

## یادداشت فنی

## پیش‌بینی بار معلق رودخانه با استفاده از سامانه‌های هوشمند

هادی ثانی‌خانی<sup>۱\*</sup>، محمدرضا نیک‌پور<sup>۲</sup>، داود فرسادی‌زاده<sup>۳</sup> و محمد مهدی معیری<sup>۴</sup>

## چکیده

برآورد دقیق بار معلق رودخانه‌ها در طراحی و بهره‌برداری پروژه‌های آبی مهم است. تخمین میزان رسوبات با روش‌های مرسوم مانند منحنی سنجه نتایج دقیقی را دربر ندارد. در این پژوهش مدل برنامه‌ریزی بیان ژن که شکل توسعه یافته برنامه‌ریزی ژنتیک است، برای تخمین میزان رسوبات معلق به کار گرفته شد. از نتایج حاصل از این مدل با نتایج مدل‌های فازی-عصبی، شبکه‌های عصبی و منحنی سنجه مقایسه شد. در این راستا، داده‌های جریان رودخانه و رسوبات معلق در ایستگاه و نیار واقع بر روی رودخانه آجی‌چای در استان آذربایجان شرقی استفاده شد. پارامترهای آماری ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) و ضریب تعیین ( $R^2$ ) برای ارزیابی دقت مدل‌ها استفاده شدند. نتایج حاصله نشان از عملکرد بهتر مدل برنامه‌ریزی بیان ژن در مقایسه با سایر مدل‌های مورد استفاده بود. برای داده‌های دوره آزمون اختلاف نسبی بین RMSE مدل برنامه‌ریزی بیان ژن با مدل‌های فازی-عصبی از نوع افراز شبکه، فازی-عصبی از نوع دسته‌بندی تفریقی، شبکه‌های عصبی و منحنی سنجه به ترتیب برابر ۸، ۱۰، ۱۳ و ۲۱ درصد بود. همچنین به ازای بهترین الگوی مورد استفاده در مدل، مقدار  $R^2$  برای مدل برنامه‌ریزی بیان ژن، فازی-عصبی از نوع افراز شبکه، فازی-عصبی از نوع دسته‌بندی تفریقی، شبکه‌های عصبی و منحنی سنجه به ترتیب برابر ۰/۹۳، ۰/۸۴، ۰/۸۸، ۰/۸۶ و ۰/۸۱ به دست آمد.

**واژه‌های کلیدی:** برنامه‌ریزی بیان ژن، رسوبات معلق، شبکه‌های عصبی، فازی-عصبی، منحنی سنجه.

**ارجاع:** ثانی‌خانی ه. نیک‌پور م. ر. فرسادی‌زاده د. و معیری م. م. ۱۳۹۴. پیش‌بینی بار معلق رودخانه با استفاده از سامانه‌های هوشمند. مجله پژوهش آب ایران. ۱۶۵:۱۷.

۱- دکتری منابع آب، عضو باشگاه پژوهش‌گران جوان و نخبگان، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد ساوه.  
۲- استادیار گروه مهندسی آب، دانشکده فناوری کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی.  
۳- دانشیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز.  
۴- دانشجوی دکتری منابع آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز.

\* نویسنده مسئول: [hsanikhani12@gmail.com](mailto:hsanikhani12@gmail.com)

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۱/۰۶/۱۵

تاریخ دریافت: ۱۳۹۰/۰۷/۲۷

## مقدمه

برآورد دقیق بار معلق در طراحی و بهره‌برداری پروژه‌های آبی مهم است. نمونه‌برداری و اندازه‌گیری روزانه بار معلق رودخانه‌ها، قابل اعتمادترین روش برای این منظور است. اما در بیشتر موارد به دلیل کمبود امکانات، نیروی انسانی و بالا بودن هزینه‌ها امکان برداشت داده‌های دبی و رسوب به‌صورت روزانه و طولانی مدت ممکن نیست. از سوی دیگر نتایج حاصل از رابطه‌های تجربی ارائه شده در زمینه پیش‌بینی رسوبات معلق رودخانه‌ها در بسیاری از موارد به دلیل پیچیدگی ساز و کار جابه‌جایی رسوبات با مقادیر واقعی هماهنگی نداشته و در مواردی نیز مقادیر محاسبه شده از روابط با یکدیگر تفاوت معنی‌داری دارند و گزینش معادله‌ای که بتواند بهترین پاسخ را داشته باشد، مشکل است. از این‌رو متخصصان در جهت برآورد بار معلق رودخانه‌ها به مدل‌های هوش مصنوعی روی آورده‌اند. کوبانر و همکاران (۲۰۰۹) بار معلق رودخانه را با به‌کارگیری مدل‌های مختلف شبکه عصبی و همچنین مدل فازی-عصبی برآورد کردند که مدل فازی-عصبی نسبت به مدل‌های شبکه عصبی نتیجه بهتری را از خود نشان داد. کیسی و گاون (۲۰۱۰) از مدل برنامه‌ریزی ژنتیک خطی برای پیش‌بینی غلظت رسوبات معلق در رودخانه استفاده کردند. نتایج حاصله نشان از عملکرد مناسب مدل برنامه‌ریزی ژنتیک خطی در پیش‌بینی رسوبات معلق داشت. رجایی (۲۰۱۱) از مدل ترکیبی موجک و عصبی برای پیش‌بینی رسوبات معلق روزانه استفاده کرد. نتایج حاصله نشان از عملکرد خوب مدل ترکیبی موجک-عصبی در مقایسه با سایر مدل‌ها به خصوص در پیش‌بینی غلظت‌های بالا برای بار معلق داشت. با وجود اینکه مدل‌های شبکه عصبی مصنوعی و سیستم انطباقی فازی-عصبی از نوع روش افراز شبکه<sup>۱</sup> برای پیش‌بینی و شبیه‌سازی رسوب معلق به ازای ورودی‌های مختلف در مدل، مورد توجه پژوهش‌گران مختلف قرار گرفته‌اند اما سیستم انطباقی فازی-عصبی از نوع دسته‌بندی تفریقی<sup>۲</sup> و مدل برنامه‌ریزی بیان ژن<sup>۳</sup> که حالت توسعه یافته و صریح برنامه ریزی ژنتیک است کمتر مورد توجه پژوهش‌گران مهندسی آب بوده است. بنابراین

هدف از این پژوهش شبیه‌سازی رسوب معلق با به کارگیری مدل برنامه‌ریزی بیان ژن و مقایسه نتایج حاصله با نتایج سامانه انطباقی فازی-عصبی، شبکه عصبی و همچنین منحنی سنج است.

## مواد و روش‌ها

## برنامه‌ریزی بیان ژن

برنامه‌ریزی بیان ژن توسط فریرا در سال ۱۹۹۹ ارائه شد (فریرا، ۲۰۰۱). در این برنامه، کروموزوم‌های خطی و ساده با طول ثابت، مشابه با آنچه که در الگوریتم ژنتیک استفاده می‌شود و ساختارهای شاخه‌ای با اندازه‌ها و شکل‌های متفاوت، مشابه با درختان تجزیه در برنامه‌ریزی ژنتیک، ترکیب می‌شوند. با اینکه فنوتیپ در برنامه‌ریزی بیان ژن، همان نوع از ساختار شاخه‌ای مورد استفاده در برنامه‌ریزی ژنتیک را شامل می‌شود، اما ساختارهای شاخه‌ای (بیان درختی) که با برنامه‌ریزی بیان ژن استنتاج می‌شوند بیانگر تمامی ژنوم‌های مستقل هستند. به طور کلی می‌توان گفت که در برنامه‌ریزی بیان ژن، بهسازی‌ها در یک ساختار خطی اتفاق افتاده و سپس به‌صورت ساختار درختی بیان می‌شود و این موجب می‌شود فقط ژنوم اصلاح شده به نسل بعد منتقل شده و نیازی به ساختارهای سنگین برای تکثیر و جهش وجود نداشته باشد (فریرا، ۲۰۰۶). برای به کارگیری روش برنامه‌ریزی بیان ژن از نرم‌افزار Genxpro ویرایش ۴/۳ و تنظیمات پیش‌فرض برنامه استفاده شد.

## داده‌های مورد استفاده و معیارهای ارزیابی

برای برآورد میزان رسوبات معلق، از مقادیر رسوب اندازه‌گیری شده در ایستگاه ونیار (در استان آذربایجان شرقی) که دارای طول دوره آماری به نسبت طولانی است، استفاده شد. این ایستگاه دارای ارتفاعی برابر با ۱۴۶۰ متر و ارتفاع متوسط زیرحوضه برابر ۱۹۴۳ متر از سطح دریا و مساحت زیر حوضه برابر ۷۷۲۳ کیلومتر مربع است. تعداد کل نمونه‌ها در طول دوره آماربرداری از سال ۴۴-۱۳۴۳ لغایت ۸۴-۱۳۸۳ معادل ۵۰۶ داده است. از داده‌های مذکور، داده‌های بین سال‌های ۱۳۴۳ تا ۱۳۷۰ با تعداد ۳۸۲ داده، به‌عنوان داده‌های آموزشی و داده‌های بین سال‌های ۱۳۷۱ تا ۱۳۸۴ با تعداد ۱۲۴ داده، به‌عنوان داده‌های آزمون در نظر گرفته شد. برای محاسبه رسوبات معلق ترکیب‌های مختلفی از ورودی‌ها به کار رفته است

1- Grid partitioning

2- Subtractive clustering (Sub-Clustering)

3- Gene expression programming

که عبارتند از:

۱.  $Q_t$
۲.  $Q_{t-1}$  و  $Q_t$
۳.  $H_t$  و  $Q_t$
۴.  $Q_{t-1}$  و  $H_t$  و  $Q_t$

که در آن  $Q_t$  دبی جریان روز  $t$ ام،  $H_t$  اشل روز  $t$ ام و  $Q_{t-1}$  دبی جریان در روز  $t-1$ ام است.

### نتایج و بحث

نتایج حاصل از به کارگیری مدل‌های مختلف برای تخمین میزان رسوب معلق به ازای الگوهای مختلف در جدول ۱ ارائه شده است. با توجه به جدول ۱ مدل برنامه‌ریزی بیان ژن با به کارگیری الگوهای ورودی یکسان عملکرد بهتری نسبت به سایر مدل‌ها دارد. در این مدل الگوی ورودی شماره ۳ با داشتن  $R^2$  و RMSE به ترتیب برابر ۰/۹۳ و ۲۶۳۷ تن در روز عملکرد بهتری نسبت به سایر الگوها در این مدل دارد. در مدل فازی-عصبی از نوع افراز شبکه برای الگوی شماره ۳ به مقدار  $R^2$  و RMSE به ترتیب برابر ۰/۸۴ و ۲۸۷۲ تن در روز دارای عملکرد بهتری نسبت به سایر الگوها بود. در مدل فازی-عصبی از نوع دسته‌بندی تفریقی، با در نظر گرفتن شاخص‌های خطای مدل، الگوهای متفاوتی دارای بهترین عملکرد هستند. در این مدل با در نظر گرفتن شاخص  $R^2$  الگوی شماره ۱ و با در نظر گرفتن معیار RMSE الگوی شماره ۳ به عنوان الگوی‌های مناسب‌تر برای پیش‌بینی رسوب انتخاب شد. در مدل شبکه عصبی نیز الگوی شماره ۳ به لحاظ معیار  $R^2$  و الگوی شماره ۱ با توجه به شاخص RMSE نتیجه بهتری نسبت به سایر الگوها داشته است.

در مقایسه کلی مدل‌های هوش مصنوعی نسبت به روش منحنی سنجه در برآورد بار معلق برتری محسوس دارند که نتایج ارائه شده در جدول ۱، نیز نشان از این مطلب است. اختلاف نسبی بین ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) برای داده‌های دوره آزمون در مدل برنامه‌ریزی بیان ژن با مدل‌های فازی-عصبی از نوع افراز شبکه، فازی-عصبی از نوع دسته‌بندی تفریقی، شبکه‌های عصبی و منحنی سنجه به ترتیب برابر ۸، ۱۰، ۱۳ و ۲۱ درصد بود. تحلیل حساسیت هر یک از مدل‌های هوشمند مورد استفاده به صورت جداگانه انجام شد. در خصوص مدل برنامه‌ریزی بیان ژن با اعمال تغییراتی در تنظیم برنامه و همچنین عملگرهای مورد استفاده، بهترین خروجی مدل

انتخاب شد. برای مدل فازی-عصبی از نوع افراز شبکه با تغییر در نوع و تعداد توابع عضویت، نتایج خروجی بررسی شدند. برای نمونه در بهترین الگوی ورودی برای این مدل، توابع عضویت گوسی با تعداد ۲ و ۳ تابع عضویت به ترتیب برای دبی و اشل در همان روز بهترین عملکرد را داشته است. برای مدل فازی-عصبی از نوع دسته‌بندی تفریقی با تغییر در مقدار شعاع کلاستر (دسته) که در محدوده ۰ تا ۱ تغییر می‌کند، بهترین نتیجه مشخص شد. همچنین در مدل شبکه‌های عصبی نیز حساسیت مدل نسبت به نرون‌های لایه پنهان بررسی شد که در همه الگوها، شبکه با تعداد ۲ نرون در لایه پنهان بهترین عملکرد را داشت. از جمله مزایای مدل برنامه‌ریزی بیان ژن ارائه رابطه ریاضی صریح با این مدل است. رابطه ارائه شده با مدل برنامه‌ریزی بیان ژن برای بهترین الگو یعنی الگوی شماره ۴ که شامل دبی و اشل رودخانه در همان روز و دبی روز قبل می‌باشد به صورت رابطه ۱ است:

$$Q_s = H_t + 12.63Q_t - Q_{t-1} + Q_t(H_t + Q_t + \frac{3H_t}{\sqrt{Q_t}}) + 26.5 \quad (1)$$

### نتیجه‌گیری

در این پژوهش قابلیت برنامه‌ریزی بیان ژن در تخمین میزان رسوبات معلق رودخانه بررسی شد. دقت مدل برنامه‌ریزی بیان ژن با مدل‌های فازی-عصبی، شبکه‌های عصبی و منحنی سنجه مقایسه شد. در این راستا داده‌های رسوب معلق، جریان رودخانه و اشل در ایستگاه و نیار رودخانه آجی‌چای در مدل‌های شبیه‌سازی استفاده شدند. نتایج به دست آمده نشان از عملکرد بهتر مدل برنامه‌ریزی بیان ژن در مقایسه با سایر مدل‌های مورد استفاده داشت. اختلاف نسبی بین ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) برای داده‌های دوره آزمون در مدل برنامه‌ریزی بیان ژن با مدل‌های فازی-عصبی از نوع افراز شبکه، فازی-عصبی از نوع دسته‌بندی تفریقی، شبکه‌های عصبی و منحنی سنجه به ترتیب برابر ۸، ۱۰، ۱۳ و ۲۱ درصد بود. همچنین به ازای بهترین الگوی مورد استفاده در مدل، مقدار ضریب تعیین ( $R^2$ ) برای مدل برنامه‌ریزی بیان ژن، فازی-عصبی از نوع افراز شبکه، فازی-عصبی از نوع دسته‌بندی تفریقی، شبکه‌های عصبی و منحنی سنجه به ترتیب برابر ۰/۹۳، ۰/۸۴، ۰/۸۸، ۰/۸۶ و ۰/۸۱ به دست آمد که نشان از دقت بالاتر مدل برنامه‌ریزی بیان ژن نسبت به سایر

به دست آمده در این پژوهش، می‌توان از مدل برنامه‌ریزی بیان ژن به‌عنوان روشی کارآمد و دقیق جهت تخمین میزان رسوبات معلق در رودخانه‌ها استفاده کرد. همچنین مقایسه عملکرد روش برنامه‌ریزی ژنتیک خطی با روش‌های مورد استفاده در این پژوهش به خصوص روش برنامه‌ریزی بیان ژن، برای پیش‌بینی میزان رسوبات معلق، می‌تواند در پژوهش‌های آینده بررسی شود.

روش‌های مورد استفاده در این پژوهش دارد. همچنین نتایج کلی نشان داد که عملکرد مدل‌های فازی-عصبی در برآورد میزان رسوبات در مقایسه با شبکه‌های عصبی بهتر است. نکته قابل توجه در خصوص مدل‌های هوشمند مصنوعی مورد استفاده، ارائه رابطه ریاضی صریح با مدل برنامه‌ریزی بیان ژن است که در مدل‌های فازی-عصبی و شبکه‌های عصبی این مسئله ممکن نیست. براساس نتایج

جدول ۱- مشخصات و عملکرد مدل‌های مختلف در تخمین میزان رسوب معلق در دوره آزمون

R <sup>2</sup>	RMSE	پارامترهای توابع	نوع تابع	الگوی داده‌های ورودی	
۰/۸۹	۲۹۳۵	-	توانی	Q <sub>t</sub>	
۰/۹۰	۲۸۳۲	-	توانی	Q <sub>t</sub> و Q <sub>t-1</sub>	برنامه‌ریزی
۰/۹۲	۲۷۴۸	-	توانی	Q <sub>t</sub> و H <sub>t</sub>	بیان ژن
۰/۹۳	۲۶۳۷	-	توانی	Q <sub>t</sub> و Q <sub>t-1</sub> و H <sub>t</sub>	
۰/۸	۲۹۵۷	۲	گوسی	Q <sub>t</sub>	
۰/۸۱	۲۹۱۶	۴ و ۲	گوسی	Q <sub>t</sub> و Q <sub>t-1</sub>	فازی-عصبی
۰/۸۴	۲۸۷۲	۳ و ۲	گوسی	Q <sub>t</sub> و H <sub>t</sub>	(افراز شبکه)
۰/۸۲	۲۹۶۴	۲ و ۲ و ۲	گوسی	Q <sub>t</sub> و Q <sub>t-1</sub> و H <sub>t</sub>	
۰/۸۸	۲۹۷۶	شعاع دسته ۰/۳۶	-	Q <sub>t</sub>	
۰/۸۶	۲۹۸۵	شعاع دسته ۰/۱۱	-	Q <sub>t</sub> و Q <sub>t-1</sub>	فازی-عصبی
۰/۸۷	۲۹۳۰	شعاع کلاستر ۰/۳۹	-	Q <sub>t</sub> و H <sub>t</sub>	(دسته‌بندی
۰/۸۶	۲۹۶۸	شعاع کلاستر ۰/۳۷	-	Q <sub>t</sub> و Q <sub>t-1</sub> و H <sub>t</sub>	تفریقی)
۰/۸۴	۳۰۳۷	تعداد نرون ۲	تانزانته هیپربولیک	Q <sub>t</sub>	
۰/۸۶	۳۰۶۳	تعداد نرون ۲	تانزانته هیپربولیک	Q <sub>t</sub> و Q <sub>t-1</sub>	
۰/۸۳	۳۰۷۰	تعداد نرون ۲	تانزانته هیپربولیک	Q <sub>t</sub> و H <sub>t</sub>	روش شبکه عصبی
۰/۸۴	۳۰۴۴	تعداد نرون ۲	تانزانته هیپربولیک	Q <sub>t</sub> و Q <sub>t-1</sub> و H <sub>t</sub>	
۰/۸۱	۳۳۴۷	-	Q <sub>s</sub> =54.047Q <sub>w</sub> <sup>1.384</sup>	Q <sub>t</sub>	روش منحنی سنجه

5. Rajae T. 2011. Wavelet and ANN combination model for prediction of daily suspended sediment load in rivers. Science of the Total Environment. 409(15):2917-2928.

## منابع

1. Cobaner M. Unal B. and Kisi O. 2009. Suspended sediment concentration estimation by an adaptive neuro-fuzzy and neural network approaches using hydro-meteorological data. Journal of Hydrology. Elsevier. 367(1):52-61.
2. Ferreira C. 2001. Gene expression programming: a new adaptive algorithm for solving problems. Complex Systems. 13(2):87-129.
3. Ferreira C. 2006. Gene expression programming: Mathematical Modeling by an Artificial Intelligence. 2nd edn. Springer-Verlag. Germany. 463 p.
4. Kisi O. Guven A. 2010. A machine code-based genetic programming for suspended sediment concentration estimation. Advanced in Engineering Software. 41(7):939-945.