

## به کارگیری محاسبات نرم در تخمین مقاطع پایدار رودخانه‌های طبیعی در بستر ماسه‌ای

محسن ناصری<sup>۱\*</sup>، ناصر طالب بیدختی<sup>۲</sup>، علی حقیقی<sup>۳</sup>

۱- دانشجوی دکترای آب، دانشکده مهندسی، دانشگاه شیراز

۲- استاد دانشکده مهندسی، دانشگاه شیراز

۳- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده عمران، دانشگاه تهران

\* شیراز، صندوق پستی ۱۶۸۷-۷۱۳۴۵

mm\_nasseri@yahoo.com

**چکیده-** در چند دهه اخیر به منظور دستیابی به برآورد صحیحی از مشخصات رودخانه‌ها و کانال‌های طبیعی، روابط و معیارهای مختلفی ارائه شده است. در این مقاله دو نگاهت غیرخطی از خانواده محاسبات نرم به منظور طراحی عرض و عمق کانال‌ها با بستر ماسه‌ای با به‌کارگیری اطلاعات به‌دست آمده از ۷۰ کانال طبیعی رژیم در آمریکای شمالی به کار رفته است. روش درونیاب احتمالاتی برنامه‌نویسی ژنتیکی<sup>۱</sup> و روش دسته‌بندی گروهی داده‌ها<sup>۲</sup> که روشی هم‌خانواده با شبکه‌های عصبی مصنوعی است، شیوه‌های نوین به کار رفته در این مقاله است. این دو روش، در نهایت با سه روش مرسوم و متداول طراحی کانال‌های پایدار مقایسه شده است. در مدل‌سازیهای فوق علاوه بر پارامترهای دبی جریان و قطر متوسط ذرات بستر، از شیب کانال نیز استفاده شده است. نتایج حاکی از دقت و همبستگی مناسب آماری روش دسته‌بندی گروهی داده‌ها نسبت به سایر روشها است. در انتها نحوه رفتار مدل و تأثیرپذیری مدل از ورودیهای منتخب بررسی شده است.

**کلید واژگان:** تئوری رژیم، کانال پایدار، رودخانه ماسه‌ای، برنامه‌نویسی ژنتیکی، دسته‌بندی گروهی داده‌ها.

### ۱- مقدمه

عنوان "تئوری رژیم" از آن یاد شده است. تئوری رژیم به هیچ وجه نوعی تئوری به معنای علمی نیست، اما مجموعه‌ای گسترده از تلاشهای مهندسان و متخصصان رودخانه را در خود جای داده است. این روش در طراحی مقاطع پایدار به صورت تجربی و نیمه‌تجربی، در هند و پاکستان، در بستر جریان یکنواخت شکل گرفت و به حیات خویش ادامه داد (افضلی مهر ۱۳۸۰). تئوری رژیم به عنوان سرشاخه مکتب تجربی در سال ۱۸۸۵ توسط کندی در رودخانه‌های ماسه‌ای هندوستان ارائه شد. وی و محققان پس از او در به کمال رساندن آن بسیار سعی

یکی از چالشهای اصلی در زمینه مهندسی رودخانه، تخمین مناسب مشخصات هیدرولیکی مقطع پایدار است که در آن میزان فرسایش و انتقال رسوب در یک تعادل دینامیکی به سر می‌برد. طراحی کانالهای پایدار و بهسازی رودخانه‌ها بیش از آنکه مسأله‌ای مهم در فرایند توسعه تلقی شود، به صورت یک هنر در بیش از یک سده گذشته رخ نمون بوده و در مراجع و منابع هیدرولیکی با

1. Genetic Programming  
2. Group Method of Data Handling

طراحی کانالهای پایدار از دریچه‌ای نو است. معرفی دو مدل مناسب به منظور تخمین پیش‌بینی عمق و عرض مقطع پایدار با استفاده از دو شیوه نوین، روش تکاملی (و احتمالاتی) برنامه‌نویسی ژنتیکی و روشی هم‌خانواده با شبکه‌های عصبی مصنوعی با عنوان روش دسته‌بندی گروهی داده‌ها (که به اختصار به ترتیب GP و GMDH نامیده می‌شوند) و مقایسه آن با روشهای کلاسیک از اهداف این مقاله است.

## ۲- شبکه‌های عصبی از خانواده دسته‌بندی داده‌ها

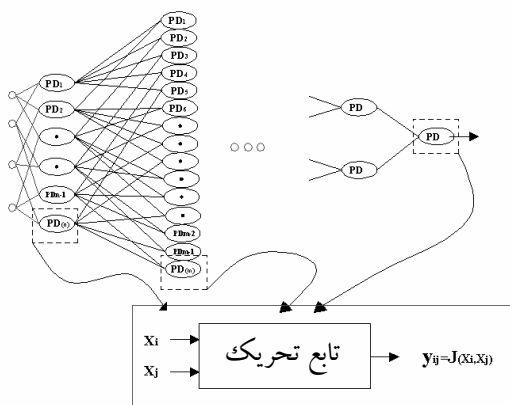
این روش یکی از فناوریهای آموزش شبکه‌های مصنوعی با تکیه بر خواص آماری است که تولد آن مرهون تحقیقات سیبرنتیکی<sup>۱</sup> سیستمهای خود سازمانده، تئوری اطلاعات و علم مهندسی کنترل است. این روش با بنیان و ایده‌های قوی، از روش آماری جدا شده و مکانش را در میان محاسبات نرم به عنوان روشی کارآمد و حتی گاهی مناسب‌تر از شبکه‌های عصبی مصنوعی عیان می‌سازد (www.GMDH.net). این روش اولین بار توسط ایواخنینخو در پژوهشکده فناوری اوکراین در دهه ۱۹۷۰ ارائه شد (Ivakhnenko, 1971). استاخوف و همکاران در ۲۰۰۵ با به‌کارگیری این روش به تخمین مقاومت فلز و آلیاژ سرمته پرداختند (Astakhov Galitsky 2005). نریمان‌زاده و همکاران در ۲۰۰۵ نیز با به‌کارگیری الگوریتم ژنتیک برای بهینه‌سازی ساختار این نوع از شبکه‌های عصبی، به مدل‌سازی برشکاری انفجاری پرداختند (Nariman-Zadeh et al. 2005). عبدال‌آل در ۲۰۰۵ نیز با این روش به بهبود پیش‌بینی بار الکتریکی و تخمین مقدار بیشینه روزانه پرداختند (Abdel-Aal 2005). پدریچ و همکاران نیز در سال ۲۰۰۳ شرح مفصلی در این زمینه ارائه و مبانی آن را شرح دادند (Pedrycz et al. 2003). نیکولائف و همکاران در سال ۲۰۰۳ مدل‌سازی

بودند تا به آنجا که با جدیت تمام این سبک از مدل‌سازی را در رودخانه‌های شنی نیز توسعه بخشیدند. در مکتب تجربی مهندسی رودخانه، شاید عمده‌ترین دستاورد، ارائه روابطی ملموس در طراحی با سطح ریسک مناسبی باشد که البته این نیازمند درک روشن و برداشت مناسبی از خود پدیده در به‌کارگیری متغیرهای مستقل پدیده فیزیکی است. در میان بسیاری از روابط ارائه شده در این زمینه می‌توان به روابط لیس، شیتال و کنداب اشاره کرد (ASCE Task Committee on Hydraulics, 1998). در مقایسه عملکرد، تفاوت چندانی بین معادلات بسیار پیچیده با معادلاتی که شامل رابطه‌ای توانی از دبی- به عنوان پارامتر غالب- باشند، وجود ندارد. بیشتر این روشها به رغم سادگی، به دلیل برخی محدودیتها از جمله مواد چسبنده یا شیب تند، هنوز قابلیت کاربرد عمومی و جدی ندارند و موضوعی تحقیقاتی محسوب می‌شوند. در چند دهه اخیر با به‌کارگیری رایانه‌ها و انجام درون‌یابیهای دقیق این میدان بسط و گسترش یافته است. بیشتر تحقیقات در این زمینه به افرادی مانند لیندلی (۱۹۱۹)، لیس (۱۹۲۰)، سیمونز و آلبرتسون (۱۹۶۳)، باری (۱۹۸۳) و هی و تورن (۱۹۸۶) اختصاص دارد (ASCE Task Committee on Hydraulics, 1998). در سال ۱۹۹۸ گزارش کارگروه انجمن مهندسان عمران ایالات متحد آینده تحقیقات را در به‌کارگیری روشهای مبتنی بر دینامیک سیال هدف‌گیری کرد (ASCE Task Committee on Hydraulics, 1998)، اما باز هم مکتب تجربی با پیدایش روشهای محاسبات نرم و دقت پیش‌بینی و برآورد این روشها جان دوباره‌ای یافت. ژولین و همکارش در سال ۱۹۹۵ آخرین و مشهورترین تحقیق فراگیر را با به‌کارگیری اطلاعات بیش از ۷۰ رودخانه از سراسر دنیا و با دخالت پارامتر شیلدز، که در مهندسی رودخانه از معیارهای پایداری به شمار می‌رود، توسعه دادند (Julien and Wargadalam J, 1995) و در واقع پس از این تحقیق از پژوهش شاخص دیگری نمی‌توان نام برد. هدف از این مقاله بررسی فرایند

1. Cybernetic

در این حالت با جستجوی حالت بهینه برای ایجاد هسته ابتدایی  $\binom{n}{2}$  تعداد مدل‌های بررسی شده و خروجی این روند به عنوان یک پارامتر ورودی برای تشکیل شبکه به کار گرفته می‌شود و به این ترتیب، ساختار شبکه تا رسیدن به وضعیت نهایی یا معیار توقف توسعه می‌یابد. در نمودار ۱ یک شبکه عصبی با توابع تحریک چند جمله‌ای که معرف شبکه مورد نظر است، ارائه شده است. در روش فوق با به‌کارگیری معادله (۳) ماتریس ضرایب در هر مرحله به دست می‌آید:

$$Xa = Y \quad (3)$$



نمودار ۱ یک شبکه عصبی فرضی از نوع GMDH

واضح است که به کارگیری معادله (۳) با الگوریتم کاهش مربعات خطا هم‌ارز است. گاهی به دلیل عدم وجود ماتریس وارون در معادله فوق، از روش‌های مختلفی از جمله روش عددی تجزیه مقادیر منفرد<sup>۱</sup> می‌توان استفاده کرد. برنامه نوشته شده در محیط نرم‌افزاری متلب قابلیت استفاده از روش تجزیه مقادیر منفرد در مواقع لزوم را دارد.

### ۳- برنامه نویسی ژنتیکی

اکنون روش‌های تکاملی در بهینه‌یابی و بهینه‌سازی با اتکا به قابلیت‌های غیر قابل انکار آنها، فاصله قابل توجهی را از

سری زمانی را با الگوریتم فوق انجام دادند. جواب‌های حاصل در مقایسه با شبکه‌های متعارف عصبی مصنوعی و منطق فازی از ایستایی خوبی برخوردار بوده و خوش رفتار است (Nikolaev, Iba 2003). در سال ۲۰۰۰ کوک و همکاران با به‌کارگیری این روش و آموزش یک شبکه عصبی، سعی در تکمیل اطلاعات هواشناسی منطقه می‌سی‌سی‌پی، در محدوده ماه‌های می-سپتامبر و سال‌های ۱۹۹۲-۱۹۸۲ کردند (Acock et. al. 2000). در سال ۱۹۹۹ چانگ و هوانگ با استفاده از اطلاعات یازده حادثه بارندگی و روش وقتی، مدل‌سازی رواناب-بارندگی را در حوزه شن‌سی تایوان انجام دادند (Chang and Hwang, 1999). در سال ۱۹۹۸ پاچپسکی و همکاران مدل‌سازی مقاومت نفوذی خاک را برای اصلاح و پیش‌بینی خصوصیت نگهداری آب در خاک با استفاده از روش دسته‌بندی گروهی داده‌ها انجام دادند (Pachepsky et. al. 1998). این روش نیز مانند سایر نمونه‌های موجود در شبکه‌های عصبی، از نرون‌ها و لایه‌هایی تشکیل شده که به وسیله توابع ریاضی، موسوم به توابع تحریک و ضرایب ثابت به یکدیگر مربوطند. در این شیوه نیز مانند سایر روش‌های فوق‌الذکر هدف، کاهش خطای مقادیر محاسبه شده نسبت به مشاهده شده در کل میدان مدل‌سازی است که  $n$  معرف تعداد متغیرهای مستقل و  $m$  معرف تعداد نمونه‌های مورد مطالعه می‌باشد:

$$\sum_{i=1}^m [f(x_{i1}, x_{i2}, x_{i3}, \dots, x_{in}) - y_i]^2 \rightarrow Min \quad (1)$$

اما در این روش ورودی و خروجی مطابق معادله (۲)، توسط عملگر چند جمله‌ای ولترا موسوم به کولموگرو-گاب، به عنوان تابع تحریک، مدل‌سازی را انجام می‌دهد (Nariman-Zadeh et al. 2005).

$$y = a_0 + \sum_{i=1}^n a_i x_i + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n a_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n a_{ijk} x_i x_j x_k + \dots \quad (2)$$

1. Singular Value Decomposition

(Sette and Boullart 2001, Sivapragasam et al. 2007). جان کوزا در سال ۱۹۸۹، در مقاله‌ای، امکان رسیدن به برنامه‌ای (یا رابطه‌ای) با استفاده از الگوریتم ژنتیک در راستای برازش منحنی بر دسته‌ای از اطلاعات را مطرح و عرصه جدیدی را در مدل‌سازی تکاملی به‌وجود آورد (Koza J R, 1989) و با انتشار کتابی (۱۹۹۰) به تکمیل پیشنهاد خویش پرداخته و نام آن را برنامه‌نویسی ژنتیکی نهاد که کلید آن، استفاده از ساختار درختی در توصیف روابط ریاضی است. این‌گونه مدل‌سازی به دلیل حجم بالای محاسبات و به منظور کارایی بالاتر، با به‌کارگیری سیستم‌های پردازش موازی سهل‌تر و با ریسک کمتری به نتیجه می‌رسد، در غیر این صورت اجرای برنامه زمان زیادی را به خویش اختصاص داده و می‌توان انتظار داشت که نتایج، گاه بالغ بر چندین سطر نشان ریاضی و اعداد باشد.

#### ۴- مشاهدات و نتایج

در این مقاله، از اطلاعات ۷۰ کانال طبیعی رژیم‌ی با بستر آبرفتی که در (Julien and Wargadalam, 1995) آورده شده استفاده شد و از میان ۱۵ مدل GP و یک مدل GMDH طراحی و ساخته شده، نتایج بهترین مدل‌های ساخته شده برای مقایسه ارائه می‌شود. به منظور مقایسه از معادلات معروف مکتب تجربی نظیر (لیسی ۱۹۵۸) معادله (۴)، (شیتال ۱۹۶۶) معادله (۵) و (چانگ ۱۹۸۵) معادله (۶) استفاده شده است.

$$w = 2.67Q^{0.5}, \quad h = 0.47\left(\frac{Q}{F_1}\right)^{0.333} \quad (4)$$

$$w = 4.3Q^{0.523}, \quad h = 0.499Q^{0.341} \quad (5)$$

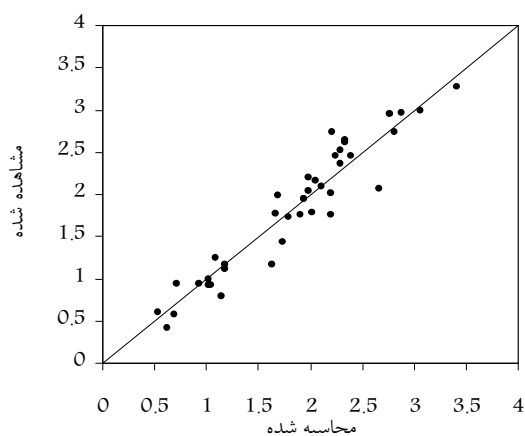
$$w = 4.17\left(\frac{S - S_c}{D_{50}^{0.5}}\right)^{0.05} Q^{0.50}, \quad h = 0.55\left(\frac{S - S_c}{D_{50}^{0.5}}\right)^{-0.3} Q^{0.3} \quad (6)$$

در معادلات فوق  $D_{50}$  قطر متوسط ذرات بستر،  $S$  شیب بستر،  $Q$  دبی جریان،  $F_1$  پارامتر رسوب لیسوی و  $S_c$  شیب

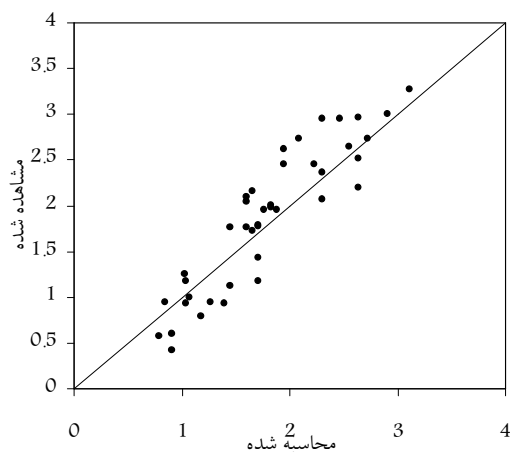
نظر کیفیت نسبت به روشهای سنتی در این زمینه ایجاد کرده‌اند. در حالت کلی شش شاخه کلی روشهای تکاملی، برنامه‌نویسی تکاملی، شبیه‌سازی بازپخت، روش فوق تکاملی تابو، الگوریتم ژنتیک و برنامه‌نویسی ژنتیکی را در زمینه بهینه‌سازی و محاسبات تکاملی می‌توان نام برد. روشهای اشاره شده در کل قرابت‌های بسیار زیادی با یکدیگر دارند، تا آنجا که خانواده‌ای متنوع را تشکیل می‌دهند (Oduguwa et al. 2005). اما در این میان دو روش آخر شباهتهای ساختاری جدی داشته و از عملگرهای یکسانی بهره می‌برند (Pedrycz et al. 2003). هالند الگوریتم ژنتیک و مبانی آنرا، به عنوان نوعی روش جستجوی مبتنی بر تصادف و احتمال در سال ۱۹۶۷ بنیاد نهاد، که به‌طور گسترده‌ای در مسائل بهینه‌سازی مورد توجه واقع شد. اما امروز توسعه این روش، محققان را با خانواده‌ای از روشهای مبتنی بر الگوریتم ژنتیک روبه‌رو کرده است. به‌طور عمومی دو خانواده عمده در روشهای مبتنی بر ایده بنیادی هالند قابل شناسایی است: اول، سیستم‌های آموزش ماشین ژنتیکی<sup>۱</sup> که به‌طور عمده بر عملکرد بهینه سیستم‌ها متمرکز است و دیگری برنامه‌نویسی ژنتیکی<sup>۲</sup>. در این خانواده از روشها، روال بهینه‌یابی بر اساس نوعی روند "تصادفی-تکاملی" و هدایت شده استوار است (Sette and Boullart 2001). این خانواده از روشها بر مبنای نظریه تکامل تدریجی و ایده‌های بنیادین زیست‌شناسی تکاملی پایه‌گذاری شده است (Michalewicz 1992). الگوریتم ژنتیک و برنامه‌نویسی ژنتیکی در مفاهیم اولیه‌ای نظیر جمعیت، نسل، نرخ جهش، نرخ لقاح، انتخاب و ... مشترکند، اما عمده‌ترین تفاوت، در میدان اعمال این عملگرها است. در الگوریتم ژنتیک، عملگرهای فوق در میدان رشته‌هایی که حامل اعداد (خواه در مبنای دو و خواه در مبنای ده) باشند تأثیر می‌گذارند، اما در برنامه‌نویسی ژنتیکی این رشته‌ها حامل برنامه و عملگرهای ریاضی هستند؛

1. Genetic based machine learning
2. Genetic programming

جوابی به مراتب بهتر را در پی داشته و این گویای برتری عمومی توانایی محاسبات نرم نسبت به روشهای کلاسیک است. لازم است ذکر شود که در مجموعه توابع به کار رفته در برنامه‌نویسی ژنتیکی، علاوه بر چهار عمل اصلی می‌توان از توابع مثلثاتی سینوس، کسینوس و تابع توانی نیز نام برد. نمودارهای ۵ تا ۸ معرف نتایج حاصل از دو مدل نوین در تخمین عمق و عرض است. بررسی و نحوه تأثیرپذیری نتایج محاسبه شده از ورودیهای مستقل به کار رفته، یکی از ارکان تشخیص هویت ریاضی مدل در تعامل با محیط مسأله است.



شکل ۵ مقادیر محاسبه شده در برابر مشاهده شده، برای پیش‌بینی عمق رودخانه پایدار (متر) با استفاده از GMDH



شکل ۶ مقادیر محاسبه شده در برابر مشاهده شده، برای پیش‌بینی عمق رودخانه پایدار (متر) با استفاده از GP

بحرانی کانال است. با توجه به اینکه در برنامه‌نویسی ژنتیکی، ورودیها به طور خودکار و بهینه برگزیده می‌شوند (در صورت حضور پارامترهای مستقل و گوناگون از مجموعه ورودیهای محتمل و ارائه شده)، لذا جدول ۱ معرف پارامترهای ورودی در مدل‌سازی عمق و عرض رژیم رودخانه‌های مدنظر است. با توجه به اینکه برای محاسبه پارامتر شیلدز به صورت تئوری به عمق کانال نیاز است، بنابراین حضور آن در مدل‌سازی نهایی منجر به ارائه رابطه‌ای ضمنی می‌شود، بنابراین از این پارامتر استفاده نشده است. تمامی روابط ریاضی حاصل به وسیله برنامه‌سازی ژنتیکی، با نرخ لقاح ۱۰۰٪ و جهش ۲۰٪ ایجاد شده و همواره بهترین جواب از نسلی به نسل دیگر حفظ شده است.

جدول ۱ پارامترهای برگزیده در مدل‌سازی عمق و عرض رژیم رودخانه

نوع پارامتر	$D_{50}$	w	h	q	S	$\tau^*$
بهترین مدل برای پیش‌بینی w	*	-	-	*	*	-
بهترین مدل برای پیش‌بینی h	*	-	-	*	*	-

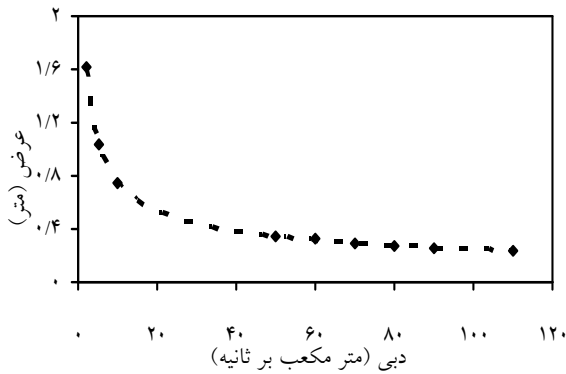
در روش شبکه عصبی دسته‌بندی گروهی اطلاعات از یک شبکه ساده که در هر لایه تنها دو ورودی موجود است، استفاده شد. از مجموعه اطلاعات موجود فقط ۵۰٪ آن در ارائه مدل‌های مبتنی بر محاسبات نرم استفاده شد و مابقی برای واسنجی تخصیص یافته است که نتایج و شاخص‌های آماری بدست آمده از تمامی مدل‌ها در مرحله واسنجی در جدول ۲ ارائه شده‌اند.

به عنوان نتیجه در حیطه مدل‌های کلاسیک، به منظور مدل‌سازی عرض رودخانه و با توجه به معیار میانگین مربعات خطا، مدل شیتال جواب بسیار مناسب‌تری را ارائه کرده و این در حالی است که مدل لیسسی دقت بالاتری را در پیش‌بینی عرض ارائه می‌کند؛ اما بهره‌گیری از روش GMDH و GP، به طور مطلق در هر دو حیطه مدل‌سازی

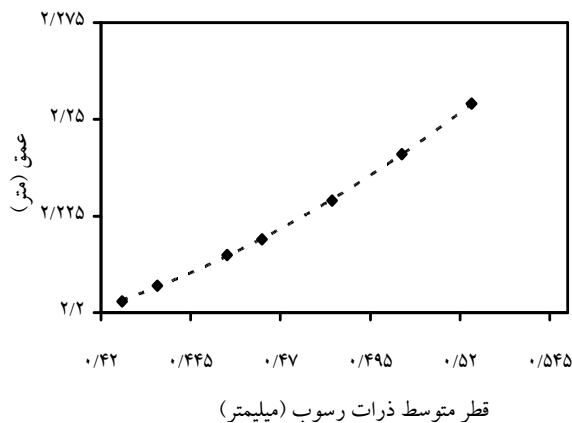
جدول ۲ مقایسه ضریب تبیین و مقدار خطای متوسط مربعات در روشهای مختلف (\* معرف وضعیت برازش  $y=Ax+B$ )

مدل	عرض رودخانه در حالت پایدار					عمق رودخانه در حالت پایدار				
	مدل های کلاسیک			محاسبات نرم		مدل های کلاسیک			محاسبات نرم	
	لیسی	شیتال	چانگ	GP	GMDH	لیسی	شیتال	چانگ	GP	GMDH
R <sup>2</sup>	۰/۸۸	۰/۸۹	۰/۸۹	۰/۹۱	۰/۹۸	۰/۶۹۵	۰/۶۹	۰/۶	۰/۸۳	۰/۹۱
MSE	۱۷۷۱/۹۵	۳۹۵/۴	۱۷۲۹	۳۰۰	۶۰/۲۸	۰/۴۵۶	۰/۶	۰/۶۶	۰/۱۱۲	۰/۰۵۲۳
A*	۰/۴۰۳۹	۰/۷۷۹	۰/۴۲۸	۱/۰۳۲	۱/۰۰۳	۰/۹۶۹	۱/۰۳۵	۱/۰۳	۱/۱۵۸	۱/۰۲۷
B*	۸/۷۸	۱۳/۸	۱۱/۳۲	۰/۱۷	-۱/۰۶۲	۰/۱۳	۰/۲۲۳	-۰/۲۹	-۰/۲۰۳	-۰/۰۵۵

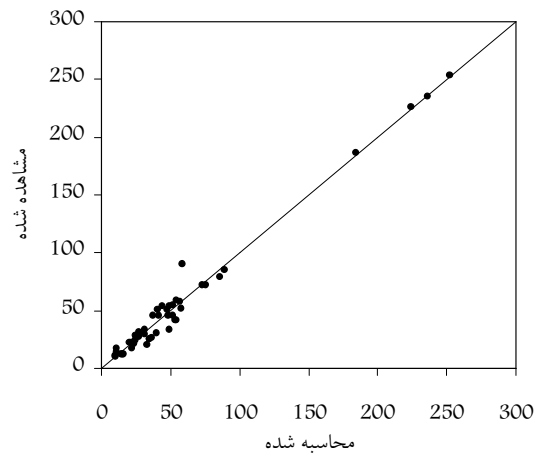
عمق) در شکل های ۹ و ۱۰ نتایج تحلیل حساسیت مقادیر پیش بینی شده توسط روش شیتال (بهترین مدل کلاسیک) برای پیش بینی عرض و روش GMDH (بهترین مدل محاسبات نرم) به منظور پیش بینی عمق ارائه شده است.



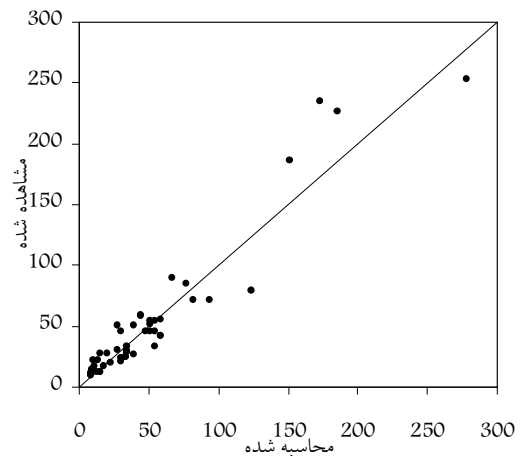
شکل ۸ نحوه تغییرات شاخص حساسیت مدل عرض شیتال نسبت به تغییرات دبی



شکل ۹ نحوه تغییرات عمق نسبت به تغییرات قطر متوسط ذرات رسوب در مدل GMDH



شکل ۷ مقادیر محاسبه شده در برابر مشاهده شده، برای پیش بینی عرض رودخانه پایدار (متر) با استفاده از GMDH



شکل ۸ مقادیر محاسبه شده در برابر مشاهده شده، برای پیش بینی عرض رودخانه پایدار (متر) با استفاده از GP

در این راستا و همچنین برای مقایسه رفتار آنها با بهترین مدل های کلاسیک ارائه شده (شیتال در عرض و لیسی در

عمق کانال پایدار در روش GMDH نسبت به دو پارامتر اندازه ذرات و شیب مدنظر دارای حساسیت بوده و نتایج حاکی از کاهش عمق نسبت به افزایش شیب است. هنگام تغییر متغیر مربوط، سایر ورودیهای مدل، مقداری برابر با میانگین دارند.

جدول ۳ مقایسه نحوه استفاده از ورودیهای محتمل در

مدلهای جدید و کلاسیک

مدل	بهترین مدل			بهترین مدل		
	برای پیش‌بینی عمق			برای پیش‌بینی عرض		
	D <sub>50</sub>	q	S	D <sub>50</sub>	Q	S
برنامه‌نویسی ژنتیکی	*	*	*	*	*	*
دسته‌بندی گروهی داده‌ها	*	-	*	*	-	*

در معادله شیتال و لسی با توجه به توان منفی مشتق نسبت به دبی، بدون محاسبه می‌توان روند کاهشی عمق یا عرض را نسبت به افزایش دبی انتظار داشت. این روند با سازوکار شناخته شده نیز هماهنگی داشته و گویای افزایش عمق مناسب طرح با افزایش اندازه ذرات است. مدل ارائه شده به منظور پیش‌بینی عرض نیز، تنها نسبت به دو پارامتر فوق دارای حساسیت است، با این تفاوت که شیب نقش ناچیزی در بهبود نتایج دارد، به حدی که قابل صرف‌نظر است. اما اندازه متوسط ذرات دارای شاخص حساسیت مطلق ۰/۵۲ و بی‌بعد (نسبی) ۰/۱۱ است. شکل ۹ نحوه تغییرات عمق را نسبت به اندازه ذره در مدل شیتال نشان می‌دهد.

همان‌طور که از شکل پیداست نرخ کاهش عرض کانال (شاخص حساسیت) نسبت به افزایش دبی جریان کاهش می‌یابد، تا جایی که دیگر افزایش دبی، در شرایط یکسان، تأثیری در عرض کانال ندارد. شکل ۱۰ نیز نشان‌دهنده نحوه افزایش عمق نسبت به قطر متوسط ذرات در مدل GMDH است. همان‌طور که پیداست افزایش عمق با

ضریب حساسیت، معرف تأثیر ورودی خاص بر خروجی مدل مربوط است. در واقع این ضریب مربوط به حساسیت  $I$  امین خروجی نسبت به  $I$  امین ورودی در مدل مذکور است و آن را می‌توان به صورت مشتق جزئی پارامتر وابسته یا خروجی نسبت به پارامتر مستقل یا ورودی توصیف کرد. با ترسیم نتیجه این مشتق‌گیری نسبت به ورودی مدنظر، نحوه تغییرات خروجی مدل نسبت به ورودی مزبور حاصل می‌شود؛ سایر ورودیها برابر با مقدار متوسطشان در نظر گرفته می‌شود و معادله (۷) معرف این شاخص است.

$$S_{ij} = \frac{\delta y_j}{\delta x_i} \approx \frac{\Delta y_j}{\Delta x_i} \quad (7)$$

که  $\Delta y_j$  تغییرات خروجی ناشی از تغییرات  $\Delta x_i$  در دامنه ورودیها است. چنانچه به بعد  $S_{ij}$  دقت شود، مشهود است که با بعد مشتق مقابله برابر است. اغلب به منظور مقایسه از مقدار بی‌بعد شده رابطه (۸) استفاده می‌شود (Skaggs and Barry 1996). شکل‌های ۹ و ۱۰ مبین دو نمودار شاخص حساسیت است. این نتایج در فاصله دو برابر انحراف معیار اطلاعات هدف با مرکز میانگین مربوط ترسیم شده، که با توجه به روشهای متعارف تحلیل حساسیت (Skaggs and Barry 1996)، برای این منظور از معادله (۷) و محاسبه عددی مشتق جزئی استفاده شده است:

$$S_{ij} = \frac{\delta y_j}{\delta x_i} \approx \frac{\Delta y_j}{\Delta x_i} \cdot \frac{x_i}{y_j} \quad (8)$$

در نتایج تحلیل حساسیت ارائه شده، طول فاصله مورد بررسی، دو برابر انحراف معیار با مرکزیت میانگین هر پارامتر است. به عنوان نمونه تغییرات شاخص حساسیت رابطه عرض شیتال، در شکل ۹ آورده شده است. جدول ۳ نشان‌دهنده نحوه استفاده از پارامترهای موجود در هر مدل منتخب است.

در هر دو مدل جدید پارامترهای ورودی به طور بهینه انتخاب شده است. مدل ارائه شده به منظور پیش‌بینی

$S_c$	شیب بحرانی کانال	اندازه ذرات نسبت مستقیم دارد. شاخصهای حساسیت به
$w$	عرض کانال پایدار	دست آمده در مدل سازی عمق با استفاده از برنامه نویسی
$h$	عمق کانال پایدار	ژنتیکی برای قطر متوسط ذرات، دبی و شیب کانال
$\tau_*$	پارامتر شیلدز	به ترتیب ۷/۵۲، ۰/۱۴ و ۰/۱ بوده و این ضرایب در تخمین
$S_{ij}$	شاخص حساسیت خروجی $j$ ام نسبت به ورودی $i$ ام از مدل	عرض به ترتیب ۱۲/۷ و ۰/۰۰ و ۰/۰۲ می باشند. همان طور
$x$	ورودی به مدل	که از نتایج پیدا است قطر متوسط ذرات در تخمین مقاطع
$y$	خروجی مدل	پایدار، نقشی به مراتب جدی تر و حیاتی تر را ایفا می کند و
		این نتیجه در مدل های ارائه شده توسط محاسبات نرم نیز تأیید می شود.

## ۷- منابع

[۱] افضلی مهر، ح. (۱۳۸۰). طراحی کانالهای پایدار در بستر شنی. مجله علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی. جلد ۵، شماره ۳، ص. ۱۸-۳۱.

[2] Abdel-Aal, R. E. (2005). "Improving electric load forecasts using network committees". Electric Power Systems Research., No. 74, pp. 83-94.

[3] Acock, M. C. and Pachepsky, A. Ya. (2000). "Estimating missing weather data for agricultural simulation using group method of data handling". Journal of Applied Meteorology, Vo. 39, pp. 1176-1184.

[4] Astakhov, V. P. and Galitsky, V. V. (2005). "Tool life testing in gun-drilling: an application of the group method of data handling". International Journal of Machine Tools & Manufacture, No. 45, pp. 509-517.

[5] Chang, F. J. and Hwang, Y. Y. (1999). "A self-organization algorithm for real-time flood forecast". Hydrological Processes, No. 13, pp. 123-138.

[6] Golberg, D. E. (1989). "Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning". Addison-Wesley, Reading, MA.

[7] Ivakhnenko, A. G. (1971). "Polynomial theory of complex system". IEEE, Trans. Syst. Man. & Cybern, SMC-1, pp. 364-378.

[8] Julien, P. Y. and Wargadalam, J. (1995). "Alluvial channel geometry: theory and

## ۶- نتیجه گیری

در این مقاله دو روش از روشهای محاسبات نرم با سه روش کلاسیک به منظور تخمین مشخصات مقاطع پایدار رودخانه در بستر ماسه ای مقایسه شده است. این دو روشهای دسته بندی گروهی داده ها و برنامه نویسی ژنتیکی، نسبت به مشهورترین روشهای کلاسیک، قابلیت به مراتب بیشتر در پیش بینی مشخصات کانال های پایدار طبیعی دارند. به عنوان یکی از نتایج فرعی مدل سازی فوق می توان به اهمیت قطر ذرات اشاره کرد و اینکه در مدل سازی های آتی، پارامتر شیب به شکل متغیری دائمی مدنظر باشد. به نظر می رسد که پس از یک قرن تلاش در پیش بینی عرض مقاطع کانال پایدار، به رغم نتایج مناسب مدل سازی های ارائه شده، به کارگیری پارامترهایی برخاسته از هویت سیالاتی-هیدرودینامیکی پدیده لازم بوده و ضروری است که در ساختارهای مختلف ارائه شده برای تئوری رژیم، به منظور یافتن متغیرهای مستقل به عنوان ورودی مناسب تر، تحقیقات ادامه یابد.

## ۷- فهرست علائم

$D_{50}$	قطر متوسط ذرات بستر
$S$	شیب بستر
$Q$	دبی جریان
$F_1$	پارامتر رسوب لیزی



- [15] Pedrycz, W. Oh, S. K. and Park, B. J. (2003). "Polynomial neural networks architecture: analysis and design". *Computers and Electrical Engineering*, No. 29, pp. 703-725.
- [16] Sette S. and Boullart, L. (2001). "Genetic programming: principles and applications". *Engineering Application of Artificial Intelligence*, Vol. 14, pp. 727-736.
- [17] Sivapragasam, C., Vincent, P. and Vasudevan, G. (2007). "Genetic programming model for forecast of short and noisy data". *Hydrological Processes*, No. 21, pp. 266-272.
- [18] Skaggs, T. H. and Barry, D. A. (1996) "Sensitivity methods for time-continuous, spatially discrete ground water contaminant transport models". *Water Resources Researches*, Vol. 32, No. 8, pp. 2409-2420.
- [19] ASCE Task Committee on Hydraulics, Bank Mechanics, and Modeling of River Width Adjustment, (1998). "River width adjustment. I: processes and mechanisms". *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 124, NO. 9, pp. 881-902.
- [20] URL: <http://www.GMDH.net>
- application". *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol 121, No . 4, pp. 312-325.
- [9] Koza, J. R. (1989). "Hierarchical genetic algorithms operating on populations of computer programs". In *Proceedings of the 11th International Joint Conference on Artificial Intelligence*. San Mateo, CA: Morgan Kaufmann. Volume I. Pages 768-774.
- [10] Michalewich, Z. (1992). "*Genetic Algorithms+Data Structures=Evolution Programs*". Springer-Verlay, Berlin Heidelberg.
- [11] Nariman-Zadeh, N., Darvizeh, A., Jamali, A. and Moeini, A. (2005). "Evolutionary design of generalized polynomial neural networks for modeling and prediction of explosive forming process". *Journal of Materials Processing Technology*, No. 164-165, pp. 1561-1571.
- [12] Nikolaev, N. Iba H. (2003). "Polynomial harmonic GMDH learning networks for time series modeling". *Neural Networks*, No. 16, pp. 1527-1540.
- [13] Oduguwa, V., Tiwari, A. and Roy, R. (2005). "Evolutionary computing in manufacturing industry: an overview of recent application". *Applied Soft Computing*, Vol. 5, pp. 281-299.
- [14] Pachepsky, Y., Rawls, W., Gimenez, D. and Watt, J. P. C. (1998). "Use of soil penetration resistance and group method of data handling to improve soil water retention estimates". *Soil & Tillage Research*, No. 49, pp. 117-126.