

ارزیابی و بهینه‌سازی شبکه باران‌سنجی بر مبنای روش‌های زمین‌آمار و الگوریتم کرم شب‌تاب (مطالعه موردی: حوضه آبریز شرق دریاچه ارومیه)

المیرا ولی‌پور^{۱*}، محمدعلی قربانی^۲ و اسماعیل اسدی^۳

*- نویسنده مسئول، دانش‌آموخته کارشناسی ارشد مهندسی منابع آب، دانشگاه تبریز Elmira.valipoor@yahoo.com

۲- استاد دانشکده کشاورزی، گروه مهندسی آب، دانشگاه تبریز.

۳- استادیار دانشکده کشاورزی، گروه مهندسی آب، دانشگاه تبریز.

دریافت: ۱۳۹۶/۲/۳

بازنگری: ۱۳۹۷/۱/۲۵

پذیرش: ۱۳۹۷/۱/۲۹

چکیده

کیفیت مناسب اطلاعات آبدهی ثبت شده در شبکه‌های باران‌سنجی در طراحی پایدار پروژه‌های آبی نقش مهمی ایفا می‌کند. از این نظر برای ایجاد شبکه‌ای بهینه و کارآمد، شبکه‌های باران‌سنجی باید به صورت دوره‌ای با توجه به نیاز و طرح‌های توسعه منابع آب پیش‌روی، مورد ارزیابی قرار گیرند. در این مطالعه ابتدا داده‌های بارش ماهانه ایستگاه‌های باران‌سنجی در حوضه شرق دریاچه ارومیه و مناطق مجاور آن جمع‌آوری و شبکه باران‌سنجی اولیه ایجاد شد. در ادامه از روش‌های کریجینگ و وزن‌دهی عکس فاصله برای ارزیابی شبکه ایستگاه‌های باران‌سنجی حوضه استفاده شده است. نتایج نشان داد از ۳۶ ایستگاه مورد مطالعه، شش ایستگاه وضعیت بحرانی داشته، از این نظر صحت اطلاعات ثبت شده در این ایستگاه‌ها مورد تردید می‌باشد. در واقع نقاط دارای حداکثر واریانس تخمین در سطح حوضه، معیاری در تعیین نقاط با پتانسیل تأسیس ایستگاه جدید در نظر گرفته شد. در نهایت با استفاده از الگوریتم کرم شب‌تاب، بهترین جانمایی برای ایستگاه‌های موجود و ایستگاه‌های پتانسیل به دست آمد. بطوریکه، بهترین جانمایی، با اضافه کردن تعداد نه ایستگاه به دست آمد.

کلید واژه‌ها: الگوریتم کرم شب‌تاب، بهینه‌سازی، زمین‌آمار و شبکه‌ی باران‌سنجی.

مقدمه

پیشنهاد کردند. Papamichai و Metaxa (1996) به منظور ارزیابی مکانی بارش و بهینه‌سازی شبکه‌ی باران‌سنجی تایوان با استفاده از داده‌های بارش ساعتی و سالیانه، از روش زمین‌آمار بهره گرفتند. آن‌ها مشخص نمودند که بارش‌های ساعتی نسبت به بارش‌های سالیانه، تغییرات مکانی بیشتری دارند. همچنین، ارزیابی شبکه بر اساس درصد منطقه با دقت قابل قبول (حاصل از واریانس کریجینگ) انجام شد و طراحی بهینه‌ی شبکه‌ی باران‌سنجی صورت گرفت. Haberlandt (2007) در حوضه رودخانه الهه در آلمان، نشان داد کریجینگ معمولی در مقایسه با روش‌های میان‌یابی تک متغیره شامل نزدیک‌ترین همسایگی، تبسن، عکس مجذور فاصله و کریجینگ شاخص، دقیق‌تر می‌باشد. Barca et al. (2008) از روش‌های احتمال، سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) و دو معیار کمینه‌سازی متوسط کمترین فاصله واریانس تخمین کریجینگ معمولی، برای ارتقای شبکه باران‌سنجی موجود در منطقه‌ای در جنوب ایتالیا استفاده کردند. Cheng et al. (2008) توزیع مکانی مناسب ایستگاه‌های باران‌سنجی را وابسته به درک درست از

بارندگی محرک اصلی در چرخه هیدرولوژی حوضه می‌باشد. از عوامل هواشناسی است که دارای تغییرات زمانی و مکانی می‌باشد. بدین منظور مطالعه توزیع مکانی بارندگی نیاز به تعداد زیادی نقاط دیده‌بانی دارد که در منطقه مورد نظر به خوبی توزیع شده باشند. (Mahmoudi-Meimand et al., 2016). مناسب بودن تراکم و توزیع باران‌سنجی‌ها در شبکه‌های باران‌سنجی هر منطقه، گامی مؤثر در موفقیت طرح‌های آبی و برنامه‌ریزی‌های منطقه‌ای و استفاده مؤثر از اطلاعات می‌باشد (Karamouz et al., 2010). محققان بسیاری نشان دادند که روش پیش‌بینی زمین‌آمار، نسبت به روش‌های سنتی، برآورد بهتری از بارندگی منطقه‌ای فراهم می‌سازد. Sepaskhah و Ghahraman (2001) با استفاده از روش کاهش واریانس کریجینگ روی داده‌های بارش با تداوم یک ساعت و دوره بازگشت ۱۰ سال در ایستگاه‌های سینوپتیک ایران، مقدار واریانس خطای تخمین کریجینگ و ضریب تغییرات نسبی، موقعیت جدیدی را در جهت احداث ایستگاه به منظور کاهش خطای تخمین بارندگی

نتایج به دست آمده از روش‌های مذکور محاسبه نمایند. آنها همچنین همبستگی میان ارتفاع، رطوبت و دما را با مقادیر بارندگی ثبت شده مورد بررسی قرار داده، دریافتند که ارتفاع از همبستگی قابل توجهی با بارش‌های مانسون (Monsoon) برخوردار می‌باشد. در حالی که رطوبت و دما با بارندگی‌های ماهانه، همبستگی داشتند. Yang و He (2013) با استفاده از الگوریتم فرا ابتکاری کرم شبتاب، نتیجه گرفتند این الگوریتم بهتر از راهبرد بهینه جستجو متناوب است.

با توجه به مشکلات حادث شده برای دریاچه ارومیه، انجام مطالعات جامع با رویکردی همه جانبه در حوضه آبریز، ضروری به نظر می‌رسد. به منظور بررسی مشکلات هدف اصلی این پژوهش چگونگی بهینه‌سازی شبکه مجموعه ایستگاه‌های باران‌سنجی وزارت نیرو و سازمان هواشناسی در مقیاس زمانی ماهانه و سالانه با استفاده از واریانس برآورد کریجینگ با توجه به توپوگرافی و وضعیت برونابی داده‌ها و همچنین الگوریتم کرم شبتاب در منطقه شمال غرب ایران می‌باشد.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد بررسی

حوضه آبریز دریاچه ارومیه در شمال غرب کشور قرار گرفته است. این حوضه به وسیله بخش شمالی کوه‌های زاگرس و دامنه‌های جنوبی کوه سبلان و نیز دامنه‌های شمالی، غربی و جنوبی کوه سهند احاطه شده است. این حوضه از سمت شمال به حوضه آبریز رودخانه ارس، از سمت مشرق و جنوب به حوضه آبریز رودخانه قزل اوزن و از سمت غرب به مرز کشور ترکیه و عراق محدود می‌شود. حوضه دریاچه ارومیه بین مرزهای جغرافیایی ۱۲° ۴۴' تا ۵۵° ۴۷' طول شرقی و ۴۰° ۳۵' تا ۳۸° ۵' عرض شمالی واقع شده است. ارتفاع آن از سطح آزاد دریا ۱۲۷۵ متر می‌باشد. مساحت حوضه آبریز دریاچه ارومیه ۵۲۳۵۵ کیلومترمربع است. تلخه رود (آجی چای)، سیمینه رود، زربینه رود و نازلو از مهم‌ترین رودخانه‌های حوضه آبریز دریاچه ارومیه می‌باشد.

آمار و اطلاعات

در این پژوهش داده‌های بارش با دوره آماری ۴۲ ساله از سال ۱۳۵۰ تا ۱۳۹۲ شامل ۳۶ ایستگاه برای حوضه آبریز شرق دریاچه ارومیه شکل (۱) مورد استفاده قرار گرفتند. بدیهی است که در تشکیل دوره آماری یاد شده، بازسازی آمار نیز صورت گرفته است. البته میزان بازسازی آمار در همه ایستگاه‌ها کمتر از ۲۰ درصد طول دوره آماری بوده است. دو آزمون کلموگراف-اسمیرنوف و اندرسون-دارلینگ روی داده‌ها انجام گرفت. سپس با توجه به نتایج دو آزمون توزیع بارندگی سالانه ایستگاه‌های منطقه تعیین شد. سپس با استفاده از آزمون گرویز - بک داده‌های پرت ایستگاه‌ها تعیین شدند.

فاکتورهای هواشناسی و توپوگرافی منطقه اعلام کردند. آنها از روش کریجینگ برای تخمین میزان بارش در سطح حوضه دریاچه شیمین (Shimen) بهره برده و با محاسبه آنتروپی، موقعیت مناسب ایستگاه‌های باران‌سنجی را مورد بررسی قرار دادند. Abedini و Shaghaghian (2009) برای طراحی شبکه باران‌سنجی، از ترکیب روش زمین‌آماری و تجزیه‌ی عاملی همراه با روش خوشه‌بندی با اولویت‌بندی ایستگاه‌های باران‌سنجی، از نظر محتوای اطلاعات، استفاده کردند. Mashal et al. (2008) در تحقیقی به منظور بهینه‌سازی شبکه باران‌سنجی استان خوزستان، از بین روش‌های مختلف برآورد مقادیر، از روش‌های زمین‌آماری استفاده نمودند. ایشان نتیجه گرفتند که روش کریجینگ نسبت به روش وزن‌دهی عکس فاصله دقت بالاتری در تخمین مقادیر دارد. ایشان همچنین از دو معیار ارزیابی حاصل از نتایج اعتبارسنجی حذفی استفاده کرده و پنج باران‌سنج، که با استفاده از سایر نقاط شبکه با دقت قابل قبولی قابل تخمین بودند، برای حذف از شبکه پیشنهاد نمودند. به دنبال آن در مرحله ایجاد باران‌سنج‌های جدید، با استفاده از ارزیابی خطای تخمین روش کریجینگ، سه محل در سطح منطقه، به عنوان باران‌سنج جدید پیشنهاد کردند. Karamouz et al. (2010) در تحلیل مکانی بارش، مقایسه‌ی روش‌های کریجینگ با سایر روش‌های متداول دیگر را در ۳۸ ایستگاه باران‌سنجی واقع در محدوده‌ی غرب کشور، مطالعه نمودند. آنها نتایج به دست آمده از روش‌های درون‌یابی هر ایستگاه با مقادیر ثبت‌شده‌ی هر ایستگاه، مقایسه نمودند. نتایج نشان داد روش کریجینگ عام نسبت به سایر روش‌های درون‌یابی، نتایج بهتری به دست می‌دهد. در نهایت تعدادی ایستگاه جدید به منظور بهینه‌سازی شبکه‌ی باران‌سنجی پیشنهاد نمودند.

بهینه‌سازی عبارت است از یافتن مقادیری از پارامترهای یک تابع، که تابع را کمینه یا بیشینه نماید. الگوریتم‌های بهینه‌سازی، هر دو نوع مسائل بیشینه‌سازی و کمینه‌سازی را پوشش می‌دهند. الگوریتم کرم شبتاب مدلی تکاملی است که مبتنی بر الگوریتم‌های هوش جمعی و برگرفته شده از طبیعت می‌باشد. الگوریتم کرم شبتاب با ایجاد یک جمعیت اولیه، از راه‌حل‌های کاربردی آغاز می‌گردد سپس به صورت مکرر از نسلی به نسل دیگر در جهت بهترین راه‌حل حرکت می‌کند. در تکرارهای موفق الگوریتم، انتخاب در مجموعه‌ای از راه‌حل‌ها انجام می‌گیرد (Hassanzadeh et al., 2011). در زمینه بهینه‌سازی با الگوریتم کرم شبتاب مطالعاتی انجام گرفته است. Putthividhya و Tanaka (2013) از روش زمین‌آماری برای بررسی کیفیت تخمین بارندگی در حوضه رودخانه چاو فرایا (Chao Phraya) بهره بردند. آنها با ترسیم شبکه تیسن و هم‌چنین ترسیم خطوط هم‌باران، با روش‌های عکس فاصله و کریجینگ معمولی، سعی کردند تا اختلاف داده‌های بارندگی را به

در بررسی آمار کلاسیک، داده‌هایی که از کل جامعه به‌منظور شناخت آن جامعه مورد بررسی قرار می‌گیرند، فاقد اطلاعات موقعیتی فضا بوده و در نتیجه مقدار اندازه‌گیری شده یک کمیت معین در یک نمونه خاص، هیچگونه اطلاعاتی در مورد مقدار همان کمیت در نمونه‌های دیگر، به فاصله معین از نمونه مذکور، ارائه نمی‌دهد. در حالیکه در زمین آمار علاوه بر تعیین مقدار یک کمیت در یک نمونه، ساختار فضائی آن مورد بررسی قرار می‌گیرد. در زمین آمار، هر نمونه تا یک حداکثر فاصله معین با نمونه‌های اطراف خود ارتباط فضائی دارد. این فاصله حداکثر که دامنه تأثیر (Range) نامیده می‌شود، اهمیت فراوانی دارد. در واقع از این فاصله به بعد، نمونه‌ها روی یکدیگر اثر نخواهد داشت. این فاصله، نشان‌دهنده‌ی فضائی است که تخمین‌گرهای زمین‌آمار می‌توانند، جهت برآورد مقدار کمیت، مورد استفاده قرار دهند (Abedini and Shaghaghian, 2009).

با توجه به این آزمون، ۶۱ داده به‌عنوان داده پرت تشخیص داده شدند که پس از بررسی مجدد و مقایسه با ایستگاه‌های مجاور، ۹ داده پرت و نامحتمل، مشخص و حذف شدند. همگنی داده‌ها در تمام ایستگاه‌های باران‌سنجی با روش آزمون‌های نرمال استاندارد (Standard Normal Homogeneity Test)، آزمون همگنی دامنه بیشند، آزمون همگنی پتیت (Pettit) و آزمون نسبت وان نیومن (Von Neuman) بررسی شد. بر اساس نتایج حاصل از این آزمون‌ها، ۹۱/۷ درصد از ایستگاه‌های منتخب حوضه، از لحاظ صحت و درستی داده‌های بارندگی ثبت‌شده مورد تأیید بوده و در تحلیل‌های هیدرولوژیک مورد استفاده قرار گرفتند (Ghajarnia et al., 2015).

زمین آمار

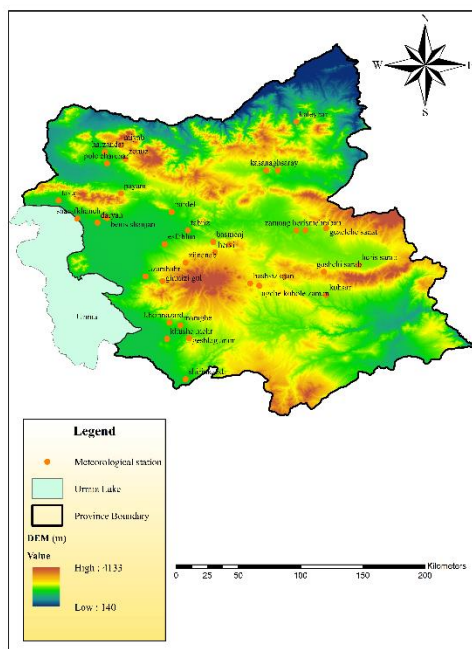


Fig. 1 - Location Map of the study area at East Basin of Urmia Lake and studied stations

شکل ۱- نقشه حوضه شرق دریاچه ارومیه و ایستگاه‌های مورد مطالعه

روش‌های تخمین

روش‌های مختلفی برای تخمین وجود دارد که در زیر به شرح مهم‌ترین روش‌ها یعنی کریجینگ و وزن‌دهی عکس فاصله پرداخته می‌شود.

کریجینگ

به‌طور کلی، تخمین زمین‌آماري، فرآیندی است که طی آن، می‌توان مقدار یک کمیت در نقطه‌ای، با مختصات معلوم را، با استفاده از مقدار همان کمیت در نقاط دیگری با مختصات معلوم، به‌دست آورد. نام این تخمین‌گر زمین‌آماري به افتخار یکی از پیشگامان علم زمین‌آمار به نام کریج (Kriging)، که یک مهندس معدن آفریقای جنوبی بود، به نام کریجینگ (Kriging) نام‌گذاری شد. روش کریجینگ بر اساس میانگین متحرک وزن‌دار بوده و می‌توان آن را بهترین تخمین‌گر خطی ناریب خواند. معادلات کریجینگ: فرمول کلی روش کریجینگ مانند سایر تخمین‌گرها به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$Z^*(x_i) = \sum_{i=1}^n \lambda_i \cdot Z(x_i) \quad (1)$$

که در آن $Z^*(x_i)$ مقدار تخمین متغیر در نقطه‌ی موردنظر، λ_i وزن یا اهمیت نمونه i ام، n تعداد مشاهدات و $Z(x_i)$ مقدار مشاهده شده متغیر می‌باشد (Safarrad et al., 2013).

روش وزن‌دهی عکس فاصله

در این شیوه مقدار یک کمیت در نقاطی با مختصات معلوم با استفاده از مقدار همان کمیت در نقاط دیگری با مختصات معلوم به‌دست می‌آید. به عبارت دیگر در روش وزن‌دهی عکس فاصله (Inverse Distance Weighting) ارزش یک متغیر بر اساس میانگین همسایه‌ها در محدوده‌های معین محاسبه می‌شود. به این ترتیب که معکوس فواصل از نقاط مجهول، وزن‌دهی می‌شود، هرچه فاصله نقاط مجهول از نقاط معلوم کاهش یابد وزن ارزش آن نقاط افزایش می‌یابد و نقاطی که ارزش آن نامعلوم است با استفاده از نقاط اطراف در یک شعاع مشخص بر اساس فرمول زیر برآورد می‌شود (Hasani, 1999).

$$Z(x) = \frac{1}{n} \sum Z(x_i) \quad (2)$$

که در آن x_i ارزش معلوم نقاط با مختصات معلوم و x ارزش برآورد شده نقطه مجهول می‌باشد و چون این مقدار تابعی از فاصله میان آن‌ها می‌باشد، لذا فواصل میان آن‌ها به‌عنوان وزن مدل به کار می‌رود که معمولاً از توان دوم معکوس فواصل استفاده می‌شود و برای وزن فواصل مقدار توان افزایش می‌یابد. برای تعیین کیفیت ارزیابی هر یک از روش‌های زمین‌آمار و درون‌یابی‌های انجام شده از

پارامتر مجذور میانگین مربعات خطا (RMSE) استفاده شده است (López-Moreno and Nogues-Bravo, 2006).

الگوریتم کرم شب‌تاب

الگوریتم کرم شب‌تاب (Firefly Algorithm)، توسط Yang (2009) بر مبنای رفتار و الگوهای چشمک زن کرم‌های شب‌تاب ارائه گردید. این الگوریتم، یک روش جدید مبتنی بر رفتارهای جمعی است که از رفتارهای اجتماعی کرم شب‌تاب در طبیعت الهام گرفته است و به‌عنوان یکی از روش‌های قدرتمند در حل مسائل بهینه‌سازی شناخته شده است. کرم‌های شب‌تاب نورهای موزون و کوتاه تولید می‌کنند. الگوی نوری هر کدام از کرم‌های شب‌تاب با یکدیگر متفاوت می‌باشند. کرم‌های شب‌تاب از این نورها به دو منظور استفاده می‌کنند. پروسه جذب جفت‌ها و دیگری به‌منظور شکار می‌باشد. نورهای ساطع شده، به‌عنوان مکانیزم حفاظتی برای کرم‌های شب‌تاب عمل می‌نماید. نورهای با آهنگ منظم، نرخ تابیدن نور و میزان فاصله زمانی که بین سیگنال‌های نور وجود دارند، سبب جذب کرم شب‌تاب‌ها به یکدیگر می‌شوند. موضوعات مهم در الگوریتم کرم شب‌تاب، تغییرات شدت نور روشنایی و فرموله کردن جذابیت حشرات است. به‌منظور سادگی، فرض می‌شود که جذابیت حشرات، شدت روشنایی آن‌ها است. در حالت کلی جذابیت، پارامتری نسبی بوده و از دید حشرات دیگر، سنجیده می‌شود. همچنین به فاصله حشرات از یکدیگر نیز بستگی دارد. رابطه جذابیت، با تغییر فاصله حشرات، به صورت رابطه (3) می‌باشد.

$$\beta = \beta_0 e^{-\gamma r} \quad (3)$$

که در آن β_0 بیانگر بیشینه جذابیت با دامنه تغییرات $[0, 1]$ می‌باشد. γ بیانگر ضریب جذب با دامنه تغییرات $[0, \infty]$ است. r بیانگر فاصله حشره i ام از حشره j ام می‌باشد. رابطه (4) معادله r_{ij} را نشان می‌دهد (Abedini and Shaghaghian, 2009).

$$r_{ij} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2} \quad (4)$$

حرکت حشره i ام به سمت حشره j ام با رابطه (5) به‌دست می‌آید.

$$x_i = x_i + \beta_0 e^{-\gamma r} (x_j - x_i) + \alpha(\text{rand} - 0.5) \quad (5)$$

به‌طور کلی به‌منظور توسعه الگوریتم کرم شب‌تاب از سه قانون ایده‌آل استفاده شده است. قوانین مزبور به شرح ذیل می‌باشند.

حرکت کرم شب‌تاب‌ها دو رویکرد متفاوت وجود دارد. در رویکرد اول، هر حرکت کرم شب‌تاب مورد نظر به سمت کرم شب‌تاب پر نورتر، به‌عنوان موقعیت جدید در نظر گرفته می‌شود. این در حالی است که در رویکرد دوم، حرکت کرم شب‌تاب مورد نظر، بر اساس برآمد نهایی، حرکت به سمت تمام کرم شب‌تاب‌های پر نور است. در حرکت کرم شب‌تاب‌ها در رویکرد اول، حرکت ذرات صرفاً با توجه به مقدار یک کرم شب‌تاب انجام می‌گیرد. به عبارت دیگر، بهینه محلی تحقق یافته می‌باشد و بهینه سراسری تأثیری در روال جستجوی الگوریتم ندارد. به همین دلیل فضای مسئله به صورت بهینه مورد جستجو قرار نمی‌گیرد. از این رو تعداد تکرار بیشتری برای رسیدن به نقطه بهینه نیاز است.

برای رفع این مشکل و سهیم شدن ذرات دیگر در حرکت ذرات و بهینه شدن عمل جستجوی الگوریتم، روش جدیدی پیشنهاد شده است. نتایج به‌دست آمده نشان می‌دهد که در نظر گرفتن هر دو رویکرد در حرکت کرم شب‌تاب‌ها، با دقت بهتری می‌تواند نقطه بهینه را در فضای جستجو بیابد (Hassanzadeh et al., 2011).

نتایج و بحث

در این مطالعه از سری زمانی بارش ماهیانه به‌منظور تحلیل‌های مکانی استفاده شده است. با توجه به اینکه در تمام دوازده ماه از سال، بارش در حوضه اتفاق می‌افتد و در هیچ ماهی تقریباً بارندگی صفر وجود ندارد، بنابراین در تحلیل‌ها اطلاعات ماه‌های فروردین تا اسفند مد نظر قرار گرفته است. نتایج حاصل از بررسی همبستگی بارش و ارتفاع در ماه‌های مورد بررسی در جدول (۱) آمده است. با توجه به ضریب همبستگی کوچکتر از ۰/۶ بارندگی و ارتفاع، برای تمام ماه‌ها از روش کریجینگ و IDW برای تحلیل مکانی بارش استفاده شد (Yazdani et al., 2013). مقدار پارامتر مجذور میانگین مربعات خطا (RMSE) با روش‌های IDW و کریجینگ در جدول (۲) آورده شده است. با توجه به اینکه مقدار خطای روش IDW کمتر می‌باشد و همچنین این روش برای مناطقی که دارای پستی و بلندی زیادی هستند، مناسب می‌باشد. بنابراین در این تحقیق برای محاسبه واریانس خطای تخمین از این روش استفاده شده است.

پس از محاسبه واریانس خطای تخمین هر ماه (به‌عنوان نمونه، لایه‌ی واریانس تخمین مربوط به ماه بهمن در شکل (۲، الف)، لایه‌های مربوط به ماه‌های مختلف با توجه به جدول (۳) وزن‌دار می‌شود و در نهایت لایه نهایی واریانس تخمین مربوط به حوضه به‌دست می‌آید (شکل ۲، ب).

در این لایه امکان شناسایی نقاط با مقدار تخمین بالا و نیازمند نمونه‌برداری بیشتر وجود دارد، البته نمی‌توان در ارتباط با تعداد

قانون اول- همه کرم‌های شب‌تاب از یک جنس در نظر گرفته می‌شوند. بگونه‌ای که یک کرم شب‌تاب به کرم شب‌تاب دیگر، صرفنظر از جنسیتش، جذب خواهد شد.

قانون دوم- جذابیت با روشنایی یک کرم شب‌تاب متناسب است. بنابراین برای هر کرم شب‌تاب چشمک زن، یکی با روشنایی کمتر به سوی دیگری با درخشندگی بیشتر حرکت خواهد کرد. جذابیت با روشنایی متناسب است و هر دوی آن‌ها هر چه فاصله افزایش یابد، کاهش می‌یابند. اگر هیچ یک از کرم‌های شب‌تاب روشنتر از دیگری نباشد، کرم شب‌تاب به طور تصادفی حرکت خواهد کرد.

قانون سوم- روشنایی یک کرم شب‌تاب بوسیله چشم‌انداز تابع هدف تعیین می‌شود (Yazdani et al., 2013). کد حاوی مراحل الگوریتم کرم شب‌تاب که بر اساس قوانین فوق‌الذکر تدوین شده، بشرح ذیل آورده شده است.

```
Objective function  $f(x)$ ,  $x = (x_1, \dots, x_n)^T$ 
Generate initial population of fireflies  $x_i$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ )
Light intensity  $I_i$  at  $x_i$  is determined by  $f(x_i)$ 
Define light absorption coefficient  $\gamma$ 
While ( $t < MaxGeneration$ )
For  $i = 1 : n$  all  $n$  fireflies
For  $j = 1 : n$  all  $n$  fireflies
If ( $I_j > I_i$ )
Move firefly  $i$  towards  $j$  in  $d$ -dimension
End if
Attractiveness varies with distance  $r$  via  $\exp[-\gamma r]$ 
Evaluate new solutions and update light intensity
End for  $j$ 
End for  $i$ 
Rank the fireflies and find the current best
End while
Postprocess results and visualization.
End.
```

نحوه‌ی عملکرد الگوریتم کرم شب‌تاب (FA) بدین صورت است. ابتدا تعدادی کرم شب‌تاب مصنوعی به طور تصادفی در دامنه‌ی مساله توزیع می‌شوند. سپس هر کرم شب‌تاب از خود نوری ساطع می‌کند که شدت آن متناسب با میزان بهینگی نقطه‌ای است که کرم شب‌تاب در آن واقع شده است. سپس شدت نور هر کرم شب‌تاب مرتباً با شدت نور سایر کرم شب‌تاب‌ها، مقایسه شده و کرم شب‌تاب کم نورتر به سوی کرم‌های شب‌تاب پر نورتر جذب می‌شود. این عمل باعث می‌شود که ذرات به اطراف ذره‌ای که نور بیشتری دارد، متمرکز شوند. چنانچه در تکرار بعدی الگوریتم، ذره‌ای با نور بیشتر وجود داشته باشد، ذرات مجدداً به سمت آن حرکت می‌کنند. در

ایستگاه‌ها و اثر هم زمان آنها در صورت اظہار نظر کرد. همانطور که در شکل (۲) مشاهده می‌شود مقادیر بیشینه واریانس تخمین، بیشتر در مرزهای شمالی، شرقی و جنوبی حوضه، جاهایی

است که فاصله ایستگاه‌ها بیشتر است، همچنین در نقاط کوهستانی که تغییرات بارندگی بیشتر است.

جدول ۱- ضریب همبستگی ارتفاع با متوسط بارندگی ماهیانه ایستگاه‌های حوضه

Table 1- Correlation coefficient of altitude with mean monthly rainfall of basin stations

| Esf. | Bah. | Dey | Aza. | Aba. | Meh. | Sha. | Mor. | Tir | Kho. | Ord. | Far. | Month correlation coefficient |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|-------------------------------|
| -0.17 | -0.13 | -0.15 | -0.23 | -0.14 | -0.14 | -0.18 | -0.25 | -0.35 | -0.22 | -0.01 | 0.14 | |

جدول ۲- مقدار مجذور میانگین مربعات خطا با روش‌های IDW و کریجینگ

Table 2- Root mean squared error with IDW and kriging methods

| Root mean squared error with kriging methods | Root mean squared error with IDW | Month |
|--|----------------------------------|-------|
| 24.97 | 18.21 | Far. |
| 31.33 | 22.58 | Ord. |
| 17.93 | 13.26 | Kho. |
| 9.19 | 6.98 | Tir |
| 9.48 | 7.50 | Mor. |
| 11.19 | 14.55 | Sha. |
| 18.71 | 14.74 | Meh. |
| 14.67 | 11.78 | Aba. |
| 12.33 | 9.43 | Aza. |
| 12.96 | 10.41 | Dey |
| 18.07 | 13.48 | Bah. |
| 79.15 | 42.12 | Esf. |

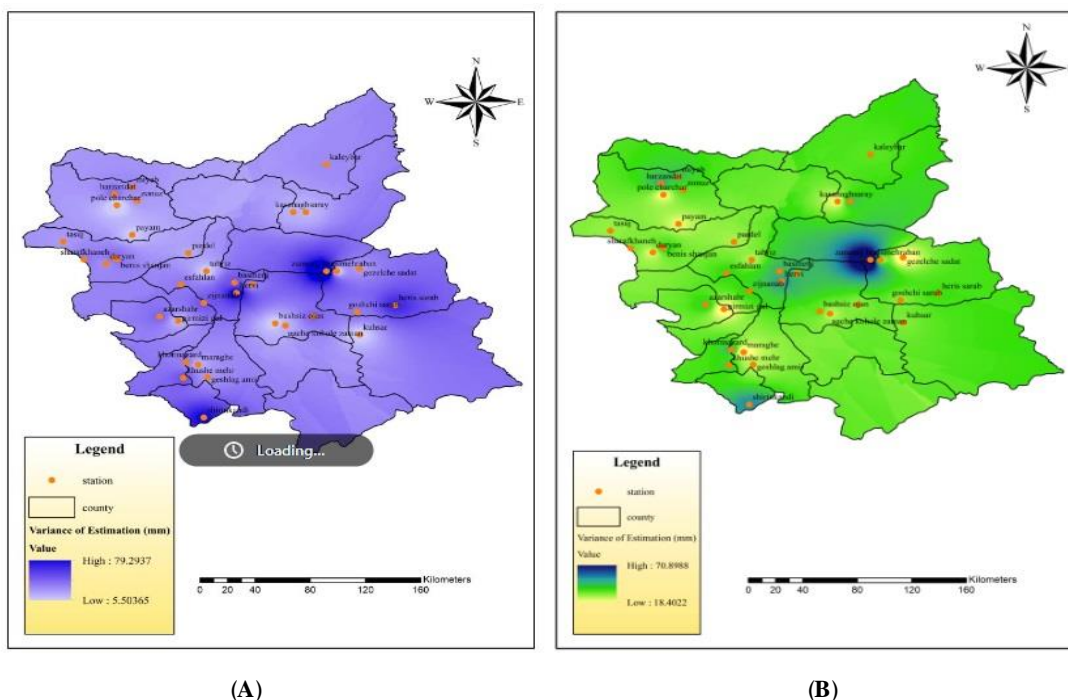


Fig. 2 - Estimated variance layers at basin level; a) Bahman layer b) final layer

شکل ۲- لایه‌های واریانس تخمین در سطح حوضه؛ الف) ماه بهمن، ب) لایه نهایی

جدول ۳- ضرایب (میلی متر) مربوط به هر ماه برای وزن دار کردن لایه‌های واریانس تخمین

Table 3. Coefficients (mm) for each month to weigh the estimated variance layers

| Esf. | Bah. | Dey | Aza. | Aba. | Meh. | Sha | Mor. | Tir | Kho. | Ord | Far. |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 30.09 | 25.08 | 22.57 | 27.71 | 41.73 | 27.01 | 19.01 | 15.61 | 18.47 | 32.25 | 60.03 | 42.51 |

$$\sum_{i=1}^2 \alpha_i = 1 \quad (12)$$

$$a_{ij}, b_{ij}, c_{ij} \in [0,1] \quad (13)$$

از آنجا که دامنه تغییرات آنتروپی انتقال اطلاعات و واریانس خطا متفاوت است، برای مقایسه این دو معیار از اعداد استاندارد شده استفاده می‌شود تا داده‌های واریانس خطا بین صفر و یک تأثیر یکسانی در ارزیابی نهایی تابع هدف داشته باشد. برای استاندارد سازی این معیار از رابطه (۱۴) استفاده می‌شود (Hassanzadeh et al., 2011).

$$Errs_{ij} = \frac{Err_{ij} - Err_{min}}{Err_{max} - Err_{min}} \quad (14)$$

که Err_{ij} و Ent_{ij} به ترتیب مقدار واقعی آنتروپی و خطای واریانس است. $Ent_{min} = \min(Ent_{ij})$ و $Err_{max} = \max(Err_{ij})$ به ترتیب مقدار کمینه‌ی آنتروپی و بیشینه خطای واریانس است. همچنین، در تابع هدف بالا $Errs_{max} = \max(Errs_{ij})$ مقدار بیشینه استاندارد خطای واریانس برابر یک است. همچنین، $Ent_{min} = \min(Ent_{ij})$ مقدار کمینه‌ی آنتروپی انتقال اطلاعات و برابر صفر است. r_1 مقدار آستانه برای انتخاب نقاط در محدوده آنتروپی انتقال اطلاعات و r_2 مقدار آستانه برای انتخاب نقاط در محدوده خطای واریانس است.

برای مکان‌یابی ایستگاه‌های جدید از نقاط پتانسیل با کمینه آنتروپی انتقال اطلاعات استفاده می‌شود، بنابراین متغیر b_{ij} تعریف می‌شود که در صورت برقراری شرط $Ent_{ij} < r_1$ (یعنی، نقاط پتانسیلی که مقدار آن‌ها از یک مقدار خاص آنتروپی انتقال اطلاعات کمتر است)، مقدار یک و در غیر این صورت مقدار صفر می‌گیرد. مقدار یک به معنی این است که شرط مسئله برقرار است و الگوریتم برای مراحل بعد بررسی می‌شود. از طرف دیگر، با توجه به مقدار واریانس تخمین، نقاطی برای مکان‌یابی ایستگاه مناسب‌اند که دارای بیشینه واریانس تخمین باشند. بنابراین، متغیر c_{ij} تعریف می‌شود که در صورت برقرار بودن شرط $Ess_{ij} > r_2$ (یعنی نقاط پتانسیلی که مقدار آنها از یک مقدار خاص واریانس خطا بالاتر باشد) مقدار یک و در غیر این صورت مقدار صفر می‌گیرد. a_{ij} متغیر تصمیم است که در صورت برقراری هر دو شرط $Ent_{ij} < r_1$ و $Ess_{ij} > r_2$ مقدار یک و در غیر این صورت مقدار صفر می‌گیرد.

نتایج الگوریتم کرم شب‌تاب

در این بخش، در ابتدا پارامترهای الگوریتم کرم شب‌تاب مورد بررسی قرار گرفته و سعی شده با تنظیم صحیح پارامترها، نتایج حاصل از الگوریتم بهبود داده شود. از مهم‌ترین پارامترهای الگوریتم کرم شب‌تاب پارامتر آلفا و گاما می‌باشند. که در این تحقیق پارامتر آلفا مورد بررسی قرار گرفته شده است. مقدار پیشنهاد شده برای این پارامتر ۰/۲ می‌باشد (Abedini and Shaghaghian, 2009). اما با توجه به اینکه ماهیت الگوریتم کرم شب‌تاب استخراج‌گر (Exploitive) می‌باشد برای بهبود حرکات تصادفی ذرات و ایجاد تعادل بین خصوصیات الگوریتم می‌توان مقدار این پارامتر را با سعی و خطا به دست آورد. بدین منظور مقادیر مختلف این پارامتر برای یافتن نقطه بهینه توابع مختلف در ابعاد مختلف مورد بررسی قرار گرفت و بهترین مقدار برای این پارامتر ۰/۱ تعیین شد. مکان-یابی صحیح ایستگاه‌های جدید باران‌سنجی در بهبود تخمین بارش منطقه‌ای با حداقل هزینه اهمیت ویژه‌ای دارد. در این مطالعه مدلی برای تعیین نقاط مناسب برای تأسیس ایستگاه‌های جدید در سطح حوضه‌ی آبخیز توسعه داده شده است. اهداف اصلی مدل توسعه داده شده عبارت‌اند از:

- ۱) بیشینه کردن حداقل آنتروپی انتقال اطلاعات
- ۲) کمینه کردن مقدار واریانس خطا

بنابراین تابع هدف پیشنهادی به صورت زیر تعریف شده است:

$$\text{Min } Z = a_{ij} \left\{ \alpha_1 (Errs_{ij} - Errs_{max})^2 + \alpha_2 (Ent_{ij} - Ent_{max})^2 \right\} \quad (6)$$

$$a_{ij} = b_{ij} \times c_{ij} \quad (7)$$

$$b_{ij} > \frac{r_1 - Ent_{ij}}{r_1} \quad (8)$$

$$b_{ij} < \frac{r_1}{Ent_{ij}} \quad (9)$$

$$c_{ij} > \frac{Errs_{ij} - r_2}{r_2} \quad (10)$$

$$c_{ij} < \frac{Errs_{ij}}{r_2} \quad (11)$$

قرار گرفتند. همچنین، به دلیل اهمیت یکسان هر دو معیار، مقادیر α_1 و α_2 برابر ۰/۵ در نظر گرفته شد.

بر طبق نتایج به دست آمده مشاهده می شود که الگوریتم کرم شب تاب پیشنهادی با در نظر گرفتن هر دو برداشت حرکت، توانسته با دقت بهتری نقطه بهینه را بیابد. نتایج به دست آمده فاصله زیادی با نتایج حاصل از الگوریتم حاصل از یک نوع حرکت دارد. در این ارزیابی الگوریتم (FA) ۱۰۰ بار اجرا شده و بهترین جواب حاصل از این اجرا در شکل های (۳) و (۴) نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می شود نتایج حاصل از الگوریتم پیشنهادی با در نظر گرفتن هر دو نوع حرکت بسیار بهتر از الگوریتم کرم شب تاب حاصل از یک برداشت حرکت می باشد و خطا کاهش یافته است. در نهایت با استفاده از الگوریتم کرم شب تاب، بهترین جانمایی برای ایستگاه های موجود و ایستگاه های پتانسیل به دست آمد. به طوری که، بهترین جانمایی، با اضافه کردن تعداد نه ایستگاه به دست آمد که در شکل (۵) قابل مشاهده است.

a_{ij} وقتی مقدار یک می گیرد که هر کدام از متغیرهای a_{ij} و b_{ij} مقدار یک بگیرند، در این صورت الگوریتم اجرا می شود و به دنبال نقطه بهینه می گردد، در غیر این صورت مقدار صفر و الگوریتم متوقف می شود. α_1 و α_2 ضرایبی بین صفر و یک هستند که مقدار آن ها با توجه به اهمیت هر کدام از معیارهای تصمیم گیرنده تعیین می شود. ضریب هر معیاری که بیشتر باشد، تأثیر آن معیار در پیدا کردن نقطه ی بهینه بیشتر است. با اجرای تابع هدف بالا (رابطه ۶) نقاط با عدم قطعیت بیشتر (حداقل آنتروپی انتقال اطلاعات)، همچنین با واریانس خطای بالا مشخص می شود که در واقع نقاط پیشنهادی برای تأسیس ایستگاه های جدید می باشند.

برای اجرای ساختار بهینه، ابتدا باید مقادیر r_1 و r_2 مشخص شود. همان طور که گفته شد این مقادیر برای مشخص کردن محدوده با آنتروپی انتقال پایین و واریانس خطای بالاست، بنابراین با توجه به خصوصیات شبکه باران سنجی منطقه و آزمون و خطا با مقادیر مختلف، در نهایت ۳۰ درصد کمینه ی آنتروپی انتقال اطلاعات، $r_1 = ۰/۳$ و ۶۰ درصد بیشینه ی خطای واریانس، یعنی $r_2 = ۶۰$ ، در انتخاب موقعیت بهینه ی تأسیس ایستگاه جدید مدنظر

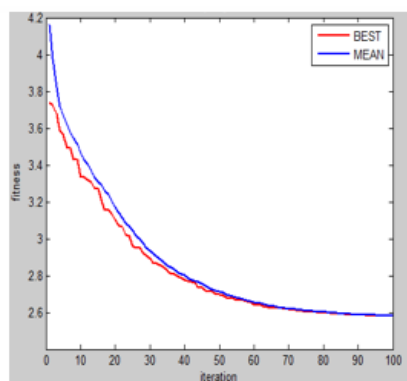


Fig. 3- Results of the best values obtained based on the standard FA algorithm

شکل ۳- نمودار نتایج حاصل از بهترین مقادیر به دست آمده از الگوریتم FA استاندارد

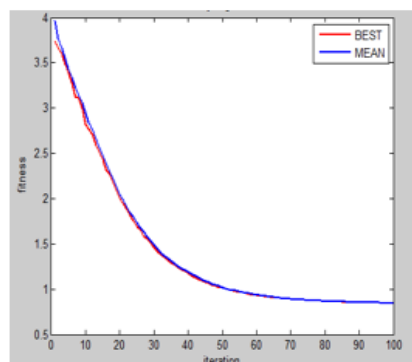


Fig. 4- Results of the best values obtained based on the proposed algorithm FA with all the movements

شکل ۴- نمودار نتایج حاصل از بهترین مقادیر به دست آمده از الگوریتم FA پیشنهادی به همراه تمام حرکت ها

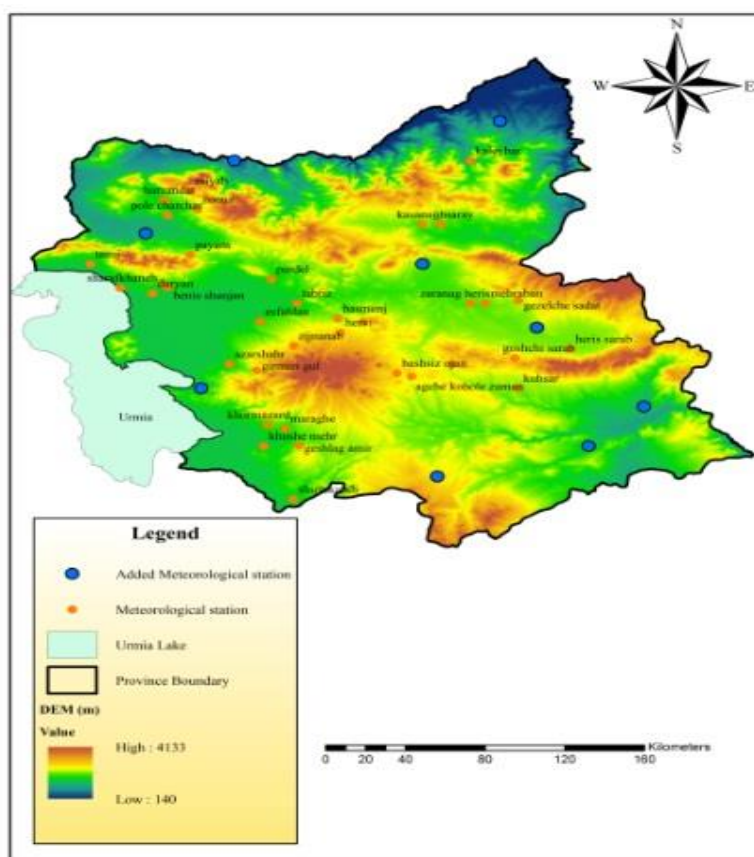


Fig. 5 - Location map of the study area and added new stations located at East Basin of Urmia Lake

شکل ۵- نقشه حوضه شرقی دریاچه ارومیه و ایستگاه‌های مورد مطالعه و ایستگاه‌های جدید باران‌سنجی

جدول ۴- مشخصات ایستگاه‌های جدید باران‌سنجی به‌دست آمده از ساختار پیشنهادی بهینه‌سازی شبکه

Table 4 - Characteristics of the new rain gauge stations obtained from the structure of the proposed network optimization

| Type of station | Geographical characteristics | | | Station name |
|-----------------|------------------------------|-----------|------------|----------------------------|
| | Altitude (m) | latitudes | longitudes | |
| Meteorolog | 1690 | 37°57' | 47°22' | Yengaja |
| Meteorology | 1730 | 38°18' | 46°51' | Goyjeh bel |
| Meteorology | 935 | 39°05' | 47°12' | Mulan |
| Meteorology | 660 | 38°52' | 46°00' | Siyah roud |
| Meteorology | 1244 | 38°28' | 45°36' | Kashk saray |
| Meteorology | 1370 | 37°37' | 45°51' | Rahdar khane shohid madani |
| Meteorology | 1990 | 37°08' | 46°55' | Mostafa kandy |
| Meteorology | 1310 | 37°17' | 47°36' | Kale bouz |
| Meteorology | 1092 | 37°37' | 47°51' | Garm roud |

مختلف سال متفاوت است و در طول ماه‌های تر، تخمین دقیق بارش اهمیت بیشتری دارد، بنابراین ماه‌های با بارش بیشتر، وزن بالاتری به خود اختصاص می‌دهند. پس از محاسبه‌ی واریانس تخمین بارش در هر ماه، با توجه به وزن بارش در هر

نتیجه‌گیری

- تحلیل مکانی بارش با استفاده از روش زمین آماری IDW در سطح حوضه صورت گرفت. از آنجا که اهمیت بارش در ماه‌های

باران‌سنجی جدید برای اضافه شدن به شبکه موقعیت‌یابی شد که مختصات ایستگاه‌های جدید در جدول (۴) قابل مشاهده است. ایستگاه‌های پیشنهادی بیشتر در مناطق مرزی و کوهستانی مکان‌یابی شد که تغییرات بارش زیاد است. همچنین، در نقاطی که تراکم ایستگاه‌ها کم است، نتایج حاصل از این تحقیق نشان می‌دهد که استفاده از اطلاعات گسترده‌تر با دوره‌ی زمانی طولانی‌تر در مطالعات آبی دقت مطالعات مشابه در سایر حوضه‌ها را افزایش می‌دهد. نتایج این تحقیق به نحو مؤثری در برنامه‌ریزی برای توسعه شبکه‌ی سنجش بارش و تخصیص بودجه‌ی موجود استفاده می‌شود. در نهایت پیشنهاد می‌شود با انجام پژوهش‌های همراه با بازدیدهای میدانی، نتایج به‌دست آمده از روش‌های زمین آماری با واقعیت‌های فیزیکی و شرایط نصب و عملکرد ایستگاه مقایسه شود. بدین ترتیب ممکن است از برخی نتایج این روش بدون انجام بازدیدهای میدانی یا صرف هزینه‌های بیشتر به علت تغییرات نحوه کارکرد ایستگاه مورد نظر پی برد. بدیهی است نتایج به‌دست آمده از هر روش علمی که مبتنی بر آمار و اطلاعات ثبت شده در ایستگاه‌های پایش است همواره متأثر از کیفیت، صحت و کمیت آمار و اطلاعات یاد شده خواهد بود. از این نظر توسعه شبکه‌های پایش، ضمن ارتقای کیفیت ثبت آمار و اطلاعات آن‌ها، پیشنهاد بدیهی خواهد بود.

تقدیر و تشکر

نویسندگان مقاله تشکر ویژه خود را از پرسنل سازمان آب منطقه‌ای و هواشناسی برای همکاری در تأمین داده‌های این تحقیق اعلام می‌دارند.

ماه که برابر با میانگین بلند مدت بارش ایستگاه‌ها در ماه موردنظر است، لایه‌های واریانس تخمین ماهیانه وزن‌دهی می‌شود. سپس، لایه‌ی نهایی واریانس تخمین از روش میانگین وزنی به‌دست می‌آید که برای بررسی‌های بعدی و یافتن نقاط پتانسیل با بالاترین واریانس خطا آماده می‌شود و یکی از معیارهای منتخب در ساختار مدل بهینه‌سازی شبکه‌ی باران-سنجی برای مکان‌یابی ایستگاه‌های باران‌سنجی به کار می‌رود. همانطور که در شکل (۲، ب) مشاهده می‌شود مقادیر بیشینه واریانس تخمین، بیشتر در مرزهای شمالی، شرقی و جنوبی حوضه، جاهایی است که فاصله ایستگاه‌ها بیشتر است، همچنین در نقاط کوهستانی که تغییرات بارندگی بیشتر است.

• در بخش بهینه‌سازی نیز، در ابتدا پارامترهای الگوریتم کرم شب‌تاب مورد بررسی قرار گرفته و سعی شده با تنظیم صحیح پارامترها، نتایج حاصل از الگوریتم بهبود داده شود. از مهمترین پارامترهای الگوریتم کرم شب‌تاب پارامتر آلفا و گاما می‌باشند. که در این تحقیق پارامتر آلفا مورد بررسی قرار گرفته شده است و مقدار آن با توجه به بهینه مقدار تابع اسفیر، $0/1$ پیشنهاد شده است. به‌منظور انجام فرآیند بهینه‌سازی مدلی برای تعیین نقاط مناسب برای تأسیس ایستگاه‌های جدید در سطح حوضه آبریز توسعه داده شده است. اهداف اصلی مدل عبارتند از: بیشینه کردن حداقل آنتروپی انتقال اطلاعات و کمینه کردن مقدار واریانس خطا، در نهایت با استفاده از الگوریتم کرم شب‌تاب مجموعه نقاط پتانسیل برای تأسیس ایستگاه جدید تعیین می‌گردد. بر طبق نتایج به‌دست آمده (شکل‌های ۳ و ۴) الگوریتم کرم شب‌تاب پیشنهادی با در نظر گرفتن هر دو رویکرد حرکت، توانسته با دقت بهتری نقطه بهینه را بیابد. با اجرای مدل پیشنهادی در حوضه‌ی آبریز دریاچه‌ی ارومیه، تعداد ۹ ایستگاه

References

- 1- Abedini, M.J. and Shaghaghian, M.R., 2009. Exploring scaling laws in surface topography. *Chaos, Solitons & Fractals*, 42(4), pp.2373-2383 (In Persian).
- 2- Barca, E., Passarella, G. and Uricchio, V., 2008. Optimal extension of the rain gauge monitoring network of the Apulian Regional Consortium for Crop Protection. *Environmental Monitoring and Assessment*, 145(1-3), pp.375-386.
- 3- Cheng, K.S., Lin, Y.C. and Liou, J.J., 2008. Rain- gauge network evaluation and augmentation using geostatistics. *Hydrological Processes: An International Journal*, 22(14), pp.2554-2564.
- 4- Ghajarnia, N., Liaghat, A. and Arasteh, P.D., 2015. Comparison and evaluation of high resolution precipitation estimation products in Urmia Basin-Iran. *Atmospheric Research*, 158, pp.50-65 (In Persian).
- 5- Ghahraman, B. and Sepaskhah, A., 2001. Autographic rain-gagenetwork design for iran by kriging. Thesis, *Shiraz University*, Iran. 141p. (In Persian).

- 6- Hassanzadeh, T., Meybodi, M.R. and Mahmoudi, F., 2011. An improved Firefly Algorithm for optimization in static environment. In *Fifth Iran Data Mining Conference/IDMC* (In Persian).
- 7- Hasani, A, 1999, *Geostatic*, Publishing and Printing University of Tehran, 260 (In Persian).
- 8- Haberlandt, U., 2007. Geostatistical interpolation of hourly precipitation from rain gauges and radar for a large-scale extreme rainfall event. *Journal of Hydrology*, 332(1), pp.144-157.
- 9- Karamouz, M., Falahi, M. and Nazif, S., 2010. Analysis of Spatial Variation of Precipitation: Comparison of Conventional and Kriging Methods *Iran-Water Resources Research*, 6(1), pp.1-9 (In Persian).
- 10- López-Moreno, J.I. and Nogués-Bravo, D., 2006. Interpolating local snow depth data: an evaluation of methods. *Hydrological Processes: An International Journal*, 20(10), pp.2217-2232.
- 11- Mahmoudi-Meimand, H., Nazif, S., Ali Abbaspour, R. and Faraji Sabokbar, H., 2016. An algorithm for optimisation of a rain gauge network based on geostatistics and entropy concepts using GIS. *Journal of Spatial Science*, 61(1), pp.233-252 (In Persian).
- 12- Mashal, M., Darvishi, E. and Rahimikhoob, A., 2008. Optimizing the Raingages Networks Using Geostatistical Method Case Study: Khozestan Province. *Iranian Journal of Irrigation and Drainage*. 2 (2), pp. 43-51
- 13- Papamichail, D.M. and Metaxa, I.G., 1996. Geostatistical analysis of spatial variability of rainfall and optimal design of a rain gauge network. *Water resources management*, 10(2), pp.107-127.
- 14- Putthividhya, A. and Tanaka, K., 2012. Optimal rain gauge network design and spatial precipitation mapping based on geostatistical analysis from collocated elevation and humidity data. *International Journal of Environmental Science and Development*, 3(2), p.124.
- 15- Safarrad, T., Farji, S.H., Azizi, G. and Abbaspour, R., 2013. Spatial Analysis of Precipitation Variations in Middle Zagros Using Geo-Statistical Methods (1995-2004) (In Persian).
- 16- Yang, X.S., 2009, October. Firefly algorithms for multimodal optimization. In *International symposium on stochastic algorithms* (pp. 169-178). Springer, Berlin, Heidelberg.
- 17- Yang, X.S. and He, X., 2013. Firefly algorithm: recent advances and applications. *International Journal of Swarm Intelligence*, 1(1), pp.36-50.
- 18- Yazdani, N.M., Sequerloo, A.Y. and Panahi, M.S., 2013. Reduction of Harmonic in Multilevel Inverters using FA and LAFA ALGORITHMS. In *J. Basic. Appl. Sci. Res.* (Vol. 3, No. 1s, pp. 130-135). TextRoad Publication.