

پیش‌بینی آورد آبی رودخانه‌ی گرگانرود با استفاده از روش‌های ترکیبی آنتروپی تقریبی و شبکه‌های عصبی مصنوعی

مرتضی زنگانه* (استادیار)

گروه مهندسی عمران، دانشکده‌ی فنی و مهندسی، پژوهشکده مخاطرات محیطی، دانشگاه گلستان، علی‌آباد کتول، گرگان

علیرضا حاجی (استادیار)

پردیس صنعتی شهدای هوپزه، گروه برق، دانشگاه شهید چمران اهواز

مهندسی عمران شریف، زمستان ۱۴۰۰ (دوره ۲ - شماره ۳/۲، ص. ۸۳-۹۲)، (پژوهشی)

یک از مباحث کلیدی در مدل‌های پیش‌بینی‌کننده‌ی سری زمانی، تعیین تعداد تأخیر در مدل پیشنهادی است. در نوشتار حاضر، تعداد تأخیر مدل سری زمانی پیش‌بینی‌کننده‌ی آورد رودخانه با استفاده از معیار آنتروپی تقریبی و روش شبکه‌های عصبی به دست آمده است. روش کار به این صورت بود که ابتدا رابطه بین بلوک‌های تأخیر و آنتروپی تقریبی در ایستگاه‌های آب‌سنجی آق‌قلا و قزاقلی در رودخانه‌ی گرگانرود بررسی و مشخص شد که بهترین تعداد تأخیر در ایستگاه‌های آب‌سنجی آق‌قلا و قزاقلی به ترتیب برابر ۱۲ و ۱۰ عدد جهت رسیدن به یک مدل جامع پیش‌بینی‌کننده‌ی آورد رودخانه است. در ادامه، نیز دو مدل ARIMA و شبکه‌های عصبی به همراه میزان بلوک تأخیری به دست آمده برای پیش‌بینی دبی رودخانه‌ی گرگانرود استفاده شد. نتایج نشان از کارایی مدل‌های توسعه داده شده در منطقه‌ی مورد نظر است، که مسئله‌ی مذکور با توجه به نتایج به دست آمده در ایستگاه‌های مورد نظر برای برنامه‌ریزی آینده می‌تواند کارساز باشد.

واژگان کلیدی: جریان رودخانه، آنتروپی تقریبی، پیش‌بینی، مدل شبکه‌های عصبی، گرگانرود.

m.zanganeh@gu.ac.ir
a.chaji@scu.ac.ir

۱. مقدمه

بی‌نظمی در یک سری اطلاعات به معنای تغییرات زیاد و نامنظم اطلاعات موجود در سری اطلاعات ذکر شده است، که نوسان اطلاعات و عدم پیروی آن از یک قاعده‌ی مشخص باعث کاهش آگاهی ما از رفتار سیستم می‌شود. تئوری آنتروپی، یکی از معیارهای مهم توصیف رفتار سیستم‌هاست، که می‌توان میزان بی‌نظمی و عدم قطعیت را با آن اندازه‌گیری کرد. اگرچه با روش‌های احتمالاتی می‌توان عدم قطعیت را به دست آورد، اما مشکل مهم آنها اطلاعات محدود و در بعضی موارد ناقص است. آنتروپی معیاری از درجه‌ی عدم قطعیت و نامعلومی (یعنی بی‌نظمی، تصادفی و بی‌قانونی) در پدیده‌های تصادفی است. معمولاً پیچیدگی یک سیستم و آنتروپی آن رابطه‌ی مستقیم دارند، به طوری که هر چه آنتروپی سیستم بزرگ‌تر باشد، بی‌نظمی و پیچیدگی سیستم بیشتر می‌شود و بالعکس. در حالت کلی، فرایندهای طبیعی به سمت آنتروپی بیشتر پیش می‌روند. بی‌نظمی در بحث حاضر، وجود جنبه‌های غیرقابل پیش‌بینی و اتفاقی در پدیده‌های پویاست. بی‌نظم بودن یک پدیده، به این مفهوم است که نتایج آن غیرقابل پیش‌بینی است و منظم بودن یعنی دارای نوعی قطعیت است. فرض می‌شود که یک سیستم آب‌شناسی (هیدرولوژی) تحت شرایط طبیعی سالم بوده و در طی سال‌ها به بیشینه‌ی پیچیدگی خود رسیده است، که چنین سیستمی غیرقابل پیش‌بینی و تصادفی است. سیستم اخیر ممکن است به دلیل

سیستم‌های منابع آب، پیچیده هستند و عدم قطعیت‌های زیادی دارند. تعیین مقدار پیچیدگی یا بی‌نظمی موجود در سیستم‌های آب‌شناسی و منابع آب به دلیل عدم قطعیت‌های زیاد موجود در سیستم‌های آب‌شناسی، اهمیت زیادی دارد. تعیین بی‌نظمی در سری زمانی جریان رودخانه در مدل‌سازی و پیش‌بینی جریان رودخانه کمک شایانی خواهد کرد. در اغلب موارد، به دلیل وجود عدم قطعیت، تصمیم‌ها بدون اطلاعات کافی گرفته می‌شوند. معمولاً در تصمیم‌گیری تحت عدم قطعیت تمایل به تصمیم‌های محافظه‌کارانه وجود دارد. تقریباً در بیشتر موارد، اطلاعات کافی جهت توصیف رفتار تصادفی سیستم‌های منابع آب در دسترس نیست. در صورت وجود شرایط آب‌شناسی و محیطی مشخص، فعالیت جریان رودخانه ممکن است از رفتار نسبتاً ساده تا کاملاً پیچیده تغییر کند. مسئله‌ی اخیر مستلزم تصادفی بودن دنباله‌ی مقادیر جریان رودخانه است، که هر چه میزان تصادفی بودن دنباله‌ی جریان بیشتر باشد، فعالیت جریان رودخانه پیچیده‌تر و هر چه تصادفی بودن کمتر باشد، فعالیت جریان رودخانه، پیچیدگی کمتری دارد و پیش‌بینی آن راحت‌تر است. وجود

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۴۰۰/۲/۱۸، اصلاحیه ۱۴۰۰/۵/۱۶، پذیرش ۱۴۰۰/۵/۳۱.

DOI:10.24200/J30.2021.57716.2930

دخالت‌های انسانی مانند استفاده‌ی زیاد از زمین، تغییر پوشش زمین، شهرنشینی و تغییرات آب و هوایی و احداث سد تحت تأثیر قرار گیرد و در نتیجه پیچیدگی‌اش را از دست بدهد و به سوی نظم و قطعیت حرکت کند. پس از توسعه‌ی تئوری آنتروپی توسط شانون در اواخر دهه‌ی ۱۹۴۰ و اصل بیشینه‌ی آنتروپی جینز در دهه‌ی ۱۹۵۰، تئوری آنتروپی در طیف وسیعی از علوم، شامل: آب‌شناسی، منابع آب، هیدرولیک و محیط زیست استفاده شده است.^[۱] سینگ و راجوگوپال^۱ (۱۹۸۷) به پیشرفت‌هایی در کاربرد اصل آنتروپی بیشینه‌ی POME^۲ در آب‌شناسی دست یافتند و با استفاده از اصل آنتروپی بیشینه، روشی جهت استخراج تعداد توزیع‌های به کار رفته در آب‌شناسی پیشنهاد کردند.^[۲] از POME برای تعیین توزیع‌های فراوانی، تخمین پارامتر، ارزیابی سیستم‌های اکتساب داده و تعیین عدم قطعیت در آب‌شناسی استفاده شده است. کریستائویچ و سینگ^۳ (۱۹۸۷)، بیشینه‌ی آنتروپی طیفی MESA^۴ را برای توسعه‌ی مدل تک‌متغیره برای پیش‌بینی جریان بلندمدت رودخانه به کار بردند. مدل برای پنج رودخانه در پنج منطقه‌ی مختلف از جهان تأیید شد.^[۵] سینگ و کریستائویچ (۱۹۹۱ و ۱۹۹۲)، یک روش مبتنی بر آنتروپی برای ارزیابی زمانی و مکانی شبکه‌های بارش در ایالت لوئیزیانا آمریکا ارائه دادند.^[۶] ارزیابی برای پنج بازه‌ی روزانه، دو روزه، هفتگی، ماهانه و سالانه برای دو فصل مختلف انجام شد. در هر مورد بهترین ترکیب باران‌سنج‌ها پیشنهاد و خطوط با اطلاعات یکسان ایجاد شد، که نشان‌دهنده‌ی انتقال اطلاعات بیشتر یا کمتر است. باربی^۵ و همکاران (۱۹۹۴)، آنتروپی را برای تعیین توزیع احتمالاتی برای هد پیزومتریک در محیط متخلخل برای جریان یک‌بعدی دائمی آب‌خوان‌های بازو بسته به کار بردند.^[۷] ژانگ (۱۹۹۱)، یک روش نو با عنوان آنتروپی مرکب معرفی کرد.^[۸] در علوم پزشکی نیز کوستا^۶ و همکارانش (۲۰۰۲ و ۲۰۰۵)، آنتروپی چند مقیاسه (MSE)^۷ را به طور کامل‌تری بیان کردند و از کاربردهای آن در نوسان‌های ضربان قلب استفاده کردند.^[۹] و^[۱۰] روش MSE نشان داد که در یک سیستم بیولوژیکی با بالا رفتن سن، کمبود پیچیدگی آهنگ نامنظم قلب و توأم با نارسایی قلبی است و با این درک آن را برای اندازه‌گیری پیچیدگی سیستم‌های بیولوژیکی به کار بردند. کسین^۸ (۲۰۰۸)، معیار پیچیدگی LZC^۹ را برای بررسی پیچیدگی در جریان رودخانه در یک دوره‌ی طولانی در ۱۵ حوضه در انگلیس و ولز به کار برد.^[۱۱] سپس دوره را به ۴ دوره تقسیم کرد و مقدار پیچیدگی لمپل - زیو (LZC) را محاسبه کرد. نتایج نشان داد که در برخی حوضه‌ها در دوره‌ی آخر در مقایسه با دوره‌ی قبل کاهش پیچیدگی به وجود آمده است، که ممکن است به فعالیت‌های انسانی مانند استفاده‌ی زیاد از خاک، زمین و تغییرات آب و هوایی ناشی از فعالیت‌های انسانی نسبت داده شود. لی و ژانگ (۲۰۰۷)، آنتروپی چند مقیاسه‌ی MSE را به عنوان معیاری برای ارزیابی پیچیدگی جریان رودخانه می‌سی‌سی‌پی به کار بردند. آنها مقادیر جریان روزانه‌ی رودخانه‌ی می‌سی‌سی‌پی را به مدت ۱۳۱ سال برای بررسی تغییر ممکن در پیچیدگی ناشی از فعالیت‌های انسانی از دهه‌ی ۱۹۴۰ به بعد به کار بردند.^[۱۲] نتایج نشان داد که از سال ۱۹۴۰ به بعد، آنتروپی جریان رودخانه کاهش پیدا کرده است. آن‌ها نتیجه گرفتند که کاهش اخیر پیچیدگی سیستم MR ممکن است ناشی از تغییرات عمده در استفاده از زمین، پوشش گیاهی و روش‌های حفاظت خاک از سال ۱۹۴۰ به بعد باشد. اخیراً زنگانه و همکاران (۲۰۲۱)، به بررسی بی‌نظمی رودخانه‌ی گرگان‌رود در ایستگاه‌های آق‌قلا و قزاقلی پرداخته و دریافته‌اند که میزان آنتروپی تقریبی با افزایش بلوک‌های تأخیری در آن، در نهایت به صفر میل می‌کند. به نظر آن‌ها مسئله‌ی اخیر مبین عدم انتقال اطلاعات از یک بلوک تأخیری خاص است. به عبارت دیگر، از یک بلوک تأخیری مشخص، دیگر بی‌نظمی در آورد آب رودخانه وجود ندارد در نتیجه، فرایند تکراری و قابل پیش‌بینی است. آن‌ها پیشنهاد کردند که مدل‌های پیش‌بینی

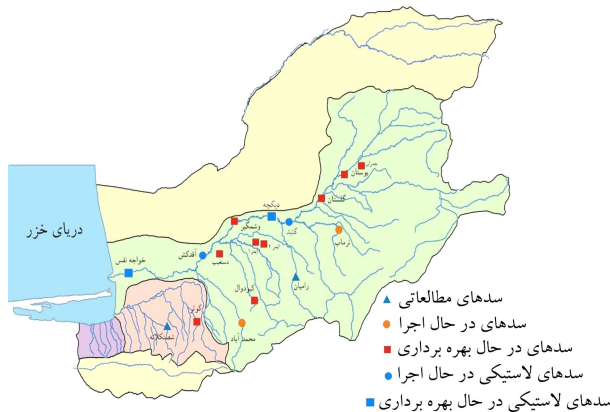
می‌توانند این تعداد بلوک تأخیری را برای مدل‌های پیش‌بینی‌کننده‌ی سری‌های زمانی در نظر بگیرند.^[۱۳]

بنابراین در مطالعه‌ی حاضر، برای اولین بار از روش‌های شبکه‌های عصبی مصنوعی (ANNs)^{۱۰} و ARIMA^{۱۱} برای پژوهش درباره‌ی دقت تعداد بلوک‌های تأخیری تعیین شده توسط روش آنتروپی تقریبی استفاده شده است. به عبارت دیگر، ابزار محاسبه‌ی نرم، جهت پیش‌بینی سری زمانی آورد آبی رودخانه‌ی گرگان‌رود در ایستگاه‌های قزاقلی و آق‌قلا با توجه به تعداد بلوک‌های تأخیری روش آنتروپی تقریبی استفاده شده است.

در سال‌های اخیر، روش‌های ابزار محاسبات نرم، مانند: روش‌های شبکه‌های عصبی مصنوعی (ANNs)، سیستم‌های استنباط فازی (FISs)^{۱۲}، روش‌های برنامه‌ریزی ژنتیک (GP)^{۱۳}، روش درخت‌های تصمیم‌گیری و روش بردار ماشین‌های پشتیبان (SVMs)^{۱۴} به منظور پیش‌بینی پدیده‌های مختلف هیدرولیکی استفاده شده‌اند. نحوه‌ی کار در ابزار ذکر شده به این صورت بوده است که با استفاده از برقراری رابطه‌ی ضمنی و یا صریح بین پارامترهای مؤثر در یک پدیده، سعی در پیش‌بینی و یا تخمین پدیده‌ی مورد نظر شده است. روش ANNs توسط پژوهشگرهای بسیاری برای پیش‌بینی پدیده‌های هیدرولیکی به ویژه در کانال‌های باز استفاده شده است. یانگ و چنگ^{۱۵} (۲۰۰۵)، از روش ANNs به منظور تخمین نیمرخ سرعت و در نهایت، تخمین دبی در کانال‌های باز استفاده کرده‌اند.^[۱۱] یوهان و وناسکین^{۱۶} (۲۰۰۹)، از ANNs به منظور پیش‌بینی زبری در کانال‌های غیرخاکی استفاده کرده‌اند.^[۱۵] در پژوهش دیگری، شایا و سیلانی (۱۹۹۸)، نیز به منظور تخمین زبری در لوله‌ها از روش ANNs استفاده کرده‌اند.^[۱۶] عابدین (۲۰۰۴)، از ANNs به منظور بررسی کارایی کانال‌های باز انشعابی تحت تأثیر سازه‌های هیدرولیکی استفاده کرده است.^[۱۷] در پژوهش دیگری، زهیری و دهقانی (۲۰۰۹)، از ANNs به منظور تخمین دبی کانال‌های مرکب و از دامنه‌ی وسیعی از داده‌های آزمایشگاهی و هندسی به منظور ارائه‌ی یک مدل جامع‌تر استفاده کرده‌اند.^[۱۸] باطنی و همکاران (۲۰۰۷)،^[۱۹] و بگوم^{۱۷} و همکاران (۲۰۱۲)،^[۲۰] در تخمین میزان آب‌شستگی پای پل‌ها در اثر جریان، از روش ANNs به منظور تخمین میزان آب‌شستگی پای پل‌ها استفاده کرده‌اند. کاظمی‌نژاد و همکاران (۲۰۱۰)، نیز از روش ANNs به منظور تخمین میزان آب‌شستگی پای لوله‌ها تحت اثر امواج استفاده کرده‌اند.^[۲۱] همچنین غضنفری هاشمی و همکاران (۲۰۱۱)، در آب‌شستگی پای گروه شمع‌ها در اثر امواج در دریا از روش‌های ANNs و بردار ماشین‌های پشتیبان استفاده کرده‌اند.^[۲۲] زجی^{۱۸} و بنکداری (۲۰۱۵)، هم در زمینه‌ی تخمین سرعت در طول کانال‌های باز، از روش‌های ANNs و برنامه‌ریزی ژنتیک استفاده کرده‌اند.^[۲۳] شیخ‌خوزانی و همکاران (۲۰۱۷)، نیز از روش ANNs تصادفی جهت تخمین و توزیع تنش برشی در کانال‌های دایره‌ی استفاده کردند و دریافتند که عدد رینولدز و عمق بی‌بعد شده با پیرامون مرطوب در تنش برشی تأثیر زیادی دارد.^[۲۴] صادق صفری (۲۰۱۶)، از روش ANNs به منظور تخمین سرعت جریان در کانال‌های باز استفاده کرده‌اند.^[۲۵] زنگانه^{۱۹} و همکاران (۲۰۱۶)، نیز از روش شبکه‌ی عصبی برای پیش‌بینی جریان‌های ساحلی در ساحل جوستو - اوگاتای^{۲۰} ژاپن استفاده کردند.^[۲۶] اخیراً نیز زنگانه و رستگار از روش‌های ANNs و ANFIS برای تخمین زبری کانال‌های خاکی استفاده کرده‌اند، که نتایج نسبت به روش‌های تجربی موجود، دقت قابل ملاحظه‌ی داشته است. ضمن این‌که پارامترهای ورودی مؤثر بیشتری در مورد پدیده‌ی مرتبط استخراج شده است.^[۲۷] به منظور توسعه‌ی روش‌های مبتنی بر روش ابزار محاسبات نرم ANNs جهت پیش‌بینی آورد آبی در رودخانه‌ی گرگان‌رود در نوشتار حاضر، پس از ارائه‌ی مقدمه‌ی در رابطه با اهمیت به کارگیری روش آنتروپی تقریبی و شبکه‌های عصبی

جدول ۱. مشخصات ایستگاه آب‌سنجی در رودخانه گرگانرود (مختصات UTM و زون ۴۰s).

ردیف	نام ایستگاه	مشخصات		سال تأسیس	طول دوره‌ی آماری (سال)
		عرض (m)	ارتفاع (m)		
۱	قزاقلی	۴۱۲۱۹۹۳	۲۲	۱۳۵۲	۴۴
۲	آق‌قلا	۴۰۹۹۱۹۴	-۱۳	۱۳۲۵	۶۷



شکل ۱. جانمایی سد‌های استان گلستان (سایت شرکت آب منطقه‌ی استان گلستان).

حدود ۳۷ میلیون مترمکعب رسیده است و قدیمی‌ترین سد استان گلستان است. در جدول ۱، مشخصات ایستگاه آب‌سنجی قزاقلی و آق‌قلا و در شکل ۱، چگونگی جانمایی سد‌های مختلف استان گلستان مشاهده می‌شود.

۳. روش آنتروپی تقریبی

مفهوم آنتروپی تقریبی (ApEn) ^[۲۸] برای اولین بار در سال ۱۹۹۱ توسط پینکاس ^{۲۲} و همکاران، معرفی شده است. ^[۲۸] در روش آنتروپی تقریبی، مقدار ApEn را به عنوان معیاری برای تعیین تصادفی بودن دنباله‌ی از اعداد در نظر می‌گیرند. در حقیقت، روش ApEn مبتنی بر آنتروپی است که از توزیع تجربی برای الگوهای مختلف به دست می‌آید. آنتروپی تقریبی (ApEn)، آزمونی است که جهت بررسی پیچیدگی در یک دنباله یا یک سری از اعداد به کار می‌رود. در واقع آنتروپی تقریبی به نوعی همان آنتروپی شانون ^{۲۳} است، که در آن از فراوانی نسبی یک الگو در دنباله به جای احتمال آن الگو استفاده می‌شود. از آن‌جا که آنتروپی شانون، میزان بی‌نظمی را در یک سیستم بیان می‌کند، آنتروپی تقریبی نیز میزان پیچیدگی و بی‌نظمی در یک دنباله را می‌دهد. آنتروپی تقریبی، یک روش آماری است که برای تعیین تصادفی بودن و یا غیرمنظم بودن یک دنباله از اعداد به کار می‌رود. دنباله‌ی که آنتروپی تقریبی آن بیشتر باشد، خاصیت تصادفی بودن بیشتری دارد و بی‌نظمی در آن بالاتر است و بالعکس، دنباله‌ی که آنتروپی تقریبی آن پایین‌تر است، نظم بیشتری دارد و در حقیقت از یک الگوی منظم پیروی می‌کند و غیرتصادفی‌تر است. فرض کنید دنباله‌ی از اعداد حقیقی به صورت $U = (u_1, u_2, \dots, u_m)$ باشد، برای دو بلوک $X(i)$ و $X(j)$ ، که $X(i)$ به صورت $X(i) = (u_i, u_{i+1}, \dots, u_{i+m-1})$ است، فاصله‌ی بین دو بردار به صورت روابط ۱ الی ۴ محاسبه می‌شود:

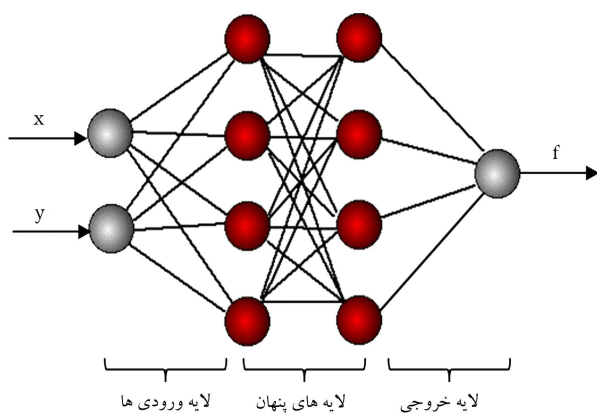
$$d(X(i), X(j)) = \max_{p=1,2,\dots,m} (|U_{(i+p-1)} - U_{(j+p-1)}|) \quad (1)$$

و کاربردهایی از روش ابزار محاسبه‌ی نرم مورد نظر، در گام دوم داده‌های استفاده شده در توسعه‌ی مدل‌های مذکور با عنوان مطالعه‌ی موردی بررسی شده است. در بخش‌های سوم و چهارم، نیز به ترتیب مبانی هر دو روش آنتروپی تقریبی و ANNs بررسی شده است. همچنین در بخش‌های پنجم و ششم، به توسعه‌ی مدل‌های مرتبط جهت پیش‌بینی آورد آبی رودخانه‌ی گرگانرود و همچنین آنالیز حساسیت در رابطه با تعداد بلوک‌های تأخیری در دقت روش‌های ANNs و ARIMA پرداخته شده است. همچنین در مرحله‌ی اخیر، کارایی روش‌های توسعه داده شده در مقابل داده‌های استفاده نشده در فرایند ارزیابی شده است. در انتها، ایده‌ی مطرح شده در رابطه با یکسان بودن بلوک‌های روش آنتروپی تقریبی با تعداد بلوک‌های تأخیری، روش پیش‌بینی‌کننده‌ی شبکه‌ی عصبی بررسی و ارزیابی شده است.

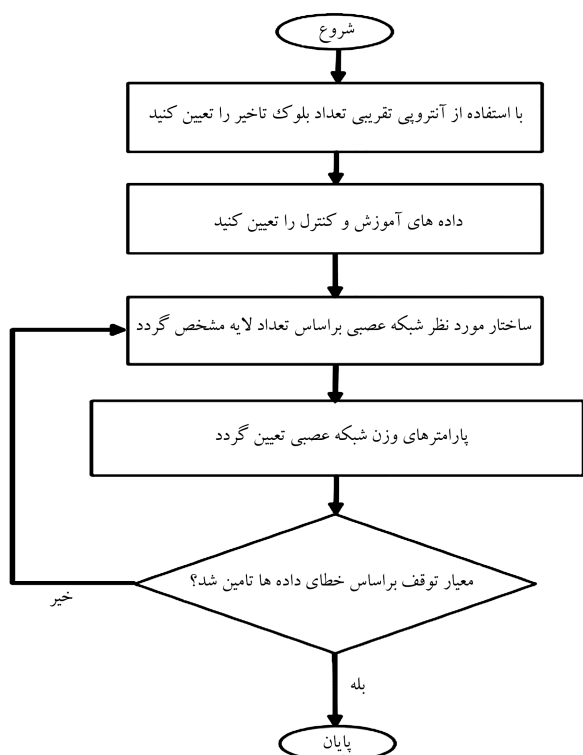
۲. مطالعه‌ی موردی

حوضه‌ی آبریز رودخانه‌ی گرگانرود از نظر تقسیم‌بندی حوضه‌های اصلی کشور ایران، بخشی از حوضه‌ی آبریز دریای خزر است. همچنین از نظر تقسیم‌بندی حوضه‌های درجه‌ی ۲ کشور، در حوضه‌ی آبریز قره‌سو و گرگان واقع است. حوضه‌ی آبریز رودخانه‌ی گرگانرود در بخش شرقی رشته‌کوه البرز واقع شده است و وسعتی در حدود ۱۱۶۳۰ کیلومترمربع دارد. به طورکلی، در حوضه‌ی آبریز رودخانه‌ی گرگانرود، دو رودخانه‌ی بزرگ وجود دارد که گرگانرود با وسعت ۱۱۶۳۰ کیلومترمربع دارای میانگین آبدهی سالانه‌ی ۵۲۷ میلیون مترمکعب و قره‌سو با وسعت ۱۷۶۲ کیلومترمربع دارای میانگین آبدهی سالانه در حدود ۵۵ میلیون مترمکعب است. میانگین آبدهی سالانه‌ی رودخانه‌ی گرگانرود در دوره‌ی شاخص ۳۰ ساله (۱۳۴۵-۷۴) در ایستگاه‌های گنبد (سطح حوضه‌ی آبریز ۴۸۶۹ کیلومترمربع) و قزاقلی (سطح حوضه‌ی آبریز ۶۵۶۰ کیلومترمربع) به ترتیب ۸/۷ و ۱۵ مترمکعب در ثانیه، رودخانه‌ی اوغان در ایستگاه گالیکش (سطح حوضه‌ی آبریز ۴۶۰ کیلومترمربع) ۲/۷۵ مترمکعب بر ثانیه و رودخانه‌ی دوغ در تنگراه (سطح حوضه‌ی آبریز ۱۷۹۲ کیلومترمربع)، ۱/۶ مترمکعب بر ثانیه به دست آمده است.

در مطالعه‌ی حاضر، از داده‌های ایستگاه‌های قزاقلی و آق‌قلا به ترتیب در بالادست و پایین‌دست سد وشمگیر استفاده شده است. آورد رودخانه‌ی گرگانرود در ایستگاه آق‌قلا از سال ۱۳۲۹ تا ۱۳۹۶، به صورت ماهانه (۶۷ سال) در اختیار است. این در حالی است که در ایستگاه قزاقلی از سال ۱۳۵۲ تا سال ۱۳۹۶ (۴۴ سال) آورد رودخانه ثبت شده است. نکته‌ی مورد نظر در ثبت آورد رودخانه‌ها، تاریخ احداث سد‌های بوستان، گلستان و وشمگیر بوده است، که در میزان ثبت دبی در تاریخ‌های بعد از احداث سد تأثیر گذاشته است. سد بوستان در سال ۱۳۸۳ به بهره‌برداری رسیده است و حجمی معادل ۳۱ میلیون مترمکعب دارد. سد گلستان نیز حجمی معادل ۴۲ میلیون مترمکعب دارد، که در سال ۱۳۸۰ به بهره‌برداری رسیده است. این در حالی است که سد وشمگیر در بهمن ماه ۱۳۴۹ با حجم ۷۸ میلیون مترمکعب احداث شده است، که امروزه با گرفتگی رسوب مخزن آن، حجمش به



شکل ۲. ساختار شبکه‌ی عصبی مصنوعی.^[۳۰]



شکل ۳. نمودار گردش کار مدل ترکیبی توسعه داده شده مرکب از روش‌های آنتروپی تقریبی و شبکه‌های عصبی.

به ترتیب رابطه‌های ۵ و ۶ را برای تعیین تعداد نرون‌های لایه‌ی پنهان پیشنهاد کرده‌اند:

$$N_H \leq 2N_I + 1 \quad (5)$$

$$N_H \leq \frac{2N_{TR}}{N_I + 1} \quad (6)$$

که در آن، N_H تعداد نرون‌های لایه‌ی پنهان، N_I تعداد نرون‌های لایه‌ی ورودی و N_{TR} تعداد داده‌های استفاده شده برای آموزش شبکه است. البته تعیین بهتر پارامترهای مذکور می‌تواند با استفاده از فرایند سعی و خطا و تأثیر آنها در نتایج آموزش انجام شود.

پس از شرح و توسعه‌ی هر یک از ابزارهای مورد نیاز در نوشتار حاضر، نحوه‌ی عمل روش آنتروپی تقریبی در نمودار گردش کار در شکل ۳ مشاهده می‌شود.

$$C_i^m(r) = \left(\frac{\text{number of } j \text{ such that } (j \leq N - m + 1, d(X(i), X(j)) < r)}{(N - m + 1)} \right) \quad (2)$$

$$\phi^m(r) = \frac{1}{N - m + 1} \sum_{i=1}^{N-m+1} \log C_i^m(r) \quad (3)$$

همچنین:

$$ApEn(m, r, N)(U) = \phi^m(r) - \phi^{m+1}(r), m \geq 1 \quad (4)$$

که در آنها، N نشان‌دهنده‌ی طول دنباله‌ی تحت بررسی، m بیان‌گر طول بلوک $(m \leq N)$ ، r عددی حقیقی و مثبت است که به طور رایج $0.25 \leq r \leq 0.5$ در نظر گرفته می‌شود، که در آن، SD ۲۴ انحراف معیار داده‌هاست.^[۲۹] در رابطه‌ی ۴، $ApEn(m, r, N)(U)$ لگاریتم فراوانی نسبی برای بلوک‌هایی به اندازه‌ی m را اندازه‌گیری می‌کند، که اگر در یک دنباله با بلوک به اندازه‌ی m مقدار آنتروپی تقریبی بالا باشد، آن دنباله به ازاء m مذکور، بی‌نظمی بیشتری (نوسان بیشتر) دارد. در نوشتار حاضر، از داده‌های میانگین ماهانه‌ی سری زمانی جریان حوضه‌ی رودخانه‌ی گرگانود استفاده شده است.

۴. شبکه‌های عصبی

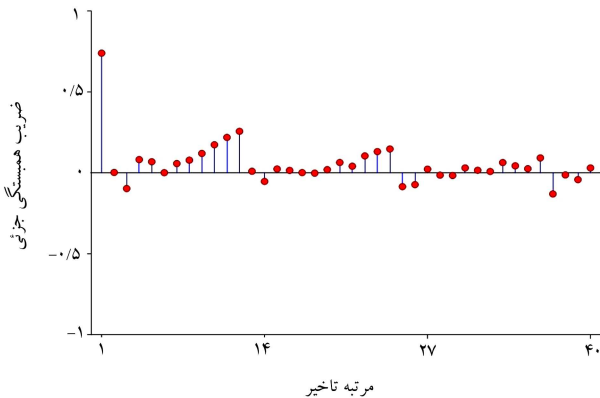
شبکه‌های عصبی یکی از زیرشاخه‌های هوش مصنوعی هستند، که به منظور پیش‌بینی یک پدیده و یا به عبارت دیگر، تخمین رفتار حاکم بر آن ابداع شده است. همان‌طور که در شکل ۲ مشاهده می‌شود، یک شبکه‌ی عصبی از چند لایه با نام‌های: لایه‌ی ورودی، لایه‌ی(های) پنهان و لایه‌ی خروجی تشکیل شده است و در هر لایه، تعدادی نرون که عملی مشابه نرون‌های بیولوژیکی انجام می‌دهند، قرار دارند. نرون‌های بیولوژیکی به شکل‌های مختلف می‌توانند با هم ارتباط داشته باشند و هر خط واصل بین دو نرون با مقداری وزن است. در واقع، شبکه‌های عصبی برگرفته شده از نوشتار مکالوچ و پیترس^[۲۵] (۱۹۴۳)،^[۳۰] هستند، که از طریق ارتباطات داخلی بین نرون‌ها سعی در تخمین یک تابع می‌کنند. ساختار شبکه‌ی عصبی به تعداد داده‌های ورودی، تعداد پارامترهای ورودی و از همه مهم‌تر میزان پیچیدگی رابطه بین پارامترهای ورودی و خروجی بستگی دارد. در روش شبکه‌های مصنوعی، ابتدا باید با استفاده از تعدادی داده‌ی موسوم به داده‌های آموزش، شبکه را آموزش داد. به این صورت که برای مثال یک جفت الگوی (I_x, T_x) ، که در آن I_x پارامتر ورودی و T_x پارامتر خروجی مطلوب است، الگوی T_x در نرون‌های هر لایه یک خروجی تولید می‌کند. در لایه‌ی خروجی، تفاوت بین خروجی مطلوب و خروجی واقعی، یک سیگنال خطا را به وجود می‌آورد، که سیگنال مذکور باعث تغییر وزن خطوط واصل بین نرون‌ها می‌شود. تغییر وزن‌های اشاره شده (آموزش شبکه) تا حد رسیدن به حد مطلوب کاربر ادامه خواهد داشت. شبکه‌ی عصبی و نحوه‌ی آموزش آنها، انواع مختلفی دارد. شبکه‌ی که در نوشتار حاضر استفاده شده است، از نوع تغذیه‌ی رو به جلو و با الگوریتم آموزش پس‌انتشار است، که از متداول‌ترین الگوریتم‌های آموزشی است. تعداد نرون‌های لایه‌ی ورودی به تعداد پارامترهای ورودی است و تعداد نرون‌های لایه‌ی خروجی نیز به تعداد پارامترهای خروجی مورد نظر است.^[۳۰] تعداد لایه‌های پنهان به طور متداول، یکی در نظر گرفته می‌شوند؛ ولی تعداد نرون‌های لایه‌ی پنهان با سعی و خطا به دست می‌آید. پژوهشگرانی مانند هک - نیلسن^[۲۶] (۱۹۷۸)،^[۳۱] و راجر و دولا^[۲۷] (۱۹۹۴)،^[۳۲]

حالی است که در ایستگاه قزاقلی که در بالادست سد وشمگیر است، این مسئله نیز از بعد از ۲۴۰ تا ۳۰۰ ماه از تأسیس سدها، بوستان و گلستان بسته به تعداد بلوک‌های مورد بررسی مشاهده می‌شود. بنابراین عواملی به غیر از احداث سد با توجه به شباهت اقلیم در دو ایستگاه چندان مهم نیست. در این حالت نیز از بلوک ۱۱ به بعد در ایستگاه آن قلا و از بلوک ۹ به بعد از ایستگاه قزاقلی چندان افزایشی در مقدار آنتروپی مشاهده نمی‌شود. مسئله‌ی اخیر می‌تواند مبین این موضوع باشد که در پیش‌بینی با استفاده از مدل‌های سری زمانی، تعداد بلوک‌های تعیین شده توسط روش آنتروپی تقریبی به عنوان تعداد تأخیر در مدل‌های ARIMA و ANNs هستند، که البته این مدعی در ادامه با آنالیز حساسیت دقت مدل‌های مورد نظر در برابر تعداد بلوک‌های مختلف بررسی و تدقیق شده است. با توجه به شکل‌های ۴ و ۵ مشاهده می‌شود که به طور کلی آنتروپی تقریبی (ApEn) با افزایش زمان افزایش یافته است، که نشان‌دهنده‌ی سیر افزایش پیچیدگی و بی‌نظمی در سیستم رودخانه است. هر چند از یک تعداد بلوکی مشخص به بعد، میزان آنتروپی ثابت باقی مانده است؛ که دلیل آن، فرضیه‌ی قابل پیش‌بینی بودن سری‌های زمانی در تعداد بلوک‌های مذکور است، که باید نسبت به حاکم بودن این ایده در پیش‌بینی به روش‌های شبکه‌های عصبی و ARIMA، در ادامه بررسی کامل صورت بگیرد. این مسئله، ایده‌ی اصلی نوشتار حاضر است. این مسئله در خود همبستگی جزئی نیز قابل دست‌یابی است، که نتایج حاصل از آن در شکل‌های ۶ و ۷ مشاهده می‌شود؛ که مطابق آنها برای $m=11$ در ایستگاه آن قلا و برای $m=9$ در ایستگاه قزاقلی، آنتروپی تقریبی نزدیک صفر و آنتروپی تقریبی برای m های بالاتر از مراتب ذکر شده، یکسان بوده است. این مطلب بیان‌گر آن است که مرتبه‌ی اتورگرسیو دو سری

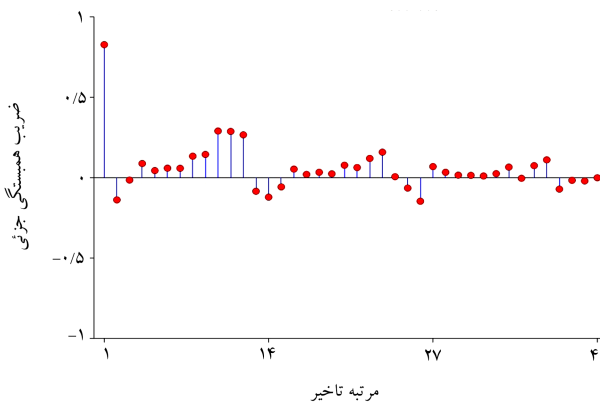
۵. بررسی نظم داده‌های ایستگاه‌های اندازه‌گیری دبی و

تعیین تعداد بلوک‌های مؤثر

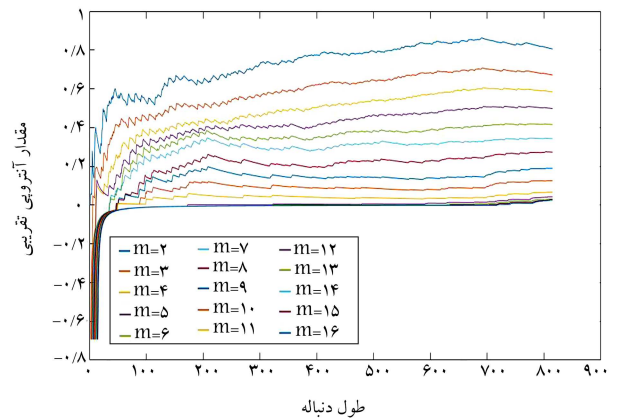
همان‌طور که عنوان شد، در نوشتار حاضر از شاخص ApEn به منظور بررسی میزان پیچیدگی (بی‌نظمی) جریان حوضه‌ی رودخانه‌ی گرگانود در ایستگاه آب‌سنجی آن قلا از سال ۱۳۲۹ تا ۱۳۹۷ و ایستگاه آب‌سنجی قزاقلی از سال ۱۳۵۲ تا ۱۳۹۷، که به صورت میانگین جریان ماهانه تبدیل شده است، استفاده و مقادیر آنتروپی تقریبی برای هر یک از مقادیر تعداد بلوک از ۲ تا ۱۶ محاسبه شده است. سپس برای هر مقدار m (تعداد تأخیر)، مقدار آنتروپی تقریبی در شکل‌های ۴ و ۵ به ترتیب برای ایستگاه‌های آن قلا و قزاقلی ترسیم شده است. بی‌نظمی در یک سیستم رودخانه ممکن است در اثر افزایش استفاده از منابع آب و خاک در حوضه رودخانه و همچنین تغییرات آب و هوایی کاهش یابد؛ به طوری که چنین مسائلی در حوضه‌ی رودخانه‌ی گرگانود بر اساس میزان آنتروپی تعیین شده در ایستگاه آن قلا از اواخر دهه‌ی ۱۳۵۰ باعث شد تا پیچیدگی و بی‌نظمی سیستم رودخانه از سال ۱۳۵۰ به بعد، مطابق شکل ۴، کاهش یابد. فعالیت و پیچیدگی سیستم رودخانه ممکن است به دلیل استفاده‌ی زیاد از زمین و پوشش گیاهی، با تغییر در زمان توزیع رواناب و تبخیر و تعرق در حوضه تغییر کند، که در مورد ایستگاه آن قلا می‌توان احداث سد وشمگیر را عامل کاهش بی‌نظمی از ماه ۲۴۰ به بعد دانست. این در



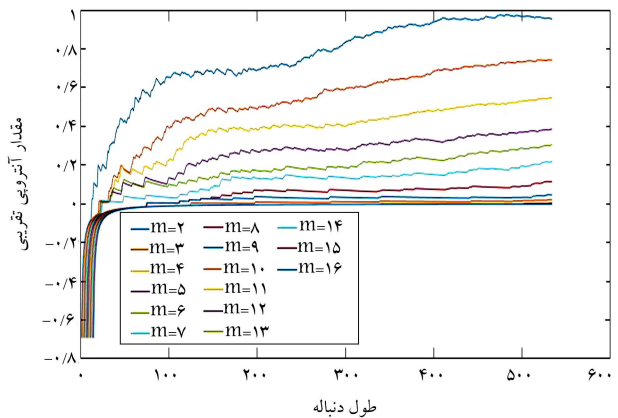
شکل ۶. خودهمبستگی جزئی در ایستگاه آن قلا.



شکل ۷. خودهمبستگی جزئی در ایستگاه قزاقلی.



شکل ۴. مقدار آنتروپی تقریبی برای هر دوره و به ترتیب برای طول بلوک‌های مختلف در ایستگاه آن قلا.



شکل ۵. مقدار آنتروپی تقریبی برای هر دوره و به ترتیب برای طول بلوک‌های مختلف در ایستگاه قزاقلی.

زمانی $m+1$ است. بنابراین با توجه به شکل‌های مذکور، این نکته تأیید می‌شود که مرتبه‌ی خودهمبستگی داده‌های ایستگاه آق‌قلا $p=12$ و برای ایستگاه قزاقلی $p=10$ (بزرگ‌ترین مقدار خودهمبستگی بعد از مقدار خودهمبستگی مرتبه‌ی یک) است.

۶. توسعه‌ی مدل‌های شبکه‌ی عصبی و ARIMA در

پیش‌بینی آورد آبی رودخانه‌ی گرگانرود

پس از معرفی داده‌های استفاده شده در توسعه‌ی روش ابزار محاسبه‌ی نرم و همچنین توضیح درباره ویژگی‌های داده‌های استفاده شده و تعداد بلوک‌های تأخیری، در بخش حاضر به توسعه‌ی مدل مرتبط به منظور پیش‌بینی آورد رودخانه‌ی گرگانرود با استفاده از جعبه‌های ابزار روش‌های مذکور در نرم‌افزار متلب^{۲۸} پرداخته شده و پژوهش در رابطه با فرضیه‌ی مورد نظر انجام شده است. در توسعه‌ی مدل‌های ابزار محاسبه‌ی نرم معمولاً سه دسته داده استفاده می‌شوند، که به عنوان داده‌های آموزش، کنترل و آزمون معرفی می‌شوند. دو دسته اول، به منظور توسعه‌ی مدل‌ها استفاده می‌شوند، که در آنها باید میزان خطای تخمین داده‌های آموزش و کنترل در پیش‌بینی پدیده‌ی مورد نظر در یک فرایند آموزشی، کمینه شود. داده‌های آزمون نیز به منظور بررسی شرایط تعمیم‌پذیری مدل‌های توسعه داده شده استفاده می‌شوند. در نوشتار حاضر، هر یک از داده‌های مورد نظر، با توجه به تجارب گذشته سعی و خطای انجام شده (حدود ۸۰٪ کل داده‌ها مربوط به داده‌های آموزش و کنترل و حدود ۲۰٪ آنها نیز به عنوان داده‌های آزمون بوده است، که به طور تصادفی انتخاب شده‌اند) برگزیده شده‌اند. در راستای هر چه تعمیم‌پذیرتر کردن مدل‌های ابزار محاسبه‌ی نرم، مدل پیش‌بینی‌کننده‌ی شبکه‌ی عصبی با توجه به تعداد بلوک‌های تأخیر به صورت رابطه‌ی ۷ بیان می‌شود:

$$X_t = f(X_{t-1}, X_{t-2}, \dots, X_{t-p}) + z_t \quad (7)$$

که در آن، X_t مقدار آورد پیش‌بینی شده توسط روش‌های ابزار محاسبه‌ی نرم استفاده شده است. p ، تعداد بلوک‌های تأخیر مورد نیاز در پیش‌بینی سری زمانی و z_t متغیر تصادفی با توزیع نرمال میانگین صفر و انحراف معیار یک است. در مدل ARIMA نیز معادله‌ی اخیر برای هر دو ایستگاه آب‌سنجی آق‌قلا و قزاقلی به صورت رابطه‌ی ۸ تعریف می‌شود:

$$X_t = \alpha_1 X_{t-1} + \alpha_2 X_{t-2} + \dots + \alpha_p X_{t-p} + z_t \quad (8)$$

که در آن، z_t متغیر تصادفی با توزیع نرمال میانگین صفر و انحراف معیار یک است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، X_t ترکیب خطی از جدیدترین p مقدار گذشته‌ی خود به علاوه‌ی یک مقدار اغتشاش z_t است، که z_t مستقل از $X_{t-1}, X_{t-2}, \dots, X_{t-p}$ است. لازم به ذکر است که مدل اخیر، مدل AR(p) نیز نامیده می‌شود. بعد از توسعه‌ی مدل‌های AR(p) در مرحله‌ی حاضر با توجه به داده‌های انتخاب شده، مدل‌های ابزار محاسبه‌ی نرم مبتنی بر روش ANNs توسعه داده می‌شوند. در روش ANNs مطابق با جدول ۲، تعداد لایه‌های پنهان ۲ عدد است و تعداد نرون‌های آن نیز به ۵ عدد تنظیم می‌شود. تابع فعال‌سازی آنها تانسیک و تابع فعال‌سازی نرون لایه‌ی خروجی نیز پورلین است. به منظور توسعه‌ی مدل ANNs برای پیش‌بینی آورد رودخانه، همه m پارامتر مؤثر در پدیده‌ی مورد نظر به عنوان ورودی شبکه انتخاب شدند و شبکه‌ی مورد نظر با تعداد گام محاسباتی ۱۰۰۰ آموزش داده شد. همچنین

جدول ۲. ضریب همبستگی به دست آمده در توسعه‌ی مدل ANNs به منظور پیش‌بینی آورد رودخانه در ایستگاه آق‌قلا با تعداد تأخیر ۱۲.

مقدار	پارامتر
۵	تعداد نرون‌های پنهان
۰/۸۱۸	ضریب همبستگی داده‌های آموزش
۰/۸۲۴	ضریب همبستگی داده‌های کنترل
۰/۸۱۷	ضریب همبستگی کل داده‌ها

جدول ۳. ضریب همبستگی به دست آمده در توسعه‌ی مدل ANNs به منظور پیش‌بینی آورد رودخانه در ایستگاه قزاقلی با تعداد تأخیر ۱۰.

مقدار	پارامتر
۵	تعداد نرون‌های پنهان
۰/۷۷۸	ضریب همبستگی داده‌های آموزش
۰/۷۸۴	ضریب همبستگی داده‌های کنترل
۰/۷۸۵	ضریب همبستگی کل داده‌ها

همبستگی حاصل شده در داده‌های آموزش و کنترل، که به صورت رابطه‌ی ۸ تعریف می‌شود، در جدول‌های ۲ و ۳ به ترتیب برای ایستگاه آق‌قلا و قزاقلی ارائه شده است:

$$R = \sqrt{1 - \frac{\sum_{k=1}^N (P^i - O^i)^2}{\sum_{k=1}^N (P^i - \bar{T})^2}} \quad (9)$$

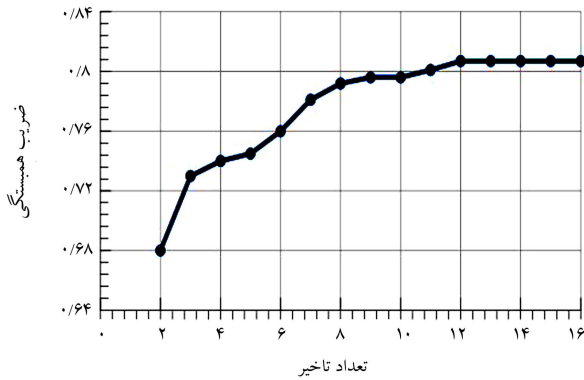
که در آن، به ترتیب O^i مقدار مشاهداتی، P^i مقدار پیش‌بینی داده‌ی \bar{T} و میانگین مشاهداتی پارامتر پیش‌بینی شده هستند.

همان‌طور که در جدول ۲ و شکل ۳ مشاهده می‌شود، ضریب همبستگی در داده‌های آموزش و کنترل به ترتیب ۰/۸۱۸ و ۰/۸۲۴ در ایستگاه آق‌قلا و به ترتیب ۰/۷۷۸ و ۰/۷۸۴ در ایستگاه قزاقلی بوده است. این مقادیر همان‌طور که در شکل‌های ۸ و ۹ مشاهده می‌شود، به ترتیب برای کل داده‌ها، ۰/۸۱۷ و ۰/۷۸۵ در ایستگاه‌های آق‌قلا و قزاقلی بوده است. هر چند ارزیابی نهایی روش ANNs مربوط به کارگیری آن بر روی داده‌های آزمون بوده است. مدل ARIMA به کارگرفته در نوشتار حاضر، که بر مبنای اتورگرسیو مرتبه‌ی p (AR(p)) است، در نرم‌افزار NCSS توسعه داده شده است، که ضرایب آن در جدول ۴ برای هر یک از ایستگاه‌های آق‌قلا و قزاقلی ارائه شده است.

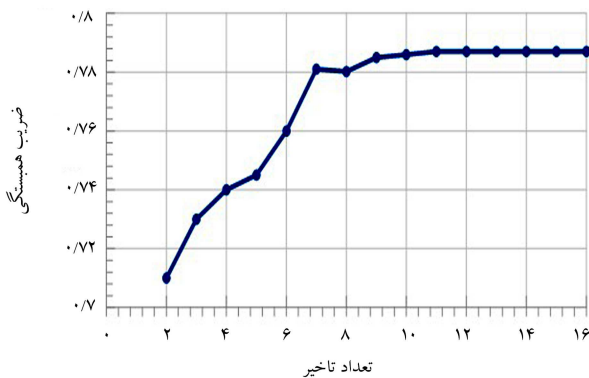
۷. آنالیز حساسیت آورد آبی رودخانه‌ی گرگانرود در برابر

تعداد بلوک‌های مختلف و ارزیابی نهایی مدل‌ها

پس از توسعه‌ی روش‌های مورد نظر، در مرحله‌ی کنونی از دیدگاه توسعه‌ی مدل با بلوک‌های تأخیر متفاوت، اثر پارامتر ذکر شده در ضریب همبستگی کل داده‌های آموزش و کنترل بررسی شده است. بر اساس این دیدگاه، میزان تأثیر بلوک‌های تأخیر در پیش‌بینی آورد آبی رودخانه‌ی گرگانرود در ایستگاه‌های آق‌قلا و قزاقلی مشخص شده است. آنالیز حساسیت پارامترهای ورودی مدل‌های ابزار محاسبه‌ی نرم را می‌توان در تأثیر روی ضریب همبستگی مجموع داده‌های آموزش و کنترل بررسی کرد. بدین منظور تغییرات ضریب همبستگی دو مدل توسعه داده شده‌ی



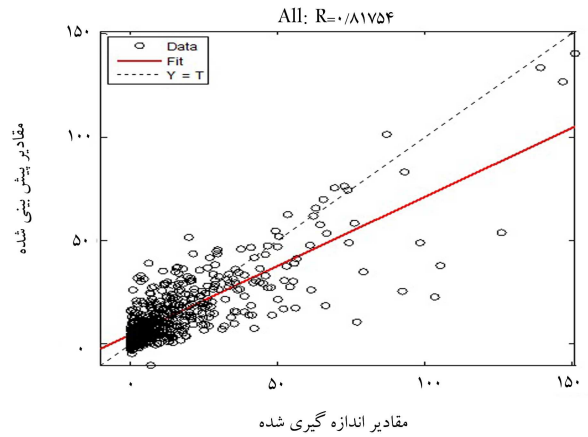
شکل ۱۰. آنالیز حساسیت ضریب همبستگی در برابر مقادیر مختلف بلوک‌های تأخیر در ایستگاه آق‌قلا با روش ANNs.



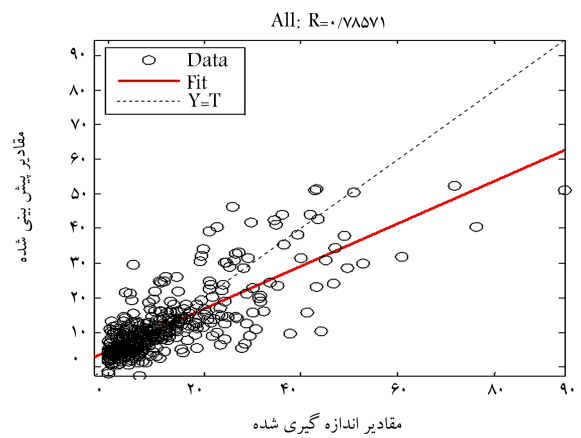
شکل ۱۱. آنالیز حساسیت ضریب همبستگی در برابر مقادیر مختلف بلوک‌های تأخیر در ایستگاه قزاقلی با روش ANNs.

در ANNs در مقابل بلوک‌های تأخیر مختلف بررسی شد، که به ترتیب این روند در مدل‌های اخیر در شکل‌های ۱۰ و ۱۱ مشاهده می‌شود، که مطابق آنها با افزایش مقدار p ضریب همبستگی در داده‌ها افزایش یافته است. این در حالی است که در بلوک‌های ۱۲ و ۱۰، به ترتیب در ایستگاه‌های آق‌قلا و قزاقلی، مقدار ضریب همبستگی به سمت مقداری ثابت میل کرده است. اگرچه میزان کاهش خطا از میزان تعداد بلوک‌های تعیین شده به بعد، تغییر چندانی قابل توجهی نکرده است. بنابراین می‌توان این‌گونه استنباط کرد که بلوک‌های به دست آمده در روش آنتروپی تقریبی با تعداد تأخیرهای حاصل شده از روش ANNs تقریباً یکسان است. نکته‌ی که باید در نظر داشت به ماهیت روش ANNs در نرم‌افزار متلب بر می‌گردد، که روشی مبتنی بر انتخاب تصادفی داده‌های کنترل است. بنابراین در انتخاب بلوک‌های تأخیر باید مسئله، چندین مرحله اجرا شود و مناسب‌ترین جواب را انتخاب کرد، که نوسان نشان داده شده در شکل‌های ۱۰ و ۱۱ به این مسئله بر می‌گردد.

با توجه به این‌که توانمندی مدل‌های ابزار محاسبات نرم به ارزیابی کارایی آنها در مقابل داده‌هایی که در فرایند آموزش استفاده نشده است، بستگی دارد؛ لذا در بخش کنونی به ارزیابی مدل‌های مورد نظر توسعه داده شده در مقابل داده‌هایی که در فرایند آموزش استفاده نشده‌اند، پرداخته شده است. در همین راستا، علاوه بر ضریب همبستگی از دو شاخص میانگین انحراف (Bias) و میانگین مربع خطا (RMSE) جهت ارزیابی کارایی مدل‌های مذکور استفاده شده است، که مطابق روابط ۱۰ و ۱۱ محاسبه می‌شوند:



شکل ۸. مقادیر اندازه‌گیری شده‌ی آورد آبی رودخانه‌ی گرگانرود در برابر مقادیر پیش‌بینی آورد رودخانه‌ی گرگانرود در ایستگاه آق‌قلا با روش ANNs.



شکل ۹. مقادیر اندازه‌گیری شده‌ی آورد آبی رودخانه‌ی گرگانرود در برابر مقادیر پیش‌بینی آورد رودخانه‌ی گرگانرود در ایستگاه قزاقلی با روش ANNs.

جدول ۴. پارامترهای تعیین شده برای روش ARIMA.

مقدار	آق‌قلا	قزاقلی
α_1	۰/۶۱۸	۰/۸۵۳
α_2	۰/۱۵۴	-۰/۰۸۵۶۰
α_3	-۰/۱۵۶	-۰/۰۷۴۱۰
α_4	۰/۰۳۲۳	۰/۰۴۱۱۰
α_5	۰/۰۶۹۵	۰/۰۰۸۲۳
α_6	-۰/۰۴۵۴	۰/۰۲۰۰۹
α_7	-۰/۰۱۴۵	۰/۰۲۸۷
α_8	-۰/۰۰۷۶۷	۰/۰۲۷۳
α_9	۰/۰۰۱۰۶	-۰/۱۲۳
α_{10}	-۰/۰۲۳۳	۰/۰۳۰۳
α_{11}	۰/۰۴۵۷	۰
α_{12}	۰/۰۲۵۶	۰

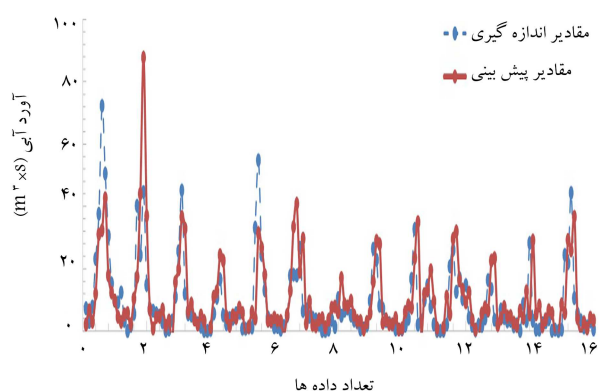
جدول ۵. مقایسه‌ی مدل‌های مختلف جهت پیش‌بینی آورد رودخانه‌ی گرگانرود در ایستگاه‌های آق‌قلا و قزاقلی.

نام ایستگاه	ARIMA	ANNs	
R	آق‌قلا	۰/۸۰۲	۰/۸۲۴
	قزاقلی	۰/۷۳۴	۰/۷۵۱
RMSE	آق‌قلا	۱۵/۲۵	۱۳/۶۹
	قزاقلی	۱۵/۷۲	۱۵/۲۹
Bias	آق‌قلا	۱/۰۵۱	۰/۹۵۰
	قزاقلی	۱/۱۴۳	۱/۰۲۳

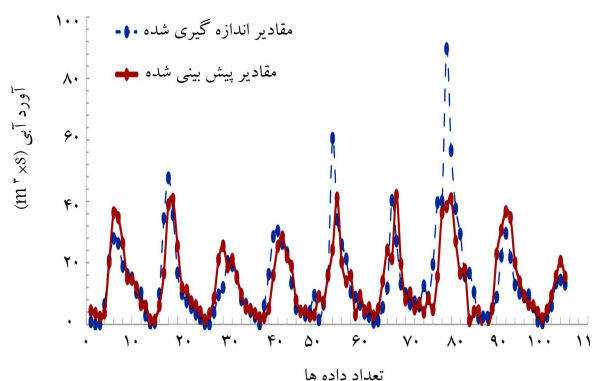
طبیعی به سمت آنتروپی بیشتر پیش می‌روند و ممکن است به دلیل دخالت عوامل بیرونی، بی‌نظمی و به دنبال آن آنتروپی سیستم کاهش یابد و سیستم به سمت نظم حرکت کند. بی‌نظمی در یک سیستم رودخانه ممکن است در اثر افزایش استفاده از منابع آب و خاک در حوضه‌ی رودخانه و همچنین تغییرات آب و هوایی و همچنین احداث زیرساخت‌هایی مانند سد کاهش یابد، به طوری که چنین مسائلی در حوضه‌ی رودخانه‌ی گرگانرود از اواخر دهه‌ی ۱۳۴۰ باعث شد تا پیچیدگی و بی‌نظمی سیستم رودخانه در ایستگاه آب‌سنجی آق‌قلا در پایین‌دست سد کاهش یابد. در پژوهش حاضر، آنتروپی تقریبی برای بررسی پیچیدگی در جریان حوضه‌ی رودخانه‌ی گرگانرود برای دوره‌های ۶۷ و ۴۴ ساله به ترتیب در ایستگاه‌های آب‌سنجی آق‌قلا و قزاقلی و از میانگین مقادیر جریان ماهانه‌ی رودخانه‌ی گرگانرود با توجه به برنامه‌ریزی‌های منابع آب در طی دوره‌ی آماری استفاده شده است. همچنین، نتایج نشان دادند که آنتروپی تقریبی، ابزاری مناسب برای ارزیابی پیچیدگی سیستم‌های آبی پویا مانند سیستم رودخانه‌ی گرگانرود با استفاده از ابزارهای پیش‌بینی سری زمانی، مانند شبکه‌های عصبی است. همچنین رابطه بین بلوک‌های تأخیر و آنتروپی تقریبی در هر یک از ایستگاه‌های مورد نظر بررسی و مشخص شد که بهترین تعداد تأخیر در ایستگاه‌های آق‌قلا و قزاقلی به ترتیب برابر ۱۲ و ۱۰ عدد جهت رسیدن به یک مدل جامع پیش‌بینی‌کننده است. در ادامه نیز دو مدل ARIMA و ANN به همراه میزان بلوک تأخیری به دست آمده برای پیش‌بینی دبی رودخانه‌ی گرگانرود استفاده شد. نتایج نشان از کارایی مدل‌های توسعه داده شده در منطقه‌ی مورد نظر است، که این مسئله با توجه به نتایج حاصل شده در ایستگاه‌های مورد نظر برای برنامه‌ریزی آینده کارساز است. آنالیز حساسیت خطاهای مدل‌های پیش‌بینی‌کننده‌ی ARIMA و ANN بیان‌گر انتخاب درست تعداد بلوک‌های تأخیری در توسعه‌ی مدل‌های مورد نظر است. همچنین می‌توان در ادامه، این پیشنهادها را برای کارهای آینده ارائه کرد:

الف) به علت حجم بالای داده‌های روزانه، گرفتن خروجی بر حسب داده‌های روزانه با رایانه‌های معمولی مقدور نبوده است؛ بنابراین با داشتن سخت‌افزار مناسب، می‌توان مدلی بر اساس داده‌های روزانه‌ی جریان به دست آورد.

ب) وجود داده‌های پرت در مدل‌های پیش‌بینی‌کننده، تأثیر غیرسازنده دارند؛ لذا باید به دنبال روش‌هایی بود که ضمن وجود داده‌ی پرت در سری داده‌ها بتوان مدل مناسب‌تری پیشنهاد کرد.



شکل ۱۲. مقادیر آورد آبی پیش‌بینی شده توسط روش ANNs در برابر اندازه‌گیری شده در ایستگاه آق‌قلا.



شکل ۱۳. مقادیر آورد آبی پیش‌بینی شده توسط روش ANNs در برابر اندازه‌گیری شده در ایستگاه قزاقلی.

$$Bias = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N (P^i - O^i) \quad (10)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (P_i - O_i)^2}{N}} \quad (11)$$

که در آن، Bias شاخص انحراف است، که نشان‌دهنده‌ی دست‌پایین و یا دست‌بالا بودن تخمین توسط مدل توسعه داده شده و RMSE خطای داده‌های آزمون است. پس از ارزیابی مدل‌های مذکور، نتایج در جدول ۵ و شکل‌های ۱۲ و ۱۳ مشاهده می‌شود، که مطابق آنها، وجود داده‌های پرت در دقت مدل پیش‌بینی تأثیر دارند؛ لذا پیش‌بینی مقادیر بیشینه با مقداری خطا همراه است. بر اساس مقدار متغیر R، که هر چقدر بزرگ‌تر باشد، دلیل برتری روش مورد نظر است؛ روش ANNs با توجه به جدول ۵ نسبت به روش ARIMA برای داده‌های مورد مطالعه دقیق‌تر عمل کرده است. همچنین مشخص است که مدل‌های توسعه داده شده، فرضیه‌ی مطرح شده در رابطه با ارتباط بین مرتبه‌ی مدل‌ها با تعداد تأخیرهای مورد نظر را تأیید می‌کنند.

۸. نتیجه‌گیری و پیشنهادها

نتایج پژوهش حاضر نشان می‌دهند که آنتروپی تقریبی، راهکار مناسبی برای تعیین پیچیدگی و بی‌نظمی در سیستم‌های آب‌شناسی است. در حالت کلی، فرایندهای

Support Vector Machines (SVMs)	بردار ماشین‌های پشتیبان
Back Propagation	پس انتشار
Maximum Entropy Spectral Analysis (MESA)	آنتروپی بیشینه طیفی
Multi-Scale Entropy (MSE)	آنتروپی چند مقیاسه
Lempel-Ziv Complexity (LZC)	پیچیدگی لمیل - زیو
TANSIG	تانسیک
PURELIN	پورلین
Epoch	گام محاسباتی
Over-training	آموزش بیش از حد
Principle of Maximum Entropy	اصل بیشینه آنتروپی
Outlier	داده پرت

تشکر و قدردانی

بدین وسیله از معاونت پژوهشی دانشگاه گلستان به منظور حمایت‌های آنها در انجام نوشتار حاضر، تقدیر و تشکر می‌شود.

ج) در پژوهش حاضر، از معیار آنتروپی تقریبی استفاده شده است، که می‌توان از معیارهای دیگر از جمله آنتروپی نمونه نیز برای تعیین تعداد تأخیرها بهره برد.

شرح علائم

Approximate Entropy (ApEn)	آنتروپی تقریبی
ANFIS	سیستم انبساط فازی - عصبی تطبیقی
ANNs	شبکه‌های عصبی مصنوعی
FISs	سیستم‌های استنباط فازی
GP	برنامه‌ریزی ژنتیک
RMSE	میانگین مربع خطا
R	ضریب همبستگی
Standard Deviation (SD)	انحراف معیار
Bias	میانگین انحراف
Artificial Neural Networks	شبکه‌های عصبی مصنوعی
Fuzzy Inference Systems	سیستم‌های استنباط فازی
Genetic Programming	برنامه‌ریزی ژنتیک

پانویس‌ها

- Singh & Rajagopal
- principle of maximum entropy
- Krstanovic & Singh
- maximum entropy spectral analysis
- Barbe
- Costa
- multi-scale entropy
- K.Sen
- lempel-ziv complexity
- artificial neural networks
- auto-regressive integrated moving average
- fuzzy inference systems
- genetic programming
- support vector machines
- Yang & Chang
- Yuhong & Wenxin
- Begum
- Zaji
- Zanganeh
- Joetsu-Ogata
- Approximate Entropy
- Pincus
- shannon entropy
- standard deviation

- McCulloch & Pitts
- Hecht-Nielsen
- Rogers & Dowl
- MATLAB

منابع (References)

- Shannon, Claude E. "A mathematical theory of communication", *The Bell System Technical Journal*, **27**(3), pp. 379-423 (1948).
- Jaynes, E.T. "Information theory and statistical mechanics", *Physical Review*, **106**(4), pp. 620 (1957).
- Singh, V.P. and Rajagopal, A.K. "Some recent advances in application of the principle of maximum entropy (POME) in hydrology", *IAHS Publication*, **164**, pp. 353-364 (1987).
- Krstanovic, P.F. and Singh, V.P. "A univariate model for longterm streamflow forecasting: 1. development", *Stochastic Hydrology and Hydraulics*, **5**, pp. 173-188 (1991a).

5. Krstanovic, P.F. and Singh, V.P. "Evaluation of rainfall networks using entropy: I. theoretical development", *Water Resource Management*, **6**, pp. 279-293 (1992a).
6. Krstanovic, P.F. and Singh, V.P. "Design of rainfall networks using entropy: II. application", *Water Resource Management*, **6**, pp. 295-314 (1992b).
7. Barbe, D.E., Cruise, J.F. and Singh, V.P. "Derivation of a distribution for the piezometric head in groundwater flow using stochastic and statistical methods", In *Hipel, K.W. (Ed.), Hydrology and Environmental Engineering, 2, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht*, pp. 151-161 (1994).
8. Zhang, Y.C. "Complexity and 1/f noise. A phase space approach", *Journal de Physique I*, **1**(7), pp. 971-977 (1991).
9. Costa, Madalena, Ary L. Goldberger, and C-K. Peng. "Multiscale entropy analysis of complex physiologic time series", *Physical review letters*, **89**(6), pp.068102, (2002).
10. Costa, Madalena, Ary L. Goldberger, and C-K. Peng. "Multiscale entropy analysis of biological signals." *Physical review E*, **71**(2), pp.021906 (2005).
11. Sen, Asok K. "Complexity analysis of riverflow time series" *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, **23**(3), pp.361-366 (2009).
12. Li, Z. and Zhang, Y.K. "Multi-scale entropy analysis of mississippi riverflow", *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, **22**(4), pp. 507-512 (2007).
13. Zanganeh, M., Chaji, A. and Kiani, M. "Gorganrood river inflow complicity evaluation by aproximate entropy.", *8th Conference of water resource Management, Mashhad, Iran*, (in Persian) (2021).
14. Yang, H.C. and Chang, F.J. "Modeling combined open channel flow by artificial neural networks", *Hydrological Processes*, **19**(18), pp. 3747-3762 (2005).
15. Yuhong, Z. and Wenxin, H. "Application of artificial neural network to predict the friction factor of open channel flow", *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, **14**(5), pp. 2373-2378 (2009).
16. Shayya, W.H. and Sablani, S.S. "An artificial neural network for non-iterative calculation of the friction factor in pipeline flow", *Computers and Electronics in Agriculture*, **21**(3), pp. 219-228 (1998).
17. Abdeen, M.A.M. "Artificial neutral network model for predicting the impact changing water structures' locations on the hydraulic performance of branched open channel system", *Mechanics and Mechanical Engineering*, **7**(2), pp. 179-192 (2004).
18. Zahiri, A. and Dehghani, A.A. "Flow discharge determination in straight compound channels using ANN", *World Academy of Science, Engineering and Technology*, **58**, pp. 12-15 (2009).
19. Bateni, S.M., Borghei, S.M. and Jeng, D.S. "Neural network and neuro-fuzzy assessments for scour depth around bridge piers", *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, **20**(3), pp. 401-414 (2007).
20. Begum, S.A., Fujail, A.M. and Barbhuiya, A.K. "Artificial neural network to predict equilibrium local scour depth around semicircular bridge abutments", *6th SASTech, Malaysia, Kuala Lumpur* (2012).
21. Kazeminezhad, M.H., Etemad-Shahidi, A. and Bakhtiary, A.Y. "An alternative approach for investigation of the wave-induced scour around pipelines", *Journal of Hydroinformatics*, **12**(1), pp. 51-65 (2010).
22. Ghazanfari-Hashemi, S., Etemad-Shahidi, A., Kazeminezhad, M.H. and et al. "Prediction of pile group scour in waves using support vector machines and ANN", *Journal of Hydroinformatics*, **13**(4), pp. 609-620 (2011).
23. Zaji, A.H. and Bonakdari, H. "Application of artificial neural network and genetic programming models for estimating the longitudinal velocity field in open channel junctions", *Flow Measurement and Instrumentation*, **41**, pp. 81-89 (2015).
24. Sheikh Khozani, Z., Hossein Bonakdari, H. and Zaji, A.H. "Estimating the shear stress distribution in circular channels based on the randomized neural network technique", *Applied Soft Computing*, **58**, pp. 441-448 (2017).
25. Sadegh Safari, M., Aksoy, H. and Mohammadi, M. "Artificial neural network and regression models for flow velocity at sediment incipient deposition", *Journal of Hydrology*, **541**, pp. 1420-1429 (2016).
26. Zanganeh, M., Yeganeh-Bakhtiary, A. and Yamashita, T. "ANFIS and ANN models for the estimation of wind and wave-induced current velocities at Joetsu-Ogata coast", *Journal of Hydroinformatics*, **18**(2), pp. 371-391 (2016).
27. Zanganeh, M. and Rastegar A. "Estimation of roughness coefficient in erodible channels by ANNs and the ANFIS methods", *Amirkabir J. Civil Eng.*, **52**(2), pp. 1-3 (2020).
28. Pincus, S.M. "Approximate entropy as a measure of system complexity", *Proceedings of the National Academy of Sciences*, **88**(6), pp. 2297-2301 (1991).
29. Hassan, M., Terrien, J., Marque, C. and et al. "Comparison between approximate entropy, correntropy and time reversibility: Application to uterine electromyogram signals", *Med. Eng. Phys.*, **33**(8), pp. 980-986 (2011).
30. McCulloch, W.S. and Pitts, W. "A logical calculus of the ideas immanent in nervous activity", *The Bulletin of Mathematical Biophysics*, **5**(4), pp. 115-133 (1943).
31. Hecht-Nielsen, R. "Kolmogorov's mapping neural network existence theorem", In *Proceedings of the International Conference on Neural Networks*, **3**, pp. 11-13, New York: IEEE Press (1978).
32. Rogers, L.L. and Dowla, F.U. "Optimization of groundwater remediation using artificial neural networks with parallel solute transport modeling", *Water Resources Research*, **30**(2), pp. 457-481 (1994).
33. Pincus, S.M. "Approximate entropy as a measure of irregularity for psychiatric serial metrics", *Bipolar Disorders*, **8**(5p1), pp. 430-440 (2006).