

## تعیین حوزه‌های آبخیز همگن با استفاده از الگوریتم جستجوی موجودات همزیست

ستار چاوشی\*

<sup>۱</sup> استادیار، بخش تحقیقات حفاظت خاک و آبخیزداری، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان اصفهان، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، اصفهان، ایران

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۰۵/۲۹

تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۱۱/۰۳

### چکیده

استفاده از الگوریتم‌های فرا ابتکاری در علوم مختلف به‌طور روز افزون در حال گسترش است. کاربرد آن‌ها در شناخت و مدل‌سازی پدیده‌های طبیعی نظیر سیل و خشکسالی به لحاظ طبیعت و مکانیسم پیچیده و تعامل غیرخطی عوامل موثر بر آن نمونه‌ای از توانایی و پتانسیل این الگوریتم‌ها در هیدرولوژی می‌باشد. در این مقاله، نخست به معرفی الگوریتم جستجوی موجودات همزیست پرداخته می‌شود و در ادامه کاربرد آن در بهینه‌سازی سامانه‌های فازی و با هدف یافتن ناحیه اثر ایستگاه‌های واقع در حاشیه جنوبی دریای خزر مورد بحث قرار می‌گیرد. این حوزه سالیانه شاهد وقوع سیلاب‌های مخرب بوده و متعاقباً صدمات جانی و مالی بوده است. یافته‌های این پژوهش برای برآورد سیلاب حوزه و متعاقباً طراحی سازه‌های کنترل سیلاب استفاده می‌شود. تعداد ۶۱ ایستگاه آب‌سنجی واقع در این منطقه در نظر گرفته شده، مشخصات فیزیکی، اقلیمی و هیدرولوژیک آن‌ها شامل مساحت، محیط، ارتفاع کمینه، ارتفاع بیشینه، ارتفاع متوسط، شیب متوسط، طول آبراهه اصلی، شیب آبراهه اصلی، طول مستطیل معادل، عرض مستطیل معادل، عامل فرم، ضریب شکل، ضریب گراولپوس، ضریب گردی، ضریب فشردگی و بارش متوسط سالیانه تعیین شده است. طبق نتایج حاصل از آزمون تحلیل مولفه‌های اصلی از بین ۱۶ پارامتر مورد بررسی، مساحت، ارتفاع متوسط، ضریب شکل و ضریب گراولپوس حوزه به‌همراه بارندگی متوسط حوزه به‌عنوان مهمترین عوامل برای آزمون همگنی هستند. این عوامل به‌عنوان ورودی سامانه فازی استفاده شد که منجر به تولید نواحی همگن شد. الگوریتم جستجوی موجودات همزیست برای بهینه‌سازی این گروه‌های همگن و طی فرایندهای تکراری به‌کار گرفته شد. در نهایت، عملکرد الگوریتم و صحت و سقم این نتایج به‌دست آمده با استفاده از آماره ناهمگنی گشتاور خطی ارزیابی شد. بدین ترتیب، تعداد ۶۱ ناحیه اثر که بیانگر نواحی همگن برای هر یک از ۶۱ حوزه مورد مطالعه است، به‌دست آمد. نتایج این مطالعه بیانگر کارایی روش پیشنهادی در تعیین ناحیه اثر حوزه‌های آبخیز منطقه دارد. پراکنش جغرافیایی ناحیه اثر ایستگاه‌ها (ایستگاه‌های همگن با ایستگاه هدف) نشان می‌دهد که مجاورت جغرافیایی الزاماً دلالت بر همگنی حوزه‌ها ندارد.

**واژه‌های کلیدی:** الگوریتم فرا ابتکاری، بهینه‌سازی، تحلیل منطقه‌ای سیلاب، روش ناحیه اثر، شباهت حوزه

### مقدمه

است. به‌منظور مقابله با این مشکل، معمولاً از ایجاد روابط منطقه‌ای بین دبی‌های جریان بیشینه با دوره بازگشت‌های مختلف با ویژگی‌های فیزیکی، اقلیمی و

یکی از مشکلات رایج در مطالعه سیلاب حوزه‌های آبخیز، کمبود داده‌های مشاهداتی بارش و جریان

سیلاب انجام گرفته که از جمله می‌توان به Saghafian و Farazjoo (۲۰۰۷)، Abdolhay و همکاران (۲۰۰۹)، Mirza Hosseini و همکاران (۲۰۱۰)، Rostami Kamrood و همکاران (۲۰۱۱)، Chavoshi و همکاران (۲۰۱۲ a,b، ۲۰۱۳)، Sheikh و همکاران (۲۰۱۴)، Ahani و همکاران (۲۰۱۵) و Farsadnia و همکاران (۲۰۱۴) اشاره کرد. مطابق با یافته‌های مربوطه، برخی ویژگی‌های حوضه نظیر مساحت، به‌عنوان عامل مهم مرتبط با سیلاب در منطقه شناخته شده، برای گروه‌بندی حوضه‌ها به‌کار گرفته شده است.

در زمینه الگوریتم جستجوی موجودات هم‌زیست<sup>۱</sup> و کاربرد آن در هیدرولوژی و منابع آب، مطالعات معدودی انجام گرفته است. Lin (۲۰۱۷) از این الگوریتم برای یافتن محل‌های نشت شبکه لوله آب استفاده کرد. این فرایند با به‌کمینه رساندن مجموع اختلاف بین ارتفاع آب محاسباتی و شبیه‌سازی شده در نقاط مشاهداتی انجام گرفته است و در این راستا دو سناریوی نشت آب شامل شبکه ساده لوله و شبکه توزیع آب مورد بررسی قرار گرفت. نتایج در هر دو سناریو حکایت از عملکرد مناسب این الگوریتم در نشت‌یابی لوله‌های آب دارد.

الگوریتم SOS به‌وسیله Bozorg-Haddad و Azarnivand (۲۰۱۷) به‌منظور بهینه‌سازی تولید برقایی مخزن سد کارون ۴ در جنوب غرب ایران استفاده شد. ایشان مزیت این الگوریتم نسبت به الگوریتم‌هایی نظیر الگوریتم ژنتیک و چرخه آب را در عدم نیاز به تعیین پارامترهای الگوریتم دانسته، با مقایسه عملکرد این سه الگوریتم چنین نتیجه گرفتند که عملکرد الگوریتم SOS در بهینه‌سازی تابع هدف سامانه مخزن مورد مطالعه از دو الگوریتم دیگر بهتر است.

پژوهش حاضر با استفاده از الگوریتم جستجوی موجودات هم‌زیست و با هدف یافتن ناحیه اثر حوضه‌های واقع در حاشیه جنوبی دریای خزر انجام گرفته است. این منطقه سالیانه شاهد وقوع سیلاب‌های مخرب بوده که صدمات جانی و مالی

هیدرولوژیکی حوزه‌های آبخیز استفاده می‌شود. بنابراین، نخستین گام در تحلیل منطقه‌ای جریان، تعیین مناطق همگن است. روش ناحیه اثر، که به‌وسیله Burn (۱۹۹۰) ارائه شد، یکی از معروف‌ترین روش‌های همگن است. در این روش، هر ایستگاه دارای ناحیه اثر منحصر به فرد خود است که شامل مجموعه‌ای از ایستگاه‌های مشابه (از لحاظ رفتار هیدرولوژیکی) است. در مطالعات اولیه مبتنی بر کاربرد مفهوم ناحیه اثر، شباهت حوضه‌ها به‌عنوان تابعی از آماره‌های جریان حاصله از تحلیل‌های آماری سری‌های سالیانه جریان در نظر گرفته می‌شد. در حالی که در مناطق فاقد آمار این مفهوم کاربرد نداشت. لذا، از روش منطقه‌ای کردن مبتنی بر شباهت حوزه‌های آبخیز در فضای  $n$  بعدی از فاصله اقلیدسی متغیرهای فیزیکی، اقلیمی و هیدرولوژیکی آبخیزها برای تشکیل ناحیه اثر ایستگاه‌ها استفاده شد.

$$D_{jk} = \left[ \sum_{i=1}^N W_i (X_{ji} - X_{ki})^2 \right]^{0.5} \quad (1)$$

که در آن،  $D_{jk}$  فاصله اقلیدسی وزنی از سایت  $j$  تا  $k$  سایت،  $N$  تعداد صفات مورد بررسی حوضه،  $W_i$  وزن هر یک از صفات  $i$  و  $X_{ji}$  مقدار استاندارد صفت  $i$  از سایت  $j$  است.

مدل‌های مختلفی برای پیش‌بینی جریان ارائه شده است که می‌توان آن‌ها را به دو دسته مدل‌های خطی و غیرخطی گروه‌بندی کرد. در مدل‌های خطی چنین فرض می‌شود که یک رابطه خطی بین سری‌های زمانی پارامتر هیدرولوژی مورد نظر وجود دارد. پیش‌بینی جریان به عوامل متعددی بستگی دارد همچون بارش، تبخیر و تعرق، خصوصیات فیزیکی حوضه و غیره که فرایند جریان را غیرخطی می‌کنند. بنابراین، مدل‌های خطی در تفسیر این روابط عاجز هستند. در دهه‌های اخیر مدل‌های غیرخطی نظیر الگوریتم‌های فرا ابتکاری برای تعریف روابط جریان با خصوصیات ذکر شده به‌کار گرفته شده است. از جمله می‌توان به شبکه‌های عصبی مصنوعی Cigizoglu و Kisi (۲۰۰۵)، Muhammad Adnan و همکاران (۲۰۱۷)، الگوریتم ژنتیک Chen و همکاران (۲۰۰۶)، Chavoshi و همکاران (۲۰۱۲a,b) و (۲۰۱۳)، کلونی مورچه Talatahari و همکاران (۲۰۱۳) اشاره کرد. در منطقه مورد مطالعه، مطالعات متعددی در زمینه

<sup>1</sup> Symbiotic Organism Search algorithm (SOS)

دائمی که در آن موجودات تصمیم می‌گیرند که یک رابطه غیرضروری و با منفعت دوطرفه باشند. از جمله معروف‌ترین روابط همزیستی در طبیعت، رابطه هم‌یاری<sup>۳</sup>، رابطه کمالگرائی<sup>۴</sup> و رابطه انگلی<sup>۵</sup> است. رابطه هم‌یاری اشاره به رابطه همزیستی بین دو گونه مختلف دارد که هر دو نفر از این رابطه سود می‌برند. کمال‌گرایی یک نوع رابطه همزیستی است که در آن فقط یک گونه سود می‌برد و موجود دیگر متاثر از سود و زیان نمی‌شود. رابطه انگلی یک نوع رابطه همزیستی است که در آن یک موجود سود و موجود دیگر زیان می‌برد. عموماً موجودات رابطه همزیستی را به‌عنوان یک استراتژی برای سازگاری با تغییرات محیط اتخاذ می‌کنند. این رابطه به موجودات کمک می‌کند تا از مزیت سازگاری و بقا در درازمدت بهره ببرند. بنابراین، منطقی است نتیجه گرفته شود که همزیستی ایجاد شده، در طول زمان تغییر شکل داده، موجب پایداری اکوسیستم‌ها شده است (شکل ۱).

الگوریتم‌های فرا ابتکاری موجود، نظیر الگوریتم تبرید فلزات یا کلونی زنبور عسل، پدیده‌های طبیعی را تقلید می‌کنند. در حالی که الگوریتم SOS تعامل زیستی موجود در رابطه بین دو موجود زنده را با یافتن مناسب‌ترین موجود شبیه‌سازی می‌کند. الگوریتم پیشنهادی نخست برای حل مسائل بهینه‌سازی عددی در فضای جستجوی پیوسته توسعه یافت. مشابه با سایر الگوریتم‌های مبتنی بر جمعیت، این الگوریتم در راستای یافتن راه‌حل بهینه، به‌طور متناوب از یک جمعیت از راه‌حل‌های منتخب در فضای جستجو استفاده می‌کند. فرایند SOS با تشکیل جمعیت اولیه با عنوان اکوسیستم آغاز می‌شود. در اکوسیستم اولیه، گروهی از موجودات در فضای جستجو و به‌طور تصادفی تولید می‌شود. هر موجود زنده نماینده یک راه‌حل منتخب برای مسئله متناظر است. هر موجود زنده دارای مقدار معینی سازگاری است که بیانگر درجه سازگاری با هدف مورد نظر است. تقریباً تمامی الگوریتم‌های فرا ابتکاری در هر مرحله از فرایند یک رشته عملیات را برای نیل به

زیادی به‌همراه دارد. یافته‌های این پژوهش برای برآورد سیلاب حوزه‌های این منطقه استفاده می‌شود که متعاقباً در طراحی سازه‌های کنترل سیلاب موثر است. تفاوت این پژوهش با پژوهش‌های گذشته آن است که به‌جای روش‌های رایج و کلاسیک گروه‌بندی یک منطقه به چند ناحیه همگن، از مفهوم ناحیه اثر برای یافتن گروه‌های همگن متناسب با هر ایستگاه استفاده می‌شود. به‌طوری که به تعداد ایستگاه‌های مورد مطالعه، ناحیه اثر به‌دست می‌آید. برتری این پژوهش نسبت به پژوهش‌های قبلی آن است که به‌منظور دقت بیشتر در تعیین ناحیه اثر ایستگاه‌ها از کلیه خصوصیات موثر بر سیلاب در قالب سه گروه خصوصیات فیزیکی حوضه (به‌عنوان مهمترین عوامل موثر بر سیل‌خیزی)، موقعیت جغرافیایی ایستگاه‌های هیدرومتری (به‌عنوان معیاری از شباهت خصوصیات اکولوژیکی حوضه نظیر خاک و پوشش گیاهی) و زمان‌بندی وقوع سیلاب (به‌عنوان معیاری از رفتار هیدرولوژیکی مشابه) استفاده شده است. همچنین، نوآوری این پژوهش در به‌کارگیری الگوریتم جستجوی موجودات همزیست برای بهینه‌سازی سامانه‌های فازی و استفاده از الگوریتم 'FES-SOS حاصله در پژوهش‌های هیدرولوژی می‌باشد.

**الگوریتم جستجوی موجودات همزیست<sup>۲</sup>:** این الگوریتم به‌وسیله Cheng و Prayogo (۲۰۱۴) و با شبیه‌سازی رفتار تعاملی بین موجودات در طبیعت ابداع شد. موجودات زنده برای بقا و حیات به گونه‌های دیگر تکیه کرده، لذا به‌ندرت به‌صورت انزوا زندگی می‌کنند. این رابطه مبتنی بر تکیه به یکدیگر به‌عنوان همزیستی نامیده می‌شود. واژه همزیست از یک واژه یونانی به معنای زندگی با یکدیگر الهام گرفته شده است. برای نخستین بار، De Bary (۱۸۷۸) این واژه را برای توصیف رفتار مشترک موجودات ناهمگون به‌کار برد (Sapp, ۱۹۹۴). امروزه این واژه برای توصیف رابطه بین هر دو گونه متمایز به‌کار برده می‌شود. رابطه همزیستی یا به شکل اجباری است که در آن دو موجود برای بقا به یکدیگر وابسته هستند، یا رابطه

<sup>3</sup> Mutualism<sup>4</sup> Commensalism<sup>5</sup> Parasitism<sup>1</sup> Fuzzy Expert System-Symbiotic Organism Search algorithm<sup>2</sup> Symbiosis

که در آن‌ها،  $rand(0,1)$  آرایه‌ای از اعداد تصادفی بین صفر تا یک است.

نقش  $BF_1$  و  $BF_2$  بدین‌گونه است که در طبیعت برخی روابط هم‌یاری برای یک طرف سود بیشتری دارد. به عبارت دیگر، فرد A ممکن است، در تعامل با فرد B منفعت بزرگی کسب کند، در حالی‌که فرد B تنها به اندازه کفایت و یا حتی کمتر از آن منفعت ببرد. در اینجا، عوامل منفعت ( $BF_1$  و  $BF_2$ ) به‌طور تصادفی از بین ۱ یا ۲ تعیین می‌شوند. این عوامل، بیانگر سطحی از منفعت برای هر فرد هستند، به‌طوری‌که یک فرد کاملاً یا به‌طور جزئی از این تعامل منفعت کسب می‌کند. رابطه (۳) نشان‌دهنده آرایه‌ای به نام آرایه هم‌یاری است که خصوصیات رابطه بین افراد  $X_i$  و  $X_j$  را نشان می‌دهد. بخش انتهایی معادلات (۱) و (۲) ( $X_{best} - Mutual_{vector} * BF_i$ ) بیانگر تلاش مشترک هر دو فرد دستیابی به هدف یعنی بقای بیشتر است. بر طبق نظریه تکاملی داروین، موجوداتی که بیشترین سازگاری را دارند، غالب هستند و لذا همه موجودات مجبورند تا سطح سازگاری خود با اکوسیستم را افزایش دهند. برخی از موجودات برای افزایش سازگاری از رابطه هم‌زیستی با سایر موجودات استفاده می‌کنند. مولفه  $X_{best}$  در معادلات فوق، بیانگر بیشینه سطح سازگاری است. بنابراین، از معیار  $X_{best}/global$  برای تعیین بیشینه سطح سازگاری استفاده می‌شود که به‌عنوان هدف نهایی یعنی افزایش سازگاری هر دو فرد در نظر گرفته می‌شود. در نهایت، افراد تنها در صورتی‌که سطح سازگاری جدید آن‌ها بهتر از سطح سازگاری قبل از رابطه تعاملی باشد، روزرسانی می‌شوند.

**مرحله کمال‌گرایی:** یک مثالی از کمال‌گرایی رابطه بین ماهی چسبیده و کوسه است. این ماهی به سطح بدن کوسه چسبیده و از باقی‌مانده غذا استفاده می‌کند و بدین‌ترتیب از این رابطه منفعت می‌برد. در حالی‌که در این رابطه منفعتی نصیب کوسه نمی‌شود. مشابه با مرحله هم‌گرایی، یک فرد  $X_j$  به‌طور تصادفی از اکوسیستم انتخاب می‌شود تا با فرد  $X_i$  ارتباط تعاملی برقرار کند. در این شرایط، موجود  $X_j$  تلاش می‌کند تا از این رابطه منفعت ببرد. با این وجود، موجود  $X_j$  به‌تنهایی از این رابطه نه سودی و نه زیان می‌برد.

راه‌حل دنبال می‌کنند تا یک نسل جدید از راه‌حل را برای نسل بعد فراهم کنند. به‌عنوان مثال، در الگوریتم ژنتیک از دو عملگر ترکیب<sup>۱</sup> و جهش<sup>۲</sup> می‌توان نام برد. در الگوریتم SOS نسل جدید، راه‌حل با تقلید از تعامل بیولوژیکی بین دو موجود زنده در اکوسیستم مدیریت می‌شود. سه مرحله که مدل تعامل بیولوژیکی دنیای واقعی را شبیه‌سازی می‌کند، شامل مرحله هم‌یاری، مرحله کمال‌گرایی و مرحله انگلی هستند (شکل ۲).

ویژگی تعامل دو فرد بیانگر قاعده اصلی هر مرحله است. سود دو طرفه در مرحله هم‌یاری، سود یک طرف و عدم تاثیرپذیری مثبت یا منفی طرف دیگر در مرحله کمال‌گرایی و در نهایت سود یک طرف و زیان طرف دیگر در مرحله انگلی ویژگی اصلی این مراحل است. هر موجود زنده به‌طور تصادفی با موجودات زنده دیگر و در تمامی مراحل تعامل دارد. این فرایند تکرار می‌شود تا جایی‌که معیار خاتمه فرایند محقق شود.

**مرحله هم‌یاری:** یک مثالی از هم‌یاری که هر دو طرف رابطه سود می‌برند، رابطه بین زنبور و گل است. زنبورها روی گل‌ها پرواز کرده و شیره آن‌ها را مکیده تا به عسل تبدیل می‌کنند. این نوعی فعالیت با هدف سود رساندن به زنبور است. این کار همچنین به گل‌ها سود می‌رساند، زیرا باعث پراکنش گرده‌های گل و به‌عبارتی دیگر، گرده‌افشانی گل‌ها می‌شود. این مرحله از الگوریتم SOS تقلیدکننده چنین رابطه هم‌یاری است. در این الگوریتم،  $X_i$  موجودی است که با عضو  $j$  ام اکوسیستم جفت می‌شود. موجود دیگر،  $X_j$  در این اکوسیستم به‌طور تصادفی انتخاب می‌شود تا با موجود قبلی تعامل برقرار کند. هر دو عضو منتخب با هدف افزایش منفعت هم‌یاری در بقا در اکوسیستم با یکدیگر رابطه هم‌یاری برقرار می‌کنند. راه‌حل‌های جدید برای  $X_i$  و  $X_j$  بر اساس هم‌یاری این دو عضو و طبق رابطه زیر محاسبه می‌شود.

$$X_{i\_new} = X_i + rand(0,1) * (X_{best} - Mutual\_Vector * \llbracket BF \rrbracket_{-1}) \quad (2)$$

$$X_{j\_new} = X_j + rand(0,1) * (X_{best} - Mutual\_Vector * \llbracket BF \rrbracket_{-2}) \quad (3)$$

$$Mutual_{vector} = \frac{X_i + X_j}{2} \quad (4)$$

<sup>1</sup> Crossover

<sup>2</sup> Mutation

از شمال در این حوضه نفوذ می‌کند. دمای هوا از بیشینه ۴۵ درجه سانتی‌گراد در پایاب گرگان‌رود و خلیج میان‌کاله تجاوز کرده، کمینه آن به ۲۰- درجه سانتی‌گراد در ارتفاعات آذربایجان غربی می‌رسد. رطوبت نسبی نیز بین ۱۸ تا ۹۸ درصد در طول شبانه روز و فصول مختلف متغیر است. متوسط بارندگی از ۱۷۶۰ میلی‌متر در بندر انزلی تا کمتر از ۲۰۰ میلی‌متر در پایاب اترک و ساحل رودخانه ارس متغیر است. تعداد ۶۱ زیرحوضه منتهی به ایستگاه هیدرومتری در منطقه برای مطالعه انتخاب شد که مشخصات آن‌ها در گزارش "مطالعات آب‌های سطحی حوزه آبخیز دریای مازندران" (JAMAB, ۲۰۱۱) آورده شده است (جدول ۱).

**روش پژوهش:** در این پژوهش، از مفهوم ناحیه اثر (Burn, ۱۹۹۰) برای یافتن حوضه‌های همگن با حوضه مورد نظر استفاده شده است (شکل ۴). بدین ترتیب که نخست داده‌های ورودی (شامل متغیرهای موثر بر سیلاب) و خروجی (همگنی حوضه‌های آبخیز) تعیین و سپس نرمالیزه شده و به‌عنوان ورودی در سامانه فازی (از نوع ممدانی) استفاده می‌شود.

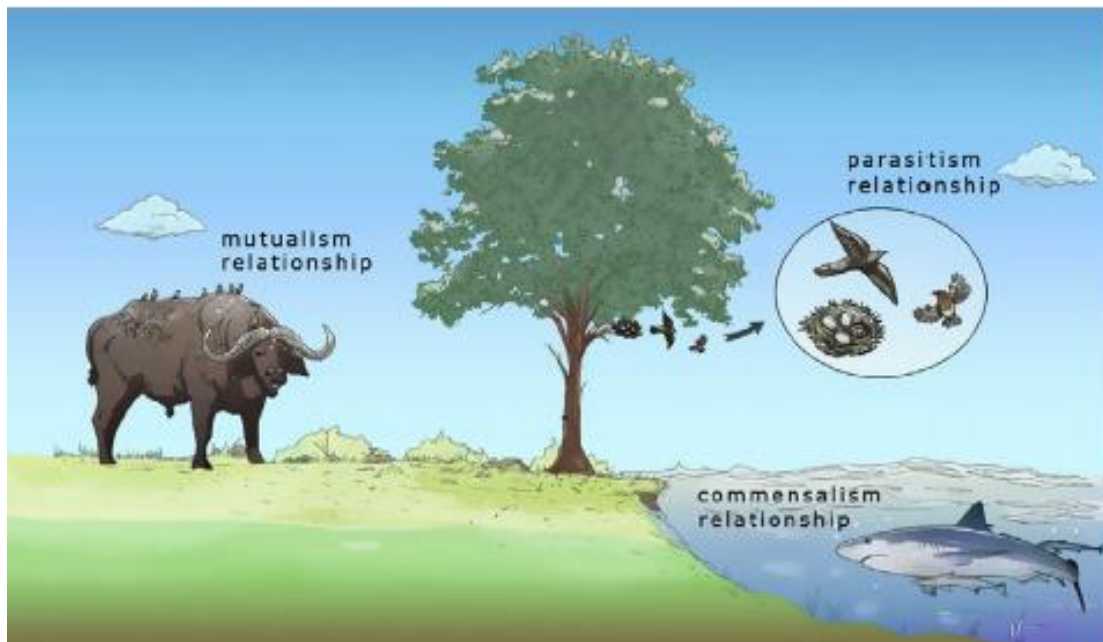
راه‌حل منتخب جدید طبق هم‌زیستی متقابل بین افراد  $X_i$  و  $X_j$  با استفاده از رابطه (۵) محاسبه می‌شود.

$$X_{i_{new}} = X_i + rand(-1, 1) * (X_{best} - X_j) \quad (5)$$

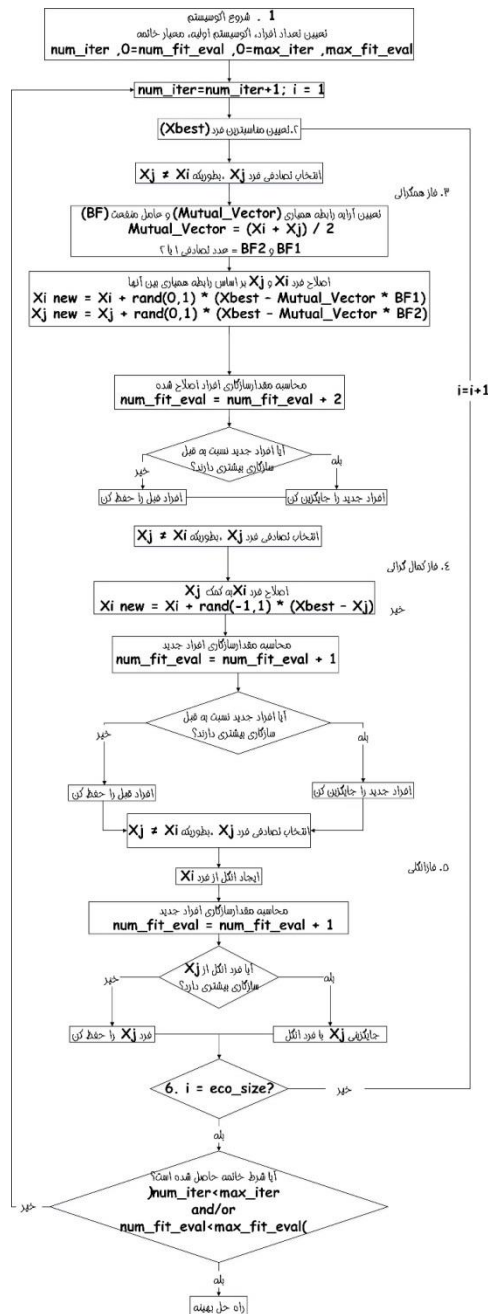
هدف از پژوهش حاضر، بررسی کارایی الگوریتم موجودات هم‌زیست در تعیین نواحی همگن حوزه آبخیز دریای مازندران است. یافته‌های این پژوهش می‌تواند در مدل‌سازی منطقه‌ای سیلاب این حوضه مورد استفاده قرار گیرد.

### مواد و روش‌ها

**منطقه مورد پژوهش:** حوزه آبخیز دریای مازندران با وسعت تقریبی ۱۷۴۶۱۸۰۰ هکتار در شمال کشور واقع بوده، از شمال به رودخانه اترک، دریای مازندران و رودخانه ارس، از جنوب به رشته کوه البرز، از شرق به استان خراسان و از غرب به مرز مشترک ایران-ترکیه محدود می‌شود (شکل ۳). تغییرات ارتفاعی حوضه بسیار زیاد بوده و از ۲۷- متر از سطح دریاهای آزاد در سطح دریای مازندران تا ۵۶۷۱ متر در قله دماوند متغیر است. از لحاظ اقلیمی این حوضه به‌شدت تحت تاثیر دریای مازندران بوده ضمن آن‌که جریان‌های مدیترانه‌ای از شمال غرب و آسیای مرکزی



شکل ۱- شمایی از یک اکوسیستم با موجودات هم‌زیست (Prayogo و Cheng, ۲۰۱۴)



شکل ۲- فلوجارت الگوریتم جستجوی موجودات همزیست (Prayogo و Cheng، ۲۰۱۴)

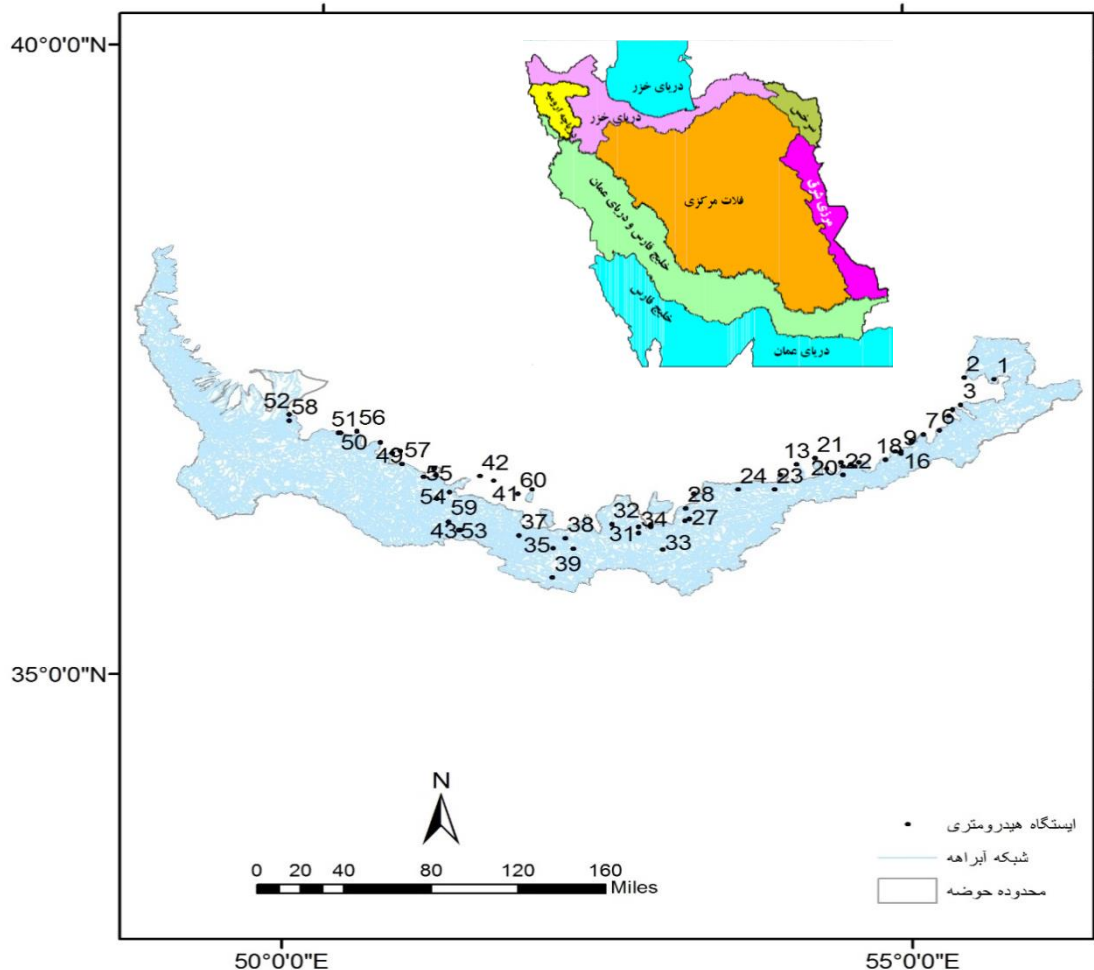
برای ارزیابی سامانه و توقف آن در نقطه بهینه از معیار ناهمگنی گشتاور خطی<sup>۳</sup>، پیشنهاد شده به وسیله Hosking و Wallis (۱۹۹۷) استفاده شده است، به طوری که مقدار  $H1 < 1$  بیانگر همگنی منطقه،  $1 \leq H1 < 2$  منطقه احتمالاً ناهمگن و  $H1 \geq 2$  منطقه ناهمگن است.

پارامترهای سامانه فازی نظیر توابع عضویت پارامترهای ورودی و خروجی، متغیرهای زبانی سامانه فازی<sup>۱</sup> (طبق تابع گوسن) و قواعد فازی<sup>۲</sup> (جدول ۲) تعریف و سامانه راه اندازی می شود. به منظور بهینه سازی پارامترهای توابع عضویت، از الگوریتم جستجوی موجودات همزیست (SOS) استفاده شده است.

<sup>3</sup> Heterogeneity (H)

<sup>1</sup> Linguistic variables

<sup>2</sup> Rules



شکل ۳- موقعیت جغرافیایی ایستگاه‌های مورد مطالعه

جدول ۱- دامنه ویژگی‌های حوزه‌های مورد مطالعه

RS	MRL	S	ME	MxE	MnE	P	A	ویژگی
۰/۰۲	۴/۴۵	۱۴/۶۸	۲۵۴/۵	۸۴۱	۰	۱۶	۱۳	کمینه
۰/۳۸	۱۱۰/۶	۵۷	۳۱۳۵	۴۷۴۸	۲۱۰۸	۲۷۷	۱۸۴۵	بیشینه
P	CC	CR	G	SF	FF	W	LL	ویژگی
۳۹۵	۰/۳۵	۰/۰۶	۰/۳۵	۰/۵۸	۰/۱۷	۲/۳	۵/۵	کمینه
۱۲۸۱	۳/۹۸	۸/۱۶	۳/۹۵	۵/۸۹	۱/۰۸	۸۶	۱۱۳/۹	بیشینه

A مساحت حوزه (کیلومتر مربع)، P محیط (کیلومتر)، MnE ارتفاع کمینه حوزه (متر)، MxE ارتفاع بیشینه حوزه (متر)، ME ارتفاع متوسط حوزه (متر)، S شیب متوسط حوزه (درصد)، MRL طول آبراهه اصلی (کیلومتر)، RS شیب آبراهه اصلی (درصد)، LL طول مستطیل معادل (کیلومتر)، W عرض مستطیل معادل (کیلومتر)، FF عامل فرم حوزه، SF ضریب شکل حوزه، G ضریب گراولپوس، CR ضریب گردی حوزه، CC ضریب فشردگی حوزه و P بارش متوسط سالیانه (میلی‌متر)

ایستگاه‌های هیدرومتری  $G_{ij}$  تعریف شده است. ویژگی‌های حوزه‌های آبخیز در رابطه زیر به کار گرفته شده تا شباهت حوزه‌ها از لحاظ خصوصیات فوق به دست آید.

$$C_{ij} = \sqrt{\frac{1}{2} \left( \frac{\ln C_{1i} - \ln C_{1j}}{\sigma(\ln C_1)} \right)^2 + \left( \frac{\ln C_{2i} - \ln C_{2j}}{\sigma(\ln C_2)} \right)^2 + \left( \frac{\ln C_{3i} - \ln C_{3j}}{\sigma(\ln C_3)} \right)^2} \quad (۶)$$

تبدیل خروجی سامانه به غیر فازی از نوع مرکزی<sup>۱</sup> است، زیرا این روش متداول‌ترین روش مورد استفاده است (Wang, ۲۰۰۹؛ Caniani و همکاران، ۲۰۱۵؛ Karamouz و همکاران، ۲۰۱۲). در این پژوهش، سه نوع ورودی با نام‌های ویژگی‌های حوزه  $C_{ij}$ ، فصل‌بندی سیلاب  $S_{ij}$  و موقعیت جغرافیایی

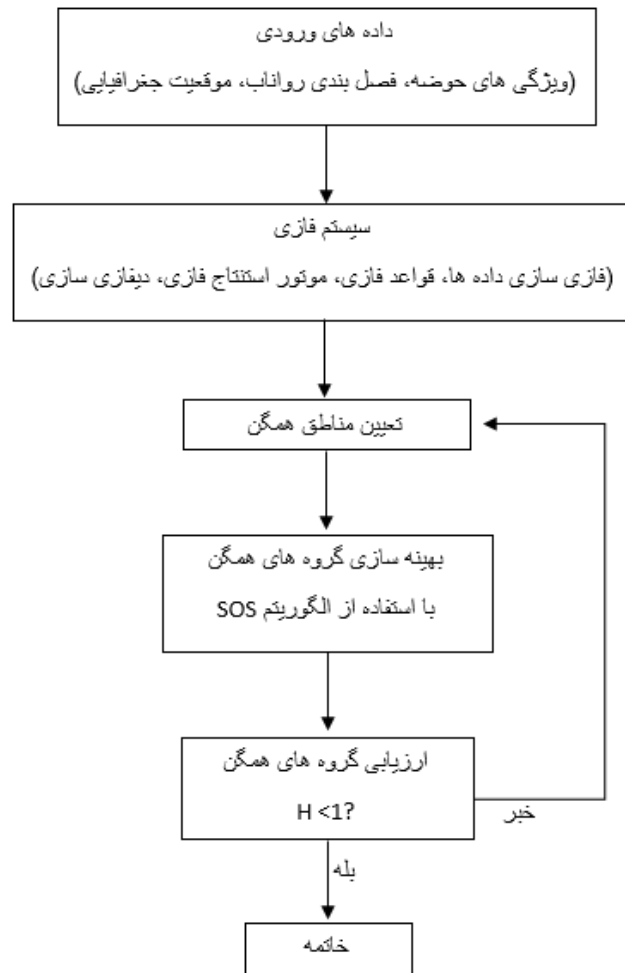
<sup>۱</sup> Centroid

$$G_i = \sqrt{(E_i - E_j)^2 + (N_i - N_j)^2} \quad (7)$$

که در آن،  $i$  و  $j$  حوضه‌ها، ۱، ۲ و ۳ ویژگی‌های منتخب حوضه‌های آبخیز،  $ln$  لگاریتم در پایه نپرین و  $\sigma$  انحراف معیار می‌باشد. فاصله جغرافیایی بین حوضه‌ها از رابطه زیر به دست می‌آید.

که در آن،  $E$  و  $N$  به ترتیب اشاره به مختصات شرقی و شمالی مرکز ثقل حوضه دارد. فصل‌بندی سیلاب طبق رابطه زیر با تبدیل تاریخ وقوع به زاویه وتر دایره نمایش داده می‌شود.

که در آن،  $i$  و  $j$  حوضه‌ها، ۱، ۲ و ۳ ویژگی‌های منتخب حوضه‌های آبخیز،  $ln$  لگاریتم در پایه نپرین و  $\sigma$  انحراف معیار می‌باشد. فاصله جغرافیایی بین حوضه‌ها از رابطه زیر به دست می‌آید.



شکل ۴- فلوجارت روش پژوهش

جدول ۲- قواعد تعریف شده در سیستم فازی

قانون ۱: اگر $c=S$ ، در نتیجه $h=H$	قانون ۴: اگر $g=S$ ، در نتیجه $h=H$	قانون ۷: اگر $s=S$ ، در نتیجه $h=H$
قانون ۲: اگر $c=M$ ، در نتیجه $h=M$	قانون ۵: اگر $g=M$ ، در نتیجه $h=M$	قانون ۸: اگر $s=M$ ، در نتیجه $h=M$
قانون ۳: اگر $c=D$ ، در نتیجه $h=L$	قانون ۶: اگر $g=D$ ، در نتیجه $h=L$	قانون ۹: اگر $s=D$ ، در نتیجه $h=L$

\*  $c$ ،  $g$  و  $h$  به ترتیب ویژگی های حوضه، فصل بندی سیلاب و موقعیت جغرافیایی ایستگاه های هیدرومتری،  $H$ ،  $M$  و  $L$  به ترتیب شباهت زیاد، شباهت متوسط، عدم شباهت و  $S$ ،  $M$  و  $D$  به ترتیب شباهت زیاد یا مجاور، شباهت کم و یا نسبتاً دور، متفاوت و یا دور

آرایه ای با طول واحد و برای  $\theta_i$  نمایش داده می‌شود. مختصات میانگین زاویه وقایع سیلابی هر ایستگاه از روابط زیر به دست می‌آید.

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \cos(\theta_i) \quad (9)$$

$$\theta_i = Julian\_Date_i \left( \frac{2\pi}{365} \right) \quad (8)$$

که در آن،  $i$  مقدار زاویه یک تاریخ وقوع معین است به طوری که اول ژانویه مقدار یک و ۳۱ دسامبر عدد ۳۶۵ است. تاریخ وقوع یک سیلاب به صورت



قاعده تعریف شده یعنی آماره ناهمگنی گشتاور خطی ( $HI < 1$ ) تبعیت کند. پارامترهای توابع متغیرهای ورودی و خروجی شامل نوع، دامنه، میانگین و انحراف معیار توابع عضویت انتخاب شد. در این پژوهش، تابع عضویت به شکل گوسی که با میانگین و انحراف معیار تعریف می‌شود، انتخاب شد. این دو پارامتر به‌طور تصادفی تعیین و در حین فرایند تکراری بهبود یافت. الگوریتم SOS برای تعدیل پارامترهای فازی استفاده شد. به‌منظور خاتمه فرایند تکراری از آماره‌های گشتاور خطی هر ایستگاه یعنی میانگین، ضریب تغییرات، انحراف معیار، چولگی و کشیدگی خطی استفاده شد. مشخصات توپولوژی به‌دست آمده در این مطالعه شامل ورودی و خروجی‌های سامانه فازی در جدول ۳ آورده شده است. مطابق با مفهوم ناحیه اثر هر ایستگاه در برگزیده مجموعه انحصاری از ایستگاه‌های اطراف است، به‌طوری که از آمار و اطلاعات آن‌ها برای برآورد منطقه‌ای سیلاب استفاده می‌کند. بنابراین، تعریف ایستگاه‌های همگن متناسب با هر یک از ایستگاه‌های مورد مطالعه به‌دست آمده است (جدول ۴). یکی از ایرادات برخی از روش‌های فراابتکاری تعداد زیاد پارامترهای الگوریتم می‌باشد. مزیت الگوریتم SOS نسبت به این‌گونه الگوریتم‌ها آن است که تنها نیاز به تعیین بیشینه تعداد دفعات ارزیابی و اندازه جمعیت است. به‌عنوان نمونه فرق این الگوریتم با الگوریتم ژنتیک آن است که در فرایند ارزیابی تعداد جدیدی از فرزندان نسل جدید تولید نمی‌کند، بلکه همانند غالب الگوریتم‌های متکی به جمعیت، نخست یک جمعیت اولیه راه‌حل (به‌نام اکوسیستم اولیه) تولید و سپس در طی یک فرایند تکراری با تولید عمل‌گرایی، اقدام به یافتن راه‌حل‌های نزدیک به راه‌حل بهینه از بین راه‌حل‌های موجود (افراد یا موجودات) در فضای جستجو می‌کند. عموماً الگوریتم‌های فرا ابتکاری برای تولید نسل جدید از عمل‌گرهای خاص خود استفاده می‌کنند. مراحل هم‌باری، کمال‌گرائی و انگلی نقش عمل‌گرها را در این الگوریتم بازی می‌کنند. به‌طوری که هر فرد (یا راه‌حل) در هر سه مرحله به‌طور تصادفی با افراد (یا راه‌حل‌های) دیگر در اکوسیستم اولیه تعامل برقرار می‌کند.

$$\bar{Y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \sin(\theta_i) \quad (10)$$

بنابراین، شباهت حوضه‌ها از لحاظ زمان وقوع سیلاب با استفاده از فاصله اقلیدسی بین ایستگاه‌های مورد نظر و طبق معادله زیر به‌دست می‌آید.

$$DE_{ij} = [(\bar{X}_i - \bar{X}_j)^2 + (\bar{Y}_i - \bar{Y}_j)^2]^{0.5} \quad (11)$$

که در آن،  $DE$  فاصله اقلیدسی (عدم شباهت) بین ایستگاه  $i$  و  $j$  است.

## نتایج و بحث

در این مطالعه، ۱۶ ویژگی حوزه آبخیز شامل مساحت، محیط، کمینه، بیشینه و میانگین ارتفاع حوضه، شیب متوسط حوضه، طولانی‌ترین مسیر آبراهه اصلی، شیب متوسط آبراهه اصلی، طول و عرض حوضه، ضریب شکل حوضه، ضریب گراوایوس، ضریب گردی، ضریب فشردگی و زمان تمرکز حوضه به همراه بارش متوسط حوضه مورد مطالعه قرار گرفت. آزمون تحلیل مولفه‌های اصلی<sup>۱</sup> با روش چرخشی قائم<sup>۲</sup> و چرخش عامل وارپوماکس<sup>۳</sup> بر روی داده‌های حوضه منتهی به چهار عامل اصلی مساحت، ارتفاع، ضریب گراولویوس و ضریب شکل شد. این عوامل مجموعاً ۸۴ درصد واریانس تجمعی را پوشش داده و لذا، از آن‌ها برای مراحل بعدی همگنی استفاده شده است (Chavoshi, ۲۰۱۲). بارش متوسط حوضه نیز به‌علت ارتباط نزدیک با سیلاب به‌عنوان عامل ورودی سامانه استفاده شد. سامانه فازی با محاسبه فاصله بین ایستگاه‌ها از لحاظ معیار همگنی آغاز شد. مطابق با معادلات (۶)، (۷) و (۱۱) فاصله اقلیدسی بین هر ایستگاه با ایستگاه‌های مجاور در فضای سه متغیر همگنی مورد بررسی یعنی به‌ترتیب پارامترهای فیزیکی، مجاورت جغرافیایی و فصل‌بندی سیلاب، محاسبه شد. توابع عضویت اولیه به‌وسیله تولباکس فازی در متلب به‌دست آمد. برای هر پارامتر، سه تابع عضویت تعریف شد که بیانگر سه سطح از احتمال عضویت یعنی کم، متوسط و زیاد است. تعیین دامنه سطح احتمال برای هر یک از سطوح عضویت نام‌برده به‌وسیله الگوریتم SOS انجام می‌گیرد، به‌نحوی که از

<sup>1</sup> Principle component analysis

<sup>2</sup> Orthogonal rotation

<sup>3</sup> Variomax factor rotation

جدول ۳- مشخصات توپولوژی سیستم فازی به دست آمده

متغیر	شبهات	تابع	دامنه	مقدار پارامترها
ویژگی حوضه	(ورودی) S	گوسن	۱-۰	[۰,۰۳۶۸,۰۰۰]
	M	گوسن	۱-۰	[۰,۱۵۳۳,۰۰۵,۰]
	D	گوسن	۱-۰	[۰,۱۰۱۰,۱۰,۰]
موقعیت جغرافیایی	(ورودی) S	گوسن	۱-۰	[۰,۱۹۰۷,۰۰۰]
	M	گوسن	۱-۰	[۰,۳۰۰۹,۰۰۵,۰]
	D	گوسن	۱-۰	[۰,۴۹۲۶,۱۰,۰]
فصل بندی سیل	(ورودی) C	گوسن	۱-۰	[۰,۱۷۸۹,۰۰۰]
	M	گوسن	۱-۰	[۰,۰۱۰,۰۵,۰]
	F	گوسن	۱-۰	[۰,۱۵۶۶,۱۰,۰]
همگنی	(خروجی) H	گوسن	۱-۰	[۰,۴۰۹۸,۰۰۰]
	M	گوسن	۱-۰	[۰,۰۱۰,۰۵,۰]
	L	گوسن	۱-۰	[۰,۰۵۰۵,۱۰,۰]

و تعیین قطعی عضویت نهایی هر حوضه به گروه همگن متناسب، مجموعه‌ای از نه قاعده فازی تعریف شد. با توجه به این که مفهوم ناحیه اثر به عنوان رهیافت منطقه‌ای کردن حوضه‌ها در نظر گرفته شد، به تعداد حوضه‌های مورد مطالعه گروه‌های همگن به دست آمد.

به عبارت دیگر، برای هر حوضه، مجموعه‌ای از حوضه‌های همگن در فضای شبهات سه متغیر فیزیکی، مجاورت جغرافیایی و فصل بندی سیلاب به دست آمد. کارایی مدل تلفیقی حاصله برای گروه‌های همگن با استفاده از آماره ناهمگنی گشتاور خطی بررسی شد. نتایج حاصله بیانگر پتانسیل این روش در منطقه‌ای کردن حوضه‌های آبخیز با روش ناحیه اثر است. پراکنش جغرافیایی ناحیه اثر ایستگاه‌ها (ایستگاه‌های همگن با ایستگاه هدف) نشان می‌دهد که مجاورت جغرافیایی الزاما دلالت بر همگنی حوضه‌ها ندارد (شکل ۳ و جدول ۴). با توجه به توسعه روزافزون الگوریتم‌های بهینه‌سازی پیشنهاد می‌شود تا در پژوهش‌های آینده از آن‌ها به عنوان جایگزین الگوریتم SOS برای بهینه‌سازی سامانه‌های فازی استفاده شود و نتایج حاصله با الگوریتم FES-SOS مقایسه شود.

در مرحله شبیه‌سازی هم‌یاری هر دو راه‌حل منتخب بهبود می‌یابند. در مرحله شبیه‌سازی کمال‌گرایی، یک فرد بهبود می‌یابد، در حالی که فرد دیگر تغییری نمی‌کند. مرحله انگلی بدین شکل شبیه‌سازی می‌شود که یک راه‌حل بهبود یافته جایگزین راه‌حل دیگری می‌شود که زیان دیده و حذف می‌شود. روش تلفیقی FES-SOS برای تعیین مناطق همگن حوضه‌های واقع در جنوب دریای خزر استفاده شد. مجموعه‌ای از کلیه صفات موثر بر سیلاب شامل مشخصات فیزیکی حوضه (به عنوان عوامل موثر بر سیلاب)، مجاورت جغرافیایی به عنوان معیاری از همگنی خاک، پوشش گیاهی و شرایط اکولوژیکی حوضه‌های مورد مطالعه) و فصل بندی سیلاب (به عنوان شاخصی از رفتار مشابه هیدرولوژیکی حوضه‌های آبخیز) استفاده شد تا در برگیرنده مجموعه‌ای از عوامل فیزیکی، جغرافیایی و اکولوژیکی باشد. به جای استفاده از روش‌های کلاسیک، گروه بندی و تفکیک حوضه‌ها در قالب گروه‌های همگن مرزهای مشخص، از روش فازی استفاده شد، به طوری که هر حوضه با سطحی معین از احتمال عضویت در همه گروه‌های همگن در نظر گرفته می‌شود. به منظور تعیین دقیق معیار همگنی حوضه‌ها

جدول ۴- ایستگاه‌های همگن طبق روش ناحیه اثر

ردیف	ایستگاه	ایستگاه‌های همگن (بر حسب شماره ردیف)
۱	۱۲۰۰۱	۲,۳,۴,۵,۶,۱۸,۷,۸,۱۷,۹,۱۶,۱۹,۱۵,۵۳,۵۹,۱۰,۴۳,۲۰,۱۲
۲	۱۲۰۰۵	۳,۴,۵,۱,۱۰,۲۰,۶,۱۳,۷,۲۳,۱۸,۸,۹,۲۱,۱۶,۳۹
۳	۱۲۰۰۷	۴,۵,۲,۶,۱۸,۱۰,۷,۱,۸,۲۳,۲۰,۹,۱۶,۱۳,۱۷,۳۹
۴	۱۲۰۱۳	۵,۳,۶,۷,۱۸,۸,۱,۲,۱۶,۹,۱۷,۱۹,۱۰,۳۰,۱۲,۱۵,۱۱,۲۰
۵	۱۲۰۱۵	۴,۷,۶,۳,۸,۱۸,۹,۱۶,۱۷,۱,۲,۱۹,۱۰,۱۵,۱۲,۲۰,۱۱,۵۳,۳۰
۶	۱۲۰۱۷	۷,۵,۴,۱۸,۸,۳,۹,۱۶,۱۷,۱۱,۱,۱۰,۲,۲۰,۱۹,۱۵,۲۲,۳۰
۷	۱۲۰۲۱	۹,۱۶,۸,۵,۶,۱۷,۴,۱۱,۱۰,۳,۱۹,۱۵,۱۸,۲۰,۲۲,۱۲
۸	۱۲۰۲۷	۹,۱۶,۱۷,۷,۵,۶,۱۱,۱۰,۴,۱۹,۱۵,۲۰,۳,۲۲,۱۲,۲۱
۹	۱۲۰۲۹	۱۶,۸,۷,۱۷,۱۰,۵,۶,۱۹,۱۵,۴,۲۰,۱۱,۲۸,۲۲,۱۲
۱۰	۱۲۰۳۵	۱۵,۱۹,۱۱,۲۲,۲۰,۱۷,۱۲,۲۱,۱۶,۹,۸,۲۳
۱۱	۱۲۰۴۳	۲۲,۱۲,۱۹,۲۰,۱۰,۱۵,۲۱,۲۳,۱۳,۲۴,۷,۸
۱۲	۱۲۰۴۵	۲۲,۲۱,۱۱,۱۳,۲۰,۲۳,۱۵,۱۹,۲۴,۱۰,۱۴
۱۳	۱۲۰۴۹	۲۱,۱۴,۲۴,۱۲,۲۳,۲۰,۱۱,۲۲,۱۵,۱۹,۱۰
۱۴	۱۲۰۵۳	۱۳,۲۴,۲۳,۲۱,۲۸,۱۲,۲۲,۲۰,۱۱,۲۷
۱۵	۱۲۰۶۲	۲۰,۱۰,۱۹,۱۱,۲۲,۱۲,۲۱,۲۳,۱۷,۱۳,۱۶,۲۴
۱۶	۱۲۰۷۱	۹,۸,۱۷,۷,۱۹,۱۰,۵,۱۵,۴,۶,۱۸,۱۲,۱۱,۲۰,۲۲,۲۱
۱۷	۱۲۰۷۳	۱۶,۹,۸,۱۰,۷,۱۹,۱۵,۲۰,۱۱,۵,۲۲,۱۲,۶,۲۱,۴
۱۸	۱۲۰۸۳	۶,۵,۴,۳,۱۶,۷,۱۹,۱,۹,۸,۲,۱۷,۱۵,۱۲,۵۳,۳۰,۱۰,۱۱
۱۹	۱۲۰۸۵	۱۰,۱۱,۱۵,۲۲,۲۰,۱۲,۱۶,۱۷,۲۱,۲۳,۹,۱۳
۲۰	۱۲۰۸۹	۱۵,۱۱,۱۰,۱۲,۲۱,۲۲,۱۹,۱۳,۲۳,۲۴,۱۷
۲۱	۱۲۰۹۵	۱۳,۱۱,۲۰,۲۲,۲۳,۲۴,۱۴,۱۲,۱۰,۱۹,۱۷
۲۲	۱۲۲۱۲	۱۱,۱۲,۱۹,۲۰,۱۵,۲۱,۱۰,۲۳,۱۳,۲۴,۱۴
۲۳	۱۳۰۰۵	۲۴,۱۲,۲۱,۱۳,۲۲,۱۱,۱۴,۱۵,۱۹,۱۰,۲۸
۲۴	۱۳۰۰۹	۲۳,۱۴,۱۳,۲۱,۲۲,۱۱,۱۲,۲۸,۱۹,۱۰,۲۷
۲۵	۱۳۰۱۷	۲۶,۳۰,۲۷,۲۸,۲۹,۳۱,۳۳
۲۶	۱۳۰۲۱	۳۰,۲۵,۲۹,۳۲,۳۱,۳۳
۲۷	۱۳۰۲۳	۲۸,۲۵,۱۴,۲۶,۳۰,۲۴,۶۰,۲۹
۲۸	۱۳۰۲۷	۲۷,۱۴,۲۵,۲۴,۲۹,۳۳,۱۳,۹
۲۹	۱۴۰۰۱	۳۳,۳۰,۳۱,۲۶,۳۴,۲۸
۳۰	۱۴۰۰۵	۲۶,۲۹,۳۱,۳۳,۳۴,۲۵
۳۱	۱۴۰۱۱	۳۴,۳۳,۳۲,۳۹,۲۹,۳۰
۳۲	۱۴۰۱۵	۳۹,۳۴,۳۱,۲۶,۳۳,۶۱
۳۳	۱۴۰۲۱	۳۱,۳۴,۲۹,۳۰,۳۲,۳۹
۳۴	۱۴۰۷۱	۳۱,۳۲,۳۳,۳۹,۳۰,۲۹
۳۵	۱۵۰۰۹	۳۶,۳۸,۶۰,۳۷,۶۱,۳۹
۳۶	۱۵۰۱۱	۳۵,۳۸,۶۰,۳۹,۳۷
۳۷	۱۵۰۱۳	۳۸,۶۱,۶۰,۴۳,۵۳,۳۵,۳۶
۳۸	۱۵۰۱۵	۳۷,۶۰,۶۱,۳۵,۳۶,۴۳,۵۳
۳۹	۱۵۰۲۷	۳۲,۳۴,۳۱,۳۶,۳۳
۴۰	۱۶۰۰۷	۶۰,۶۱,۴۱,۵۵,۴۲,۴۵,۴۷,۴۶,۵۶,۳۶,۳۹
۴۱	۱۶۰۰۹	۴۲,۶۱,۴۰,۶۰,۴۵,۴۶,۵۷,۵۴,۵۵,۲۶,۵۳,۴۹,۳۶
۴۲	۱۶۰۱۱	۴۱,۴۵,۴۶,۵۴,۶۱,۵۵,۴۰,۶۰,۵۷,۵۸,۴۷,۵۲,۵۶,۵۳
۴۳	۱۶۰۱۷	۵۳,۵۹,۳۷,۵۴,۶۱,۴۴,۳۸,۶۰,۴۱,۳۵
۴۴	۱۶۰۲۳	۵۴,۵۹,۴۳,۵۳,۳۵,۴۸,۳۶,۶۱,۳۷,۴۱,۳۸

ادامه جدول ۴- ایستگاه‌های همگن طبق روش ناحیه اثر

ردیف	ایستگاه	ایستگاه‌های همگن (بر حسب شماره ردیف)
۴۵	۱۶۰۳۳	۴۶,۵۵,۵۴,۴۲,۵۷,۴۷,۴۱,۵۲,۴۰,۴۸,۵۸,۴۹,۶۱,۵۶,۴۴,۵۳
۴۶	۱۶۰۳۵	۴۵,۵۴,۵۵,۴۲,۵۷,۴۷,۴۱,۵۲,۴۸,۴۹,۴۰,۶۱,۵۸,۵۶,۵۳
۴۷	۱۶۰۴۷	۵۷,۴۸,۴۹,۵۵,۴۶,۵۶,۴۵,۵۴,۵۱,۴۰,۵۰,۴۲,۵۸,۵۲,۴۱,۴۴,۶۱
۴۸	۱۶۰۴۹	۴۹,۵۷,۵۱,۵۰,۴۷,۵۵,۵۶,۴۵,۴۶,۵۴,۶۱,۵۸,۵۲,۴۲,۱۴,۵۳,۲۴
۴۹	۱۶۰۵۱	۴۸,۵۶,۵۱,۴۷,۵۷,۵۰,۵۵,۴۶,۴۵,۵۸,۵۲,۵۴,۴۱,۴۲,۲۶,۴۴,۵۳,۵۹
۵۰	۱۶۰۵۵	۵۱,۴۸,۴۹,۵۸,۵۲,۵۷,۴۶,۴۵,۵۴,۶۰,۵۶,۵۵,۴۷,۲۴,۲۱
۵۱	۱۶۰۵۹	۵۶,۴۹,۵۰,۴۸,۵۸,۵۲,۴۷,۵۷,۵۵,۴۶,۴۵,۴۴,۵۴,۴۲,۴۱,۵۹,۵۳,۲۶
۵۲	۱۶۰۶۳	۵۸,۵۰,۵۱,۵۶,۴۶,۴۵,۴۹,۵۷,۴۸,۵۵,۴۲,۴۷,۴۰,۴۱,۵۴,۲۶
۵۳	۱۶۰۷۹	۴۳,۵۹,۳۷,۵۴,۶۱,۴۴,۴۱,۳۸,۶۰,۳۵
۵۴	۱۶۰۸۵	۴۴,۴۸,۵۳,۴۱,۶۱,۵۷,۵۹,۳۸,۴۲,۶۰,۴۵,۵۵,۴۳,۳۷
۵۵	۱۶۰۸۹	۵۴,۴۵,۴۶,۴۷,۵۷,۴۲,۴۸,۵۶,۴۰,۴۹,۴۱,۵۸,۵۲,۵۱,۶۱
۵۶	۱۶۰۹۱	۵۱,۴۹,۴۸,۵۰,۴۷,۵۷,۵۵,۵۸,۵۲,۴۵,۴۶,۴۰,۴۲,۵۴,۴۴,۴۱,۵۹
۵۷	۱۶۲۰۳	۴۷,۴۸,۵۵,۴۶,۴۹,۴۵,۵۴,۵۶,۵۱,۴۱,۵۰,۴۲,۵۲,۵۸,۲۶,۴۴,۶۱
۵۸	۱۶۲۰۵	۵۲,۵۰,۵۱,۵۶,۴۹,۴۵,۴۲,۵۵,۴۸,۴۷,۵۷,۴۶,۴۰,۲۶
۵۹	۱۶۲۰۹	۴۴,۵۴,۵۳,۴۳,۳۷,۶۱,۴۱,۳۸,۴۸,۶۰,۵۷,۴۲,۴۵
۶۰	۱۶۲۱۱	۶۱,۴۱,۴۲,۳۹,۵۳,۳۲,۴۰,۲۷,۳۶
۶۱	۱۶۵۰۷	۶۰,۴۰,۴۱,۴۲,۳۶,۳۲,۵۳,۴۸,۵۴,۴۵,۴۶,۳۵

## نتیجه‌گیری

پژوهش‌های متعددی در زمینه بررسی همگنی حوزه‌های آبخیز در این منطقه انجام گرفته است که عمدتاً متکی به روش‌های کلاسیک است و در نهایت گروه‌های همگن و مجزا از حوضه‌های همگن ارائه شده است. در این پژوهش، از مفهوم گروه‌بندی مبتنی بر منطق فازی استفاده شد که در آن، هر حوضه دارای احتمال عضویت در هر یک از گروه‌ها را دارد. با توجه به این‌که درجه احتمال عضویت هر حوضه در نواحی همگن متفاوت است و به‌منظور یافتن بهترین گروه‌های همگن از الگوریتم جستجوی موجودات هم‌زیست استفاده شده است. در این راستا، به‌منظور یافتن حوضه‌هایی که شباهت رفتار هیدرولوژیک قابل قبولی داشته باشد، معیاری از ناهمگنی ایستگاه‌ها مبتنی بر آماره‌های ناهمگنی گشتاور خطی به‌کار گرفته شد که به موجب آن دامنه ناحیه اثر هر ایستگاه به‌دست آمد. با توجه به این‌که هیچگونه روش و همچنین، پارامترهای منحصر به فردی برای تعیین حوضه‌های همگن وجود ندارد، کارشناسان مختلف از شیوه‌های گوناگون استفاده کرده و پارامترهای مختلفی را به‌کار برده‌اند تا به نتایج بهتری برسند. این پژوهش، با استفاده از مهمترین ویژگی‌های حوضه در

سه قالب موقعیت جغرافیایی (به‌عنوان معیاری از همگنی خاک، پوشش گیاهی و شرایط اکولوژیکی حوضه‌های مورد مطالعه)، خصوصیات فیزیکی حوضه‌های آبخیز (به‌عنوان عوامل موثر بر سیلاب) و فصل‌بندی وقوع سیلاب (به‌عنوان شاخصی از رفتار مشابه هیدرولوژیکی حوضه‌های آبخیز) انجام شده است و لذا، مناطق همگن حاصله در برگزیده بیشینه شباهت هیدرولوژیکی می‌باشد. از بین عوامل فیزیکی حوضه، مساحت، ارتفاع متوسط حوضه، ضریب شکل و ضریب گراولوس به همراه بارندگی متوسط حوضه به‌عنوان مهمترین عوامل مرتبط با سیلاب است که با مطالعات قبلی در منطقه هماهنگی دارد. پراکنش جغرافیایی ناحیه اثر ایستگاه‌ها (ایستگاه‌های همگن با ایستگاه هدف) نشان می‌دهد که مجاورت جغرافیایی الزاماً دلالت بر همگنی حوضه‌ها ندارد. متأسفانه پژوهش‌های گذشته گزارشی از حوضه‌های نهایی در هر گروه همگن ارائه نداده است و لذا، امکان مقایسه نتایج آن‌ها با این پژوهش میسر نیست.

با توجه به توسعه روز افزون الگوریتم‌های فرا ابتکاری برای حل مسائل پیچیده و غیرخطی پیشنهاد می‌شود تا در پژوهش‌های آینده از سایر الگوریتم‌ها به‌جای SOS برای بهینه‌سازی سامانه‌های فازی

اقلیمی مرتبط با سیلاب نظیر دما و تبخیر پیشنهاد می‌شود تا در مطالعات آینده از این عوامل نیز برای گروه‌بندی حوزه‌های همگن استفاده شود.

استفاده و نتایج حاصله با نتایج این پژوهش مقایسه شود. در این راستا و با توجه به نقش موثر عوامل زمینی نظیر کاربری اراضی، گروه‌های هیدرولوژیک خاک و ضریب رواناب سطحی و همچنین، سایر عوامل

#### منابع مورد استفاده

1. Abdolhay, A. 2008. Comparison of hydrological homogenization methods for development of flood regional models. MSc Thesis, University Putra Malaysia, 121 pages.
2. Ahani, A., S. Emamgholizadeh, S. Mousavi Nadoushani and Kh. Azhdari. 2015. Regional flood frequency analysis by hybrid cluster analysis and l-moments. *Journal of Watershed Management Research*, 6(12): 11-20 (in Persian).
3. Bozorg-Haddad, O. and A. Azarnivand. 2017. Optimal operation of reservoir systems with the symbiotic organisms search SOS algorithm. *Journal of Hydroinformatics*, 20(3): 1-14.
4. Burn, D.H. 1990. An appraisal of the region of influence approach to flood frequency analysis. *Hydrological Science Journal*, 35: 149-165.
5. Caniani, D., D.S. Lioi, I.M. Mancini and S. Masi. 2015. Hierarchical classification of groundwater pollution risk of contaminated sites using fuzzy logic, a case study in the Basilicata region Italy. *Water*, 7(5): 2013-2036.
6. Chavoshi, S., W.N. Azmin Sulaiman, B. Saghafian, M.D. Sulaiman and L.A. Manaf. 2012. Soft and hard clustering methods for delineation of hydrological homogeneous regions in the southern strip of the Caspian Sea Watershed. *Journal of Flood Risk Management*, 5(4): 282-294.
7. Chavoshi, S., W.N. Azmin Sulaiman, B. Saghafian, M.D. Sulaiman and L.A. Manaf. 2013a. Flood prediction in southern strip of Caspian Sea Watershed. *Journal of Water Resources*, 40(6): 593-605.
8. Chavoshi, S., W.N. Azmin Sulaiman, B. Saghafian, M.D. Sulaiman and L.A. Manaf. 2013b. Regionalization by fuzzy expert system based approach optimized by genetic algorithm. *Journal of Hydrology*, 486: 271-280.
9. Chen, J. and B.J. Adams. 2006. Integration of artificial neural networks with conceptual models in rainfall-runoff modeling. *Journal of Hydrology*, 318(1-4): 232-249.
10. Cheng, M.Y. and D. Prayogo. 2014. Symbiotic organisms search: a new metaheuristic optimization algorithm. *Computers and Structures*, 139: 98-112.
11. Cigizoglu, H.K. and O. Kisi. 2005. Flow prediction by three back propagation techniques using k-fold partitioning of neural network training data. *Hydrology Research*, 36(1): 49-64.
12. Farsadnia, F., P. Haghghat Jou, H. Shamohamadi and A. Moghaddamnia. 2014. Flood regionalization of Mazandaran province's watersheds by using fuzzy clustering algorithm. *Watershed Management Science and Engineering*, 8(24): 61-65 (in Persian).
13. Hosking, J.R.M and J.R. Wallis. 1997. *Regional frequency analysis: an approach based on l-moments*. Cambridge University, 244 pages.
14. JAMAB. 2010. Surface water and sediment study of Mazandaran basin. Final Report, Ministry of Power and Energy of Iran, 182 pages (in Persian).
15. Karamouz, M., S. Nazif and M. Falahi. 2012. *Hydrology and hydroclimatology: principles and applications*. CRC Press, 740 pages.
16. Lin, Ch. 2017. A hybrid heuristic optimization approach for leak detection in pipe networks using ordinal optimization approach and the Symbiotic Organism Search. *Journal of Water*, 9(812): 1-18.
17. Mirza Hosseini, M., M. Mohseni Saravi and Gh. Zehtabian. 2010. Regional analysis of low flow by hybrid method in Mazandaran Province. *Iranian Society of Irrigation and Water Engineering*, 1(1): 1-9 (in Persian).
18. Rostami Kamrood, M., Z. Shahmohamadi Heidari, P. Haghghatjoo and A. Moghaddamnia. 2011. Regional flood frequency analysis in Golestan Basin using l-moments. *Water Resources Engineering*, 4: 39-50 (in Persian).
19. Saghafian, B. and H. Farazjoo. 2007. Prioritization of hydrologic units with respect to flood potential in Golestan Dam river basin. *Watershed Management Science and Engineering*, 1(1): 1-11 (in Persian).
20. Sapp, J. 1994. *Evolution by association, a history of symbiosis*. New York, Oxford University Press. 272 pages.
21. Sheikh, Z., A. Dehviri and F. Farsadnia. 2014. Comparison canonical kriging and linear moment's methods for regional flood frequency analysis in Mazandaran Province. *Watershed Management Science and Engineering*, 8(25): 25-39 (in Persian).

22. Talatahari, S., V.P. Singh and Y. Hassanzadeh. 2013. Ant colony optimization for estimating parameters of flood frequency distributions. *Metaheuristics in Water, Geotechnical and Transport Engineering*, 121-146.
23. Wang, Y.M. 2009. Centroid defuzzification and the maximizing set and minimizing set ranking based on alpha level sets. *Computers and Industrial Engineering*, 57: 228-236.