

## مقایسه روش‌های درون‌یابی بر پایه فضای فیزیوگرافی CCA با گشتاورهای خطی احتمال در تحلیل فراوانی منطقه‌ای سیلاب، مطالعه موردی: آبخیزهای استان مازندران

زهرا شیخ<sup>۱\*</sup> و احمد پهلوانروی<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup> کارشناس ارشد، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه زابل، <sup>۲</sup> دانشیار، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه زابل

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۴/۰۲/۱۶

تاریخ دریافت: ۱۳۹۳/۱۰/۲۰

### چکیده

بیشینه دبی لحظه‌ای سالانه ۳۸ ایستگاه هیدرومتری استان مازندران به همراه خصوصیات فیزیوگرافی و اقلیمی حوزه-های آبخیز گردآوری شد. نخست، از روش درون‌یابی بر پایه فضای فیزیوگرافی جهت برآوردهای منطقه‌ای سیلاب با دوره‌های برگشت ۱۰، ۲۰، ۵۰ و ۱۰۰ سال استفاده شد. طراحی فضای فیزیوگرافی بر اساس روش تحلیل همبستگی متعارف انجام شد و برآوردهای منطقه‌ای سیلاب با استفاده از سه روش درون‌یابی کریجینگ معمولی، کریجینگ ساده و IDW در فضای فیزیوگرافی به‌دست آمد. نتایج نشان داد که مقادیر سیلاب ایستگاهی از بیشینه همبستگی مکانی در فضای فیزیوگرافی برخوردارند و ساختار مکانی آن‌ها از نیم تغییرنمای گوسی تبعیت می‌نماید. در ادامه، از گشتاورهای خطی نیز برای تحلیل فراوانی منطقه‌ای سیلاب استفاده شد. در این روش، مناطق همگن بر اساس الگوریتم خوشه-بندی Ward تعیین شدند. همگنی مناطق به‌دست آمده از خوشه‌بندی با استفاده از آزمون‌های همگنی و ناهماهنگی بررسی شد. سپس با استفاده از آزمون نکویی برازش  $Z^{DIST}$ ، توزیع لجستیک تعمیم یافته برای هر سه خوشه به‌عنوان بهترین توزیع منطقه‌ای انتخاب شد و برآوردهای منطقه‌ای بر اساس عوامل توزیع منتخب به‌دست آمد. در نهایت عملکرد دو روش با استفاده از روش ارزیابی جک‌نایف و پنج شاخص آماری BIAS، BIASr، RMSE، RMSEr و NASH بررسی شد. بر اساس شاخص NASH هر دو روش عملکرد مطلوب و مشابهی ارائه می‌دهند، اما، بر اساس نتایج سایر شاخص‌های آماری روش درون‌یابی بر پایه فضای فیزیوگرافی عملکرد بهتری نسبت به گشتاورهای خطی ارائه می‌دهد و با افزایش دوره بازگشت کیفیت برآوردهای آن بهبود می‌یابد. در حالی که، گشتاورهای خطی برای دوره‌های بازگشت کوتاه عملکرد بهتری را ارائه می‌دهد. همچنین، نتایج درون‌یابی نشان داد که تخمین‌های زمین‌آماری نسبت به قطعی از دقت بالاتری برخوردارند و بهترین عملکرد متعلق به کریجینگ معمولی است.

واژه‌های کلیدی: خوشه‌بندی، کریجینگ، نیم تغییرنما، همگنی منطقه‌ای، IDW

### مقدمه

بخش‌های پویا در هیدرولوژی مبدل شده است. تئوری گشتاورهای خطی جزء مرسوم‌ترین روش‌های تحلیل منطقه‌ای است که در آن، مناطق همگن هیدرولوژیکی

تحلیل منطقه‌ای پرکاربردترین روش به‌منظور بهبود تخمین تناوب سیلاب می‌باشد که به یکی از

پس از ارائه نتایج موفقیت‌آمیز کاربرد روش درون‌یابی بر پایه فضای فیزیوگرافی (PSBI<sup>۱</sup>) این روش مورد توجه سایر محققین قرار گرفت، به‌طوری که Shu و Ouarda (۲۰۰۷) در مطالعه‌ای به‌منظور پیش‌بینی کمیت سیلاب در حوضه‌های بدون آمار، مدلی بر پایه CCA<sup>۲</sup> و شبکه عصبی مصنوعی توسعه دادند. داده‌های ۱۵۱ ایستگاه هیدرومتری ایالت کبک کانادا گردآوری شد و عملکرد مدل شبکه عصبی بر پایه CCA را با روش درون‌یابی بر پایه فضای فیزیوگرافی CCA و مدل اصلی مورد مقایسه قرار دادند. نتایج نشان داد، روش شبکه مصنوعی بر پایه CCA برآوردهای دقیق‌تری نسبت به سایر مدل‌ها ارائه می‌نماید. Ouarda و همکاران (۲۰۰۸) با استفاده از داده‌های ۲۹ ایستگاه هیدرومتری در مکزیک به ارزیابی چهار روش تحلیل خوشه‌ای سلسله مراتبی، تحلیل همبستگی متعارف، تحلیل همبستگی متعارف اصلاح شده و روش درون‌یابی بر پایه فضای فیزیوگرافی CCA پرداختند. نتایج این تحقیق نشان داد که روش تحلیل همبستگی متعارف و روش زمین‌آماري نسبت به سایر روش‌ها عملکرد بهتری دارند. Guillemette و همکاران (۲۰۰۹)، از روش درون‌یابی بر پایه فضای فیزیوگرافی جهت برآورد بیشینه دمای آب رودخانه‌های کانادا در مقیاس وسیعی استفاده نمودند. داده‌های ۱۲ ایستگاه سنجش بیشینه دمای آب رودخانه گردآوری شد و ساخت فضای فیزیوگرافی بر اساس روش PCA و CCA صورت گرفت. ارزیابی متقابل نشان‌دهنده عملکرد رضایت‌بخش هر دو روش بود. Martel و همکاران (۲۰۱۱) به بررسی فراوانی منطقه‌ای سیلاب پائیزی در ایالت کبک کانادا در سه بازه زمانی با احتمال وقوع سیلاب پائیزی پرداختند. آن‌ها از دو روش تحلیل همبستگی متعارف و درون‌یابی بر پایه فضای فیزیوگرافی CCA جهت تحلیل فراوانی منطقه-ای حجم و اوج سیلاب استفاده نمودند. نتایج این محققان نشان داد که هر دو مدل عملکرد مطلوبی ارائه می‌دهند. در نهایت Archfield و همکاران (۲۰۱۳)، مطالعه‌ای با هدف مقایسه عملکرد روش‌های زمین‌آمار (درون‌یابی بر پایه فضای فیزیوگرافی CCA و

بر اساس خوشه‌بندی و روش مناطق ثابت تعیین می‌شود. در این روش از گشتاورهای خطی جهت حل مسائل مربوط به تخمین عوامل توابع توزیع، تعیین بهترین تابع توزیع، خلاصه کردن توزیع آماری و منطقه‌ای کردن استفاده می‌شود (Hosking, ۱۹۹۰). در زمینه کاربرد تئوری گشتاورهای خطی جهت برآوردهای منطقه‌ای در ایران مطالعاتی صورت گرفته است که می‌توان به پژوهش‌های Eslamian و Chavoshi Borojeni (۲۰۰۳)، Sarhadi و همکاران (۲۰۰۸)، Rostami و همکاران (۲۰۰۹)، Shamkoueyan و همکاران (۲۰۰۹)، Ghahraman و همکاران (۲۰۱۰)، Rostami-Kamrod و همکاران (۲۰۱۱) و Sarmadi و Shokoohi (۲۰۱۴) اشاره نمود.

اصلاح برآوردهای منطقه‌ای مستلزم رعایت سه اصل کلی افزایش بهره‌مندی از داده‌های مکانی یا منطقه‌ای، در نظر گرفتن مکانیسم‌های تولید سیلاب و افزایش تمرکز بر ماهیت وقایع حدی است. پیشرفت‌های اخیر در زمینه روش‌های مکانی-زمانی و کاربرد گسترده روش‌های زمین‌آمار در هیدرولوژی و مدیریت منابع آب نشان داده است که این سه اصل را می‌توان با کاربرد روش‌های زمین‌آمار در تحلیل فراوانی منطقه‌ای سیلاب عملی نمود (Daviau و همکاران، ۲۰۰۰). اما وضعیت متفاوت حوضه‌های هیدرولوژیکی، بکارگیری مستقیم روش‌های زمین‌آمار را در تحلیل منطقه‌ای متغیرهای هیدرولوژیکی ناممکن نموده است. مهم‌ترین اختلاف وجود ساختار تودرتو حوزه‌های آبخیز و وجود شبکه‌ای از جریان رودخانه‌ها می‌باشد. به‌نحوی که بالادست و پائین‌دست یک حوضه می‌تواند رفتار متفاوتی نسبت به حوضه‌های همسایه داشته باشد (Skoien و همکاران، ۲۰۰۶). به‌منظور حل این مشکل، Chokmani و Ouarda (۲۰۰۴)، رویکرد جدیدی جهت منطقه‌ای نمودن داده‌های هیدرولوژیکی با استفاده از روش‌های زمین‌آمار ارائه کردند. در این روش، بر اساس مفهوم همسایگی هیدرولوژیکی (Burn, ۱۹۹۰؛ Reed و همکاران، ۱۹۹۹؛ Castellarin و همکاران، ۲۰۰۱) و با استفاده از روش‌های زمین-آمار به درون‌یابی متغیرهای هیدرولوژیکی در فضای فیزیوگرافی به‌جای فضای جغرافیایی معمول پرداختند.

<sup>1</sup> Physiographical Space Based Interpolation

<sup>2</sup> Canonical Correlation Analysis

آماری ۱۳ تا ۵۶ سال گردآوری شد. داده‌ها از نظر وجود مقادیر پرت و همچنین، کیفیت بر اساس آزمون گرویز و بک مورد ارزیابی قرار گرفتند و در نهایت مقادیر دبی اوج لحظه‌ای مشاهده شده (سیلاب ایستگاهی) با استفاده از توزیع‌های آماری هر ایستگاه بر اساس برآزش با روش گشتاورهای خطی و بیشینه احتمال درست نمایی به دست آمد. علاوه بر داده‌های هیدرولوژیکی مجموعه‌ای از اطلاعات اقلیمی و فیزیوگرافی منطقه نیز استفاده شد. در مجموع تعداد ۱۵ متغیر فیزیوگرافی و اقلیمی شامل متوسط بارش سالانه و ماهانه، طول و عرض جغرافیایی، ارتفاع ایستگاه، کمینه، بیشینه و متوسط ارتفاع حوضه، شیب متوسط حوضه، مساحت و محیط حوضه، طول آبراهه اصلی، شیب آبراهه اصلی، درصد مساحت پوشیده شده با جنگل و دریاچه در نظر گرفته شد. مشخصات ایستگاه‌های هیدرومتری مورد مطالعه در جدول ۱ ارائه شده است. به منظور حذف اثرات اختلاف واحد موجود در متغیرهای هیدرولوژیکی، اقلیمی و فیزیوگرافی تمامی داده‌ها قبل از هر آنالیزی با استفاده از تبدیل لگاریتمی و بر اساس آزمون کولموگروف اسمیرنوف مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفتند، تا از نرمال بودن آن‌ها اطمینان حاصل شود. شکل ۱، موقعیت منطقه مورد پژوهش و پراکنش ایستگاه‌های هیدرومتری منتخب را ارائه می‌نماید.

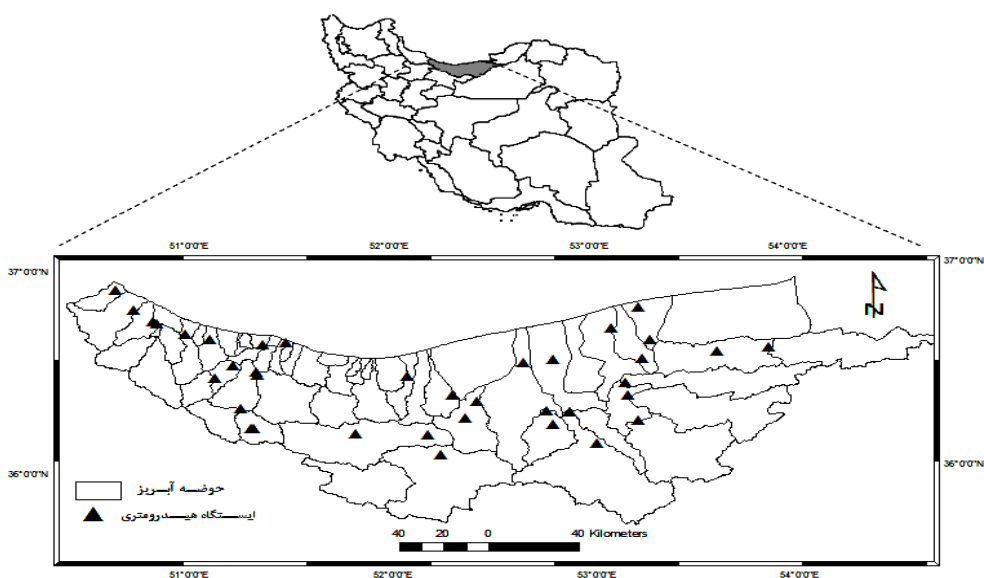
کریجینگ توپولوژی) با روش رگرسیون منطقه‌ای جهت پیش‌بینی سیلاب طرح در مکان‌های فاقد داده در ایالات متحده آمریکا انجام دادند. نتایج این مطالعه نشان داد که روش‌های زمین‌آمار از عملکرد بهتری برخوردارند.

هدف از این مطالعه، تفکیک و منطقه‌بندی حوزه‌های آبخیز استان مازندران بر اساس مفهوم همسایگی هیدرولوژیکی و الگوریتم خوشه‌بندی Ward، برآورد فراوانی منطقه‌ای سیلاب بر اساس روش‌های درون‌یابی (زمین‌آمار و قطعی) بر پایه فضای فیزیوگرافی CCA و گشتاورهای خطی در مناطق همگن هیدرولوژیکی شناسایی شده و در نهایت ارزیابی کارایی این دو روش می‌باشد.

## مواد و روش‌ها

### موقعیت منطقه مورد پژوهش و داده‌های مورد

**استفاده:** منطقه مورد مطالعه استان مازندران در شمال ایران، با مساحتی بالغ بر ۲۴ هزار کیلومتر مربع در محدوده جغرافیایی  $35^{\circ} 47'$  تا  $36^{\circ} 58'$  عرض شمالی و  $50^{\circ} 34'$  تا  $54^{\circ} 14'$  طول شرقی می‌باشد که به شکل نواری پهن در امتداد رشته کوه‌های البرز و سواحل جنوبی دریای مازندران قرار گرفته است. بیشینه دبی لحظه‌ای سالانه مربوط به ۳۸ ایستگاه هیدرومتری منتخب استان مازندران با طول دوره



شکل ۱- موقعیت منطقه مورد پژوهش و پراکنش ایستگاه‌های هیدرومتری

جدول ۱- مشخصات ایستگاه‌های هیدرومتری مورد پژوهش

ردیف	ایستگاه	مساحت (km <sup>2</sup> )	طول دوره آماری	ردیف	ایستگاه	مساحت (km <sup>2</sup> )	طول دوره آماری
۱	سفیدچاه	۱۰۳۶/۹۲	۳۴	۲۰	کره‌سنگ	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	سلیمان‌تنگه	۱۲۴۸/۲۵	۴۶	۲۴	دره هریجان	۸۴/۸۳	۲۱
۶	ریگ‌چشمه	۲۷۱۵/۲۵	۴۸	۲۵	ولی‌آباد	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 کسلیان	۳۴۲/۸۹	۵۴	۳۱	زوات	۴۱۹/۰۰	۳۰
۱۳	شیرگاه تالار	۱۷۷۶/۱۶	۵۰	۳۲	ماشالله‌آباد	۱۵۱/۳۴	۲۰
۱۴	پاشاکلا	۲۱۱/۳۳	۱۳	۳۳	هرات‌بر	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

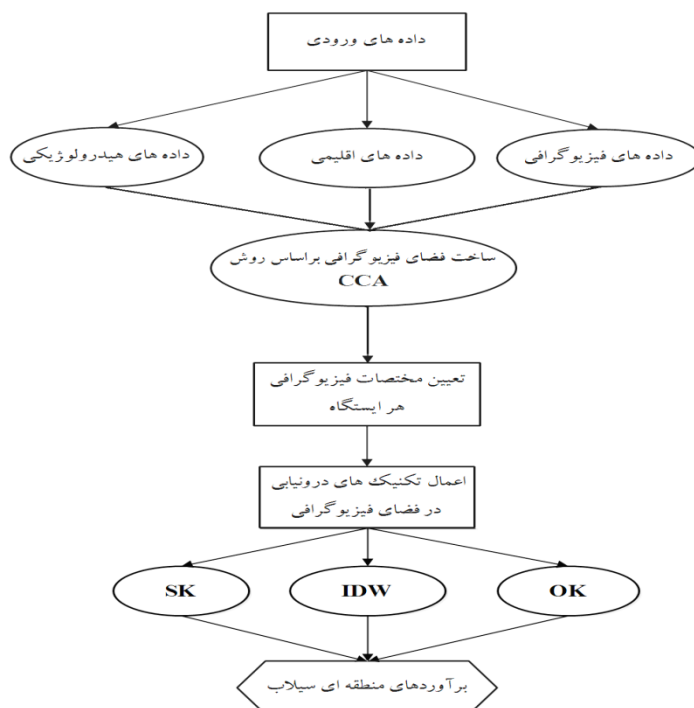
فضای فیزیوگرافی تعریف می‌شود (GREHYS, ۱۹۹۶). روش PSBI به‌طور مشخص از دو مرحله ساخت فضای فیزیوگرافی و درون‌یابی مکانی در فضای فیزیوگرافی تشکیل شده است. مراحل منطقه‌ای کردن بر اساس روش PSBI به‌صورت شماتیک در شکل ۲ ارائه شده است.

**ساخت فضای فیزیوگرافی:** در فضای جغرافیایی، سیلاب کمیتی مجزا و فاقد ساختار مکانی<sup>۱</sup> می‌باشد. حتی در حوضه‌های همجوار مقادیر آن تغییرات زیادی دارد، زیرا مکانیسم تولید سیلاب و عوامل مؤثر بر آن در هر حوضه منحصر به فرد می‌باشد. در واقع وقوع سیلاب در هر مکان، نشان‌دهنده پاسخ هیدرولوژیکی به اقلیم غالب منطقه و منعکس‌کننده تأثیر خصوصیات فیزیکی و ژئومورفولوژی حوضه‌ها می‌باشد. در این صورت، اگرچه سیلاب ماهیتی پیوسته در فضای جغرافیایی ندارد، اما در فضای فیزیوگرافی طراحی شده به‌وسیله متغیرهای اقلیمی و فیزیوگرافی مؤثر بر

**روش درون‌یابی بر پایه فضای فیزیوگرافی (PSBI):** روش PSBI به‌منظور حل مشکل منطقه‌ای کردن داده‌های هیدرولوژیکی فاقد پیوستگی مکانی توسط Chokmani و Ouarda (۲۰۰۴) ارائه شد. در این روش تعیین مناطق همگن، بر اساس مفهوم همسایگی هیدرولوژیکی صورت می‌گیرد. در روش همسایگی هیدرولوژیکی که به‌علت اثربخشی و انعطاف‌پذیری آن اخیراً مورد توجه قرار گرفته است (Burn, ۱۹۹۰؛ Gaal و همکاران، ۲۰۰۷؛ Holmes و همکاران، ۲۰۰۲؛ Ouarda و همکاران، ۲۰۰۱). با داشتن یک حوضه مشخص، سایر حوضه‌های هیدرولوژیکی مشابه آن در شعاع به‌دست آمده در جهان واقعی (DeBeers, ۲۰۰۲) یا در فضای فیزیوگرافی تعریف می‌شوند (Ouarda و همکاران، ۲۰۰۰؛ Cavadias و همکاران، ۲۰۰۱). منظور از همسایگی مجموعه‌ای از حوضه‌های دارای آمار می-باشد که در نزدیکی حوضه مورد نظر قرار گرفته‌اند. در این حالت فرض می‌شود، هر حوضه دارای منطقه همگن هیدرولوژیکی است و فواصل بین حوضه‌ها در

<sup>1</sup> Spatial structure

آن، ماهیتی پیوسته خواهد داشت (Chokmani و Ouarda، ۲۰۰۴).



شکل ۲- نمودار روش درون یابی بر پایه فضای فیزیوگرافی CCA

روابط بین تعدادی متغیر مستقل را با تعدادی متغیر وابسته بررسی می نماید (Farshadfar، ۲۰۱۰). چنان-  
 $X = \{X_1, X_2, \dots, X_n\}$  و  $Y = \{Y_1, Y_2, \dots, Y_r\}$  دو مجموعه از متغیرهای تصادفی باشند،  
 $n \geq r$ ، منطبق حاکم بر این روش، به دست آوردن ترکیب خطی متغیرهای هر یک از مجموعه ها می باشد، به-  
 طوری که همبستگی محاسبه شده بین دو ترکیب خطی به بیشینه مقدار برسد.

$$V = a_1X_1 + a_2X_2 + \dots + a_nX_n = a'X \quad (1)$$

$$W = b_1Y_1 + b_2Y_2 + \dots + b_nY_n = b'Y \quad (2)$$

که در آن ها،  $V$  و  $W$  ترکیب خطی از مجموعه متغیرها،  $a'X$  و  $b'Y$  بردارهای مدنظر،  $a'$  و  $b'$  ترانهاده ستون بردارهای  $a$  و  $b$  می باشد. همبستگی بین متغیرهای تصادفی  $V$  و  $W$  به صورت رابطه زیر محاسبه می شود.

$$\text{corr}(V, W) = \frac{\text{cov}(V, W)}{\sqrt{\text{var}(V)}\sqrt{\text{var}(W)}} = \frac{a' C_{XY} b}{\sqrt{a' C_{XX} a} \sqrt{b' C_{YY} b}} \quad (3)$$

که در آن،  $C$  ماتریس کوواریانس متغیرها می-  
 باشد و بر اساس رابطه (۴) به دست می آید.

فضای فیزیوگرافی، عبارت است از فضای چند بعدی تعریف شده به وسیله متغیرهای اقلیمی و فیزیوگرافی مؤثر بر کمیت مورد نظر که مختصات آن به وسیله توصیف گرهای ژئومورفولوژیکی هر حوضه و روش های آماری چند متغیره به دست می آید. روش های متعددی برای ساخت فضای فیزیوگرافی وجود دارد که می توان به روش تجزیه مؤلفه های اصلی ( $PCA^1$ ) و تحلیل همبستگی کانونی ( $CCA^2$ ) اشاره کرد. Joseph و همکاران (۲۰۰۶)، Shu و Ouarda (۲۰۰۷)، Kamali و همکاران (۲۰۰۸)، Nezhad و همکاران (۲۰۱۰)، Martel و همکاران (۲۰۱۱) و Archfield و همکاران (۲۰۱۳) از روش CCA جهت طراحی فضای فیزیوگرافی استفاده نمودند.

**تحلیل همبستگی متعارف:** جزء روش های پیشرفته آماری چند متغیره می باشد که نخستین بار توسط هتلینگ در سال ۱۹۳۶ ارائه شد. روش همبستگی متعارف همانند روش رگرسیون چندگانه

<sup>1</sup> Principal Component Analysis

<sup>2</sup> Canonical Correlation Analysis

Wallis و Hosking (۱۹۹۳)، برای محاسبه دقیق-تر ایستگاه‌های ناهمگن آزمون‌های همگنی و برای تعیین توزیع منتخب، آزمون نکویی برازش مبتنی بر گشتاورهای خطی را معرفی کردند. آزمون‌های همگنی شامل آزمون ناهمگنی<sup>۶</sup> و آزمون ناهمگنی<sup>۷</sup> منطقه‌ای می‌باشد.

**آزمون ناهمگنی منطقه‌ای:** اگر تغییر پذیری یا فضای پراکنش ایستگاه‌ها بزرگ باشد، احتمال تعلق این ایستگاه‌ها به یک مجموعه واحد را می‌توان به‌وسیله آزمون ناهمگنی گشتاورهای خطی بررسی کرد که شامل سه آماره  $H_1$ ،  $H_2$  و  $H_3$  است (Hosking و Wallis، ۱۹۹۳). اگر مقادیر این سه آماره کمتر از یک باشد، منطقه همگن، اگر بین یک تا دو باشد، نسبتاً ناهمگن و اگر بزرگ‌تر از دو باشد، منطقه کاملاً ناهمگن می‌باشد. هر یک از آماره‌های  $H$  دارای فرم عمومی مطابق رابطه زیر می‌باشند.

$$H = \frac{v_{obs} - \mu_v}{\sigma_v} \quad (10)$$

که در آن،  $\mu_v$  و  $\sigma_v$  به ترتیب میانگین و انحراف معیار مقادیر شبیه‌سازی شده متغیر مورد نظر و عامل  $v_{obs}$  مقادیر محاسبه شده متغیر مورد نظر با استفاده از داده‌های منطقه‌ای است. در عمل عنوان می‌شود، آماره  $H_1$  به منظور بررسی این آزمون مناسب‌تر می‌باشد و به‌عنوان شاخص اساسی برای معیار ناهمگنی توصیه شده است (Wallis و Hosking، ۱۹۹۷).

**آزمون ناهمگنی:** این آزمون مبتنی بر گشتاورهای خطی است و قادر به تشخیص ایستگاه‌های ناهمگن از مجموعه ایستگاه‌های مورد مطالعه می‌باشد. اگر مقدار آماره  $D$  بزرگ‌تر از سه باشد، ایستگاه ناهمگن بوده و از گروه حذف می‌شود. معیار ناهمگنی به-صورت زیر محاسبه می‌شود.

$$D_i = \frac{1}{3}(u_i - \bar{u})^T S^{-1}(u_i - \bar{u}) \quad (11)$$

$$S = (NS - 1)^{-1} \sum_{i=1}^{NS} (u_i - \bar{u})(u_i - \bar{u})^T \quad (12)$$

$$\bar{u} = \frac{1}{NS} \sum_{i=1}^{NS} u_i \quad (13)$$

$$C = \begin{pmatrix} C_{XX} & C_{XY} \\ C'_{XY} & C_{YY} \end{pmatrix} \quad (4)$$

CCA به منظور بیشینه رساندن  $corr(V, W)$  قادر به برآورد مقادیر بردارهای  $a'$  و  $b'$  می‌باشد. چنانچه،  $P$  رتبه  $C_{XY}$  باشد، مقادیر بهینه بردارهای  $a'$  و  $b'$  برابر است با:

$$\lambda_i = corr(V_i, W_i) \quad i = 1, \dots, p \quad (5)$$

که در آن، متغیرهای  $V_1, V_2, \dots, V_p$  و  $W_1, W_2, \dots, W_p$  به‌عنوان متغیرهای کانونی<sup>۱</sup> شناخته می‌شوند (Muirhead، ۱۹۸۲).

**درون‌یابی مکانی:** روش درون‌یابی بر پایه فضای فیزیوگرافی بر درون‌یابی متغیرهای هیدرولوژیکی در فضای فیزیوگرافی به‌جای فضای جغرافیایی معمول تأکید دارد. بنابراین، پس از ساخت فضای فیزیوگرافی به منظور درون‌یابی داده‌های هیدرولوژیکی، مختصات فیزیوگرافی هر حوضه به‌جای مختصات جغرافیایی آن-ها باید مورد استفاده قرار گیرد (Castiglioni و همکاران، ۲۰۰۹). بدین ترتیب هر حوضه می‌تواند به-عنوان یک نقطه در فضای  $X-Y$  تعریف شده به‌وسیله متغیرهای فیزیوگرافی-هیدرولوژیکی قرار گیرد و مقادیر تجربی کمیت 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 معمولی (OK<sup>۲</sup>)، کریجینگ ساده (SK<sup>۳</sup>) و IDW<sup>۴</sup> انجام داد (Chokmani و Ouarda، ۲۰۰۴).

**روش گشتاورهای خطی:** گشتاورهای خطی، ترکیب خطی از آماره‌های ترتیبی<sup>۵</sup> هستند که توسط Hosking (۱۹۹۰) ارائه شدند. چهار گشتاور خطی نخست که به‌عنوان ترکیب خطی گشتاورهای وزنی احتمال بیان می‌شوند، عبارتند از:

$$\lambda_1 = \beta_0 \quad (6)$$

$$\lambda_2 = 2\beta_1 - \beta_0 \quad (7)$$

$$\lambda_3 = 6\beta_2 - 6\beta_1 + \beta_0 \quad (8)$$

$$\lambda_4 = 20\beta_3 - 30\beta_2 + 12\beta_1 - \beta_0 \quad (9)$$

<sup>1</sup> Canonical Variables

<sup>2</sup> Ordinary Kriging

<sup>3</sup> Simple Kriging

<sup>4</sup> Inverse Distance Weights

<sup>5</sup> Order Statistics

<sup>6</sup> Heterogeneity

<sup>7</sup> Discordancy

منطقه‌ای (درون‌یابی بر پایه فضای فیزیوگرافی و تئوری گشتاورهای خطی احتمال) به دست می‌آید. سپس به منظور ارزیابی عملکرد روش‌های منطقه‌ای از پنج شاخص آماری بر اساس روابط (۱۶) تا (۲۰) استفاده می‌شود.

$$BIAS = \frac{1}{ns} \sum_{i=1}^{ns} (Q_{reg}(i) - Q_{loc}(i)) \quad (16)$$

$$BIASr = \frac{1}{ns} \sum_{i=1}^{ns} \left[ \frac{(Q_{reg}(i) - Q_{loc}(i))}{Q_{loc}(i)} \right] \quad (17)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{ns} \sum_{i=1}^{ns} [Q_{reg}(i) - Q_{loc}(i)]^2} \quad (18)$$

$$RMSEr = \sqrt{\frac{1}{ns} \sum_{i=1}^{ns} \left[ \frac{(Q_{reg}(i) - Q_{loc}(i))}{Q_{loc}(i)} \right]^2} \quad (19)$$

$$NASH = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{ns} (Q_{reg} - Q_{loc})^2}{\sum_{i=1}^{ns} (Q_{loc} - \bar{Q}_{loc})^2} \quad (20)$$

که در آن‌ها،  $ns$  تعداد ایستگاه‌ها،  $Q_{loc}(i)$  و  $Q_{reg}(i)$  به ترتیب دبی مشاهده‌ای و منطقه‌ای متعلق به ایستگاه نام با دوره بازگشت  $T$  سال می‌باشد (Ouarda و همکاران، ۲۰۰۸).

### نتایج و بحث

**تجزیه و تحلیل نتایج روش درون‌یابی بر پایه فضای فیزیوگرافی CCA:** ساخت فضای فیزیوگرافی بر اساس روش آماری چند متغیره 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 حوضه، محیط حوضه، طول آبراهه اصلی، ارتفاع کمینه حوضه، شیب متوسط حوضه و ارتفاع ایستگاه هیدرومتری) و متغیرهای وابسته شامل دو متغیر هیدرولوژیکی ( $Q_{10}$  و  $Q_{20}$ ) می‌باشد. ملاک انتخاب متغیرهای فیزیوگرافی میزان همبستگی با دبی اوج لحظه‌ای بوده و برای این منظور از آنالیز همبستگی پیرسون استفاده شد. منظور از فضای فیزیوگرافی فضای دو بعدی ایجاد شده، به وسیله متغیر کانونی اول ( $V_1$ ) و متغیر کانونی دوم ( $V_2$ ) می‌باشد. نحوه قرارگیری ایستگاه‌های هیدرومتری در

که در آن‌ها،  $u_i = [\tau_1^i, \tau_2^i, \tau_3^i, \tau_4^i]^T$  ماتریس ترانهاده گشتاورهای خطی در ایستگاه نام،  $N$  تعداد کل ایستگاه‌ها،  $S$  ماتریس کوواریانس نمونه و  $\bar{u}$  میانگین گروه برای  $NS$  مکان می‌باشد.

**انتخاب بهترین توزیع منطقه‌ای:** آزمون نکویی برازش به منظور انتخاب بهترین تابع توزیع منطقه‌ای انجام می‌شود. معیار برازندگی برای هر توزیع بر اساس گشتاورهای خطی تعیین و آماره  $Z^{DIST}$  نامیده می‌شود. بهترین تابع توزیع منطقه‌ای باید  $|Z^{DIST}| < 1/64$  باشد.

$$Z^{DIST} = (\tau_4^{DIST} - \bar{\tau}_4 + \beta_4) / \sigma_4 \quad (14)$$

که در آن،  $DIST$  اشاره به توزیع منتخب می‌کند،  $\tau_4^{DIST}$  ضریب کشیدگی خطی توزیع منتخب،  $\bar{\tau}_4$  میانگین کشیدگی خطی،  $\beta_4$  و  $\sigma_4$  به ترتیب مقدار اریب و انحراف از معیار  $\tau_4$  یا ضریب کشیدگی خطی می‌باشند (Hosking، ۱۹۹۰).

**برآورد سیلاب منطقه‌ای:** با بکارگیری روش گشتاورهای خطی، عوامل توابع توزیع منتخب برای هر منطقه برآورد می‌شود و با استفاده از عوامل توزیع منتخب، چندک هر یک از نواحی به دست می‌آید. در نهایت با استفاده از رابطه زیر مقادیر سیلاب منطقه‌ای برای دوره‌های بازگشت گوناگون به دست می‌آید.

$$\hat{Q}_i(F) = I_1^i \hat{q}(F) \quad (15)$$

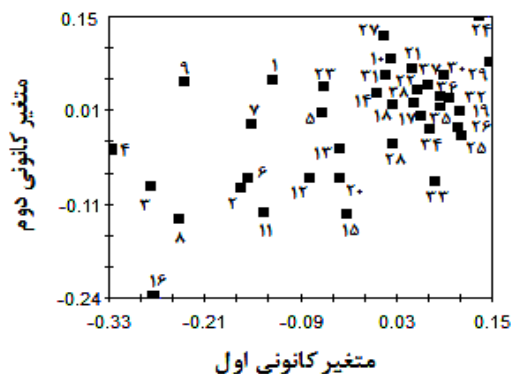
که در آن،  $\hat{q}(F)$  چندک به دست آمده از توزیع منتخب و  $I_1^i$  میانگین سیلاب در هر ایستگاه،  $\hat{Q}_i(F)$  مقادیر سیلاب منطقه‌ای برآورد شده در دوره‌های بازگشت مختلف است (Wallis و Hosking، ۱۹۹۷).

**ارزیابی نتایج:** به منظور بررسی صحت نتایج و ارزیابی قابلیت اطمینان در برآوردهای سیلاب منطقه‌ای از روش ارزیابی متقابل جک‌نایف استفاده شد. این روش در ارزیابی عملکرد تکنیک‌های درون‌یابی کارایی لازم را دارد، زیرا شرایط بدون اندازه‌گیری را برای هر یک از ۳۸ حوضه فراهم می‌نماید. در این روش هر حوضه به نوبت از مجموعه شبکه هیدرومتری حذف و به عنوان حوضه بدون آمار فرض می‌شود. در این مرحله حوضه حذف شده، به عنوان حوضه هدف در نظر گرفته می‌شود و مقادیر کمیت سیلاب این حوضه با استفاده از حوضه‌های باقی‌مانده و بر اساس دو روش تحلیل

مقادیر دبی با افزایش دوره بازگشت کاملاً قابل توجیه است. محدوده‌ای که در آن نیم تغییرنا به آستانه می‌رسد و پس از آن ساختار مکانی وجود نخواهد داشت، دامنه تأثیر می‌نامند. با توجه به نیم تغییرنماهای تجربی، دبی با دوره بازگشت ۱۰ سال از دامنه تأثیر بیشتری نسبت به سایر دوره‌های بازگشت برخوردار می‌باشد، زیرا با افزایش دوره بازگشت میزان پیوستگی مکانی کاهش می‌یابد.

در تخمین زمین‌آمار، پس از محاسبه نیم تغییرنماهای تجربی، باید مدل تئوری به آن برازش داده شود. مدل‌های تئوری: کروی، نمایی، خطی و گوسی جهت برازش با نیم تغییرنماهای تجربی مورد آزمایش قرار گرفت. با توجه به الگوی مکانی نشان داده شده به وسیله نیم تغییرنمای 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 و کریجینگ ساده در فضای فیزیوگرافی CCA محاسبه شد. ارزیابی متقابل مقادیر دبی برآورد شده بر اساس روش کریجینگ معمولی در فضای فیزیوگرافی CCA با دبی مشاهده شده در شکل ۵ ارائه شده است. محور x نمودار نشان‌دهنده مقادیر دبی مشاهده شده و محور y نشان‌دهنده مقادیر دبی منطقه‌ای برآورد شده بر اساس دوره‌های بازگشت مختلف می‌باشد. هر چه 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 شکل مذکور، دقت بالای پیش‌بینی‌های منطقه‌ای کاملاً مشهود می‌باشد. به طوری که خط بهترین برازش با مقادیر منطقه‌ای بر خط ایده‌آل ۱:۱ کاملاً منطبق بود. انطباق خط برازش یافته شده بر خط ایده‌آل و همچنین، پراکنش متناسب نقاط حول خط ایده‌آل ۱:۱، نشان‌دهنده ناچیز بودن میانگین خطا و جذر میانگین مربعات خطا است. در تخمین قطعی از روش IDW برای درون‌یابی کمیت هیدرولوژیکی استفاده شد. ارزیابی متقابل مقادیر دبی برآورد شده، بر اساس روش IDW با دبی مشاهده شده در شکل ۶ ارائه شده است.

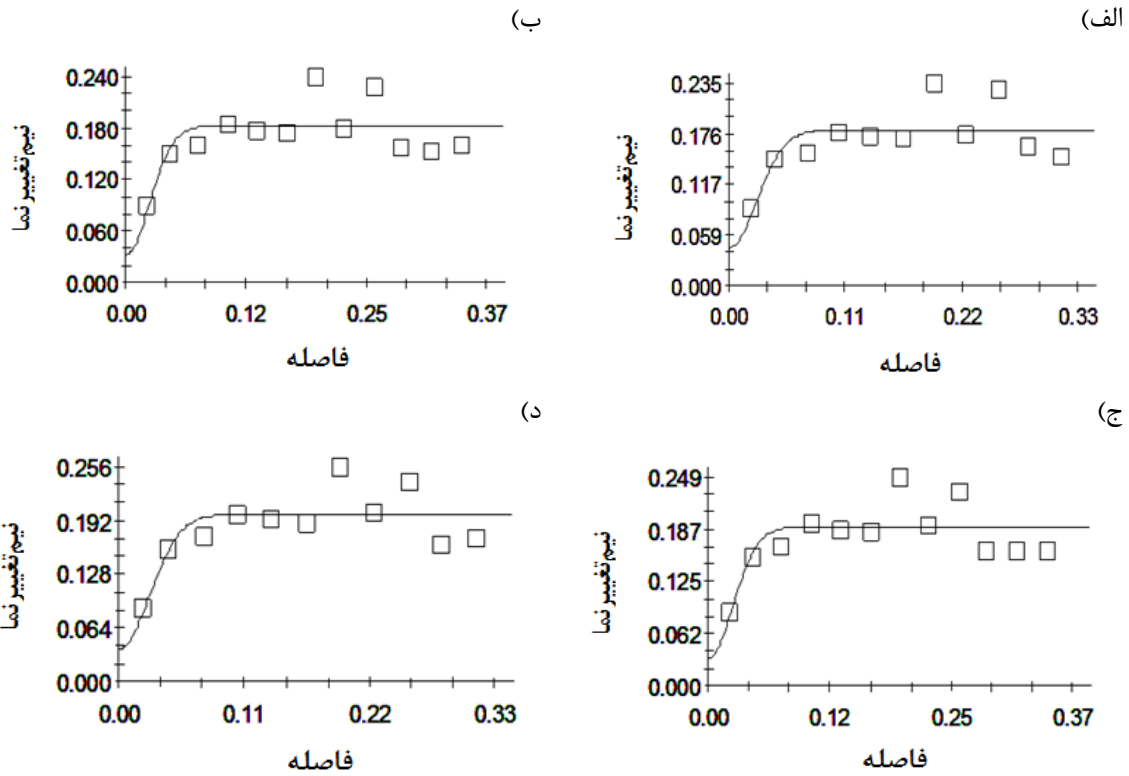
فضای فیزیوگرافی CCA در شکل ۳ ارائه شده است. شماره ایستگاه‌های هیدرومتری مطابق جدول ۱ است. بدین ترتیب، مختصات فیزیوگرافی هر ایستگاه با توجه به موقعیت قرارگیری در فضای فیزیوگرافی برای انجام مراحل بعدی محاسبات به دست آمد.



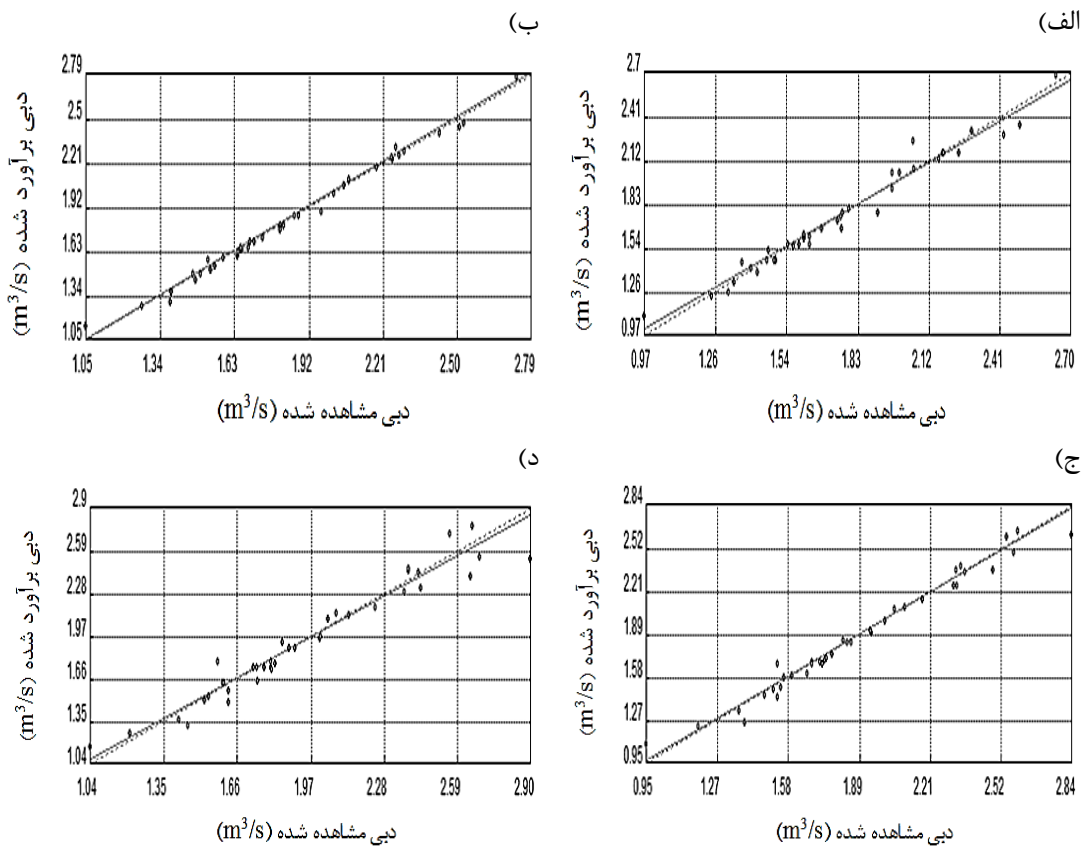
شکل ۳- نحوه پراکنش ایستگاه‌های هیدرومتری در فضای فیزیوگرافی CCA

پس از ساخت فضای فیزیوگرافی باید به درون‌یابی متغیرهای هیدرولوژیکی (سیلاب ایستگاهی با دوره بازگشت‌های مختلف) در فضای فیزیوگرافی طراحی شده پرداخت. در مطالعه حاضر عمل درون‌یابی بر اساس روش‌های زمین‌آمار و قطعی انجام شد. در روش زمین‌آمار، شناسایی و اندازه‌گیری ساختار مکانی کمیت هیدرولوژیکی، بر اساس نیم تغییرنماهای تجربی و با استفاده از نرم‌افزار GS<sup>+</sup> صورت گرفت. نیم تغییرنماهای تجربی ایزوتروپیک در فضای فیزیوگرافی طراحی شده با CCA تعیین شدند و ناهمسانگردی داده‌ها در جهات مختلف مورد بررسی قرار گرفت. شکل ۴، نشان‌دهنده نیم تغییرنماهای برازش داده شده به کمیت سیلاب ایستگاهی با دوره بازگشت‌های ۱۰، ۲۰، ۵۰ و ۱۰۰ سال است. بر اساس شکل 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 نیم تغییرنا به سرعت افزایش می‌یابد و پس از آن به مقدار ثابتی می‌رسد که به این سطح ثابت، آستانه می‌گویند. بر این اساس، سیلاب با دوره بازگشت ۱۰۰ سال از آستانه بالاتری نسبت به سایر دوره‌های بازگشت برخوردار می‌باشد. این امر به علت افزایش

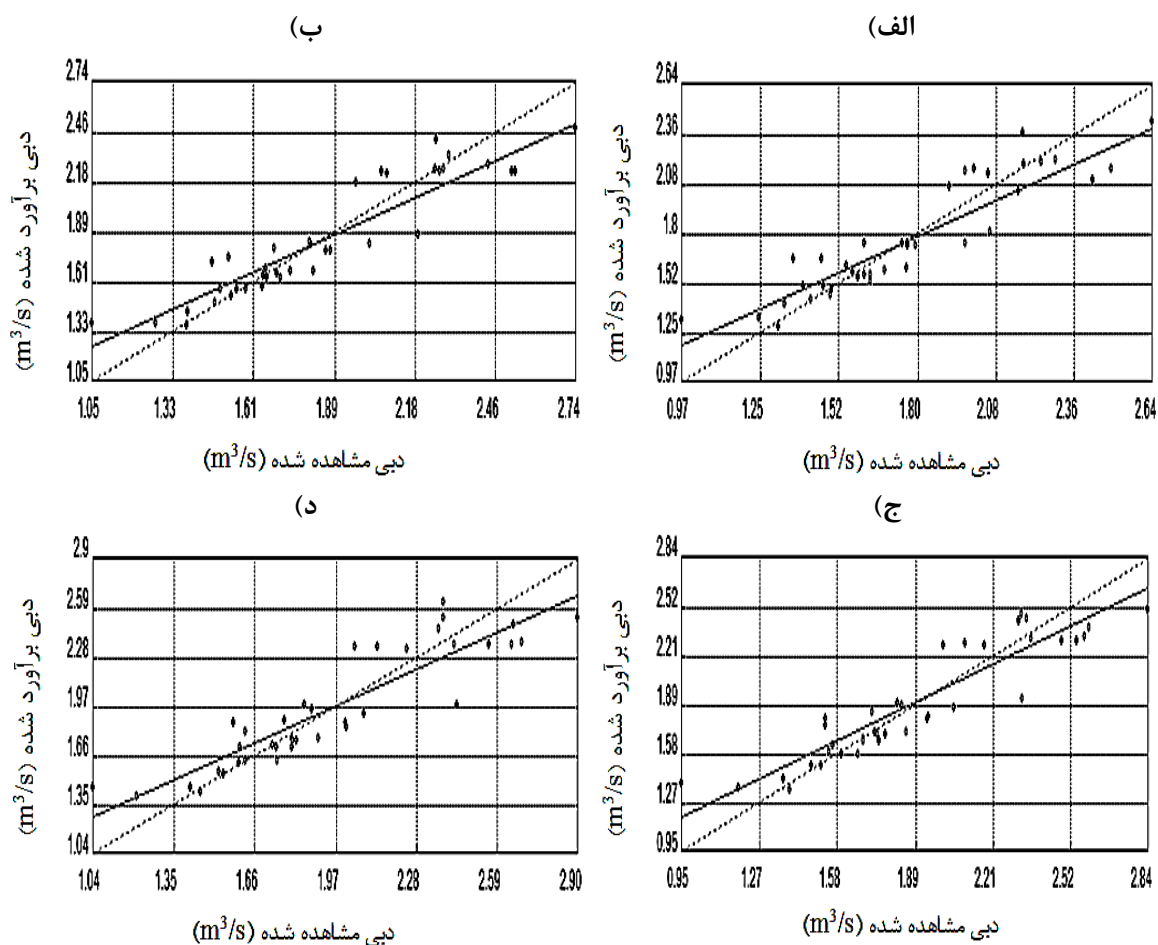




شکل ۴- نیم تغییرنماهای برازش داده شده با مقادیر سیلاب ایستگاهی در فضای فیزیوگرافی CCA (با دوره بازگشت الف) ۱۰، ب) ۲۰، ج) ۵۰ و د) ۱۰۰ سال)



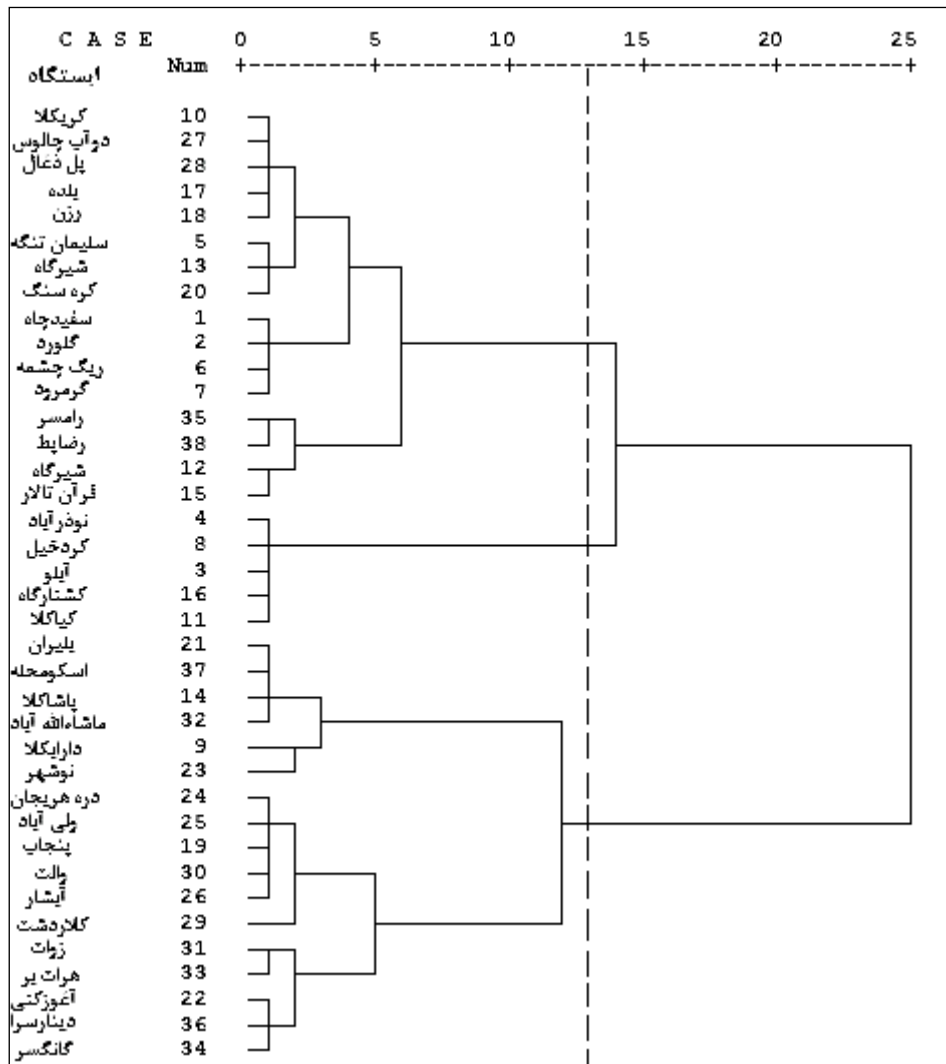
شکل ۵- ارزیابی متقابل نتایج کریجینگ معمولی در فضای فیزیوگرافی CCA با دوره بازگشت‌های الف) ۱۰، ب) ۲۰، ج) ۵۰ و د) ۱۰۰ سال (خط نقطه چین به‌عنوان خط ایده‌آل ۱:۱ و خط ممتد بر اساس بهترین برازش با مقادیر دبی اوج ناحیه‌ای (نقاط) ترسیم شده است)



شکل ۶- ارزیابی متقابل نتایج IDW در فضای فیزیوگرافی CCA با دوره بازگشت‌های الف) ۱۰، ب) ۲۰، ج) ۵۰ و د) ۱۰۰ سال (خط نقطه-چین به‌عنوان خط ایده‌آل ۱:۱ و خط ممتد بر اساس بهترین برازش با مقادیر دبی اوج ناحیه‌ای (نقاط) ترسیم شده است)

های آبخیز استان مازندران را بر اساس خوشه‌بندی فازی مورد بررسی قرار داد. در تعیین تعداد خوشه بهینه، کارایی هفت شاخص ارزیابی خوشه‌بندی فازی (ضریب افزاز، آنتروپی افزاز، درجه فازی بودن، آنتروپی طبقه‌بندی نرمال شده، فوکویاما-سونگو، زی و بنی و وون) مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد، دو شاخص زی و بنی و وون کارایی بهتری نسبت به شاخص‌های دیگر در تعیین تعداد خوشه بهینه دارند و بهترین عملکرد با سه خوشه حاصل می‌شود. شکل ۷، نتایج خوشه‌بندی و نحوه قرارگیری ایستگاه‌ها بر اساس سه خوشه در نظر گرفته شده، را ارائه می‌دهد.

**تجزیه و تحلیل نتایج گشتاورهای خطی:** تعیین مناطق همگن استان مازندران بر اساس روش خوشه-بندی با بکارگیری پنج مشخصه فیزیوگرافی مساحت حوضه زهکشی، شیب متوسط حوضه زهکشی، طول آبراهه اصلی، شیب آبراهه اصلی و کمینه ارتفاع حوضه انجام شد. انتخاب این بردارهای مشخصه بر اساس همبستگی آن‌ها با کمیت سیلاب بود. از الگوریتم خوشه‌بندی سلسله مراتبی Ward، برای تعیین ایستگاه‌های هر خوشه استفاده شد. تعداد خوشه بهینه بر اساس نتایج Farsadnia (۲۰۱۱)، برابر با سه در نظر گرفته شد. ایشان در مطالعه‌ای منطقه‌ای کردن حوزه-



شکل ۷- دندروگرام به دست آمده از الگوریتم خوشه‌بندی

باشد. زمانی که مجموعه جامعی از متغیرهای تاثیرگذار در تحلیل فراوانی منطقه‌ای وجود ندارد، معمولاً مناطق شکل گرفته برای تحلیل فراوانی منطقه‌ای سیلاب همگن نخواهند بود و نیاز به تعدیل برای بهبود همگنی آن وجود دارد.

نتایج اولیه همگنی سه منطقه در جدول ۲، بیان شده است. بر اساس نتایج جدول ۲، منطقه ۱ با توجه به آماره  $H_1$  کاملاً ناهمگن است و مقادیر بالای آماره  $H_2$  مربوط به این منطقه، این موضوع را تأیید می‌نماید. منطقه ۳، بر اساس آماره  $H_1$  نسبتاً ناهمگن است و آماره  $H_2$  نیز نشان‌دهنده همین موضوع می‌-

جدول ۲- نتایج آزمون همگنی پیش و پس از تعدیل همگنی

پس از تعدیل همگنی				پیش از تعدیل همگنی				شماره منطقه
$H_3$	$H_2$	$H_1$	تعداد ایستگاه	$H_3$	$H_2$	$H_1$	تعداد ایستگاه	
-۰/۵۸	-۰/۲۷	۰/۴۴	۱۷	۰/۳۴	۱/۴۰*	۲/۲۳**	۱۶	۱
۰/۵۰	۰/۵۶	۰/۶۳	۸	۰/۹۲	۰/۷۱	۰/۸۷	۵	۲
-۰/۶۴	-۰/۲۷	۰/۸۰	۱۱	۰/۵۰	۱/۱۰*	۱/۷۰*	۱۷	۳

\*\* کاملاً ناهمگن و \* نسبتاً ناهمگن است.

۳). توزیع‌های آماری منتخب هر منطقه در جدول ۳ مشخص شده است. با در نظر گرفتن کمترین مقادیر آماره  $Z^{DIST}$ ، توزیع لجستیک تعمیم یافته برای هر سه منطقه انتخاب شد. توزیع لجستیک تعمیم یافته دارای سه عامل موقعیت، مقیاس و شکل می‌باشد که در جدول ۴، مقادیر این سه عامل برای هر منطقه بیان شده است. با استفاده از عوامل توزیع منتخب، چندک هر یک از نواحی به‌دست آمد و در نهایت برآوردهای منطقه‌ای کمیت سیلاب بر اساس رابطه (۱۵) در هر ایستگاه محاسبه شد.

Hosking و Wallis (۱۹۹۷)، راهکارهایی جهت تعدیل مناطق ناهمگن ارائه نمودند. در مطالعه حاضر از گزینه حذف یک یا چند ایستگاه و انتقال یک یا چند ایستگاه از یک منطقه به مناطق دیگر برای تعدیل مناطق ناهمگن استفاده شد. بدین ترتیب، پس از تعدیل مناطق ناهمگن، هر سه خوشه همگن شدند. مقادیر آماره ناهمگنی پیش و پس از تعدیل همگنی در جدول ۲ نشان داده شده است. در مرحله بعد به منظور انتخاب بهترین تابع توزیع منطقه‌ای هر خوشه از آماره  $Z^{DIST}$  بر اساس برنامه نوشته شده به زبان فرترن برای توزیع‌های سه عامله استفاده شد (جدول

جدول ۳- آزمون نکوئی برازش

مقادیر آماره $Z^{DIST}$			توزیع آماری
منطقه ۳	منطقه ۲	منطقه ۱	
$-۰/۳۸^*$	$۰/۵۱^*$	$-۰/۷۱^*$	لجستیک تعمیم یافته
$-۰/۷۰^*$	$-۰/۵۲^*$	$-۱/۴۰^*$	مقادیر حدی تعمیم یافته
$-۱/۵۷^*$	$-۱/۱۰^*$	$-۲/۴۷$	نرمال تعمیم یافته
$-۳/۰۵$	$-۲/۱۲$	$-۴/۲۹$	پیرسون نوع ۳
$-۱/۹۸$	$-۳/۱۴$	$-۳/۶۴$	پارتو تعمیم یافته

\* توزیع آماری منتخب می‌باشد.

جدول ۴- عوامل توزیع منتخب (لجستیک تعمیم یافته)

شماره منطقه	موقعیت ( $\xi$ )	مقیاس ( $\alpha$ )	شکل (K)
۱	۰/۷۹۲	۰/۲۸۴	$-۰/۳۷۵$
۲	۰/۸۵۹	۰/۲۹۶	$-۰/۲۶۷$
۳	۰/۷۰۶	۰/۳۱۷	$-۰/۴۴۰$

مقدار آن برابر با یک می‌باشد. اما با توجه به سایر شاخص‌های در نظر گرفته شده، کمترین خطا نشان-دهنده بهترین عملکرد می‌باشد. مقادیر منفی شاخص-های  $BIASr$  و  $BIAS$  نشان‌دهنده برآوردهای بیشتر از مقدار واقعی<sup>۱</sup> می‌باشد. ذکر این نکته ضروری است که عملکرد شاخص‌های نسبی ( $RMSEr$  و  $BIASr$ ) در بررسی کارایی کمیت‌های سیلاب منطقه‌ای از اهمیت ویژه‌ای برخوردار هستند. زیرا با بکارگیری شاخص‌های نسبی به جای شاخص‌های معین ( $RMSE$  و  $BIAS$ ) هرگونه اثر بالقوه مقیاس از نتایج حذف می‌شود (Ouarda و همکاران، ۲۰۰۸).

مقایسه عملکرد روش‌های درون‌یابی بر پایه فضای فیزیوگرافی CCA و گشتاورهای خطی احتمال: از روش ارزیابی جک‌نایف به منظور بررسی صحت نتایج و دقت برآوردهای منطقه‌ای به‌دست آمده بر اساس روش‌های درون‌یابی بر پایه فضای فیزیوگرافی CCA و گشتاورهای خطی استفاده شد. نتایج ارزیابی متقابل بر اساس پنج شاخص آماری ( $BIAS$ ،  $BIASr$ ،  $RMSE$ ،  $RMSEr$  و  $NASH$ ) در جدول ۵ ارائه شده است. شاخص  $NASH$  جزء مهم-ترین معیارهای ارزیابی عملکرد برای داده‌های دبی اوج محسوب می‌شود. مقادیر منفی این شاخص نشان-دهنده نامناسب بودن روش بوده و در بهترین حالت

<sup>1</sup> Overestimates

نشان داد، هر چند مقادیر شاخص RMSE و BIAS با افزایش دوره بازگشت در حال افزایش است، ولی عملکرد روش کریجینگ بر پایه فضای فیزیوگرافی CCA با توجه به شاخص‌های نسبی BIASr و RMSEr در حال بهبود است. نتایج Martel و همکاران (۲۰۱۱) نیز نشان داد که عملکرد نسبی روش درون‌یابی بر پایه فضای فیزیوگرافی CCA با افزایش دوره بازگشت با توجه به دو شاخص BIASr و RMSEr در حال بهبود است، هر چند مقدار شاخص‌های RMSE و BIAS در حال افزایش می‌باشد.

در ادامه، عملکرد روش گشتاورهای خطی بر اساس پنج شاخص آماری مورد بررسی قرار گرفت. بر اساس شاخص NASH، عملکرد روش گشتاورهای خطی مطلوب ارزیابی شد و بین ۰/۸-۰/۹ برآورد شد. اما عملکرد سایر شاخص‌های آماری نشان داد، با افزایش دوره بازگشت دقت پیش‌بینی‌های این روش رو به کاهش است و بهترین عملکرد روش گشتاورهای خطی مربوط به دوره‌های بازگشت کوتاه است. به طوری که با افزایش دوره بازگشت، مقادیر هر چهار شاخص ارزیابی عملکرد در حال افزایش می‌باشد و اختلاف زیاد ایجاد شده، در نتایج شاخص‌های ارزیابی عملکرد با افزایش دوره بازگشت، این موضوع را تأیید می‌نماید.

در نهایت عملکرد روش‌های درون‌یابی بر پایه فضای فیزیوگرافی CCA با گشتاورهای خطی احتمال مورد مقایسه و ارزیابی قرار گرفت. بر اساس نتایج شاخص NASH هر دو روش عملکرد مطلوب و مشابهی را ارائه می‌نمایند و برآوردهای منطقه‌ای آن‌ها از دقت بالایی برخوردار است. اما بر اساس نتایج سایر شاخص‌های آماری، عملکرد ضعیف روش گشتاورهای خطی نسبت به روش‌های درون‌یابی به طور خاص برای دوره‌های بازگشت بالا بارز شد. روش‌های درون‌یابی بر پایه فضای فیزیوگرافی بر اساس شاخص‌های BIAS، BIASr، RMSE و RMSEr برآوردهای منطقه‌ای با قطعیتی بالاتر نسبت به روش گشتاورهای خطی ارائه می‌دهند. در شکل‌های ۵ و ۶ به وضوح قطعیت بالای برآورد روش‌های درون‌یابی مشهود می‌باشد. مقایسه عملکرد روش‌های درون‌یابی و گشتاورهای خطی نشان‌دهنده برتری عملکرد روش‌های درون‌یابی و به-

در ابتدا به بررسی و ارزیابی عملکرد روش‌های درون‌یابی بر پایه فضای فیزیوگرافی CCA پرداخته شد. با توجه به شاخص NASH عملکرد هر سه روش درون‌یابی، مطلوب ارزیابی شد و در این میان روش‌های زمین‌آماري (کریجینگ معمولی و ساده) نسبت به روش قطعی (IDW) عملکرد بهتری را از خود به نمایش گذاشتند. به طوری که عملکرد کریجینگ معمولی و کریجینگ ساده بر اساس شاخص NASH بیش از ۰/۹ برآورد شد، درحالی که عملکرد روش IDW بیش از ۰/۸ به دست آمد. علاوه بر شاخص NASH، عملکرد سایر شاخص‌های آماری BIAS، BIASr، RMSE و RMSEr نیز در همین راستا بوده و عملکرد روش‌های زمین‌آماري نسبت به روش قطعی مطلوب‌تر ارزیابی شد. کاربرد تکنیک زمین‌آمار دلیل اصلی این تمایز محسوب می‌شود. قدرت اصلی روش‌های زمین‌آمار را می‌توان در بهترین برآوردگر خطی ناریب<sup>۱</sup> بودن دانست. "بهترین" بدین معناست که جذر میانگین خطای آن کمینه می‌باشد، "خطی" بدین معناست که برآوردهای آن بر اساس متوسط وزن داده‌ها در منطقه بوده و "ناریب" یعنی میانگین خطای قابل انتظار آن صفر می‌باشد (Journel و Huijbregts، ۱۹۷۸). علاوه بر این، بررسی دقیق‌تر نتایج شاخص‌های ارزیابی BIAS، BIASr، RMSE و RMSEr روندی مشابه در عملکرد هر سه روش درون‌یابی بر پایه فضای فیزیوگرافی را نشان داد. به طوری که بر اساس نتایج هر سه روش درون‌یابی، با افزایش دوره بازگشت، عدم قطعیت برآوردهای منطقه‌ای افزایش می‌یابد، زیرا مقادیر دو شاخص RMSE و BIAS با افزایش دوره بازگشت رو به افزایش است. اما نتایج دو شاخص نسبی BIASr و RMSEr نشان‌دهنده بهبود عملکرد روش‌های درون‌یابی با افزایش دوره بازگشت می‌باشد. با توجه به اهمیت نتایج شاخص‌های نسبی، می‌توان بیان نمود، با افزایش دوره بازگشت عملکرد روش‌های درون‌یابی اعم از زمین‌آمار و قطعی در حال بهبود است. این نتایج با مطالعات Ouarda و همکاران (۲۰۰۸) و Martel و همکاران (۲۰۱۱) مطابقت دارد. نتایج Ouarda و همکاران (۲۰۰۸)،

<sup>1</sup> Best Linear Unbiased Estimator

برتری دارد و استفاده از مناطق همگن ثابت جغرافیایی هر چند برای مقاصد عملی مناسب است، اما شباهت-های هیدرولوژیکی را تخمین نمی‌زند.

تاکنون مطالعه‌ای جهت مقایسه کارایی روش درون‌یابی بر پایه فضای فیزیوگرافی با گشتاورهای خطی صورت نگرفته است. اما Ouarda و همکاران (۲۰۰۸)، در مطالعه‌ای عملکرد روش درون‌یابی بر پایه فضای فیزیوگرافی CCA را با روش خوشه‌بندی مورد ارزیابی قرار دادند. در روش خوشه‌بندی مناطق همگن بر اساس الگوریتم خوشه‌بندی سلسله مراتبی Ward تعیین شدند و برآوردهای منطقه‌ای بر اساس رگرسیون منطقه‌ای به‌دست آمد. نتایج ارزیابی متقابل جک‌نایف بر اساس شش شاخص آماری نشان داد که روش درون‌یابی بر پایه فضای فیزیوگرافی نسبت به روش خوشه‌بندی با افزایش دوره بازگشت عملکرد بهتری را ارائه می‌دهد. نتایج مطالعه Ouarda و همکاران (۲۰۰۸)، با نتایج تحقیق حاضر مطابقت دارد.

طور خاص روش‌های زمین‌آمار است و بهترین عملکرد در انحصار روش کریجینگ معمولی بر پایه فضای فیزیوگرافی CCA می‌باشد. نتایج دو شاخص BIASr و RMSEr همچنین، نشان داد که اثر مقیاس، یکی از عوامل مؤثر بر خطاهای محاسباتی است که این امر به‌علت وجود طیف گسترده حوزه‌های آبخیز از حیث وسعت و رژیم‌های هیدرولوژیکی در محدوده مورد مطالعه (وسعت حوزه‌های آبخیز از ۲۷ تا ۴۰۲۶ کیلومتر مربع) ناشی می‌شود. از این‌رو، به‌منظور حذف اثر مقیاس کاربرد دبی استاندارد شده به‌وسیله وسعت حوزه زهکشی ضرورت می‌یابد. علاوه بر این، نتایج مطالعه حاضر، برتری رویکرد همسایگی هیدرولوژیکی را نسبت به روش مناطق ثابت به‌منظور تعیین مناطق همگن هیدرولوژیکی نشان داد که با نتایج گروه تحقیقات آماری هیدرولوژی ۱۹۹۶ مطابقت دارد. بر اساس نتایج آن‌ها روش همسایگی در تعیین مناطق همگن هیدرولوژیکی از روش مناطق ثابت جغرافیایی

جدول ۵- نتایج ارزیابی عملکرد روش درون‌یابی بر پایه فضای فیزیوگرافی CCA و گشتاورهای خطی

روش	متغیر	BIAS (m <sup>3</sup> /s)	BIASr (%)	RMSE (m <sup>3</sup> /s)	RMSEr (%)	NASH
OK	Q <sub>10</sub>	۰/۰۰۵۲	۰/۵۴	۰/۰۶	۳/۹۵	۰/۹۷
	Q <sub>20</sub>	۰/۰۰۳۸	۰/۳۱	۰/۰۳	۲/۲۹	۰/۹۹
	Q <sub>50</sub>	-۰/۰۰۳۰	۰/۱۵	۰/۰۶	۴/۲۷	۰/۹۷
	Q <sub>100</sub>	-۰/۰۰۵۲	۰/۱۰	۰/۱۰	۵/۲۴	۰/۹۴
IDW درون‌یابی بر پایه فضای فیزیوگرافی CCA	Q <sub>10</sub>	۰/۰۱۲۶	۱/۸۶	۰/۱۵	۹/۷۳	۰/۸۳
	Q <sub>20</sub>	۰/۰۱۱۴	۱/۶۵	۰/۱۴	۸/۸۰	۰/۸۵
	Q <sub>50</sub>	۰/۰۱۳۹	۲/۱۷	۰/۱۷	۱۱/۰۵	۰/۸۳
	Q <sub>100</sub>	۰/۰۱۲۲	۲/۰۰	۰/۱۸	۱۰/۷۸	۰/۸۱
SK	Q <sub>10</sub>	۰/۰۰۴۲	۰/۴۷	۰/۰۶	۴/۰۶	۰/۹۷
	Q <sub>20</sub>	-۰/۰۰۶۰	-۰/۱۱	۰/۰۴	۲/۹۵	۰/۹۸
	Q <sub>50</sub>	-۰/۰۰۹۵	۰/۵۴	۰/۰۹	۵/۴۳	۰/۹۵
	Q <sub>100</sub>	-۰/۰۱۰۸	-۰/۹۵	۰/۱۲	۶/۱۱	۰/۹۱
Linear Moments	Q <sub>10</sub>	-۷/۰۰۹	-۶/۴۷۴	۱۴/۹۸	۱۳/۳۱۸	۰/۹۷
	Q <sub>20</sub>	-۰/۶۶۶	۴/۶۳۰	۲۲/۳۱	۱۷/۶۰۹	۰/۹۵
	Q <sub>50</sub>	۱۷/۲۵۱	۲۵/۵۷۴	۴۴/۰۲	۳۷/۰۶۹	۰/۹۰
	Q <sub>100</sub>	۴۰/۰۲۱	۴۶/۸۷۴	۷۲/۰۰	۵۹/۶۷۱	۰/۸۰

مشکل توسعه یافته‌اند و پیوسته تئوری‌ها و روش‌های جدیدی در آن مورد آزمون قرار می‌گیرد. روش درون‌یابی بر پایه فضای فیزیوگرافی جزء روش‌هایی تحلیل منطقه‌ای است که اخیراً مورد توجه هیدرولوژیست‌ها

کامبود و عدم کفایت مشاهدات به یکی از چالش‌های بزرگ در پیش‌بینی‌های هیدرولوژیکی مبدل شده است. روش‌های تحلیل منطقه‌ای طیف گسترده‌ای از مطالعات هیدرولوژیکی هستند که جهت رفع این

است یا جزئی از همسایگی هیدرولوژیکی سایر حوضه-هاست. به طور کلی، عملکرد مطلوب روش درون‌یابی بر پایه فضای فیزیوگرافی CCA را می‌توان تحت تأثیر عوامل زیر دانست. (۱) تعیین مناطق همگن هیدرولوژیکی بر اساس رویکرد همسایگی هیدرولوژیکی، (۲) بکارگیری فاصله اقلیدسی بین حوضه‌ها در فضای فیزیوگرافی و بر اساس شباهت در رژیم هیدرولوژیکی، (۳) در نظر گرفتن ساختار مکانی و خصوصیات ژئومورفولوژیکی حوضه‌ها در برآوردهای منطقه‌ای و (۴) طراحی فضای فیزیوگرافی بر اساس روش CCA که به دنبال بیشینه رساندن همبستگی میان متغیرهای اقلیمی، فیزیوگرافی و هیدرولوژیکی حوضه‌های آبخیز می‌باشد. با توجه به نتایج موفقیت‌آمیز کاربرد روش درون‌یابی بر پایه فضای فیزیوگرافی در این مطالعه، پیشنهاد می‌شود، به‌منظور بهبود و افزایش دقت تحلیل‌های منطقه‌ای در کشور، روش نوین Top-Kriging با هدف لحاظ نمودن توپولوژی و شبکه رودخانه‌ای حوضه‌ها مورد آزمون و بررسی قرار گیرد.

در سراسر جهان قرار گرفته است. در این روش، مشکل درون‌یابی متغیرهای هیدرولوژیکی فاقد ساختار مکانی با طراحی فضای فیزیوگرافی مرتفع شده است. پیوسته بودن متغیرهای هیدرولوژیکی در سراسر فضای فیزیوگرافی یکی از مهم‌ترین خصوصیات فضاهای فیزیوگرافی محسوب می‌شود. مختصات فیزیوگرافی هر حوضه، بر اساس اطلاعات مشابه‌ترین حوضه‌های اطراف به خصوصیات حوضه مورد نظر به‌دست می‌آید. این امر سبب می‌شود که برآوردهای منطقه‌ای از دقت و قطعیت بالاتری برخوردار باشند. علاوه بر این، در روش درون‌یابی بر پایه فضای فیزیوگرافی مشکل گروه‌بندی حوضه‌ها یا تعیین مناطق همگن هیدرولوژیکی که یکی از بحث برانگیزترین موضوعات در تحلیل‌های منطقه‌ای محسوب می‌شود، با در نظر گرفتن رویکرد همسایگی هیدرولوژیکی برطرف شده است. در روش همسایگی هیدرولوژیکی ضرورتی به گروه‌بندی یا طبقه‌بندی حوضه‌ها وجود ندارد و فرض می‌شود که هر حوضه، منطقه همگن هیدرولوژیکی

#### منابع مورد استفاده

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(10): 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*, 241: 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. Cavadias, G., T.B.M.J. Ouarda, B. Bobee and C. Girard. 2001. A canonical correlation approach to the determination of homogeneous regions for regional flood estimation of ungauged basins. *Hydrological Sciences Journal*, 46: 499-512.
6. 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: 1251-1264.
7. Daviau, J.L., A. Adamowski and G.G. Patry. 2000. Regional food frequency analysis using GIS, L-moment and geostatistical methods. *Hydrological Processes*, 14: 2731-2753.
8. DeBeers. 2002. Snap Lake Diamond project: environmental assessment report. Submitted to the Mackenzie Valley Environmental Impact Review Board, 123 pages.
9. Eslamian, S. and S. Chavoshi Borojeni. 2003. Using L-moment theory in flood frequency analysis of central catchments of Iran. *Journal of Water and Soil Science*, 7(1): 1-17 (in Persian).
10. Farsadnia, F. 2011. Regionalization of Mazanadaran Watershed using fuzzy cluster analysis. MSc Thesis, Zabol University, 88 pages (in Persian).
11. Farshadfar, E. 2010. Multivariate principles and procedures of statistics. Razi University Press. 753 pages (in Persian).
12. Gaal, L., J. Kysely and J. Szolgay. 2007. Region-of-influence approach to a frequency analysis of heavy precipitation in Slovakia. *Hydrology and Earth System Sciences*, 12: 825–839.
13. Ghahraman, B., H. Shamkoian and K. Davary. 2010. Derivation of the regional rainfall depth-duration-frequency equations using linear moment theories, case study: Khorasan Provinces. *Iranian Journal of Irrigation and Drainage*, 4: 132-142 (in Persian).

14. GREHYS (Groupe de Recherche en Hydrologie Statistique). 1996. Inter-comparison of regional flood frequency procedures for Canadian rivers. *Journal of Hydrology*, 186: 85–103.
15. 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.
16. Holmes, M.G.R., A.R. Young, A. Gustard and R. Grew. 2002. A region of influence approach to predicting flow duration curves within ungauged catchments. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, 6: 721–731.
17. Hosking, J.R.M. 1990. L-Moments: analysis and estimation of distributions using linear combinations of order statistics. *Journal of Royal Statistical Society*, 52: 105-124.
18. Hosking, J.R.M. and J.R. Wallis. 1993. Some statistics useful in regional frequency analysis. *Water Resource Research*, 29: 271-281.
19. Hosking, J.R.M. and J.R. Wallis. 1997. *Regional frequency analysis an approach based on L-moments*. Cambridge University Press, 244 pages.
20. Joseph, G., K. Chokmani, T.B.M.J. Ouarda and A. Saint-Hilaire. 2006. An evaluation of the robustness of canonical Kriging for regional analysis of streamflows. *Revue des Science de l'eau*, 20(4): 367–380.
21. Journel, A. and Ch. Huijbregts. 1978. *Mining Geostatistics*. Academic Press, 600 pages.
22. 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.
23. 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.
24. Muirhead, R.J. 1982. *Aspect of multivariate statistical theory*. Wiley-Interscience Publisher, 698 pages.
25. 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.
26. Ouarda, T.B.M.J., C. Girard, G.S. Cavadias and B. Bobee. 2001. Regional flood frequency estimation with canonical correlation analysis. *Journal of Hydrology*, 254: 157-173.
27. Ouarda, T.B.M.J., M. Hache, P. Bruneau and B. Bobee. 2000. Regional flood peak and volume estimation in a Northern Canadian Basin. *Journal of Cold Regions Engineering*, 14: 176-191.
28. Reed, D.W., D. Jakob, A.J. Robinson, D.A. Faulkner and E.J. Stewart. 1999. Regional frequency analysis: a new vocabulary. *The International Association of Hydrological Sciences*, 255: 237-243.
29. Rostami-Kamrod, M., Sh.Z. Heydari, P. Haghghatjo and A. Moghaddamnia. 2011. Regional flood frequency analysis using L-moments methods for Gilan watersheds. *Journal of Water Resource Engineering*, 4: 39-50 (in Persian).
30. Rostami, R., H. Sedghi and A. Motamedi. 2009. Flood analysis of Dez Basin. *Journal of Water Resource Engineering*, 2: 61-70 (in Persian).
31. Sarhadi, A., S. Soltani, R. Modaress. 2008. Regional frequency low flow analysis using liner moments method in Jiroft area. *Iranian Journal of Water*, 3: 45-54 (in Persian).
32. Sarmadi, F. and A. Shokoohi. 2014. Regionalizing precipitation in Iran using GPCC gridded data via multivariate analysis and L-moment methods. *Theoretical and Applied Climatology*, 118(1-2): doi: 10.1007/s00704-014-1292-y.
33. Shamkoueyan, H., B. Ghahraman and K. Davary. 2009. Flood frequency analysis using linear moment and flood index method in Khorasan Provinces. *Journal of Water and Soil*, 23: 31-43 (in Persian).
34. 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(7): W07438, doi: 10.1029/2006WR005142.
35. Skoien, J.O., R. Merz and G. Bloschl. 2006. Top-Kriging geostatistics on stream networks. *Hydrology and Earth System Science*, 10: 277–287.



## Comparison CCA physiographical space based interpolation and linear moments methods for regional flood frequency analysis, case study: watersheds of Mazandaran Province

Zahra Sheikh<sup>\*1</sup> and Ahmad Pahlavanravi<sup>2</sup>

<sup>1</sup> MSc, Faculty of Natural Resources, University of Zabol, Iran and <sup>2</sup> Associate Professor, Faculty of Natural Resources, University of Zabol, Iran

Received: 10 December 2014

Accepted: 06 May 2015

### Abstract

The physiographical and climatological attributes of basins and maximum annual flood statics were obtained from 38 hydrometric stations of Mazandaran Province. The first, physiographical space based interpolation method was used for regional flood analysis with 10, 20, 50 and 100 year return periods. The Canonical Correlation Analysis was used to design physiographic space and regional analysis was obtained application of three interpolation methods include, ordinary Kriging, simple Kriging and IDW in the physiographic space. The results showed at-site flood quantiles have maximum correlation spatial in the physiographic space and their spatial structures following from Gaussian semi variogram. In order to evaluated the accuracy results using L-moments method for regional flood frequency analysis. In this method Ward clustering has been used to the determination of homogeneous regions. Homogeneity areas were adjusted by using homogenous and discordancy tests. Using goodness-of-fit  $Z^{DIST}$  the Generalized Logistic distribution was selected for all clusters as the best regional distribution and regional estimates obtained by parameters selected distribution. Finally, performance methods evaluated using Jack Knife procedure and the five statistical indexes BIAS, BIASr, RMSE, RMSEr and NASH. Both methods give the same and desirable performance based on NASH; however results of other indexes showed that physiographical space based interpolation method provide better performance than linear moments and improving estimated by increasing the return periods, while the L-moments offers better performance for short return periods. The results of interpolation indicated that geostatistics estimates have more accuracy than deterministic estimates and ordinary Kriging has best performance.

**Key words:** Clustering, IDW, Kriging, Regional homogeneity, Semi-variogram

---

\* Corresponding author: z.sheikh03@gmail.com