

## کاربرد منطق فازی در برآورد مقادیر غیردقیق شاخص فرساینده‌گی باران و تغییرات مکانی آن در حوزه آبخیز دریای خزر

محمدحسین مهدیان<sup>1\*</sup>، نازیلا خرسندی، داود نیک کامی، ابراهیم پذیرا و امیر سرشته‌داری

استاد سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی؛ mahdian.mhossein@gmail.com

استادیار دانشگاه آزاد اسلامی واحد تاکستان؛ khorsandina@yahoo.com

استاد پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری؛ nikkami.d@gmail.com

استاد دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران؛ ebrahimpazira@gmail.com

مریی پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری؛ amirsar@gmail.com

### چکیده

فرساینده‌گی باران در مدل جهانی فرسایش و هدررفت خاک ( $EI_{30}$ ) که حاصلضرب انرژی جنبشی (E) و حداکثر انرژی جنبشی باران ( $I_{30}$ ) می‌باشد، یکی از پارامترهای مهم مدل‌های ریاضی فرسایش خاک و تولید رسوب محسوب می‌شود. از آنجایی که اندازه‌گیری آن وقت‌گیر و هزینه‌بر است، برای برآورد آن از روابط تجربی استفاده می‌شود که مبتنی بر شدت باران می‌باشند. داده‌های شدت بارندگی در بسیاری مناطق موجود نیست. بنابراین، در عمل، شاخص فرساینده‌گی باران با استفاده از مقدار باران محاسبه و تخمین زده می‌شود که منجر به عدم قطعیت در داده‌های شاخص فرساینده‌گی باران می‌شود. در این پژوهش، منطق فازی بر داده‌های غیردقیق شاخص فرساینده‌گی باران اعمال شد و سپس، تغییرات مکانی آن با شش روش کریجینگ معمولی، کوکریجینگ، اسپلاین، چندجمله‌ای منطقه‌ای، چندجمله‌ای محلی و عکس فاصله وزن‌دار بررسی شد تا تاثیر منطق فازی بر این روش‌ها ارزیابی شود. در بین پارامترها و شاخص‌های مختلف فرساینده‌گی مبتنی بر میزان باران، تنها شاخص فورنیه اصلاح شده ( $EI_{mod}$ ) همبستگی بالایی را با  $EI_{30}$  در 11 ایستگاه سینوپتیک نشان داد. یک مدل رگرسیونی برای تخمین  $EI_{30}$  از  $EI_{mod}$  در 66 ایستگاه فاقد آمار شدت بارندگی استفاده شد و سپس منطق فازی بر این داده‌های تخمینی اعمال شد. تعداد پنج تابع عضویت گوسی برای ارتفاع به‌عنوان متغیر ورودی و  $EI_{30}$  به عنوان متغیر خروجی تعریف شد. سپس، مجموعه‌های شاخص فرساینده‌گی با روش مرکز ثقل دفازی شد و به اعداد قطعی تبدیل شد. نتایج نشان داد نسبت اثر قطعه‌ای به آستانه نیم‌تغییرنما (0/23) بیان‌گر همبستگی مکانی قوی  $EI_{30}$  در فاصله 630 کیلومتری است. مقادیر منفی میانگین انحراف خطا (MBE) در روش‌های فازی کوکریجینگ و فازی کریجینگ بیان‌گر کم‌برآورد شدن  $EI_{30}$  بود، در حالی که مقادیر مثبت آن در سایر روش‌ها نشان‌دهنده بیش‌برآورد شدن این شاخص می‌باشد. از سوی دیگر، مقدار میانگین مطلق خطا (MAE) در روش فازی کوکریجینگ نسبت به روش‌های عکس فاصله وزن‌دار، کریجینگ، کوکریجینگ، اسپلاین، فازی عکس فاصله وزن‌دار، فازی کریجینگ و فازی اسپلاین به ترتیب به میزان 28، 21، 19، 22، 15، 11 و 11 درصد کاهش نشان داد. نقشه خروجی برای تمام روش‌های میان‌یابی حاکی از وجود روند کاهشی از غرب به شرق حوزه بود، به طوری که بیش‌ترین مقدار فرساینده‌گی (1450 مگاژول میلی‌متر در هکتار در ساعت در سال) در غرب حوزه اتفاق افتاد. این الگو مطابق با الگوی تغییرات اقلیمی از مرطوب به نیمه‌خشک بود.

واژه‌های کلیدی: شاخص فرسایش‌زایی باران، شاخص فورنیه اصلاح شده، فازی کوکریجینگ، میان‌یابی

<sup>1</sup> نویسنده مسئول، آدرس: تهران، بزرگراه شهید چمران، خیابان یمن، باغ کشاورزی، صندوق پستی 1113-11395

\* دریافت: 91/6/19 و پذیرش: 92/2/15

## مقدمه

Latinopoulos, 2006). در راستای حل این مشکل، Piotrowski و همکاران (1996) نشان دادند می توان از ترکیب منطق فازی و روش میان یابی استفاده نمود و روش کریجینگ را به فازی کریجینگ تبدیل کرد. مقایسه روش های کریجینگ و فازی کریجینگ توسط رحیمی بندرآبادی و ثقفیان (1386) نشان داده منطق فازی دقت تخمین بارندگی را 10 درصد افزایش می دهد.

همان طور که مشاهده می شود، منطق فازی در بسیاری از زمینه ها کاربرد دارد. اما به نظر می رسد پژوهشی در ارتباط با تأثیر منطق فازی بر داده های شاخص فرساینده گی که از مدل رگرسیونی به دست آمده باشد، انجام نشده است. علاوه بر این، مقایسه روش های میان یابی کلاسیک و روش های میان یابی فازی نیز در ارتباط با شاخص فرساینده گی باران گزارش نشده است. لذا، هدف این پژوهش، بررسی تأثیر روش فازی در بهبود دقت شش روش میان یابی شامل کریجینگ معمولی، کوکریجینگ، اسپلاین، چندجمله ای منطقه ای، چندجمله ای محلی و عکس فاصله وزن دار است.

## مواد و روش ها

## منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه حوزه دریای خزر در شمال ایران بین 36 درجه و 28 دقیقه و 38 درجه و 36 دقیقه عرض شمالی و 48 درجه و 52 دقیقه و 56 درجه و 26 دقیقه طول شرقی واقع شده است (شکل 1). میانگین ماهانه و سالانه دما بدون در نظر گرفتن بندر انزلی از غرب به شرق افزایش می یابد. متوسط بارندگی سالانه از 1400 میلی متر در نواحی ساحلی تا 300 میلی متر در دره نامرستاق متغیر بود. متوسط ارتفاع 1300 متر بالای سطح دریا می باشد. اقلیم این منطقه مرطوب، مدیترانه ای نیمه مرطوب و نیمه خشک می باشد. داده های مقدار بارندگی فقط در 77 ایستگاه از 100 ایستگاه باران سنجی که دارای حداقل طول دوره آماری 25 سال بود، مورد استفاده قرار گرفت. از بین 77 ایستگاه، تنها در 11 ایستگاه شدت بارندگی ثبت می شود.

## شاخص فرساینده گی باران

بر اساس تحقیقات خرسندی (1389)، شاخص  $EI_{30}$  مبتنی بر شدت بارندگی برای این منطقه مناسب تشخیص داده شده است. این شاخص در 11 ایستگاه منطقه مورد مطالعه محاسبه شد. در این رابطه، انرژی جنبشی (E) برای این ایستگاه ها از رابطه زیر تعیین شد:

$$E = \sum_{r=1}^k 0.29[1 - 0.72 \exp(-0.05i_r)] \Delta V_r \quad (1)$$

از مهم ترین عوامل فرسایش آبی در حوزه دریای خزر، شدت و مقدار بارندگی قابل توجه منطقه است. اگر سایر عوامل مؤثر بر فرسایش خاک ثابت در نظر گرفته شود، فرسایش خاک تابعی از قدرت فرساینده گی باران می باشد. شاخص هایی به منظور ارائه قدرت فرساینده گی باران به عنوان تابعی از خصوصیات فیزیکی آن از قبیل انرژی جنبشی، شدت بارندگی و مقدار باران پیشنهاد شده است (رفاهی، 1379). مطالعات انجام شده در مقایسه شاخص های فرساینده گی مختلف در کرت های رواناب- رسوب شمال ایران نشان داده که شاخص  $EI_{30}$  بیش ترین همبستگی را با رسوب خروجی کرت دارد (خرسندی، 1389). فرساینده گی باران ( $EI_{30}$ ) حاصل انرژی جنبشی باران و حداکثر شدت بارندگی 30 دقیقه ای می باشد.

تهیه نقشه شاخص فرساینده گی در یک منطقه و یا حوزه آبخیز هنوز یکی از سوالات ضروری تحقیقات است. چنین نقشه هایی امکان درک بهتر از تغییرات شاخص فرساینده گی باران را در منطقه مورد مطالعه فراهم می آورد. مقایسه روش های مختلف میان یابی در تهیه نقشه شاخص فرساینده گی در برخی مطالعات انجام شده است، به طوری که Hoyos و همکاران (2005) در برآورد  $EI_{30}$  با استفاده از داده های 16 ایستگاه باران سنجی دریافتند روش میان یابی چند جمله ای منطقه ای دارای میانگین خطاها (ME) و جذر میانگین مربعات خطاها ( $RMSE^1$ ) کم تر نسبت به روش عکس فاصله وزن دار می باشد. مقادیر  $RMSE$  در برآورد شاخص  $EI_{30}$  برای فصل مرطوب با روش های عکس فاصله وزن دار و چند جمله ای به ترتیب برابر با 809/8 و 705/1 و برای فصل خشک 475/0 و 424/2 به دست آمده است. بنابراین، در هر دو فصل روش چندجمله ای خطای کم تری را نسبت به روش عکس فاصله وزن دار داشته است.

هم چنین، علی پور (1384) به منظور تهیه نقشه شاخص  $EI_{30}$  از روش های میان یابی کریجینگ معمولی، کوکریجینگ، عکس فاصله وزن دار، اسپلاین و فازی کریجینگ استفاده نمود. نتایج بررسی های این پژوهش گر نشان داده که روش فازی کریجینگ با میانگین خطای مطلق 10/49 کم ترین خطا را در بین انواع روش های کریجینگ دارد و در مجموع سبب کاهش 32 درصدی میانگین خطای مطلق شده است.

از جمله مشکلات روش های میان یابی، عدم قطعیت در داده های اولیه می باشد (Theodossiou) و

<sup>1</sup> Root Mean Square Error

عبارات زبانی برای هر یک از توابع عضویت شامل پنج طبقه خیلی کم (VL)، کم (L)، متوسط (M)، زیاد (H) و خیلی زیاد (VH) تعریف شد. قوانین پایه بر اساس روش ممدانی برای متغیرهای ورودی و خروجی تعیین شد (Mamdani و Assilian، 1999). از آنجا که رابطه بین ارتفاع و  $EI_{30}$  مستقیم می‌باشد، قوانین زیر تعریف شد. لازم به توضیح است این قوانین بر اساس وجود رابطه مستقیم بین داده‌های فرسایندهای باران و ارتفاع ایستگاه‌ها و نیز در شرایط حداقل خطای ارزیابی تقاطعی ارائه شده است.

قانون اول: اگر ارتفاع خیلی کم باشد، شاخص فرسایندهای باران خیلی کم باشد.

قانون دوم: اگر ارتفاع کم باشد، شاخص فرسایندهای باران کم باشد.

قانون سوم: اگر ارتفاع متوسط باشد، شاخص فرسایندهای باران متوسط باشد.

قانون چهارم: اگر ارتفاع زیاد باشد، شاخص فرسایندهای باران زیاد باشد.

قانون پنجم: اگر ارتفاع خیلی زیاد باشد، شاخص فرسایندهای باران خیلی زیاد باشد.

توابع عضویت برای ارتفاع و  $EI_{30}$  در شکل (2) نشان داده شده است. در نهایت، با روش دفازی کردن مجموعه‌های فازی به اعداد قطعی تبدیل شد. در این پژوهش، دفازی کردن با روش مرکز ثقل انجام شد (معادله 5). این مقادیر دفازی شده در شش روش زمین آماری کلاسیک مورد استفاده قرار گرفت.

$$z_{COA} = \frac{\int \mu_A(z)zdz}{\int \mu_A(z)dz}, \quad (5)$$

که در آن:  $\mu_A$  درجه عضویت اجتماع خروجی A برای مقادیر مختلف Z می‌باشد.

#### آنالیز واریوگرافی

به منظور بررسی نرمال بودن داده‌ها، تست نرمالیت با استفاده از روش کولموگروف-اسمیرونوف انجام شد. از آنجایی که داده‌ها نرمال نبودند، از تبدیل لوگ نرمال استفاده شد. به منظور بررسی همبستگی مکانی بین داده‌های شاخص فرسایندهای باران از نیم‌تغییرنا استفاده شد:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} \{Z(x_i) - Z(x_i + h)\}^2 \quad (6)$$

که در آن:  $i$  شدت بارندگی در طی فواصل زمانی یک دقیقه‌ای ( $\text{mm min}^{-1}$ ) و  $\Delta V_r$  ارتفاع بارن برای فواصل زمانی  $r$  (mm) می‌باشد. هم‌چنین، از ترکیب E از معادله (1) و حداکثر شدت بارندگی برای فواصل 30 دقیقه‌ای،  $EI_{30}$  حاصل شد (Brown و Foster، 1987). تحقیقات خرسندی (1389) نشان داد برای برآورد شاخص فرسایندهای باران، از بین روابط مبتنی بر میزان باران، تنها شاخص فورنیه اصلاح شده ( $FI_{mod}$ ) از همبستگی بالایی با شاخص  $EI_{30}$  در این 11 ایستگاه سینوپتیک برخوردار است. شاخص فورنیه اصلاح شده به صورت زیر محاسبه شد:

$$FI_{mod} = \sum \frac{P_i^2}{P} \quad (2)$$

که در آن:  $FI_{mod}$  شاخص فورنیه اصلاح شده،  $P_i$  متوسط بارندگی ماهانه بر حسب میلی‌متر،  $P$  متوسط بارندگی سالانه بر حسب میلی‌متر می‌باشد (Arnoldus، 1980).

در مرحله بعد، به منظور بسط شاخص فرسایندهای  $EI_{30}$  به 66 ایستگاه فاقد آمار شدت بارندگی، از مدل رگرسیونی زیر استفاده شد (خرسندی، 1389). این مدل رگرسیونی نشان داد 79 درصد از تغییرات  $EI_{30}$  به وسیله شاخص  $FI_{mod}$  توصیف می‌شود. بنابراین، به منظور تعیین شاخص  $EI_{30}$  در 66 ایستگاه باران‌سنجی فاقد آمار شدت بارندگی، از معادله (3) استفاده شد.

$$EI_{30} = -22320 + 214548FI_{mod} \quad (R^2 = 0.79, P < 0.01) \quad (3)$$

که در آن:  $EI_{30}$  بر حسب مگاژول بر میلی‌متر در هکتار در سال و  $FI_{mod}$  بر حسب میلی‌متر می‌باشد.

#### روش فازی‌سازی داده‌ها

در ابتدا، فازی‌سازی مقادیر قطعی ارتفاع به‌عنوان متغیر ورودی و  $EI_{30}$  به‌عنوان متغیر خروجی انجام شد. هر مقدار از ارتفاع و  $EI_{30}$  متعلق به تابعی با یک درجه عضویت مشخص در نظر گرفته شد. درجه عضویت آن مقادیر می‌تواند بین صفر (فاقد عضویت) و یک (عضویت قطعی) تغییر کند. به این منظور، نوع و تعداد توابع و درجه عضویت برای هر کدام از متغیرهای ورودی و خروجی مطابق شکل (2) تعیین شد. هر سری فازی با استفاده از  $A=[a, b, c]$  تعریف شد که معادله این تابع به صورت معادله (4) می‌باشد:

$$\mu_{Ai}(x) = \exp\left(-\frac{(C_i - x)^2}{2\sigma_i^2}\right) \quad (4)$$

که در آن:  $C_i$  و  $\sigma_i$  به ترتیب مرکز و عرض آیین سری فازی  $A_i$  می‌باشند.

مورد بررسی قرار گرفت. آماده‌های توصیفی مقادیر فازی شده و قطعی شاخص فرساینده گی  $EI_{30}$  در جدول (1) داده شده است. مقادیر به دست آمده مشابه با مقادیر به دست آمده در پژوهش انجام شده توسط Kavian و همکاران (2011) در حوزه شمالی ایران می‌باشد. برای مقادیر قطعی  $EI_{30}$  ضریب آزمون کلموگروف-اسمیرنوف ( $<0/05$ ) نشان داد این داده‌ها از توزیع نرمال پیروی نمی‌کنند. بنابراین، با استفاده از تبدیل لوگ-نرمال داده‌ها به توزیع نرمال تبدیل شد. جدول (1) نشان می‌دهد فازی نمودن داده‌ها، انحراف معیار و نیز ضریب پراکنده گی داده‌های شاخص فرساینده گی باران را کاهش داده است. به طوری که مقادیر انحراف معیار تحت تأثیر منطق فازی از  $352/52$  به  $333/82$  در مورد مقادیر غیرنرمال و از  $0/23$  به  $0/21$  در مورد مقادیر نرمال شده کاهش داشته است. بنابراین، مقادیر انحراف معیار برای مقادیر غیرنرمال و نرمال به  $5/59$  و  $9/59$  کاهش یافت. از سوی دیگر مقادیر ضرایب پراکنده گی از  $41/70$  به  $39$  در مقادیر غیرنرمال و از  $8/06$  به  $7$  در مقادیر نرمال تغییر یافت. بنابراین، مقادیر ضرایب پراکنده گی به ترتیب به  $6/92$  و  $15/14$  درصد کاهش نشان داد.

نیم‌تغییرنمای مقادیر قطعی و فازی شده  $EI_{30}$  به ترتیب در شکل‌های (3) و (4) ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، مدل گوسی به عنوان مدل مناسب به هر دو نیم‌تغییرنما برازش داده شد. مدل گوسی برای مقادیر فازی و قطعی شاخص فرساینده گی  $97$  و  $90$  درصد تغییرات نیم‌تغییرنما را توضیح داد. هم‌چنین، نسبت اثر قطعه‌ای به آستانه مقادیر فازی و قطعی  $EI_{30}$  به ترتیب  $0/23$  و  $0/27$  بود. مطابق تحقیقات Men و همکاران (2008)، چون خطای اندازه‌گیری کم‌تر از  $0/5$  شد، در نتیجه نشان از همبستگی قوی بین مقادیر  $EI_{30}$  ایستگاه‌ها است.

در این پژوهش نیم‌تغییرنما برای مقادیر فازی شده و قطعی نشان داد که آستانه مشخصی وجود دارد و روندی در داده‌ها مشاهده نمی‌شود. بنابراین، از بین انواع روش‌های کریجینگ، روش کریجینگ معمولی مناسب تشخیص داده شد. نیم‌تغییرنما نشان داد با افزایش فاصله نیم‌تغییرنما در راستای  $32$  درجه ناهمسان‌گردی را نشان می‌دهد. علاوه بر آن، مقادیر آستانه و اثر قطعه‌ای  $EI_{30}$  به ترتیب  $0/280$  و  $0/076$  می‌باشد.

بررسی‌های موجود نشان می‌دهد متغیرهای محیطی نظیر ارتفاع، طول و عرض جغرافیایی می‌توانند شاخص فرساینده گی باران را تحت تأثیر قرار دهند. بر اساس محاسبات انجام شده، ضرایب همبستگی  $EI_{30}$  با ارتفاع،

که در آن:  $\gamma(h)$  واریانس در هر فاصله،  $N(h)$  تعداد جفت نقاط،  $Z(x_i)$  مقدار اندازه‌گیری شده در هر مکان  $x_i$  و  $Z(x_i+h)$  مقدار اندازه‌گیری شده در مکان  $x_i+h$  می‌باشند. ترسیم نیم‌تغییرنما با استفاده از نرم‌افزار  $GS^+$  انجام شد. با برازش مدل تئوری مناسب بر نیم‌تغییرنما، پارامترهای آن شامل آستانه، اثر قطعه‌ای و شعاع تأثیر تعیین شد. کنترل اعتبار نیم‌تغییرنما از طریق روش ارزیابی تقاطعی انجام گرفت. سپس، با استفاده از معیارهای ارزیابی، مقادیر خطا برآورد شد. به نحوی که مدل بهینه دارای حداقل شاخص‌های میانگین مطلق خطا (MAE) و نیز میانگین انحراف خطا (MBE) باشد.

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |Z^* - Z_i| \quad (7)$$

$$MBE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Z^* - Z_i) \quad (8)$$

که در آن:  $Z^*$  مقدار تخمین زده شده،  $Z_i$  مقدار مشاهده شده و  $n$  تعداد ایستگاه‌ها است.

### روش‌های میان‌یابی

از آنجایی که داده‌ها روند نداشتند و از توزیع نرمال نیز برخوردار بودند، از بین روش‌های نوع کریجینگ، دو روش کریجینگ معمولی و کوکریجینگ استفاده شد. برای متغیر کمکی در روش کوکریجینگ، از ارتفاع، طول و عرض جغرافیایی که بر این شاخص تأثیرگذار می‌باشند، استفاده شد که در نتیجه متغیر مناسب، ارتفاع تشخیص داده شد. برای روش یادشده، نیم‌تغییرنمای  $EI_{30}$ ، نیم‌تغییرنمای متغیر کمکی و نیز نیم‌تغییرنمای متقابل  $EI_{30}$  و متغیر کمکی تهیه شد.

در این پژوهش، شش روش درون‌یابی کلاسیک شامل کریجینگ معمولی، کوکریجینگ، اسپلاین، چندجمله‌ای منطقه‌ای، چندجمله‌ای محلی و عکس فاصله وزن‌دار و ترکیب آن‌ها با روش فازی مورد ارزیابی قرار گرفت. معیار مقایسه روش‌ها، ارزیابی تقاطعی با استفاده از شاخص‌های میانگین مطلق خطا و میانگین انحراف خطا همراه با تفسیر نقشه‌ها بود.

### نتایج و بحث

از بین پارامترهای محیطی تنها ارتفاع، همبستگی معنی‌داری را با  $EI_{30}$  نشان داد. بنابراین، در  $66$  ایستگاه که  $EI_{30}$  با استفاده از مدل رگرسیونی تخمین زده شده بود، تابع عضویت ارتفاع به عنوان متغیر ورودی و شاخص فرساینده گی به عنوان متغیر خروجی در شکل (2) نشان داده شده است.

به منظور بررسی تأثیر منطق فازی بر میان‌یابی مقادیر  $EI_{30}$ ، مقادیر فازی شده و غیر فازی هر کدام جداگانه

باران نشان داد میزان فرساینده‌گی از غربی‌ترین قسمت حوزه به سمت مرکز روند افزایشی را نشان می‌دهد. از مرکز به سمت شرق حوزه نیز میزان شاخص فرساینده‌گی کاهش داشت. شاخص فرساینده‌گی به‌عنوان یکی از فاکتورهای تأثیرگذار بر فرسایش خاک در قسمت‌های غربی حوزه خزر مقادیر بیش‌تری را نسبت به نواحی شرقی آن نشان داد.

### نتیجه‌گیری

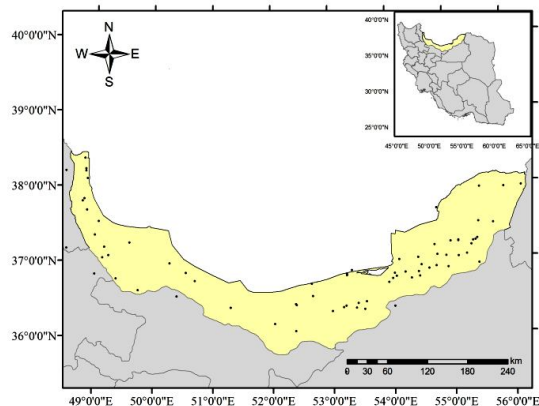
استفاده از منطق فازی در هر یک از روش‌های میان‌یابی باعث افزایش دقت برآورد شد، منتهی مقدار افزایش دقت بستگی به نوع روش داشت. به‌نحوی که می‌توان مطرح نمود برای روش‌های چندجمله‌ای افزایش دقت نسبت به روش‌های دیگر کم‌تر بود. در صورتی‌که برای روش‌های نوع کریجینگ، مقدار آن بیش‌تر بدست آمد، بدین صورت که در روش کوکریجینگ فازی شده به 13 درصد رسید. در مجموع، استفاده از متغیر کمکی در روش کوکریجینگ و لحاظ منطق فازی در آن زمینه افزایش دقت را سبب می‌شود. روش فازی کریجینگ و فازی اسپلین، سبب ایجاد مقادیر خطای کم‌تری نسبت به روش‌های میان‌یابی کلاسیک شد. به‌طوری که میزان خطای مطلق در روش فازی کوکریجینگ نسبت به روش‌های عکس فاصله وزن‌دار، کریجینگ، کوکریجینگ، اسپلین، فازی عکس فاصله وزن‌دار، فازی کریجینگ و فازی اسپلین به‌ترتیب به‌میزان 28، 22، 19، 23، 15، 11 و 11 درصد کاهش نشان داد. هم‌چنین، بررسی مقادیر انحراف (MBE) نشان داد فازی کریجینگ و فازی کوکریجینگ روشی کم‌برآوردکننده و سایر روش‌ها، روش‌های بیش‌برآوردکننده در برآورد  $EI_{30}$  در حوزه مورد مطالعه بودند. از سوی دیگر، فرساینده‌گی باران به‌عنوان یکی از فاکتورهای مؤثر بر فرسایش خاک در نواحی غربی حوزه مقادیر بیش‌تری را نسبت به نواحی شرقی نشان داد. این روند با مقدار و شدت بارندگی در این مناطق منطبق می‌باشد. با حرکت به سمت شرق حوزه، با توجه به آن که میزان و شدت بارندگی سیر نزولی را نشان داد، شاخص فرساینده‌گی باران نیز کاهش داشت. مقدار میانگین برآوردی شاخص فرساینده‌گی  $846/34$  مگاژول میلی‌متر در هکتار در سال بود. بیش‌ترین مساحت حوزه در نقشه شاخص فرساینده‌گی باران در محدوده  $858-973$  مگاژول بر میلی‌متر هکتار در سال قرار داشت.

طول و عرض جغرافیایی به‌ترتیب  $0/746$ ،  $0/126$  و  $0/178$  به‌دست آمد. لذا، برای استفاده در روش کوکریجینگ از متغیر کمکی ارتفاع استفاده شد. مدل گوسی بر نیم‌تغییرنمای اثر متقابل  $EI_{30}$  و ارتفاع با ضریب همبستگی  $0/71$  برازش داده شد.

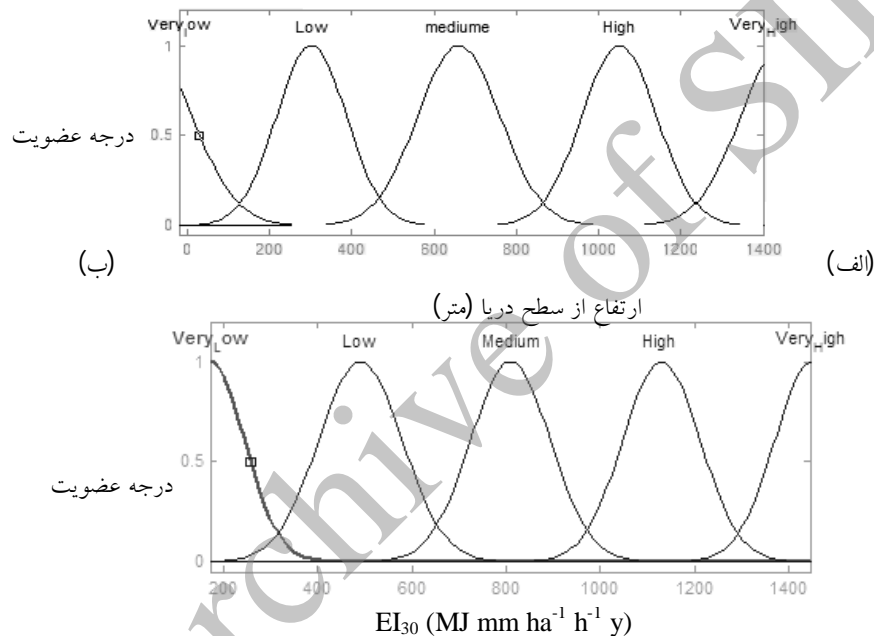
در روش اسپلین، حداقل MAE (195/89) و MBE (0/05) با تابع معکوس چندجمله‌ای به‌دست آمد. در حالی‌که، در روش فازی اسپلین مقدار MAE و MBE به  $170/89$  و  $0/03$  کاهش یافت. در روش عکس فاصله وزن‌دار، توان و تعداد نقاط همسایگی بهینه به‌ترتیب 1 و 31 حاصل شد که حداقل MAE (210/07) و MBE (8/16) را نتیجه داد، اما استفاده از منطق فازی در این روش میان‌یابی مقادیر MAE و MBE به ترتیب  $178/44$  و  $6/99$  را حاصل نمود. علاوه بر آن، از روش‌های میان‌یابی چند جمله‌ای موضعی و چندجمله‌ای فراگیر، به ترتیب مقدار MAE  $220/22$  و  $225/49$  بدست آمد که اعمال منطق فازی این مقادیر را به ترتیب به  $207/58$  و  $204/49$  کاهش داد.

نتایج ارزیابی روش‌های مختلف در جدول (2) ارائه شده است. همان‌طور که در این جدول مشاهده می‌شود، در کل، از بین روش‌های مختلف میان‌یابی، کم‌ترین مقادیر میانگین خطای مطلق (MAE) در ارتباط با روش‌های مبتنی بر منطق فازی بود، به‌طوری که روش فازی کوکریجینگ کم‌ترین میزان خطای مطلق ( $151/12$ ) و انحراف ( $-1/87$ ) را به‌خود اختصاص داد. در مقایسه نسبی بین هر روش و فازی شده آن مشاهده شد که دقت بین 8 درصد برای روش چندجمله‌ای منطقه‌ای فازی شده تا 19 درصد برای روش کوکریجینگ فازی شده نسبت به روش کلاسیک آن افزایش داشت. با اعمال روش‌های فازی بر روش‌های کلاسیک، دقت به‌طور متوسط 13 درصد افزایش داشت. در این ارتباط، نتایج تحقیقات علی‌پور (1384) نشان داد روش فازی کریجینگ با میانگین خطای مطلق  $10/49$  کم‌ترین خطا را در بین انواع روش‌های کریجینگ دارد و در مجموع سبب کاهش 32 درصدی میانگین خطای مطلق شده است. رحیمی بندرآبادی و تقفیان (1386) نیز نشان دادند روش فازی کریجینگ منجر به کاهش 10 درصدی خطای برآورد نسبت به روش کریجینگ شده است.

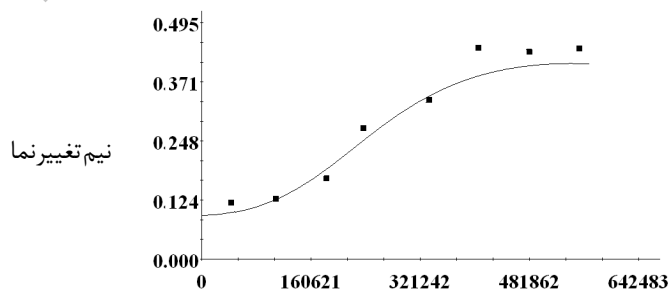
نقشه فرساینده‌گی باران با استفاده از روش کوکریجینگ فازی شده تهیه شد که نتیجه آن در شکل (5) ارائه شده است. روند تغییرات نقشه شاخص فرساینده‌گی



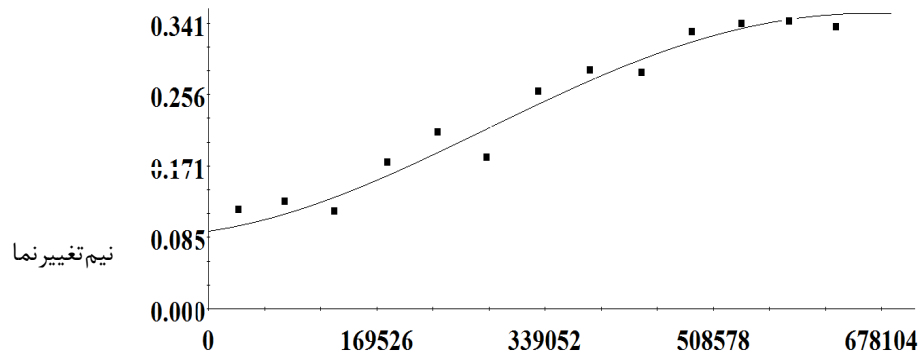
شکل 1- موقعیت منطقه مورد مطالعه



شکل 2 - توابع عضویت برای متغیر ورودی ارتفاع (الف) و متغیر خروجی شاخص فرساینده‌گی باران (ب)



شکل 3- نیم تغییرنمای تناخص فرساینده‌گی



فاصله جفت نقاط (متر)

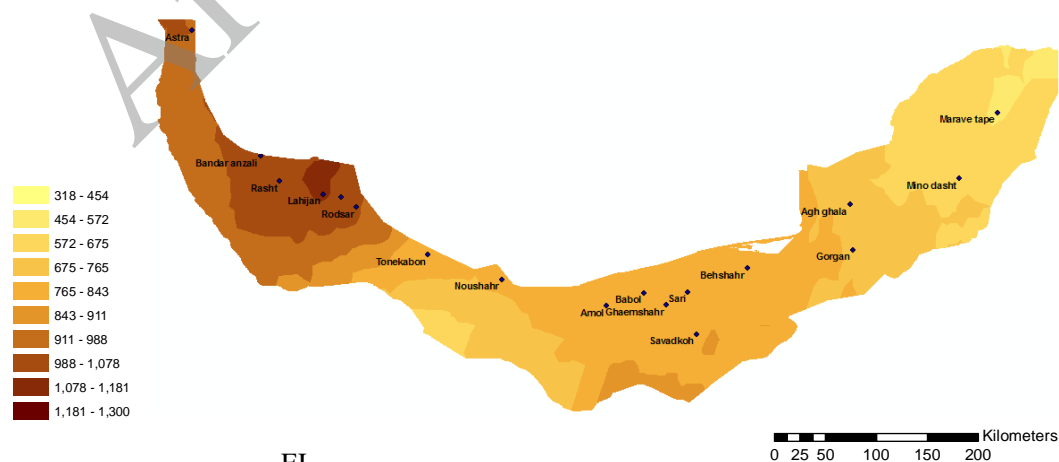
شکل 4- نیم تغییر نمای شاخص فرساینده‌گی فازی شده

جدول 1- نتایج آماره‌های توصیفی و آزمون کلموگروف-اسمیرونوف در حوزه آبخیز خزر

| متغیر                 | نوع توزیع | میانگین | حداقل | حداکثر | انحراف معیار | ضریب پراکندگی | چولگی | کشیدگی |
|-----------------------|-----------|---------|-------|--------|--------------|---------------|-------|--------|
| قطعی EI <sub>30</sub> | غیرنرمال  | 845/31  | 171   | 1446   | 352/52       | 41/70         | -0/98 | -0/88  |
| قطعی EI <sub>30</sub> | لوگ‌نرمال | 2/87    | 2/23  | 3/16   | 0/23         | 8/06          | -0/29 | -0/13  |
| فازی EI <sub>30</sub> | غیرنرمال  | 845     | 170   | 1446   | 333/82       | 39            | -0/93 | -0/89  |
| فازی EI <sub>30</sub> | لوگ‌نرمال | 2/88    | 2/23  | 3/16   | 0/21         | 7             | -0/19 | -0/11  |

جدول 2 - مقادیر خطای مطلق و انحراف از خطای روش‌های مختلف میان‌یابی

| روش                    | MAE    | MBE   | روش               | MAE    | MBE   |
|------------------------|--------|-------|-------------------|--------|-------|
| فازی عکس فاصله وزن دار | 178/44 | 6/99  | عکس فاصله وزن دار | 210/00 | 8/26  |
| فازی کریجینگ           | 169/90 | -1/77 | کریجینگ           | 193/65 | -1/48 |
| فازی کوکریجینگ         | 151/15 | -1/87 | کوکریجینگ         | 187/57 | -1/75 |
| فازی اسپلاین           | 170/89 | 0/03  | اسپلاین           | 195/90 | 0/05  |
| فازی چندجمله ای کلی    | 207/05 | 6/21  | چندجمله ای کلی    | 225/62 | 7/54  |
| فازی چندجمله ای موضعی  | 204/49 | 6/03  | چندجمله ای موضعی  | 225/29 | 7/21  |



شکل 5 - نقشه برآورد شاخص فرساینده‌گی باران با روش فازی کوکریجینگ  
 $EI_{30}$   
 (MJ mm ha<sup>-1</sup> h<sup>-1</sup> y)

فهرست منابع:

1. خرسندی، ن. 1389. بررسی تغییرات مکانی شاخص فرساینده‌گی باران در حوزه آبخیز دریای خزر. پایان‌نامه دکتری، دانشکده کشاورزی، دانشگاه آزاد، واحد علوم و تحقیقات.
2. رحیمی‌بندرآبادی، س. و ب. تقفیان. 1386. برآورد توزیع مکانی بارندگی با کمک تئوری مجموعه‌های فازی، تحقیقات منابع آب ایران، سال سوم، جلد 2، صفحه 26 الی 38.
3. رفاهی، ح. ق. 1379. فرسایش آبی و کنترل آن، انتشارات دانشگاه تهران، 672 صفحه.
4. علی‌پور، ز. ت. 1384. کاربرد فازی کریجینگ برای تهیه نقشه فرساینده‌گی باران در حوزه دریاچه نمک. پایان‌نامه دکتری، دانشکده کشاورزی، دانشگاه آزاد، واحد علوم و تحقیقات.
5. Arnoldus, H.M.J. 1980. An approximation to the rainfall factor in the universal soil loss equation. In: Assessment of Erosion (Eds. De Boodt M. and M. Gabriels, Wiley, New York, pp. 127-132.
6. Brown, L.C. and G.R. Foster. 1987. Storm erosivity using idealized intensity distributions. T. Am. Soc. Agri. Eng., 30:379-386.
7. Hoyos, N., P.R. Waylen and A. Jaramillo. 2005. Seasonal and spatial patterns of erosivity in a tropical watershed of the Colombian Andes. J. Hydrol., 314:177-191.
8. Kavian, A., Y. Fathollah Nejad, M. Habibnejad and K. Soleimani. 2011. Modeling seasonal rainfall erosivity on a regional scale: A case study from northeastern Iran. Int. J. Environ. Res., 5(4): 939-950.
9. Mamdani, E.H. and S. Assilian. 1999. An experiment in linguistic synthesis with a fuzzy logic controller. Int. J. Hum-Comput. Stud., 51(2):135-147.
10. Men, M., Z. Yu and H. Xu. 2008. Study on the spatial pattern of rainfall erosivity based on geostatistics in Hebei province, China. Front. Agric. China, 2(3): 281-289.
11. Piotrowski, J.A., F. Bartels, A. Salski and G. Schmidt. 1996. Geostatistical regionalization of glacial aquitard thickness in northwestern Germany based on fuzzy kriging. Math. Geol., 28: 437-452.
12. Theodossiou, N. and P. Latinopoulos. 2006. Evaluation and optimization of groundwater observation networks using the kriging methodology. Environ. Model Softw., 21:991-1000.