دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری
پژوهشنامه اصلاح گیاهان زراعی

تحلیل فراوانی منطقه‌ای سیلاب با استفاده از روش کریجینگ متعارف در حوزه‌های آبخیز استان مازندران

زهرا شیخ[۱]، عبدالحمید دهواری[۲] و مهدیه ابراهیمی[۲]

۱- دانش‌آموخته‌ی کارشناسی ارشد، دانشگاه زابل، (نویسنده مسوول: z.sheikh03@gmail.com)
۲- استادیار، دانشگاه زابل

تاریخ دریافت: ۹۲/۱۲/۱۹ تاریخ پذیرش: ۹۳/۰۴/۳۱

چکیده

تحلیل منطقه‌ای، پایدارترین روش به منظور بهبود تخمین تناوب سیلاب می‌باشد که به یکی از بخش‌های پویا در هیدرولوژی مبدل شده است و پیوسته تئوری‌های جدیدی در آن مورد آزمون قرار می‌گیرد. کاربرد زمین‌آمار برای برآوردهای منطقه‌ای سیلاب، یک نوآوری در این عرصه محسوب می‌شود. پایه و اساس این روش بر درون‌یابی متغیرهای هیدرولوژیکی در فضای فیزیوگرافی به جای فضای جغرافیایی معمول تأکید دارد. از این رو در این مطالعه اطلاعات هیدرولوژیکی، اقلیمی و فیزیوگرافی ۳۸ حوزه آبخیز استان مازندران تهیه و از روش کریجینگ متعارف برای برآوردهای منطقه‌ای سیلاب بر اساس دوره‌های بازگشت ۱۰، ۲۰، ۵۰ و ۱۰۰ سال استفاده شد. طراحی فضای فیزیوگرافی با استفاده از متغیرهای ژئومورفوکلیماتیک مؤثر بر سیلاب و روش تحلیل همبستگی متعارف انجام شد. در تمام دوره‌های بازگشت مدل گوسی، به عنوان بهترین مدل نیم‌تغییرنما انتخاب و از روش تخمین زمین‌آماری کریجینگ معمولی، برای برآوردهای منطقه‌ای استفاده شد. ارزیابی عملکرد برآوردهای منطقه‌ای، با استفاده از روش ارزیابی متقابل جک‌نایف و پنج شاخص آماری صورت گرفت. بر اساس نتایج به دست آمده عملکرد شاخص نش، بیش از ۰/۹ در تمامی دوره‌های بازگشت برآورد شد که نشان‌دهنده‌ی پیش‌بینی‌های دقیق و قابل قبول سیلاب در حوزه‌های بدون آمار می‌باشد. سایر شاخص‌های ارزیابی نیز عملکرد رضایت‌بخشی را ارائه کردند و با توجه به نتایج شاخص‌های نسبی، دقت برآوردهای منطقه‌ای با افزایش دوره بازگشت بهبود می‌یابد. این نتایج نشان داد کاربرد روش کریجینگ متعارف، رویکردی مؤثر و کارآمد برای تحلیل فراوانی منطقه‌ای سیلاب است.

واژه‌های کلیدی: تحلیل همبستگی متعارف، زمین‌آمار، کریجینگ معمولی، فضای فیزیوگرافی

مقدمه

روش‌های تحلیل منطقه‌ای با هدف ارائه پیش‌بینی‌های هیدرولوژیکی قابل اعتماد، در مکان‌هایی با سوابق آماری محدود یا فاقد داده توسعه یافته‌اند (۲۲،۱۹). تحقیقات اخیر نشان داده است، روش‌های زمین‌آمار که در ابتدا به منظور درون‌یابی داده‌های نقطه‌ای توسعه یافته بودند (۷)، می‌توانند به‌طور مؤثری برای منطقه‌ای نمودن داده‌های هیدرولوژیکی و حتی سری‌های زمانی هیدرولوژیکی مورد استفاده قرار گیرند (۲۱،۵،۲). روش درون‌یابی بر پایه فضای فیزیوگرافی[۱] (PSBI) که توسط چوکمانی و اورودا (۵) ابداع شد، در بسیاری از جنبه‌های هیدرولوژی به‌عنوان یک نوآوری محسوب می‌شود. این روش قادر به منطقه‌ای نمودن متغیرهای هیدرولوژیکی بدون نیاز به تعریف و شناخت مناطق همگن و یا ادغام گروه‌های همگن هیدرولوژیکی می‌باشد. در واقع با در نظر گرفتن رویکرد همسایگی هیدرولوژیکی، مشکل گروه‌بندی یا طبقه‌بندی حوزه‌های آبخیز را نیز برطرف نموده است (۱۶،۳،۲). پس از ارائه نتایج مؤفقیت‌آمیز کاربرد روش PSBI و کریجینگ متعارف[۲] در برآورد منطقه‌ای سیلاب توسط چوکمانی و اورودا (۵) این روش مورد توجه سایر هیدرولوژیست‌ها قرار گرفت. به طوری که جوزف و همکاران (۱۱)، با هدف بررسی رژیم هیدرولوژیکی هائیتی، به مقایسه روش کریجینگ متعارف و رگرسیون فضایی پرداختند. نتایج ارزیابی متقابل نشان داد، روش کریجینگ متعارف عملکرد بهتری نسبت به رگرسیون ارائه می‌دهد و پیشنهاد شد تا از روش کریجینگ عمومی که ترکیبی از هر دو روش است، در مطالعات بعدی استفاده شود. اما شو و اورودا (۱۸) در مطالعه‌ای به منظور پیش‌بینی کمیت سیلاب در حوزه‌های بدون آمار، مدلی بر پایه‌ی تحلیل همبستگی متعارف[۳] (CCA) و شبکه عصبی مصنوعی توسعه دادند. داده‌های ۱۵۱ ایستگاه هیدرومتری ایالت کبک کانادا گردآوری شد و عملکرد مدل شبکه عصبی بر پایه‌ی CCA را با روش کریجینگ متعارف و مدل CCA اصلی مورد مقایسه قرار دادند. نتایج نشان داد روش شبکه مصنوعی بر پایه CCA برآوردهای دقیق‌تری نسبت به سایر مدل‌ها ارائه می‌نماید. اورودا و همکاران (۱۵) با استفاده از داده‌های ۲۹ ایستگاه هیدرومتری در مکزیک به ارزیابی چهار روش برآورد منطقه‌ای سیلاب بر اساس تحلیل خوشه‌ای سلسله مراتبی، تحلیل همبستگی متعارف، روش تحلیل همبستگی متعارف اصلاح شده و روش کریجینگ متعارف پرداختند. نتایج این تحقیق نشان داد که روش تحلیل همبستگی متعارف و کریجینگ متعارف نسبت به سایر روش‌ها عملکرد بهتری دارند. گیلمت و همکاران (۹)، از روش PSBI و کریجینگ متعارف برای برآورد حداکثر دمای آب رودخانه‌های کانادا در مقیاس وسیعی استفاده نمودند. برای این منظور آمار ۱۲ ایستگاه سنجش دما گردآوری شد و

1- Physiographical Space Based Interpolation 2- Canonical Kriging 3- Canonical Correlation Analysis

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-17]
[DOR: 20.1001.1.22516174.1395.7.14.25.7]
[DOI: 10.29252/jwmr.7.14.47]

برآوردهای منطقه‌ای دمای آب به دست آمد. نتایج ارزیابی متقابل نشان‌دهنده‌ی عملکرد بهتر روش کریجینگ متعارف بود.

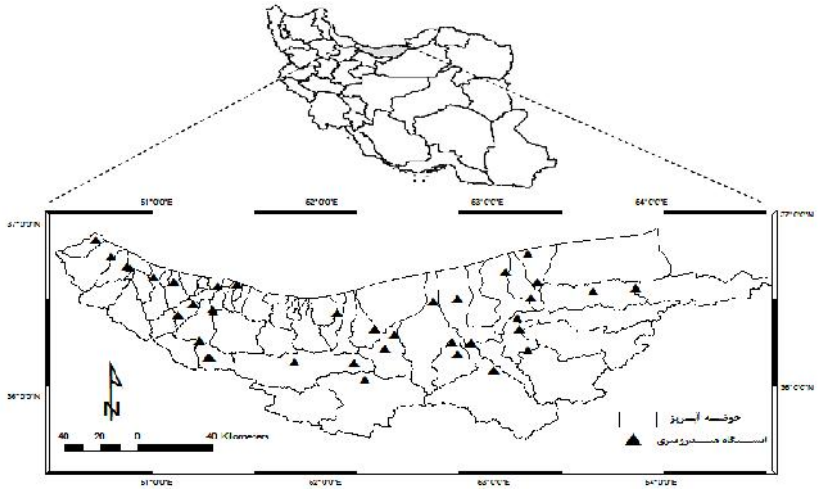
هم‌چنین کمالی‌نژاد و همکاران (۱۲)، در مطالعه‌ای عملکرد روش‌های کریجینگ متعارف، کریجینگ باقیمانده در فضای فیزیوگرافی و رگرسیون منطقه‌ای را جهت تحلیل فراوانی منطقه‌ای سیلاب مورد بررسی قرار دارند. بدین منظور، با استفاده از داده‌های ۱۵۱ ایستگاه واقع در ایالت کبک و روش ارزیابی متقابل نشان دادند که روش کریجینگ باقیمانده در فضای فیزیوگرافی برآوردهای کارآمدتری از مقادیر سیلاب منطقه‌ای نسبت به دو روش دیگر ارائه می‌نماید. مارتل و همکاران (۱۳) نیز به بررسی فراوانی منطقه‌ای سیلاب پائیزی در ایالت کبک کانادا در سه بازه‌ی زمانی با احتمال وقوع سیلاب پاییزی پرداختند. آنها از دو روش تحلیل همبستگی متعارف و روش کریجینگ متعارف برای تحلیل فراوانی منطقه‌ای، حجم و اوج سیلاب استفاده نمودند. نتایج این محققان نشان داد که هر دو مدل عملکرد مطلوبی ارائه می‌دهند. در نهایت آرچفیلد و همکاران (۱) مطالعه‌ای با هدف بررسی عملکرد روش‌های زمین‌آمار (کریجینگ متعارف و کریجینگ توپولوژی[1]) با روش رگرسیون منطقه‌ای برای پیش‌بینی سیلاب طرح در مکان‌های فاقد داده در ایالات متحده آمریکا انجام دادند. نتایج این تحقیق نشان داد که روش‌های زمین آمار از عملکرد بهتری برخوردار هستند.

هدف از این مطالعه، تحلیل منطقه‌ای حوزه‌های آبخیز استان مازندران بر اساس مفهوم همسایگی هیدرولوژیکی و برآورد فراوانی منطقه‌ای سیلاب بر اساس روش کریجینگ متعارف در فضای فیزیوگرافی طراحی شده و در نهایت ارزیابی کارآیی این روش می‌باشد.

مواد و روش‌ها

موقعیت منطقه مورد مطالعه

استان مازندران با مساحتی بالغ بر ۲۴ هزار کیلومتر مربع در محدوده جغرافیایی از ′۴۷ ۳۵ تا ′۵۸ ۳۶ عرض شمالی و از ′۳۴ ۵۰ تا ′۱۴ ۵۴ طول شرقی به شکل نواری پهن در امتداد رشته کوه‌های البرز و سواحل جنوبی دریای مازندارن قرار گرفته است. شکل ۱ موقعیت استان مازندران و پراکنش ایستگاه‌های هیدرمتری منتخب آن را ارائه می‌نماید. حداقل و حداکثر ارتفاع از سطح دریای منطقه به‌ترتیب ۲۶- و ۵۶۷۰ متر مربوط به سواحل دریای مازندران و قله دماوند می‌باشد. آب و هوای منطقه در نواحی دشتی معتدل و مرطوب بوده که در ارتفاعات از معتدل مرطوب تا سرد خشک تغییر می‌نماید. بارش متوسط سالانه در جهت غرب به شرق از ۱۰۰۰ میلی‌متر به ۳۰۰ میلی‌متر کاهش می‌یابد، درحالی که میانگین درجه حرارت سالانه در همین جهت افزایش می‌یابد (۸).



شکل ۱- موقعیت منطقه مورد مطالعه و پراکنش ایستگاه‌های هیدرومتری
Figure 1. Location of the study area and distribution of the gauged sites

داده‌های مورد استفاده و تجزیه و تحلیل آماری

به منظور انجام این تحقیق، حداکثر دبی لحظه‌ای سالانه مربوط به ۳۸ ایستگاه هیدرومتری منتخب استان مازندران با طول دوره آماری ۱۳ تا ۵۶ سال گردآوری شد (جدول ۱). داده‌های هیدرولوژیکی از نظر وجود مقادیر پرت و همچنین کیفیت بر اساس آزمون گروبز و بک مورد ارزیابی قرار گرفتند. علاوه بر داده‌های هیدرولوژیکی، مجموعه‌ای از اطلاعات اقلیمی و فیزیوگرافی منطقه شامل متوسط بارش سالانه و ماهانه، طول و عرض جغرافیایی، ارتفاع ایستگاه، حداقل، حداکثر و متوسط ارتفاع حوزه، شیب متوسط حوزه، مساحت و محیط حوزه، طول آبراهه اصلی، شیب آبراهه اصلی، درصد مساحت پوشیده شده با جنگل و دریاچه نیز درنظر گرفته شد. به‌منظور حذف اثرات اختلاف واحد موجود در متغیرهای هیدرولوژیکی، اقلیمی و فیزیوگرافی، تمامی داده‌ها قبل از هر

1- Top Kriging

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-17]
[DOR: 20.1001.1.22516174.1395.7.14.25.7]
[DOI: 10.29252/jwmr.7.14.47]

آنالیزی با استفاده از تبدیل لگاریتمی استاندارد و سپس بر اساس آزمون کولموگروف اسمیرنوف مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفتند، تا از نرمال بودن آنها اطمینان حاصل شود.

جدول ۱- مشخصات ایستگاه‌های هیدرومتری مورد مطالعه

Table 1. The characteristics of the selected streamflow stations

ردیف	ایستگاه	مساحت (km^2)	طول دوره آماری	ردیف	ایستگاه	مساحت (km^2)	طول دوره آماری
۱	سفیدچاه	۱۰۳۶/۹۲	۳۴	۲۰	کره سنگ	۳۹۸۶/۶۶	۵۵
۲	گلورد	۱۴۲۷/۷۴	۲۷	۲۱	بلیران	۸۲/۰۶	۱۳
۳	آبلو	۱۹۰۵/۶۱	۳۰	۲۲	آغوزکتی	۱۴۰/۶۲	۴۶
۴	نوذرآباد	۲۰۱۷/۳۲	۳۴	۲۳	نوشهر	۷۵/۴۹	۳۴
۵	سلیمان تنگه	۱۲۴۸/۲۵	۴۶	۲۴	دره هریجان	۸۴/۸۳	۲۱
۶	ریگ چشمه	۲۷۱۵/۲۵	۴۸	۲۵	ولی آباد	۱۸۱/۰۹	۲۱
۷	گرمرود	۸۷۶/۷۸	۲۶	۲۶	آبشار	۵۸۶/۱۸	۲۲
۸	کردخیل	۴۰۲۶/۵۷	۳۵	۲۷	دوآب چالوس	۶۲۷/۴۳	۲۸
۹	دارابکلا	۲۷/۵۷	۲۸	۲۸	پل ذغال	۱۵۸۳/۳۶	۵۶
۱۰	کریکلا	۵۶۶/۶۳	۲۲	۲۹	کلاردشت	۱۹۰/۴۶	۴۸
۱۱	کیاکلا	۲۳۸۶/۷۹	۵۴	۳۰	والت	۳۳۰/۵۱	۲۷
۱۲	شیرگاه کسیلیان	۳۴۲/۸۹	۵۴	۳۱	زوات	۴۱۹/۰۰	۳۰
۱۳	شیرگاه تالار	۱۷۷۶/۱۶	۵۰	۳۲	ماشاالله آباد	۱۵۱/۳۴	۲۰
۱۴	پاشاکلا	۲۱۱/۳۳	۱۳	۳۳	هرات بر	۷۷۶/۲۰	۳۸
۱۵	قرآن تالار	۴۰۶/۶۱	۵۳	۳۴	گانگسر	۴۰۹/۲۲	۳۲
۱۶	کشتارگاه	۱۶۲۵/۱۵	۵۴	۳۵	رامسر	۱۳۵/۸۱	۳۵
۱۷	بلده	۷۵۲/۷۴	۲۸	۳۶	دینارسرا	۲۲۴/۶۸	۲۵
۱۸	رزن	۱۱۸۲/۳۱	۳۶	۳۷	اسکومحله	۸۱/۳۰	۱۸
۱۹	پنجاب	۲۳۵/۵۲	۲۹	۳۸	رضا پط	۱۰۸/۱۹	۱۵

روش کریجینگ متعارف

در فضای جغرافیایی، سیلاب کمّیتی ناپیوسته است، حتی در حوزه‌های هم‌جوار مقادیر آن تغییرات زیادی دارد؛ زیرا مکانیسم تولید سیلاب و پارامترهای مؤثر بر آن، در هر حوزه منحصربه‌فرد می‌باشد. در واقع وقوع سیلاب در هر مکان، نشان‌دهنده‌ی پاسخ هیدرولوژیکی به اقلیم غالب منطقه و منعکس کننده‌ی تأثیر خصوصیات فیزیکی و ژئومورفولوژیکی حوزه‌ها می‌باشد. در این صورت اگرچه سیلاب ماهیتی پیوسته در فضای جغرافیایی ندارد، اما در فضای فیزیوگرافی طراحی شده توسط متغیرهای اقلیمی و فیزیوگرافی مؤثر بر آن، ماهیتی پیوسته خواهد داشت (۵). به‌عبارتی هرچند امکان درون‌یابی مستقیم برخی از متغیرهای هیدرولوژیکی به‌علت ماهیت ناپیوسته و عدم داشتن ساختار مکانی[1] در فضای جغرافیایی میسر نمی‌باشد، اما در فضای فیزیوگرافی طراحی شده توسط متغیرهای ژئومورفوکلیماتیک مؤثر بر آنها امکان‌پذیر می‌شود. فضای فیزیوگرافی، فضایی چندبعدی تعریف شده توسط متغیرهای اقلیمی و فیزیوگرافی مؤثر بر کمّیت مورد نظر می‌باشد. مختصات آن به وسیله‌ی توصیف‌گرهای ژئومورفوکلیماتیک هر حوزه و روش‌های آماری چندمتغیره به‌دست می‌آید، بنابراین هر حوزه می‌تواند به عنوان یک نقطه در فضای X-Y تعریف شده توسط پارامترهای ژئومورفوکلیماتیک قرار گرفته و مقادیر تجربی کمّیت مورد نظر (سیلاب با دوره بازگشت‌های مختلف) به‌عنوان محور سوم یا Z در نظر گرفته شود و درون‌یابی را با استفاده از یک الگوریتم درون‌یابی استاندارد نظیر کریجینگ انجام داد (۴). روش کریجینگ متعارف (CK) جزء روش‌های درون‌یابی بر پایه فضای فیزیوگرافی است، که در آن عمل درون‌یابی توسط کریجینگ و در فضای فیزیوگرافی تعریف شده توسط روش آماری چندمتغیره CCA صورت می‌گیرد. مراحل منطقه‌ای کردن بر اساس روش کریجینگ متعارف به‌صورت شماتیک در شکل ۲ ارائه شده است.

براساس شکل ۲، روش کریجینگ متعارف به‌طور مشخص از دو مرحله‌ی اصلی ساخت فضای فیزیوگرافی بر اساس روش آماری تحلیل همبستگی متعارف و درون‌یابی مکانی در فضای فیزیوگرافی بر اساس روش کریجینگ تشکیل شده است.

تحلیل هم‌بستگی متعارف

تورانین (۲۳)، رایس (۱۷) و دی‌کورسی (۶) نخستین افرادی بودند، که از روش تحلیل همبستگی متعارف در مطالعات هیدرولوژیکی بهره جستند. CCA، جزء روش‌های پیشرفته آماری چندمتغیره می‌باشد، که اغلب به بررسی ارتباط میان دو مجموعه از متغیرهای تصادفی و همبسته می‌پردازد. چنان‌چه X و Y دو مجموعه از متغیرهای تصادفی $X=\{X_1, X_2, \dots, X_n\}$ و $Y=\{Y_1, Y_2, \dots, Y_r\}$، $n \geq r$ باشند، به‌طوری‌که X مجموعه‌ای n عضوی از خصوصیات اقلیمی- فیزیوگرافی و Y مجموعه‌ای r عضوی از متغیرهای هیدرولوژیکی (مقادیر سیلاب ایستگاهی با دوره‌های بازگشت مختلف) باشد، CCA قادر به تعیین ترکیب خطی غالب میان دو مجموعه X و Y است.

منطق حاکم بر این روش به‌دست آوردن ترکیب خطی متغیرهای هر یک از مجموعه‌ها می‌باشد، به‌طوری که همبستگی محاسبه شده بین دو ترکیب خطی به حداکثر مقدار برسد. به‌عبارت دیگر CCA، دو متغیر جدید به نام متغیرهای کانونی[2] $V=\{V_1, V_2, \dots, V_p\}$ و $W=\{W_1, W_2, \dots$

1- Spatial Structure

2- Canonical Variables

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-17]

[DOR: 20.1001.1.22516174.1395.7.14.25.7]

[DOI: 10.29252/jwmr.7.14.47]

$p=\min\{n, r\}$، W_p تبیین می‌نماید (۱۴). متغیر کانونی نخست از حداکثر رابطه و همبستگی میان دو مجموعه از متغیرها برخوردار است و دومین متغیر کانونی بیش‌ترین ارتباط و همبستگی میان دو مجموعه از متغیرها را پس از متغیر کانونی اول، تبیین و استنتاج می‌کند. علاوه‌بر این همبستگی بین هر جفت متغیر کانونی (V_i و W_i) حداکثر مقدار و همبستگی میان متغیرهای کانونی جفت‌های متفاوت صفر است (۵،۱۸). چنان‌چه X و Y به ترتیب متغیرهای مستقل و وابسته باشند، ترکیب خطی غالب آنها به شکل زیر است:

رابطه (۱) $V = a_1X_1 + a_2X_2 + \dots + a_nX_n = a'X$

رابطه (۲) $W = b_1Y_1 + b_2Y_2 + \dots + b_rY_r = b'Y$

در روابط ۱ و ۲، V و W به‌ترتیب ترکیب خطی از مجموعه متغیرهای X و Y، $a'X$ و $b'Y$ بردارهای متناظر، a' و b' ترانهاده ستون بردارهای a و b می‌باشد. ماتریس کوواریانس متغیرهای $X_1, X_2, \dots, X_n$ و $Y_1, Y_2, \dots, Y_r$ بر اساس تعلق متغیرها به هر مجموعه به صورت رابطه ۳ بیان می‌شود:

رابطه (۳)
$$corr(V,W) = \frac{cov(V,W)}{\sqrt{Var(V)}\sqrt{Var(W)}} = \frac{a'C_{XY}b}{\sqrt{a'C_{XX}a}\sqrt{b'C_{YY}b}}$$

همبستگی میان متغیرهای تصادفی V و W براساس رابطه‌ی۴ محاسبه می‌شود:

رابطه (۴)
$$C = \begin{pmatrix} C_{XX} & C_{XY} \\ C_{XY}' & C_{YY} \end{pmatrix}$$

هدف CCA، برآورد مقادیر بهینه بردارهای a' و b' می‌باشد، به‌نحوی‌که $corr(V,W)$ به بیش‌ترین مقدار برسد. چنان‌چه P مرتبه C_{XY} باشد، مقادیر بهینه بردارهای a' و b' برابر است با:

رابطه (۵) $\lambda_i = corr(V_i, W_i) i = 1, \dots, P$

در رابطه ۵، متغیرهای $W_1, W_2, \dots, W_P$ و $V_1, V_2, \dots, V_P$ به‌عنوان متغیرهای کانونی شناخته می‌شوند (۱۴). متغیرهای کانونی V_1 و V_2 از حداکثر همبستگی با متغیرهای کانونی W_1 و W_2 برخوردارند، بنابراین تغییرات متغیر W را به‌خوبی ارائه می‌دهند. هم چنین متغیرهای V_1 و V_2 غیرهمبسته و متعامد هستند و می‌توانند به عنوان محورهای مختصات (X و Y) فضای فیزیوگرافی در نظر گرفته شوند (۱). در نهایت پس از طراحی فضای فیزیوگرافی و تعیین مختصات فیزیوگرافی هر ایستگاه، می‌توان مقادیر تجربی کمّیت مورد نظر را به عنوان محور سوم یا Z در نظر گرفت و درون‌یابی را بر اساس تخمین زمین‌آماری نظیر کریجینگ انجام داد. با به کارگیری روش درون‌یابی (کریجینگ) در فضای فیزیوگرافی CCA، برآوردهای منطقه‌ای بر اساس دوره‌های بازگشت مختلف به دست می‌آید.

ارزیابی روش

به منظور بررسی صحت نتایج و ارزیابی قابلیت اطمینان در برآوردهای منطقه‌ای سیلاب با دوره بازگشت‌های مختلف از روش ارزیابی متقابل جک نایف[۲] استفاده شد. این روش در ارزیابی عملکرد روش‌های درون‌یابی کارآیی لازم را دارد، زیرا شرایط بدون اندازه‌گیری را برای هر یک از ۳۸ آبخیز فراهم می‌نماید. در روش جک‌نایف هر حوزه به نوبت از مجموعه‌ی شبکه هیدرومتری حذف و به‌عنوان حوزه بدون آمار فرض می‌شود. سپس حوزه حذف شده، به‌عنوان حوزه هدف در نظر گرفته می‌شود و مقادیر کمیت سیلاب آن با استفاده از حوزه‌های باقیمانده و بر اساس روش منطقه‌ای مورد نظر به دست می‌آید. در نهایت به‌منظور ارزیابی عملکرد تحلیل منطقه‌ای از شاخص‌های آماری بر اساس روابط ۶ تا ۱۰ استفاده می‌شود (۴).

رابطه (۶)
$$BIAS = \frac{1}{ns}\sum_{i=1}^{ns}(Q_{reg}(i) - Q_{Loc}(i))$$

رابطه (۷)
$$BIASr = \frac{1}{ns}\sum_{i=1}^{ns}\left[\frac{Q_{reg}(i) - Q_{loc}(i)}{Q_{loc}(i)}\right]$$

رابطه (۸)
$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{ns}\sum_{i=1}^{ns}[Q_{reg}(i) - Q_{ioc}(i)]^2}$$

رابطه (۹)
$$RMSEr = \sqrt{\frac{1}{ns}\sum_{i=1}^{ns}\left[\frac{Q_{reg}(i) - Q_{loc}(i)}{Q_{loc}(i)}\right]^2}$$

رابطه (۱۰)
$$NASH = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{ns}(Q_{reg} - Q_{loc})^2}{\sum_{i=1}^{ns}(Q_{loc} - \overline{Q_{loc}})^2}$$

در این روابط ns تعداد ایستگاه‌ها، $Q_{reg}(i), Q_{loc}(i)$ به ترتیب دبی مشاهده‌ای و منطقه‌ای متعلق به ایستگاه iام با دوره بازگشت‌های مختلف می‌باشد (۱۵).

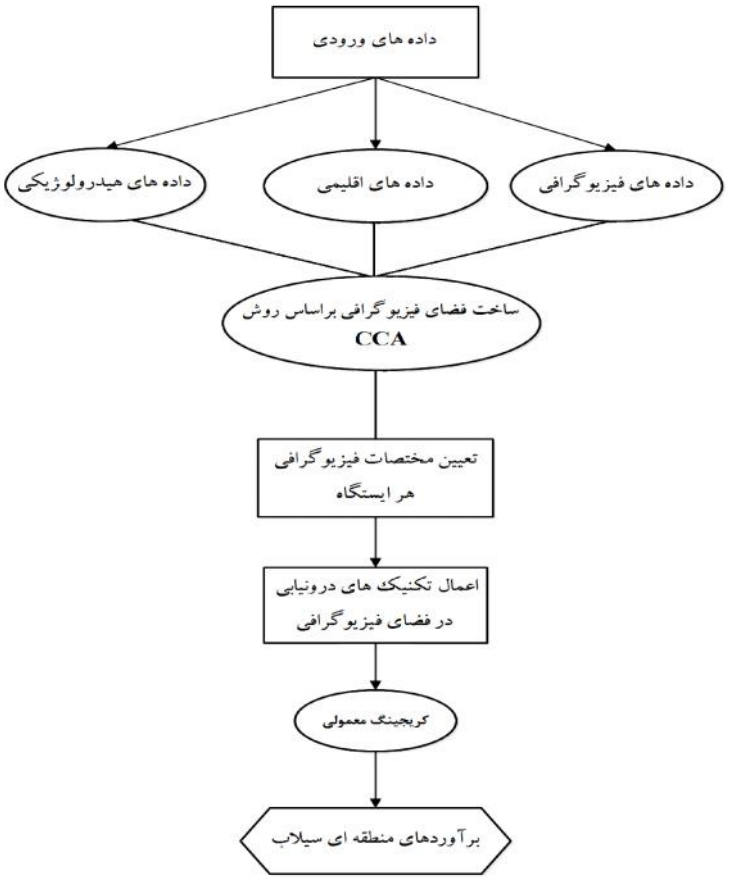
1- Jack Knife

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-17]
[DOR: 20.1001.1.22516174.1395.7.14.25.7]
[DOI: 10.29252/jwmr.7.14.47]

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-17]

[DOR: 20.1001.1.22516174.1395.7.14.25.7]

[DOI: 10.29252/jwmr.7.14.47]

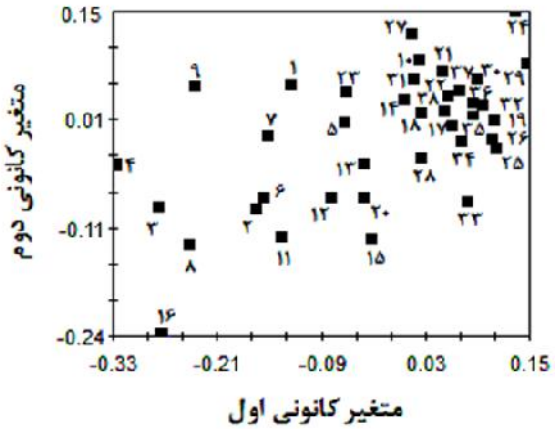


شکل ۲- فلوچارت روش کریجینگ متعارف.
Figure 2. Flowchart of regional analysis based on Canonical Kriging

نتایج و بحث

مقادیر دبی اوج لحظه‌ای مشاهده شده (سیلاب ایستگاهی) با استفاده از توزیع‌های آماری منتخب هر ایستگاه بر اساس برازش با روش گشتاورهای خطی و حداکثر احتمال درست‌نمایی به‌دست آمد (۱۵). توزیع‌های درنظر گرفته شده شامل نرمال، ویبول، نمائی، گاما، لجستیک، لجستیک تعمیم یافته، پارتو تعمیم یافته، لوگ پیرسون نوع سه، لوگ نرمال دو پارامتره و مقادیر حداکثری بود. انتخاب توزیع‌های آماری و تحلیل ایستگاهی سیلاب با استفاده از برنامه نوشته شده توسط حامد و رائو (۱۰) تحت نرم‌افزار Matlab انجام شد.

ساخت فضای فیزیوگرافی بر اساس روش آماری چندمتغیره‌ی CCA صورت گرفت. این روش به تبیین ارتباط و همبستگی میان دو مجموعه از متغیرهای مستقل و وابسته می‌پردازد. متغیرهای مستقل در نظر گرفته شده، شامل شش متغیر فیزیوگرافی (مساحت حوزه، محیط حوزه، طول آبراهه اصلی، ارتفاع حداقل حوزه، شیب متوسط حوزه و ارتفاع ایستگاه هیدرومتری) و متغیرهای وابسته شامل دو متغیر هیدرولوژیکی (Q_{10} و Q_{20}) بودند. منظور از فضای فیزیوگرافی، فضایی دو بعدی است که توسط متغیر کانونی اول (V_1) و متغیرکانونی دوم (V_2) ایجاد می‌شود. V_1 و V_2 ترکیبی خطی از مجموعه متغیرهای فیزیوگرافی می‌باشند، که از بیش‌ترین همبستگی با متغیرهای هیدرولوژیکی برخوردارند. نحوه قرارگیری ایستگاه‌های هیدرومتری در فضای فیزیوگرافی در شکل ۳ ارائه شده است. شماره ایستگاه‌های هیدرومتری مطابق جدول ۱ می‌باشد. بدین‌ترتیب مختصات فیزیوگرافی هر ایستگاه با توجه به موقعیت قرارگیری در فضای فیزیوگرافی برای انجام مراحل بعدی محاسبات به‌دست آمد.



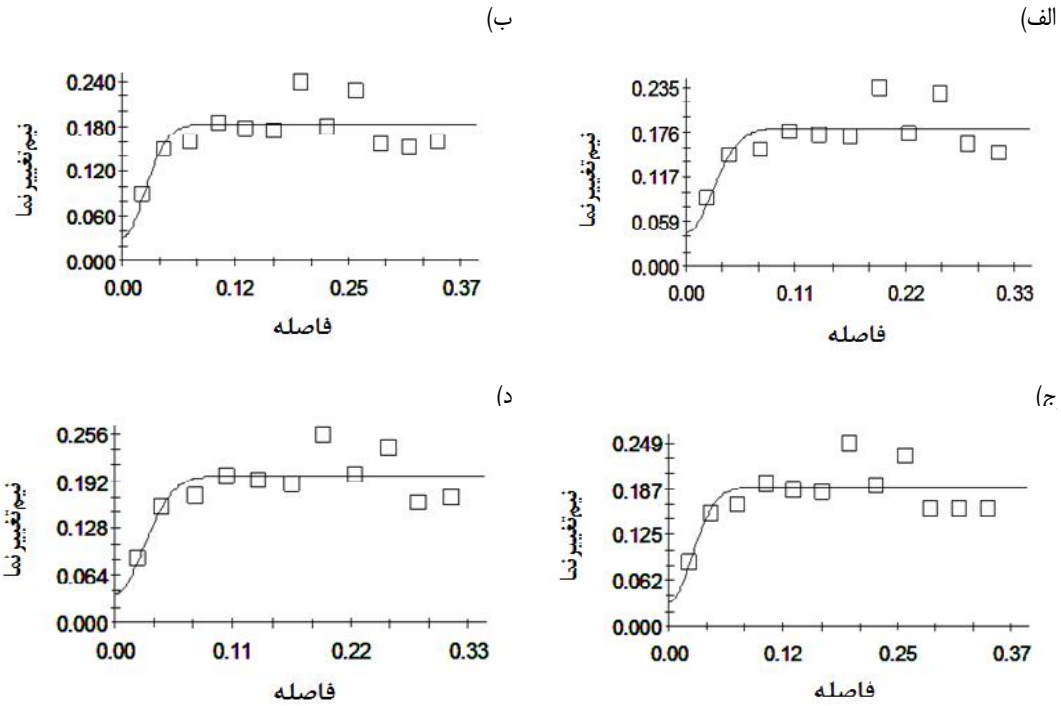
شکل ۳- نحوه پراکنش ایستگاه‌های هیدرومتری در فضای فیزیوگرافی CCA
Figure 3. The distribution of stations in the CCA physiographical space

شناسایی و اندازه‌گیری ساختار مکانی کمیت هیدرولوژیکی، بر اساس نیم‌تغییرنماهای تجربی و با استفاده از نرم‌افزار GS^+ صورت گرفت. ناهمسانگردی داده‌ها در جهات مختلف مورد بررسی قرار گرفت. آستانه[1] و دامنه تأثیر[2] نیم‌تغییر نماها در چهار جهت صفر، ۴۵، ۹۰ و ۱۲۰ درجه تغییرات معنی‌داری نشان ندادند. بدین‌ترتیب نیم‌تغییر نماهای تجربی ایزوتروپیک در فضای فیزیوگرافی طراحی شده با CCA تعیین شدند. در شکل ۴ نیم‌تغییر نماهای برازش داده شده به کمیت سیلاب ایستگاهی با دوره بازگشت‌های ۱۰، ۲۰، ۵۰ و ۱۰۰ سال ارائه شده است. بر اساس شکل‌های مذکور متغیرهای در نظر گرفته شده از ساختار مکانی آشکاری در فضای فیزیوگرافی برخوردار هستند. به طوری که در فاصله کمی از مبدأ میزان تغییرات نیم‌تغییر نما به سرعت افزایش می‌یابد و پس از آن به مقدار ثابتی می‌رسد که به این سطح ثابت، آستانه می‌گویند. با توجه به مقادیر آستانه نیم‌تغییرنماهای تجربی در دوره بازگشت‌های مختلف، سیلاب با دوره بازگشت ۱۰۰ سال از آستانه بالاتری نسبت به سایر دوره‌های بازگشت برخوردار می‌باشد. این امر به علت افزایش مقادیر دبی با افزایش دوره بازگشت کاملاً قابل توجیه است. محدوده‌ای که در آن نیم‌تغییرنما به آستانه می‌رسد و پس از آن ساختار مکانی وجود نخواهد داشت، دامنه تأثیر می‌نامند. با توجه به نیم‌تغییرنماهای تجربی، دبی با دوره بازگشت ده سال از دامنه‌ی تأثیر بیش‌تری نسبت به سایر دوره‌های بازگشت برخوردار می‌باشد، زیرا با افزایش دوره بازگشت میزان پیوستگی مکانی کاهش می‌یابد. افزایش ناپیوستگی مکانی با افزایش دوره بازگشت،با افزایش عدم قطعیت برآوردها و همچنین تأثیر اثر قطعه‌ای[3] مرتبط می‌باشد. پرش عمودی نیم‌تغییر نما در مبدأ مختصات که به اثر قطعه‌ای معروف است، خود بیانگر نوعی ناپیوستگی در نزدیکی مبدأ می‌باشد. این ناپیوستگی مکانی متأثر از خطای نمونه‌برداری، خطای برآوردهای مکانی و منطقه‌ای نمودن است.

پس از محاسبه‌ی نیم‌تغییرنماهای تجربی، باید مدل تئوری به آن برازش داده شود. مدل‌های تئوری کروی، نمایی، خطی و گوسی جهت برازش با نیم‌تغییرنماهای تجربی مورد آزمایش قرار گرفت. با توجه به الگوی مکانی نشان داده شده توسط نیم‌تغییرنمای تجربی و شاخص‌های ضریب همبستگی، مجموع مربعات باقیمانده و تناسب ساختار مکانی در نهایت مدل گوسی مناسب ارزیابی شد. پس از برازش مدل گوسی، برآوردهای منطقه‌ای سیلاب بر اساس روش کریجینگ معمولی در فضای فیزیوگرافی CCA محاسبه شد. ارزیابی متقابل مقادیر دبی برآورد شده بر اساس روش کریجینگ متعارف با دبی مشاهده شده در شکل ۵ ارائه شده است. محور x نمودار نشان دهنده‌ی مقادیر دبی مشاهده شده و محور y نشان دهنده‌ی مقادیر دبی منطقه‌ای برآورد شده بر اساس دوره‌های بازگشت مختلف می‌باشد. هرچه پراکنش نقاط و خط بهترین برازش با مقادیر دبی منطقه‌ای به خط ۱:۱ نزدیک‌تر باشد، دقت مدل مورد بررسی بالاتر خواهد بود. بر اساس شکل‌های مذکور دقت بالای پیش‌بینی‌های منطقه‌ای کاملاً مشهود می‌باشد. به‌طوری که خط بهترین برازش با مقادیر منطقه‌ای بر خط ایده‌آل ۱:۱ کاملاً منطبق بود. انطباق خط برازش یافته شده بر خط ایده‌آل و هم چنین پراکنش متناسب نقاط حول خط ایده‌آل ۱:۱، نشان‌دهنده ناچیز بودن میانگین خطا و جذر میانگین مربعات خطا است.

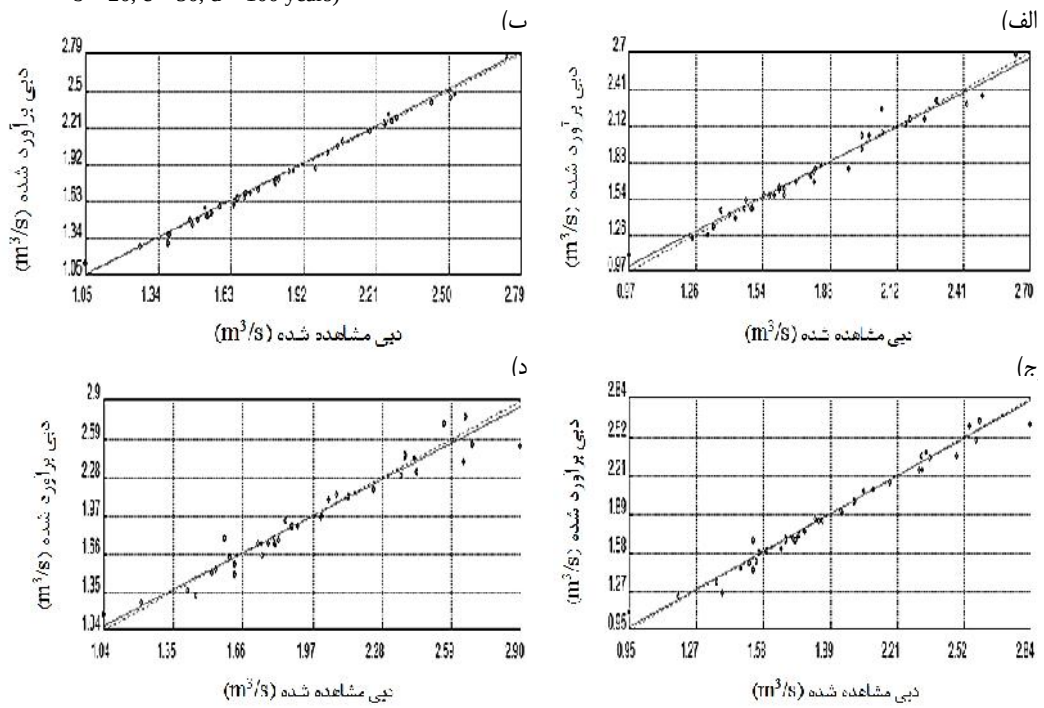
1- Sill
2- Effect Range
3- Nugget Effect

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-17]
[DOR: 20.1001.1.22516174.1395.7.14.25.7]
[DOI: 10.29252/jwmr.7.14.47]



شکل ۴- نیم‌تغییرنماهای برازش داده شده با مقادیر سیلاب ایستگاهی در فضای فیزیوگرافی CCA (با دوره بازگشت الف=۱۰، ب=۲۰، ج=۵۰ و د= ۱۰۰سال)

Figure 4. Variograms fitted to the quantity of local flood in CCA physiographical space (with return periods a = 10, b = 20, c = 50, d = 100 years)



شکل ۵- ارزیابی متقابل نتایج کریجینگ متعارفبا دوره بازگشت‌های الف=۱۰، ب=۲۰، ج=۵۰ و د=۱۰۰ سال (خط نقطه‌چین به عنوان خط ایده‌آل ۱:۱ و خط ممتد بر اساس بهترین برازش با مقادیر دبی اوج ناحیه‌ای (نقاط) ترسیم شده است)

Figure 5. Cross validation results of Canonical Kriging with return periods a = 10, b = 20, c = 50, d = 100 years (dotted line is the ideal line (1:1) and continuous line is plotted based on the best fitting regional flood quantities (dots))

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-17]
[DOR: 20.1001.1.22516174.1395.7.14.25.7]
[DOI: 10.29252/jwmr.7.14.47]

در ادامه به‌منظور بررسی صحت و دقت برآوردهای منطقه‌ای روش کریجینگ متعارف از روش جک‌نایف استفاده گردید. نتایج ارزیابی متقابل جک‌نایف بر اساس پنج شاخص آماری در جدول ۲ ارائه شده است. با توجه به نتایج جدول ۲، شاخص NASH بیش از ۰/۹ در تمام دوره‌های بازگشت برآورد گردید، این امر نشان‌دهنده‌ی دقت بالای روش کریجینگ متعارف می‌باشد. شاخص NASH جزء بهترین معیارهای ارزیابی عملکرد محسوب می‌گردد. مقادیر منفی این شاخص نشان‌دهنده نامناسب بودن مدل بوده و در بهترین حالت مقدار آن برابر با یک است (۵). اما با توجه به چهار شاخص BIASr، BIAS، RMSE وRMSEr کمترین مقادیر، نشان‌دهنده‌ی بهترین عملکرد می‌باشد. مقادیر منفی به‌دست آمده بر اساس شاخص BIAS نشان‌دهنده برآوردهای بیش‌تر از مقدار واقعی[1] می‌باشد. در بررسی کارآیی کمیت سیلاب منطقه‌ای، عملکرد شاخص‌های نسبی نظیر BIASr و RMSEr از اهمیت ویژه‌ای برخوردار هستند، زیرا با به ارگیری شاخص‌های نسبی به جای شاخص‌های قطعی نظیر RMSE و BIAS هرگونه اثر بالقوه مقیاس از نتایج حذف می‌گردد (۱۵). بدین ترتیب بر اساس نتایج شاخص‌های نسبی، می‌توان بیان نمود با افزایش دوره بازگشت عملکرد روش کریجینگ متعارف در حال بهبود است. این نتایج با مطالعات اورودا و همکاران (۱۵) و مارتل و همکاران (۱۳) مطابقت دارد. نتایج اورودا و همکاران نشان داد، هر چند مقادیر شاخص RMSE و BIAS با افزایش دوره بازگشت در حال افزایش است، ولی عملکرد روش کریجینگ متعارف با توجه به شاخص‌های نسبی BIASr و RMSEr در حال بهبود است (۱۵). نتایج مارتل و همکاران نیز نشان داد که عملکرد نسبی روش کریجینگ متعارف با افزایش دوره بازگشت با توجه به دو شاخص BIASr و RMSEr در حال بهبود است، هر چند مقادیر شاخص‌هایRMSE و BIAS در حال افزایش می‌باشد (۱۳).

جدول ۲- نتایج ارزیابی متقابل برآوردهای منطقه‌ای سیلاب بر اساس روش کریجینگ متعارف

Table 2. The results of the cross validation of regional flood estimation based on Canonical Kriging

متغیر	BIAS (m^3/s)	BIASr٪	RMSE (m^3/s)	RMSEr (٪)	NASH
Q_{10}	۰/۰۰۵۲	۰/۵۴	۰/۰۶	۳/۹۵	۰/۹۷
Q_{20}	۰/۰۰۳۸	۰/۳۱	۰/۰۳	۲/۲۹	۰/۹۹
Q_{50}	-۰/۰۰۳۰	۰/۱۵	۰/۰۶	۴/۲۷	۰/۹۷
Q_{100}	-۰/۰۰۵۲	۰/۱۰	۰/۱۰	۵/۲۴	۰/۹۴

مطالعه حاضر با هدف کاربرد روش کریجینگ متعارف جهت پیش‌بینی منطقه‌ای سیلاب در حوزه‌های بدون آمار در استان مازندران با ۳۸ ایستگاه هیدرومتری انجام گرفت. در روش کریجینگ متعارف، مناطق همگن هیدرولوژیکی بر اساس رویکرد همسایگی هیدرولوژیکی تعیین شدند. در روش همسایگی فرض می‌شود، هر حوزه دارای منطقه همگن هیدرولوژیکی است و فواصل بین حوزه‌ها در فضای فیزیوگرافی تعریف می‌شود، بدین‌ترتیب مشکل گروه‌بندی حوزه‌های آبخیز برطرف گشت. علاوه‌براین روش کریجینگ متعارف امکان برآوردهای منطقه‌ای کمیت‌های هیدرولوژیکی را در نقاط بدون آمار نیز فراهم نموده است. حوزه‌های بدون آمار، با داشتن خصوصیات اقلیمی و فیزیوگرافی آنها، می‌توان مختصات فیزیوگرافی آنها را برآورد نموده و با کمک اطلاعات حوزه‌های اطراف، مقادیر متغیر هیدرولوژیکی را تخمین زد. روش کریجینگ متعارف که با هدف فراهم نمودن امکان تحلیل منطقه‌ای متغیرهای هیدرولوژیکی فاقد ساختار مکانی ابداع و بر به کارگیری مختصات فیزیوگرافی به جای مختصات جغرافیایی معمول تأکید دارد؛ بنابراین با در نظر گرفتن متغیرهای مورد نظر در فضای فیزیوگرافی امکان درون‌یابی آن‌ها فراهم می‌شود. برازش مدل تئوری گوسی به عنوان بهترین نیم‌تغییرنما در دوره بازگشت‌های ۱۰، ۲۰، ۵۰ و ۱۰۰ سال نشان‌دهنده‌ی حداکثر ساختار مکانی متغیرهای هیدرولوژیکی در فضای فیزیوگرافی است. مهمترین دلایل کارآمدی و پیش‌بینی‌های دقیق روش کریجینگ متعارف شامل در نظر گرفتن ساختار مکانی و خصوصیات ژئومورفولوژیکی حوزه‌ها در برآوردهای منطقه‌ای، ساخت فضای فیزیوگرافی بر اساس حداکثر همبستگی میان متغیرهای اقلیمی، فیزیوگرافی و هیدرولوژیکی از طریق کاربرد روش آماری چندمتغیره CCA، کاربرد روش‌های زمین‌آمار در برآوردهای منطقه‌ای که به‌عنوان بهترین تخمین‌گر خطی ناااریب شناخته می‌شوند و به کارگیری فاصله‌ی اقلیدسی حوزه‌ها در فضای فیزیوگرافی و بر اساس شباهت در رژیم هیدرولوژیکی است. به طور کلی نتایج حاصل از این تحقیق نشان داد کاربرد روش کریجینگ متعارف رویکردی عملی، مؤثر و کارآمد در تحلیل فراوانی منطقه‌ای سیلاب می‌باشد و می‌توان بیان داشت این روش از پتانسیل کافی جهت برآوردهای منطقه‌ای داده‌های هیدرولوژیکی برخوردار می‌باشد و برآوردهای دقیق‌تر و قابل اعتمادتری، نسبت به سایر روش‌های مرسوم در این زمینه ارائه می‌دهد. با توجه به نتایج به دست آمده از این مطالعه جهت افزایش کارآیی و دقت تکنیک نوپای کریجینگ متعارف برای تحلیل منطقه‌ای سایر متغیرهای وابسته به جریان نظیر دما، غلظت، املاح و جریان حداقل باید مورد بررسی قرار گرفته تا مشکل برآوردهای منطقه‌ای این قبیل متغیرها مرتفع شود.

1- Overestimates

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-17]
[DOR: 20.1001.1.22516174.1395.7.14.25.7]
[DOI: 10.29252/jwmr.7.14.47]

منابع

1. Archfield, S.A., A. Pugliese, A. Castellarin, J.O. Skøien and J.E. Kiang. 2013. Topological and Canonical Kriging for Design-Flood Prediction in Ungauged Catchments: an Improvement over a Traditional Regional Regression Approach. Hydrology and Earth System Sciences, 17: 1575-1588.
2. Burn, D.H. 1990. Evaluation of regional flood frequency analysis with a region of influence approach. Water Resource Research, 26: 2257-2265.
3. Castellarin, A., D.H. Burn and A. Brath. 2001. Assessing the effectiveness of hydrological similarity measures for flood frequency analysis. Journal of Hydrology, 24: 270-285.
4. Castiglioni, S., A. Castellarin and A. Montanari. 2009. Prediction of low-flow indices in ungauged basins through physiographical space-based interpolation. Journal of Hydrology, 378: 272-280.
5. Chokmani, K. and T.B.M.J. Ouarda. 2004. Physiographical space-based kriging for regional flood frequency estimation at ungauged sites. Water Resource Research, 40, W12514.
6. DeCoursey, D.G. 1973. Objective regionalization of peak flow rates. Flood and Droughts.Proceedings of the second international symposium in hydrology. 11-13 September, 1972. Fort-Collins, Colorado.
7. De Marsily, G. and S. Ahmed. 1987. Application of kriging techniques in groundwater hydrology. Journal of Geology Sciences India, 29: 57-82.
8. Eslamiyan, S., A. Zarei and A. Abrishamchi. 2004. Regional Estimation of Low Flows for Mazandaran River Basin. Science and Technology of Agriculture and Natural Resources, 1: 27-37 (In Persian).
9. Guillemette, N., A. St-Hilaire, T.B.M.J. Ouarda, N. Bergeron, E. Robichaud and L. Bilodeau. 2009. Feasibility Study of a Geostatistical Modelling of Monthly Maximum Stream Temperatures in a Multivariate Space. Journal of Hydrology, 364: 1-12.
10. Hamed, K.H. and A.R. Rao. 1997-2003. Flood Frequency Analysis (Computer Program).
11. Joseph, G., K. Chokmani, T.B.M.J. Ouarda and A. Saint-Hilaire. 2006. Anevaluation of the Robustness of Canonical Kriging for Regional Analysis of Stream flows. Revue des Science de l'eau, 20: 367-380.
12. Kamali Nezhad, M., K. Chokmani, T.B.M.J. Ouarda, M. Barbet and P. Bruneau. 2010. Regional Flood Frequency Analysis Using Residual Kriging in Physiographical Space. Hydrological Processes, 24: 2045-2055.
13. Martel, B., T.B.M.J. Ouarda, M. Barbet, P. Bruneau, M. Latraverse and M. Kamali Nezhad. 2011. Regional Frequency Analysis of Autumnal Floods in the Province of Quebec, Canada. Nat Hazards, 59: 681-698.
14. Muirhead, R.J. 1982. Aspect of Multivariate Statistical Theory. JOHN WILEY & SONS, INC., 605 THIRD AVE., NEW YORK, NY 10158, USA, 656.
15. Ouarda, T.B.M.J., K.M. Ba, C. Diaz-Delgado, A. Carsteanu, K. Chokmani, H. Gingras, E. Quentin, E. Trujillo and B. Bobe´e. 2008. Inter comparison of Regional Flood Frequency Estimation Methods at Ungauged Sites for a Mexican Case Study. Journal of Hydrology, 348: 40-58.
16. Reed, D.W., D. Jakob, A.J. Robinson, D.A. Faulkner and E.J. Stewart. 1999. Regional Frequency Analysis: a New Vocabulary, Proceedings of the international Congress of Hydrological Extremes: Understanding, Predicting, Mitigating, Birmingham, UK. *IAHS-AISH publication*, 237-243.
17. Rice, R.M. 1972. Using Canonical Correlation for Hydrological Predictions. Bulletin International Association of Scientific Hydrology, 3: 315-321.
18. Shu, C. and T.B.M.J. Ouarda. 2007. Flood Frequency Analysis at Ungauged Sites Using Artificial Neural Networks in Canonical Correlation Analysis Physiographic Space. Water Resources Research, 43: W07438.
19. Sivapalan, M. 2003. Prediction in Ungauged Basins a Grand Challenge for Theoretical Hydrology-Invited Commentary. Hydrological Process, 17: 3163-3170.
20. Skøien, J.O. and G. Bloschl. 2007. Spatiotemporal Topological Kriging of Runoff Time Series. Water Resource Research, 43: W09419.
21. Skøien, J.O., R. Merz and G. Bloschl. 2006. Top-Kriging Geostatistics on Stream Networks. Hydrology and Earth System Sciences, 10: 277-287.
22. Smith, K. 2000. Environmental Hazards Assessing: Risk and Reducing Disaster. Third Edition, London and New York. 392 pp.
23. Torranin, P. 1972. Applicability of Canonical Correlation in Hydrology. Hydrology Paper 58. Colorado State University, Fort-Collins, Colorado 30 pp.

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-17]
[DOR: 20.1001.1.22516174.1395.7.14.25.7]
[DOI: 10.29252/jwmr.7.14.47]

Regional Flood Frequency Analysis Application of Canonical Kriging Method in Mazandaran Province Watersheds

Zahra Sheikh[1], Abdolhamid Dehvari[2] and Mahdeieh Ebrahimi[2]

1- M.Sc. in combat desertification, University of Zabol,
(Corresponding author: z.sheikh03@gmail.com)
2- Assistant Professor, University of Zabol
Received: March 10, 2014 Accepted: July 22, 2014

Abstract

Regional analysis is the stability method to improve estimates of flood frequency, which has become one of the dynamic sectors in hydrology and the new theories are testing, constantly. Application of geostatistical method is an innovation in this field for regional flood analysis.This technique is based on the interpolation of hydrological variables in the physiographical space instead of using common geographical space. However, the hydrological, climatological and physiographical information of 38 river basin information of watersheds inside of Mazandaran province were obtained and Canonical Kriging method was used for regional flood analysis whit return periods of 10, 20, 50 and 100 years. The Canonical Correlation Analysis was used to design physiographic space by the geomorphoclimatical variables affecting the flood. The Gaussian model had the best fit to semi-variogram model in all return periods and the geostatistical method of Ordinary Kriging was used for regionalization. Results evaluated using Jack Knife mutual procedure and the five statistical indexes. The performance of NASH was obtained over than 0.9 in all of return periods, which implies the accurate and acceptable predictions of flood in ungauged basins. The other indicators led to satisfying results, too. According to the results of relative statistical indicators accuracy regional estimates improves as long as return periods increase. These results showed that application of Canonical Kriging method is effective and practical approach for regional flood analysis.

Keywords: Canonical Correlation Analysis, Geostatistics, Ordinary Kriging, Physiographical Space

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-17]

[DOR: 20.1001.1.22516174.1395.7.14.25.7]

[DOI: 10.29252/jwmr.7.14.47]