Kejie

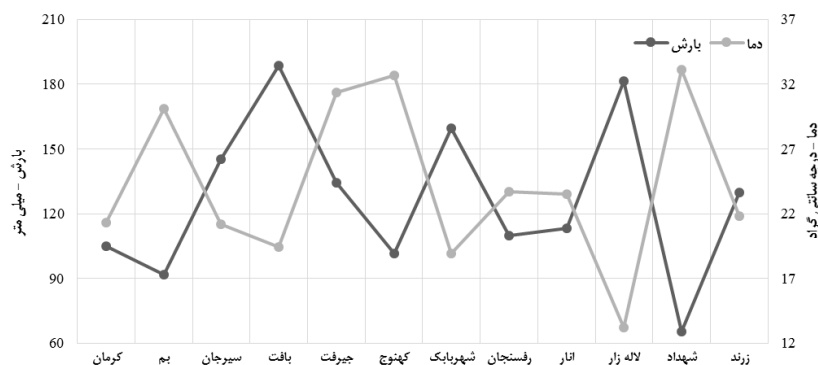
(USLE) پرداختند. هدف از تحقیق ایشان ارزیابی فرسایش‌پذیری بارش در اروپا بر اساس داده‌های مربوط به ۱۵۴۱ ایستگاه باران‌سنج با فواصل زمانی ۵ تا ۴۰ دقیقه در کل محدوده اروپاست که با استفاده از توابع رگرسیون خطی در فواصل زمانی ۳۰ دقیقه‌ای به دست آمد. میانگین مقدار R به دست آمده مربوط به منطقه سوییس و برابر با ۷۲۲ $(Mj.mm.ha^{-1}.h^{-1}.yr^{-1})$ و بیشترین آن برابر با ۱۰۰۰ $(Mj.mm.ha^{-1}.h^{-1}.yr^{-1})$ مربوط به منطقه مدیترانه و ناحیه آلباین و کمترین مقدار آن کمتر از ۵۰۰ $(Mj.mm.ha^{-1}.h^{-1}.yr^{-1})$ مربوط به منطقه نوردیک به دست آمد. در پایان نقشه پهنه‌بندی ضریب R با روش رگرسیون گوسین (GPR) برای کل اروپا تهیه شد. بر اساس تحقیق‌های داخلی و خارجی می‌توان گفت که شاخص فرساینده‌ی باران یکی از بهترین شاخص‌های ارزیابی فرسایش خاک است.

استان کرمان در جنوب‌شرقی ایران واقع شده است و به دلیل شرایط خاص اقلیمی از لحاظ پوشش گیاهی پوشش متوسط و پتانسیل فرسایش بالایی دارد. شناسایی مقادیر بارندگی و توزیع فصلی و مکانی آن، همچنین تعیین شاخص فرساینده‌ی باران نقطه‌ی شروعی در شناسایی مناطق با پتانسیل بالای فرسایش‌پذیری به منظور برنامه‌ریزی‌های پیشگیری مدیریتی فرسایش است که این شاخص تا به حال در استان کرمان تعیین نشده است. بنابراین، هدف از انجام تحقیق حاضر دستیابی به نقشه فرسایش‌پذیری استان کرمان و انتخاب مناسب‌ترین روش درون‌یابی است که تاکنون برای استان کرمان به طور جداگانه انجام نشده است. در این تحقیق سعی شده است که نتایج حاصل از داده‌های باران‌نگارهای ثبت به داده‌های باران‌نگارهای غیرثبات تعمیم داده شود.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

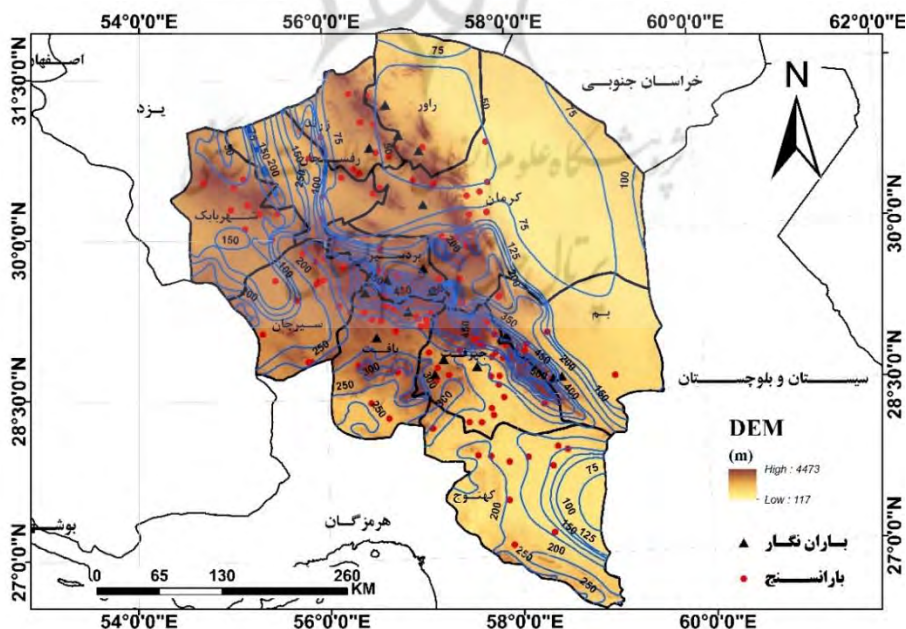
استان کرمان در جنوب‌شرقی ایران و با مساحت ۱۸۱۷۱۴ کیلومتر مربع قرار گرفته، و در برگیرنده بیش از ۱۱ درصد از وسعت ایران است که از لحاظ وسعت خاکی بزرگ‌ترین استان ایران و در جنوب شرقی فلات مرکزی و بین ۵۳° و ۲۶° تا ۵۹° و ۲۹° طول شرقی و ۲۵° و ۵۵° تا ۳۲° عرض شمالی قرار دارد. ارتفاع حداکثر استان ۴۴۷۳ متر در ارتفاعات مرکزی (ارتفاعات هزار در بردسیر) و ارتفاع حداقل آن ۱۱۷ متر در شرق استان (دشت شهداد) واقع شده است. متوسط بارندگی سالانه استان در سال آبی ۹۳-۱۳۹۲ از حدود ۱۸۸/۵ میلی‌متر در جنوب‌غربی (ارتفاعات شهرستان بافت) تا کمتر از ۶۵/۵ میلی‌متر (دشت شهداد) در شرق استان تنزل دارد. میانگین دمای هوا در همین سال از کمتر از $۱۳/۲$ درجه سانتی‌گراد در مرکز استان (ارتفاعات هزار) تا بیش از $۳۳/۱$ درجه سانتی‌گراد (شهداد) متغیر است. اقلیم غالب منطقه با سیستم دوماترین اصلاح‌شده نیمه‌خشک است که ۳۹/۷ درصد استان را پوشانده است. شکل ۱ نمودار بارندگی و دمای شهرستان‌های استان و شکل ۲ موقعیت استان کرمان در ایران و استان‌های مجاور را نشان می‌دهد.



شکل ۱. نمودارهای بارندگی و دمای شهرستان‌های استان کرمان

انتخاب ایستگاه‌ها و جمع‌آوری آمار بارندگی

در این تحقیق از مجموع ایستگاه‌های سینوپتیک، کليماتولوژی، تبيخیرسنجی و باران‌سنجی معمولی وابسته به وزارت نیرو و اداره هواشناسی داخل استان کرمان، با دوره آماری بیش از ۲۰ سال استفاده شد. کیفیت آمار هر یک از ایستگاه‌های انتخابی از طریق بررسی مقادیر خیلی زیاد و خیلی کم انجام گرفت و در صورت مشاهده داده‌های پرت، نسبت به حذف آن‌ها اقدام شد. تست نرمال بودن داده‌ها با استفاده از آزمون کولموگروف-اسمیرنوف در نرم‌افزار SPSS 22 بررسی شد. لذا، با بررسی تمامی ایستگاه‌های هواشناسی انتخابی ۱۳۵ ایستگاه باران‌سنج معمولی و ۱۷ باران‌نگار مناسب تشخیص داده شد که موقعیتشان روی نقشه DEM در استان کرمان در شکل ۲ نشان داده شده است.



شکل ۲. موقعیت ایستگاه‌های باران‌نگار، باران‌سنج انتخاب‌شده و خطوط هم‌باران در استان کرمان

شاخص فرساینده‌ی باران (EI_{30})

ویشمایر و اسمیت (۱۹۵۸) برای محاسبه‌ی شاخص فرساینده‌ی (EI_{30}) در معادله‌ی جهانی فرسایش خاک (USLE)، از حاصل ضرب انرژی جنبشی بارندگی (E) در حداکثر شدت ۳۰ دقیقه‌ای (I_{30}) بر حسب مگاژول میلی‌متر بر هکتار در ساعت در سال ($Mj.mm.ha^{-1}.hr^{-1}.yr^{-1}$) در سیستم SI استفاده کردند. به‌منظور محاسبه‌ی فرساینده‌ی به روش مذکور ابتدا انرژی جنبشی رگبار با استفاده از رابطه‌ی (۱) محاسبه شد.

$$KE_i = 210/3 + 89 \log I_i \quad (1)$$

که در آن KE_i انرژی جنبشی باران بر حسب مگاژول بر مترمربع در سانتی‌متر باران و I_i شدت بارندگی بر حسب سانتی‌متر بر ساعت برای گام‌های زمانی است. سپس، با استفاده از رابطه‌ی (۲) فرساینده‌ی باران محاسبه می‌شود.

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n EI_i}{100} \quad (2)$$

که در آن R عامل فرساینده‌ی باران بر حسب تن متر بر هکتار ساعت، $\sum_{i=1}^n E$ مجموع انرژی جنبشی رگبار و I_{30} حداکثر شدت بارش ۳۰ دقیقه‌ای پیوسته به سانتی‌متر بر ساعت است. دلیل انتخاب این شاخص زودیافت‌بودن آن است، ضمن اینکه شاخصی مناسب در شرایط متفاوت اقلیمی است که به دفعات در اکثر نقاط کشور، همچنین خارج از کشور استفاده می‌شود و از مقبولیت بیشتری برخوردار است. لذا، در تحقیق حاضر اقدام به برآورد این شاخص با استفاده از دیگر شاخص‌ها شده است.

محاسبه‌ی شاخص‌های زودیافت

محاسبه‌ی EI_{30} مستلزم وجود آمار شدت بارندگی است که در ایستگاه‌های مجهز به باران‌نگار تهیه می‌شود. چنین آماری در بیشتر ایستگاه‌های هواشناسی استان کرمان وجود ندارد و باید آن را برای ایستگاه‌های یادشده برآورد کرد. این برآورد را با استفاده از معادله‌ی رگرسیونی بین شاخص EI_{30} و شاخص‌های زودیافت می‌توان به‌دست آورد. در این تحقیق تعدادی از مهم‌ترین شاخص‌های زودیافت برای ایستگاه‌های مجهز به باران‌نگار شامل شاخص‌های فورنیه (F)، فورنیه اصلاح‌شده (MF)، شاخص فورنیه متوسط سالانه (Fa)، شاخص فورنیه کلی (Ft)، شاخص فورنیه اصلاح‌شده متوسط سالانه (MFa)، شاخص فورنیه اصلاح‌شده کلی (Mft)، متوسط بارندگی حداکثر روزانه (M_d)، بارندگی متوسط سالانه (P)، متوسط تعداد روزهای با بارندگی بیش از ۱۰ میلی‌متر (N_{10})، متوسط حداکثر بارندگی‌های ماهانه (مرطوب‌ترین ماه سال) در دوره آماری (M_p)، مجذور متوسط حداکثر بارندگی‌های ماهانه در دوره آماری (M_p^2) و متوسط بارندگی حداکثر روزانه (Md) استفاده شده است که در ادامه شرح می‌دهیم.

محاسبه‌ی شاخص‌های فورنیه

شاخص‌های فورنیه (F) و فورنیه اصلاح‌شده (MF) این دو شاخص از معروف‌ترین شاخص‌هایی است که همبستگی بالای

آن‌ها با شاخص EI_{30} در تحقیقات زیادی (از جمله اونچف، ۱۹۸۵) به اثبات رسیده است (رابطه ۳).

$$F = \frac{P^r}{P} \quad (3)$$

که در آن p میانگین حداکثر بارندگی (مرطوب‌ترین ماه) ماهانه و P میانگین سالانه بارندگی است (مورگان، ۱۹۹۵). همچنین، آرنولدز (۱۹۸۰) از شاخص فورنیه برای تخمین R سالیانه استفاده کرد. وی شاخص اصلاح‌شده فورنیه را به صورت رابطه (۴) معرفی کرد.

$$MF = \frac{\sum_{i=1}^{12} P_i^r}{P} \quad (4)$$

که در آن P_i متوسط بارش در ماه، i سال و P متوسط سالانه بارندگی است که در این مورد همبستگی بهتری را نشان داد (آرنولدز، ۱۹۸۰). در شاخص فورنیه کلی (Ft) مجذور متوسط حداکثر بارندگی ماهانه در طول دوره آماری محاسبه شد و به متوسط بارندگی سالانه تقسیم می‌شود. شاخص فورنیه متوسط سالانه (Fa) از تقسیم مجذور حداکثر بارندگی ماهانه هر سال به بارندگی همان سال به دست می‌آید. سپس، در طول دوره آماری میانگین‌گیری شده است. شاخص فورنیه اصلاح‌شده کلی (Mft) مجذور متوسط بارندگی هر ماه در طول دوره آماری محاسبه شده و مجموع آن‌ها به متوسط بارندگی سالانه تقسیم شده است (آرنولدز، ۱۹۷۷؛ آرنولدز، ۱۹۸۰؛ میخایلووا و همکاران، ۱۹۹۷؛ هادلی و همکاران، ۱۹۸۵؛ شمشاد و همکاران، ۲۰۰۸). شاخص دیگر فورنیه، فورنیه اصلاح‌شده متوسط سالانه (MFa) است که در آن برای هر سال یک شاخص حساب می‌شود. سپس، میانگین آن‌ها گرفته می‌شود؛ به این صورت که مجذور بارندگی هر ماه در هر سال محاسبه شده و با تقسیم مجموع آن‌ها به بارندگی همان سال، مقدار شاخص فورنیه سال یاد شده به دست آمده است. برای به دست آوردن شاخص متوسط ایستگاه از مقادیر شاخص یاد شده در طول دوره آماری میانگین‌گیری شده است (فرو و پورتو، ۱۹۹۹؛ حکیم‌خانی و حکیم‌خانی، ۱۳۸۹).

برآورد شاخص EI_{30} با استفاده از رابطه رگرسیونی

به منظور برآورد شاخص EI_{30} در ایستگاه‌های باران سنجی، رابطه رگرسیونی بین این شاخص (متغیر وابسته) و شاخص‌های زودیافت (متغیر مستقل) از طریق رگرسیون گام‌به‌گام بررسی شد. سپس، روابط ریاضی بین آن‌ها برقرار شد و بهترین معادله با در نظر گرفتن معیارهای ضریب تعیین و اشتباه استاندارد به دست آمد. در نهایت، شاخص مذکور (EI_{30}) برای ایستگاه‌های فاقد باران نگار برآورد شد.

تهیه نقشه پهنه‌بندی شاخص فرسایندهی باران

برای تبدیل مقادیر برآوردی نقطه‌ای مربوط به شاخص فرسایندهی باران (EI_{30}) به نقشه پهنه‌بندی از روش‌های

درون‌یابی زمین‌آماری استفاده شد، شامل کریجینگ ساده^۱، کریجینگ معمولی^۲، و کوکریجینگ^۳ (با متغیرهای کمکی) در نرم‌افزار ArcGIS 10.3. برای این منظور ابتدا مقادیر مناسب Lag با استفاده از نرم‌افزار GS+ تعیین شد و بعد واریوگرام تجربی و در پی آن واریوگرام مدل به صورت مجزا با استفاده از روش‌های مختلف تولید واریوگرام تهیه شد. برای محاسبه میزان خطای این روش‌های میان‌یابی و ارزیابی کارایی آن‌ها از تکنیک ارزیابی متقابل استفاده شد. در اینجا از معیارهای میانگین خطای اریب (MBE)، میانگین خطای مطلق (MAE)، ریشه دوم میانگین مربع خطا (RMSE) استفاده شده است.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n [Z^*(X_i) - Z(X_i)]^2}{n}} \quad (۵)$$

$$MBE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Z^*(X_i) - Z(X_i)) \quad (۶)$$

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |Z^*(X_i) - Z(X_i)| \quad (۷)$$

که در آن‌ها $Z^*(X_i)$ مقادیر برآوردشده متغیر x در نقطه i ، $Z(X_i)$ مقادیر مشاهده‌شده متغیر x در نقطه i و n تعداد متغیر مشاهده‌شده است.

روش‌های زمین‌آماری

کریجینگ

کریجینگ برآوردگری است که بر منطق میانگین متحرک وزن‌دار استوار است. مقادیر یک متغیر را در نقاط نمونه‌برداری نشده به صورت ترکیبی خطی از مقادیر همان متغیر در نقاط اطراف آن در نظر می‌گیرد و برای برآورد نقاط ناشناخته، به هریک از نمونه‌ها وزنی نسبت می‌دهد. بهترین برآوردکننده خطی ناریب است (معادله ۸).

$$Z_i = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(X_i) \quad (۸)$$

که در آن $Z(X_i)$ مقدار اندازه‌گیری‌شده متغیر در مکان (X_i) ، Z_0 مقدار برآوردشده متغیر در نقطه (X_i) ، λ_i وزن یا اهمیت کمیت وابسته به نمونه نام که بر اساس مقدار کمیت وابسته به نمونه در نقاط معلوم، به پارامتر موردنظر داده می‌شود و n تعداد نقاطی است که متغیر در آن‌ها اندازه‌گیری شده است (ایستگاه). شرط استفاده از این برآوردگر این است که متغیر دارای توزیع نرمال است (زهتابیان و همکاران، ۱۳۸۹؛ رضایی و همکاران، ۱۳۸۹). در این تحقیق از روش‌های کریجینگ ساده، کریجینگ معمولی، لگاریتم داده‌ها در روش کریجینگ و کوکریجینگ استفاده شد.

یافته‌های پژوهش

در استان کرمان تنها هفده ایستگاه باران‌نگار دارد که در این تحقیق انتخاب شدند. نام این ایستگاه‌ها و شاخص EI_{30} و دیگر شاخص‌های زودیافت در جدول ۱ آمده است.

جدول ۱. مقادیر شاخص‌های فرساینده‌گی باران در ایستگاه‌های هواشناسی مطالعاتی مجهز به باران‌نگار

ایستگاه	H	M_d	P	N_{10}	Mp	Mp^2	Fa	Ft	MFa	MfT	EI_{30}	N_t
چهارطاق	۲۵۹۷	۱۳/۷۴	۱۵۴/۴	۴/۸۲	۴۶/۷۴	۲۲۱۴/۶۲	۱۶/۱۲	۱۴/۳۲	۳۳/۱۷	۲۲/۶۲	۱۴۶/۹۱	۱۴/۳
قریه العرب	۲۳۴۰	۱۴/۱	۱۳۴/۲	۴/۶۲	۴۰/۱	۱۷۱۸/۰۱	۱۱/۲۳	۹/۴۷	۳۲/۵۶	۱۲/۹۶	۱۰۱/۹۳	۷/۲
جعفرآباد	۲۴۶۹	۱۶/۴۶	۱۷۶/۴	۴/۶۷	۵۴/۳۷	۳۱۲۴/۰۹	۱۶/۵۲	۱۳/۷۵	۳۹/۵	۲۳/۱۷	۱۶۳/۹۴	۱۳/۴
علی‌آباد سفلی	۱۶۵۸	۱۲/۴۶	۱۱۷/۳	۳/۳۴	۳۴/۴	۱۲۶۳	۱۱/۸۳	۹/۳۲	۲۱/۴۲	۱۳/۴۷	۸۰/۳۷	۱۸/۱
انجیرک	۱۴۳۵	۵/۸۳	۵۶/۴	۱/۸۲	۱۸/۲۳	۴۱۷/۳۲	۴/۷۶	۳/۱۴	۹/۳۲	۴/۴۲	۳۵/۰۹	۱۳/۵
چشمه‌عروس	۲۴۶۰	۱۳/۸۲	۱۳۶/۸۹	۴/۲۴	۴۰/۳۳	۱۸۰۲/۲۵	۱۳/۴۲	۱۱/۱۴	۳۱/۹۴	۱۶/۹۷	۱۰۹/۳۱	۱۱/۶
دهبکری	۲۰۶۰	۱۶/۱	۱۷۴/۲۴	۳/۸۴	۴۹/۴۲	۲۵۷۴/۳۴	۱۳/۹۲	۱۱/۶۳	۳۲/۵۶	۲۲/۱۸	۱۴۷/۰۶	۲۵/۷
دولت‌آباد اسفندقه	۱۷۳۴	۵/۴۲	۳۹/۸	۱/۸۳	۱۷/۳۶	۳۳۱/۳۷	۵/۶۲	۴/۲	۱۴/۱۷	۷/۳۲	۲۴/۹۱	۹/۵
قدرونی	۱۶۹۵	۹/۱	۹۳/۲۳	۲/۷	۲۶/۴۸	۷۸۶/۹۱	۹/۲۷	۸/۳۶	۱۷/۴۶	۱۰/۸۷	۶۹/۰۷	۹/۳
حسین‌آباد	۹۲۷	۶/۴۳	۷۱/۲۳	۱/۹۳	۲۰/۶۳	۴۶۵/۵۱	۶/۶	۵/۲۴	۱۳/۹۳	۷/۵۳	۴۷/۶۸	۱۲/۸
کرمان	۱۷۶۹	۱۰/۹	۱۱۹/۱	۴/۱۸	۳۸/۲۱	۱۵۴۲/۲	۱۳/۲	۱۱/۱۴	۳۰/۳۶	۱۴/۵۳	۹۳/۶۸	۱۰/۳
کناروئیه	۱۴۵۶	۶/۵۷	۴۲/۴	۱/۵۲	۱۶/۸۵	۳۱۴/۳۲	۴/۸۶	۳/۵۲	۹/۶۲	۴/۶۷	۲۷/۵۴	۱۵/۷
راور	۱۱۹۸	۷/۷۸	۷۳/۵۴	۲/۴۲	۲۲/۷۲	۵۴۶/۲۵	۸/۳	۶/۲۴	۱۱/۱۸	۸/۳۲	۵۳/۲۹	۱۱/۱
سارنگ	۱۸۴۴	۱۱/۳۶	۱۳۴/۵۶	۵/۱	۴۱/۴۷	۱۸۴۷/۳۳	۱۳/۲۹	۱۰/۳	۲۹/۴۱	۱۶/۳۷	۱۰۵/۴۵	۱۹/۶
سلطانی	۲۰۷۰	۳۰/۵۴	۱۹۴/۷	۵/۶۳	۷۰/۷۱	۵۱۲۱/۲۶	۱۹/۰۷	۱۵/۰۶	۴۰/۰۴	۲۳/۸۴	۲۱۳/۷۴	۴۰/۳
یالخری	۱۲۳۰	۵/۴۲	۳۳/۷	۱/۵۱	۱۵/۸	۲۷۳/۱	۴/۷۳	۲/۵۶	۹/۲۸	۴/۲۸	۲۶/۱۴	۱۶/۵
هفت کوسک	۲۸۱۶	۲۳/۳۶	۱۸۳/۶	۵/۳۸	۵۷/۸۳	۳۵۴۵/۴۹	۱۸/۶۸	۱۶/۵۱	۳۹/۷۴	۲۴/۱۲	۱۹۰/۳۵	۱۸/۴

H ارتفاع از سطح دریا به متر، M_d متوسط بارندگی حداکثر روزانه به میلی‌متر، P متوسط بارندگی سالانه به میلی‌متر، N_{10} متوسط تعداد روزهای با بارندگی بیش از ۱۰ میلی‌متر، Mp متوسط حداکثر بارندگی ماهانه به میلی‌متر، Fa شاخص فورنیة متوسط سالانه به میلی‌متر، Ft شاخص فورنیة کلی به میلی‌متر، MFa شاخص فورنیة اصلاح‌شده متوسط سالانه به میلی‌متر، MfT شاخص فورنیة اصلاح‌شده کلی به میلی‌متر، EI_{30} بر حسب مگاژول - میلی‌متر بر هکتار در ساعت در سال و N_t تعداد روزهای باران در سال است.

با توجه به جدول ۱، حداکثر، حداقل و میانگین شاخص EI_{30} به ترتیب ۲۱۳/۷۴، ۲۴/۹۱ و ۹۶/۲۶ مگاژول - میلی‌متر بر هکتار در ساعت در سال است. به منظور بررسی روابط و ضرایب همبستگی بین متغیرهای مستقل و متغیر وابسته (EI_{30}) و همبستگی بین متغیرهای مستقل، ماتریس همبستگی در جدول ۲ نشان داده شده است.

جدول ۲. ماتریس همبستگی شاخص‌های مورد بررسی

شاخص	EI_{30}	P	N_{10}	M_d	M_p	Mp^2	Fa	Ft	MFa	MFt	N_t
EI_{30}	۱										
P	۰/۸۴۷	۱									
N_{10}	۰/۷۳۴	۰/۸۳۹	۱								
M_d	۰/۷۹۷	۰/۷۹۱	۰/۷۴۱	۱							
M_p	۰/۸۸۲	۰/۸۷۶	۰/۸۳۵	۰/۸۵۳	۱						
Mp^2	۰/۸۵۲	۰/۸۲۳	۰/۷۷۳	۰/۸۷۹	۰/۸۸۱	۱					
Fa	۰/۸۴۳	۰/۸۷۳	۰/۸۵۳	۰/۷۹۵	۰/۸۷۲	۰/۸۲۵	۱				
Ft	۰/۸۱۶	۰/۸۶۶	۰/۸۴۹	۰/۷۶۲	۰/۸۵۱	۰/۷۹۲	۰/۸۹۳	۱			
MFa	۰/۷۸۶	۰/۸۶۳	۰/۷۵۸	۰/۷۵۵	۰/۸۵۶	۰/۸	۰/۸۹۳	۰/۸۵۶	۱		
MFt	۰/۸۳۷	۰/۸۷۴	۰/۸۱	۰/۷۵۹	۰/۸۵۹	۰/۸۰۹	۰/۸۵۸	۰/۸۷۵	۰/۸۵۲	۱	
N_t	۰/۶۵۲	۰/۴۹۸	۰/۴۰۲	۰/۷۰۸	۰/۶۰۸	۰/۷	۰/۸۷۷	۰/۴۰۶	۰/۴۸۵	۰/۴۸۵	۱

تمامی همبستگی‌ها در سطح معناداری ۰/۰۱

طبق جدول ۲، شاخص EI_{30} بیشترین همبستگی را با شاخص Mp ($R^2 = 0/882$) دارد و شاخص‌های P ، Mp^2 ، MFt و Fa به ترتیب با ضرایب همبستگی $0/852$ ، $0/847$ ، $0/843$ و $0/837$ در رده‌های بعدی قرار دارد. ارتفاع ایستگاه (H) کمترین همبستگی را با شاخص EI_{30} ($R^2 = 0/638$) نشان داد. تمامی متغیرها به غیر از ارتفاع ایستگاه همبستگی بالای ۰/۸ با EI_{30} دارد. همبستگی داخلی بین شاخص‌ها بالاست که تأثیرپذیری آن‌ها نسبت به هم را نشان می‌دهد. برای مثال، شاخص Fa (فورنیة متوسط سالانه) دارای ضریب همبستگی برابر با $0/893$ با شاخص Ft (فورنیة کلی) است. مهم‌ترین دلیل همبستگی بالای بین شاخص EI_{30} و دیگر شاخص‌ها لحاظ‌شدن بارندگی در آن‌هاست. از بین روابط مختلف حاصل از ترکیب و همبستگی شاخص‌ها، رابطه (۹) به دلیل داشتن ضریب تعیین بالا و اشتباه استاندارد برآورده‌شده کمتر برای انجام محاسبات انتخاب شده است. شکل ۳ خط برازش داده‌شده بین شاخص EI_{30} و MP ، همچنین جدول ۳ دیگر روابط به‌دست‌آمده را نشان می‌دهند.

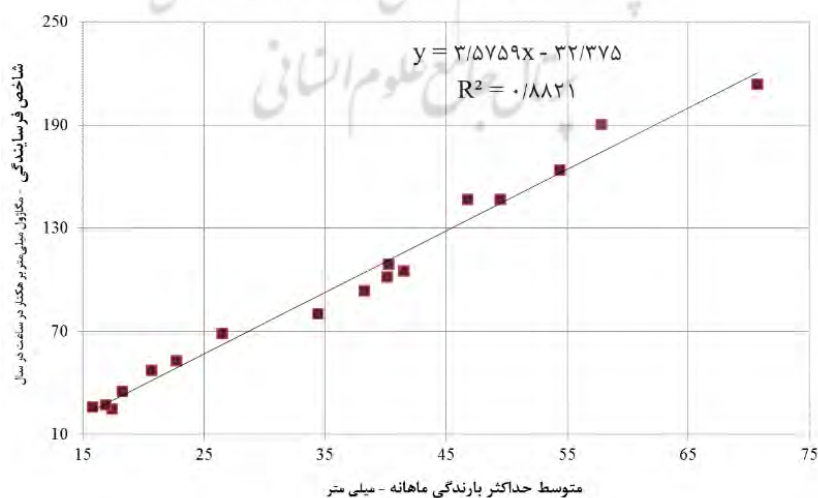
$$EI_{30} = 3/5759Mp - 32/375 \quad (9)$$

در این رابطه MP متوسط حداکثر بارندگی ماهانه به میلی‌متر و واحد EI_{30} مگاژول - میلی‌متر بر هکتار در ساعت و در سال است. لازم به ذکر است که این رابطه در سطح خطای ۱ درصد معنادار است.

جدول ۳. معادلات مربوط به همبستگی شاخص‌های مورد بررسی با شاخص EI₃₀

شاخص	معادله شاخص فرساینده (مگاژول - میلی‌متر بر هکتار در ساعت در سال)	R ²
متوسط حداکثر بارندگی ماهانه	$3 / 5759Mp - 32 / 375$	۰/۸۸۲
(متوسط حداکثر بارندگی ماهانه) ^۲	$0 / 0426Mp^2 + 26 / 335$	۰/۸۵۲
متوسط بارندگی سالانه	$1 / 0763P - 26 / 226$	۰/۸۴۷
فورنیة متوسط سالانه	$11 / 837Fa - 37 / 026$	۰/۸۴۳
فورنیة اصلاح‌شده کلی	$7 / 919Mft - 14 / 436$	۰/۸۳۷
فورنیة کلی	$12 / 812Ft - 21 / 709$	۰/۸۱۶
متوسط بارندگی حداکثر روزانه	$8 / 3126Md - 6 / 1246$	۰/۷۹۷
فورنیة اصلاح‌شده متوسط سالانه	$4 / 8134Mfa - 21 / 429$	۰/۷۸۶
متوسط تعداد روزهای با بارندگی بیش از ۱۰ میلی‌متر	$37 / 297N_{10} - 34 / 276$	۰/۷۳۴
ارتفاع از سطح دریا (متر)	$-0 / 238N_t + 24 / 973$	۰/۶۳۸
تعداد روزهای باران در سال	$24 / 973N_t - 0 / 238$	۰/۶۵۲

H ارتفاع از سطح دریا به متر، M_d متوسط بارندگی حداکثر روزانه به میلی‌متر، P متوسط بارندگی سالانه به میلی‌متر، N₁₀ متوسط تعداد روزهای با بارندگی بیش از ۱۰ میلی‌متر، M_p متوسط حداکثر بارندگی ماهانه به میلی‌متر، Fa شاخص فورنیة متوسط سالانه به میلی‌متر، Ft شاخص فورنیة کلی به میلی‌متر، MFa شاخص فورنیة اصلاح‌شده متوسط سالانه به میلی‌متر، Mft شاخص فورنیة اصلاح‌شده کلی به میلی‌متر، EI₃₀ بر حسب مگاژول - میلی‌متر بر هکتار در ساعت در سال، N_t تعداد روزهای باران در سال

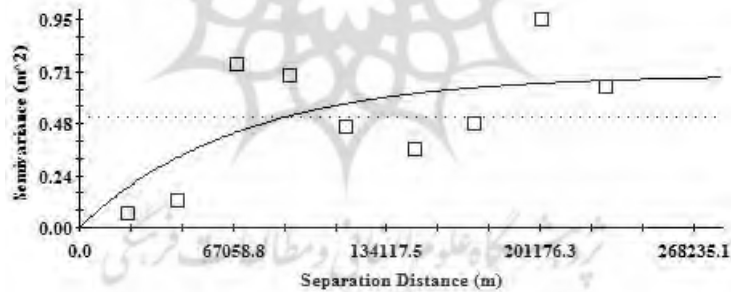


شکل ۳. خط برازش داده‌شده به شاخص فرساینده و متوسط حداکثر بارندگی ماهانه

برای رسم نقشه فرساینده‌ی باران، ابتدا داده‌ها وارد نرم‌افزار SPSS شد و نرمال بودن داده‌ها با آزمون کولموگروف-اسمیرنوف بررسی و مشخص شد داده‌ها در حالت خام نرمال است. سپس، داده‌ها وارد نرم‌افزار GS+ شد. پس از بررسی روند داده‌ها مشخص شد که داده‌ها همسان‌گرد مدل نمایی مناسب‌ترین مدل است. سپس، مشخصات واریوگرام به‌دست آمده وارد نرم‌افزار ArcGIS 10.3 شد و نقشه فرساینده‌ی رسم شد. در جدول ۴ مشخصات واریوگرام، در شکل ۴ مناسب‌ترین مدل واریوگرام و در جدول ۵ نتایج ارزیابی متقابل روش‌های زمین‌آماري مورد استفاده به‌منظور تهیه نقشه شاخص EI_{30} آمده است. همان‌گونه که در این جدول مشخص است، روش کریجینگ معمولی به دلیل ضریب خطاهای کمتر بهترین روش انتخاب و نقشه پهنه‌بندی شاخص فرساینده‌ی باران استان کرمان تهیه شد (شکل ۵).

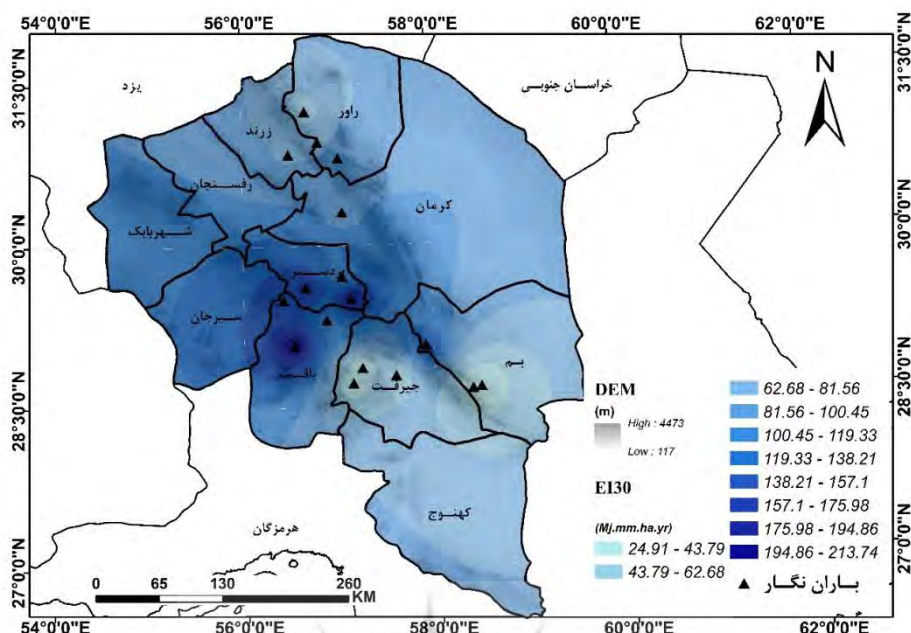
جدول ۴. مشخصات مدل‌های واریوگرام برآورد شده شاخص EI_{30}

مدل	اثر قطعه‌ای	آستانه (متر)	دامنه مؤثر (متر)	R^2	RSS
کروی	۰/۱۱۴	۰/۶۹	۲۱۶۹۰۰	۰/۶۱	۰/۰۰۴۱
نمایی	۰/۰۰۱	۰/۷	۲۱۰۳۰۰	۰/۷۴	۰/۰۰۳۶
خطی	۰/۲	۰/۷۷	۲۲۹۹۸۷	۰/۲۹	۱/۴۷
گوسین	۰/۰۰۱	۰/۶۱	۸۶۶۰۲	۰/۳۷	۰/۳۲

شکل ۴. مناسب‌ترین مدل واریوگرام شاخص EI_{30}

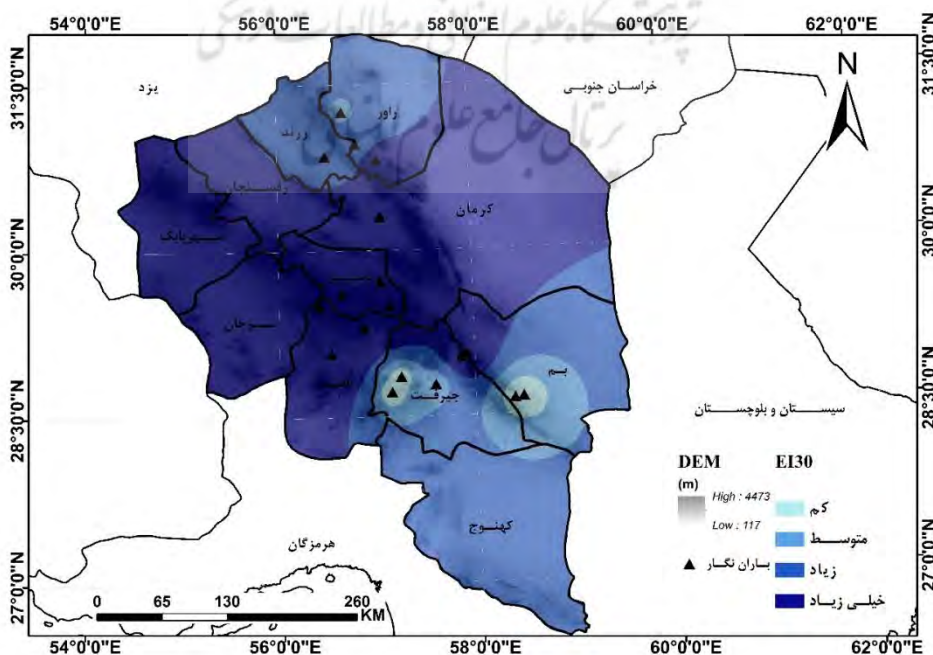
جدول ۵. خطاهای ارزیابی در مدل‌های برازش داده‌شده

مدل	متغیر کمکی	RMSE	MBE	MAE
کریجینگ ساده	-	۶۲/۱۴	۱/۰۸	۲۶/۲۸
کریجینگ معمولی	-	۴۵/۴۱	۰/۹۵	۱۹/۷۱
لوگ کریجینگ	-	۴۶/۷۱	۱/۱۳	۸۸/۱۴
	ارتفاع	۸۰/۱۱	۱/۴۸	۴۴/۲
	متوسط حداکثر بارندگی ماهانه	۷۰/۶۳	۱/۱۶	۴۳/۷
کو کریجینگ	(متوسط حداکثر بارندگی ماهانه) ^۲	۷۱/۳۲	۱/۲۷	۳۵/۰۳
	متوسط بارندگی سالانه	۷۹/۷	۰/۹۸	۳۸/۴۷
	فورنیة اصلاح‌شده کلی	۷۲/۴۴	۱/۲۱	۳۶/۵



شکل ۵. نقشه شاخص فرساینده‌ی باران و DEM در استان کرمان (مگاژول - میلی‌متر در هکتار در ساعت در سال)

در ادامه، برای بررسی وضعیت فرساینده‌ی باران و پتانسیل فرسایشی ناشی از آن در سطح استان، با پهنه‌بندی شاخص فورنیة اصلاح‌شده کلی، نقشه حاصل در پنج کلاس طبقه‌بندی شد. پنج طبقه یادشده شامل طبقه‌های ناچیز ($20 >$)، کم ($20 - 40$)، متوسط ($40 - 60$)، زیاد ($60 - 90$) و خیلی زیاد ($90 <$) است (حکیم‌خانی و همکاران، ۱۳۸۴؛ قربان‌پور، ۱۳۸۳؛ محمدی، ۱۳۷۷) که نقشه حاصل از این دسته‌ها در شکل ۶ آمده است.



شکل ۶. طبقه‌بندی کلاس‌های فرسایشی در استان کرمان

بحث و نتیجه‌گیری

هدف این تحقیق تهیه نقشه فرساینده‌ی باران با استفاده از آمار بارندگی‌های لحظه‌ای در ایستگاه‌های ثبات و برقراری رابطه همبستگی بین آمار زودیافت بارندگی و این شاخص‌ها به منظور تهیه نقشه فرساینده‌ی باران در منطقه فاقد داده‌های باران نگار در استان کرمان بود. شبیه‌سازی مطمئن این شاخص در بعد مکان است. در این تحقیق از حداکثر شدت بارندگی ۳۰ دقیقه‌ای استفاده شده است که یکی از خصوصیات مهم بارندگی است، در فرساینده‌ی نقش مستقیمی دارد و در معادلات ویشمایر و اسمیت (۱۹۷۸)، اودنگ و همکاران (۲۰۰۸) و افگیون و همکاران (۲۰۱۱) نیز به آن اشاره شده است. دخالت عامل حداکثر شدت ۳۰ دقیقه‌ای باران در افزایش میزان خطر فرساینده‌ی باران، در تحلیل بارندگی بارز است. رگبارهای به‌وقوع پیوسته در ایستگاه سلطانی با بیشترین مقدار نشان‌دهنده این مطلب است. همچنین، نتایج این تحقیق با یافته‌های صادقی (۱۳۸۳) که رابطه‌ای بین شدت بارندگی نیم‌ساعته و شاخص فرساینده‌ی باران با ضریب همبستگی ۰/۹۷ درصد در حوضه آبخیز امامه ارائه کرد همخوانی دارد. پس از تهیه شاخص EI_{30} مشخص شد که ایستگاه سلطانی واقع در شمال شهرستان بافت دارای بیشترین مقدار (۲۱۳/۷۴) و ایستگاه دولت‌آباد اسفندقه واقع در غرب شهرستان جیرفت دارای کمترین مقدار (۲۴/۹۱) است. نتایج نشان داد که شاخص فرساینده‌ی باران بیشترین همبستگی را با متوسط حداکثر بارندگی ماهانه به میلی‌متر، مربع آن و متوسط بارندگی سالانه و کمترین همبستگی را با تعداد روزهای باران در سال دارد. نتایج ارزیابی روش‌های میان‌یابی زمین‌آماری به منظور برآورد شاخص فرساینده‌ی باران بیانگر آن است که روش کریجینگ معمولی با خطای کمتر دقت بالاتری دارد. با پهنه‌بندی نقشه فرساینده‌ی باران مشخص شد که این شاخص در نواحی غرب و جنوب‌غربی استان، در ارتفاعات واقع در شهرستان‌های بافت، بردسیر و سیرجان دارای بیشترین مقدار R (بین ۱۲۷ تا ۲۱۳) و سایر نواحی استان از جمله شهرستان‌های بم، جیرفت، کهنوج و راور واقع در شرق، جنوب و شمال استان دارای کمترین مقدار R (بین ۲۴ تا ۱۲۷) است. این نتیجه با نتیجه تحقیق نیک‌کامی و مهدیان (۱۳۹۳) نزدیک است که نشان دادند ایستگاه بم در ایران در بین ایستگاه‌های مورد بررسی دارای کمترین مقدار فرساینده‌ی باران است. پس از آن نقشه کلاسه‌بندی فرسایش‌پذیری استان به‌دست آمد که مشخص شد ۵/۰۵ درصد از استان در طبقه کم، ۱۱/۶ درصد در طبقه متوسط، ۳۶/۱ درصد در طبقه زیاد و ۴۷/۲۵ درصد در طبقه خیلی زیاد قرار دارد. این طبقه شهرستان‌های کرمان، بافت، سیرجان، شهرابک، بردسیر و رفسنجان را دربرمی‌گیرد. به‌منظور اثبات بیانات قبلی با همپوشانی نقشه DEM با نقشه شاخص EI_{30} ، (شکل ۵) مشخص است میزان این شاخص در امتداد ارتفاعات شمال و شمال‌غرب به سمت مرکز استان به‌خصوص در ارتفاعات هزار دارای توان فرساینده‌ی بیشتر و مناطق شرق (کویر شهداد) و جنوبی استان دارای فرساینده‌ی کمتری است. این مقادیر فرساینده‌ی نشان‌دهنده همخوانی تغییرات بارندگی با توان فرساینده‌ی و دلیلی بر تأیید وجود همبستگی بین ارتفاع ایستگاه‌ها از سطح دریا (H) با این شاخص است ($R^2=0/۶۳۸$). نتایج این قسمت از تحقیق با نتایج حکیم‌خانی و حکیم‌خانی (۱۳۸۹) و نیک‌کامی و همکاران (۱۳۹۳) مطابقت دارد. نقشه فرساینده‌ی باران برای استان کرمان تهیه نشده و تنها سه نقشه کشوری را حکیم‌خانی و همکاران (۱۳۸۴)، محمدی (۱۳۷۷)، سپاسخواه و پناهی (۲۰۰۷) و نیک‌نامی و مهدیان (۱۳۹۳) تهیه کرده‌اند. این تحقیق اولین نقشه جداگانه فرساینده‌ی باران در استان کرمان است که با بررسی یازده شاخص زودیافت انجام شده است، اما محاسبه دقیق R به آمارهای پیوسته و

طولانی مدت باران‌نگارهای ثابت احتیاج دارد. امید است که در آینده با جمع‌آوری آمارهای بیشتر و دقیق‌تر اقدام به محاسبه R و اصلاح Rهای محاسباتی شود. پیشنهاد می‌شود که با تهیه گوه‌های بارش همانند گوه‌های بارش تیپ SCS برای اقلیم‌های مختلف و استفاده از منحنی‌های شدت مدت و دوره بازگشت و سایر پارامترهای بارندگی در دسترس و قابل اطمینان، اقدام به این امر کرد. از کاربردهای شاخص‌های فرساینده‌گی و نقشه‌های حاصل می‌توان به دو مورد اصلی یعنی کمک به برنامه‌ریزی، ارائه و اجرای طرح‌های مناسب حفاظت خاک و کمک به تحقیقات از طریق افزایش آگاهی از مناطق با خطر فرسایش و رسوب‌زایی بالا اشاره کرد (یو، ۱۹۹۸؛ میخایلو و همکاران، ۱۹۹۷). این نقشه‌ها منبع مهمی از اطلاعات است که به آبخیزداران و کارشناسان کشاورزی برای ارائه طرح‌های حفاظت خاک و کنترل فرسایش و مدیریت اراضی کمک شایانی می‌کند. برای مثال، با تهیه نقشه توان فرسایشی و با تلفیق آن با نقشه‌های درصد و تراکم پوشش گیاهی، کاربری اراضی و ارتفاعات می‌توان نقاط با توان فرساینده‌گی بالا را تعیین و نسبت به اقدامات اضطراری حفاظتی در آن‌ها در قالب طرح‌های آبخیزداری اقدام کرد.

سپاسگزاری

محققان پژوهش حاضر بر خود لازم می‌دانند تا از همکاری شرکت سهامی آب منطقه‌ای و اداره کل هواشناسی استان کرمان در خصوص ارائه آمار و اطلاعات مورد نیاز تشکر و قدردانی کنند.

منابع

- حکیم‌خانی، ش.؛ حکیم‌خانی، ا. (۱۳۸۹). تهیه نقشه فرساینده‌گی باران برای استان لرستان. فصلنامه پژوهش‌های آبخیزداری (پژوهش و سازندگی)، ۸۹: ۶۲ - ۷۲.
- حکیم‌خانی، ش.؛ مهدیان، م.ح.؛ عرب‌خداری، م.؛ قربان‌پور، د. (۱۳۸۴). بررسی فرساینده‌گی باران در سطح کشور به روش فورنیه. سومین همایش ملی فرسایش و رسوب، پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری، ۶-۹ شهریور. ص ۲۸۱ - ۲۸۸.
- رضایی، م.؛ دواتگر، ن.؛ تاجداری، خ.؛ ابولپور، ب. (۱۳۸۹). بررسی تغییرات برخی شاخص‌های کیفی آب‌های زیرزمینی استان گیلان با استفاده از زمین‌آمار. نشریه آب و خاک، ۲۴(۵): ۹۳۲ - ۹۴۱.
- زهتابیان، غ.ر.؛ جان‌فزا، ع.؛ محمدعسکری، ح.؛ نعمت‌الهی، م. ج. (۱۳۸۹). مدل‌سازی توزیع برخی از خصوصیات شیمیایی آب‌های زیرزمینی (مطالعه موردی در حوزه آبخیز گرمسار). فصلنامه مرتع و بیابان، ۱۷(۱): ۶۱ - ۷۳.
- شریفان، ح. (۱۳۸۶). بررسی روابط بین ضریب فرساینده‌گی و پارامترهای مختلف باران در منطقه گرگان. مجله علوم کشاورزی و منابع طبیعی، ۴(۴): ۲۰۷ - ۲۱۵.
- صادقی، س.ح.ر. (۱۳۸۳). بررسی تغییرات مکانی شاخص فرساینده‌گی در استان مازندران. طرح پژوهشی سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی.
- علی‌پور، زت.؛ مهدیان، م.ح.؛ حکیم‌خانی، ش.؛ سعیدی، م. (۱۳۸۹). محاسبه و برآورد شاخص‌های Lal, EI_{30} ، هادسون و Onchev در حوضه دریاچه نمک. مجله علوم کشاورزی دانشگاه آزاد اسلامی واحد تبریز، ۴، ویژه‌نامه ۱ (۴): ۱۴۱ - ۱۵۷.
- علی‌پور، زت.؛ مهدیان، م.ح.؛ پذیرا، ا.؛ حیدری‌زاده، م.؛ رحیمی بندرآبادی، س.؛ سعیدی، م. (۱۳۸۹). مقایسه کارایی روش‌های معمول زمین‌آمار با روش فازی کریجینگ در تهیه نقشه هم‌فرساینده‌گی باران در حوزه آبخیز دریاچه نمک. فصلنامه پژوهش‌های آبخیزداری (پژوهش و سازندگی)، ۸۶: ۳۲ - ۴۱.

- قربان‌پور، د. (۱۳۸۳). مطالعه و برآورد شاخص فرساینده‌گی باران (R) در مازندران، پایان‌نامه کارشناسی‌ارشد آبخیزداری، دانشگاه مازندران، ۸۸ ص.
- محمدی، ج. (۱۳۷۷). تهیه نقشه فرساینده‌گی باران در ایران با استفاده از شاخص فورنیه و روش آماری کریجینگ. مجله علوم کشاورزی و منابع طبیعی، ۳(۴): ۳۵-۴۴.
- مرادی، ح. ر.؛ بهزادفر، م.؛ صادقی، س.ح.ر. (۱۳۸۵). بررسی ارتباط بین پارامترهای بارندگی و عامل فرساینده‌گی باران در استان خوزستان. مجله علمی کشاورزی، ۲۹(۴): ۶۹ - ۸۳.
- نیک کامی، د.؛ مهدیان، م.ح. (۱۳۹۳). تهیه نقشه شاخص مناسب باران کشور. نشریه علمی- پژوهشی مهندسی و مدیریت آبخیز. ۶(۴): ۳۶۴ - ۳۷۶.
- همتی، م.؛ احمدی، ح.؛ نیک کامی، د.؛ زهتابیان، غ.ر. (۱۳۸۶). تعیین بهترین شاخص فرساینده‌گی باران در اقلیم نیمه‌خشک سرد ایران (مطالعه موردی ایستگاه تحقیقات حفاظت خاک کیوده علیا - کرمانشاه). چهارمین همایش ملی علوم و مهندسی آبخیزداری ایران، کرج دانشکده منابع طبیعی.
- Alipour, Z.T.; Mahdian, M.H.; Hakimkhani, Sh.; Saeedi, M. (2011). Calculating and estimating of EI_{30} , Lal, Hudson and Onchev indices in namak lake watershed. Journal of Agricultural Sciences of Tabriz Azad University, 4(14): 141-157.
- Alipour, Z.T.; Mahdian, M.H.; Pazira, E.; Heidarizadeh, M.; Rahimi Bandar Abadi, S.; Saeedi, M. (2011). Efficiency comparison of common geostatistics methods with of fuzzy kriging in preparing rainfall isoerodent map in namak lake watershed. Watershed Management Research Journal (Pajouhesh & Sazandegi), 86: 32-41.
- Arnoldus, H. (1977). Methodology used to determine the maximum potential average annual soil loss due to sheet and rill erosion in Morocco. FAO Soils Bull. 34, 39-51.
- Arnoldus, H.M.J. (1980). An approximation of the rainfall factor in the Universal Soil Loss Equation. In: De Boodt, M., Gabriels, D. Eds., Assessment of Erosion. Chichester, New York, 127-132.
- Bernstein, L. (2007). Climate Change 2007: Synthesis Report, Summary for Policymakers Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Un-edited copy Prepared for COP-13 Edition.
- Ferro, V.; Porto, P. (1999). A comparative study of rainfall erosivity estimation for southern Italy and southern Australia. Hydrology Science. 44: 3-24.
- Fournier, F. (1960). Climate et erosion; la relation entre l'erosion du sol par leau et les precipitations atmospheriques. First edition. Presses Universitaires de France, Paris (In French).
- Gorbanpour, D. (2004). Study and evaluation of rainfall erosivity index (R) in Mazandaran. MSc thesis in Watershed Management, Mazandaran University.
- Hadley, R.F.; Lal, R.; Onstad, C.A.; Walling, D.E.; Yair, A. (1985). Recent developments in erosion and sediment yield studies. UNESCO, Paris, 127 p.
- Hakim Khani, Sh.; Hakim Khani, A. (2011). Rainfall erosivity mapping for Lorestan province. Watershed Management Research Journal (Pajouhesh & Sazandegi), 89: 62-72.
- HakimKhani, S.; Mahdian, M.H.; ArabKhedri, M.; Ghorbanpoor, D. (2005). Investigating rainfall erosivity in Iran. 3th Erosion and Sediment National Conference, Soil Conservation and Watershed Management Research Center, 28-31 August, Tehran, Iran.
- Hemmati, M.; Ahmadi, H.; Nikkani, D.; Zehtabian, G.H. (2008). Determining of best rainfall erosivity index in Iran's cold semi-arid climate (Case Study: Soil Conservation Research Station of Kaboudeh Olia° Kermanshah). 4th National Conference on Sciences and Watershed Management Engineering, Department of Natural Resources, Karaj.
- Hudson, N. (1971). Soil Conservation, second Edition. B. T. Batsford, London.
- Kavian, A.; Fathollah Nejad, Y.; Habibnejad, M.; Soleimani, K. (2011). Modelling Seasonal Rainfall Erosivity on a Regional scale: A case Study from Northeastern Iran. Journal of Environ Res, 5(4): 939-950.
- Lal, R. (1976). Soil erosion on alfisols in Western Nigeria. Effects of rainfall characteristics. Geoderma, 16: 389-410.

- Lal, R.; Elliot, W. (1994). Erodibility and Erosivity. Soil Erosion research methods, Soil and Water Conservation Society. Ankeny, 181-208.
- Ma, X.; He, Y.; Xu, J.; Van Noordwijk, M.; Lu, X. (2014). Spatial and temporal variation rainfall erosivity in a Himalayan watershed. *Journal of Catena*. 248-259.
- Mikhailova, E.A.; Bryant, R.B.; Schwager, S.J.; Smith, S.D. (1997). Predicting rainfall erosivity in Honduras, *Soil Science Society of America Journal*. 61 (1): 273-279.
- Mohammadi, G. (1998). Preparation of Rainfall erosivity mapping in Iran using Fournier index and Kriging statistical method. *Journal of Agricultural Sciences and Natural Resources*. 4(3): 35-44.
- Moradi, H.R.; Behzadfar, M.; Sadeghi, S.H.R. (2007). Investigation of relationship between rainfall and the rainfall erosivity parameters in Khuzestan province. *Journal of Agricultural Scientific*, 29(4): 69-83.
- Morgan, R.P.C. (1995). *Soil Erosion and Conservation*. Addison Wesley, London, 198 p.
- Nikkami, D.; Mahdian, M.H. (2014). Rainfall erosivity Mapping in Iran. *Journal of Watershed Engineering and Management*, 6(4): 364-376.
- Ogedengbe, K.; Adesina, A.O.; Alabi, R.T. (2008). Estimation of the R-factor of universal soil loss equation using monthly rainfall amount for Nijeria. *J. World assoc. Soil Water Conserv*, 3: 20-26.
- Onchev, N.G. (1985). Universal index for calculating rainfall erosivity. In: El-Swaify, S.A., Moldenhauer, W.C. and Lo, A. (eds), *Soil erosion and conservation*, Soil Conservation Society of America, Ankeny. IO, 424-431.
- Panagos P.; Ballabio, C.; Borrelli, P.; Meusburger, K.; Klik, A. (2015). Rainfall erosivity in Europe. *Journal of Science of the Total Environment*. 511, 801-814.
- Panahi, J. (1998). Determining the Rainfall Erosivity Index in Islamic Republic of Iran. MSc Thesis, Irrigation Course, Shiraz University, College of Agriculture.
- Rezaei, M.; Davatgar, N.; Tajdari, K.; Abolpour, B. (2010). Investigating the Spatial Variability of Some Important Groundwater Quality Factors in Guilan, Iran. *Journal of Water and Soil*, 24(5): 932-941.
- Sadeghi, S.H.R.; Tavangar, S. (2015). Development of stationnal models for estimation of rainfall erosivity factor in different timescales. *Journal of Natural Hazards*. 77, 429-443.
- Sadeghi, S.H.R. (2009). Determining of Spatial Variability of Rainfall Erosivity Index in Mazandaran Province. Research Project of Management and Planning Organization.
- Salles, C.; Poesen, J. (2000). Rain properties controlling soil splash detachment. *Hydrological Process*, 14: 271-282.
- Sanchez-Moreno, J.F.; Mannaerts, C.M.; Jetten, V. (2014). Rainfall erosivity mapping for Santiago Island, Cape Verde. *Geoderma*, 217, 74-82.
- Sepaskhah, A.R.; Panahi, J. (2007). Estimating storm erosion index in I.R. Iran. *Iranian Journal of Science & Technology, Transection B, Engineering*, 31(B2): 237-248.
- Shamashd, A.; Azhari, M.N.; Isa, M.H.; Wan Hussin, W.M.A.; Parida, B.P. (2008). Development of an appropriate procedure for estimation of RUSLE EI₃₀ index and preparation of erosivity maps for pulau penang in peninsular Malaysia. *Catena* 72(3): 423-432.
- Sharifan, H. (2008). Evaluation of equations erosivity index and parameters of rainfall in Gorgan. *Journal of Agricultural Sciences and Natural Resources*, 14(5): 207-215.
- Silva, A.M. (2004). Rainfall erosivity map for Brazil. *Catena* 57: 251-259.
- Sukhanovski, Y.P.; Ollesch, G.; Khan, K.Y.; Meibner, R. (2002). A new index for rainfall erosivity on a physical basis. *J. Plant Nutr. Soil Sci*. 165, 51-57.
- Ufoegbune, G.C.; Bello, N.J.; Ojekunle, Z.O.; Orunkoye, A.R.; Eruola, A.O.; Amori, A.A. (2011). Rainfall Erosivity Pattern of Ogun River Basin Area (Nigeria) using Modified Fournier Index. *European Water Journal*, 35: 23-29.
- Wichmeier, W.H.; Smith, D.D. (1978). Predicting rainfall losses: a guide to conservation planning. *Agriculture Handbook No. 537*, US Department of Agriculture, Washington, DC.
- Yu, B. (1998). Rainfall erosivity and its estimation for Australia's tropics. *Australian Journal of Soil Research* 36: 65-143.
- Zehtabian, G.H.; Janfaza, E.; Mohammad Asgari, M.; Nematollahi, M.J. (2010). Modelling of groundwater spatial distribution for some chemical properties (Case Study in garmsar watershed). *Iranian Journal of Range and Desert Research*, 17(1): 61-73.