

## تخمین ابعاد فرسایش بستر در پایین دست سرریز سیفونی با مستهلک کننده انرژی جامی شکل با استفاده از روش برخورد گروهی با داده‌ها (GMDH)

کوروش قادری<sup>۱\*</sup>، رضا جعفری نیا<sup>۲</sup>، بهرام بختیاری<sup>۱</sup> و زهرا افضلی گروه<sup>۱</sup>

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۳/۹/۱؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۴/۲۶)

### چکیده

بررسی پدیده فرسایش موضعی در پایین دست سازه‌های هیدرولیکی آنقدر پیچیده است که به راحتی نمی‌توان یک مدل عمومی برای تخمین صحیح ابعاد فرسایش توسعه داد. در چند دهه اخیر استفاده از روش‌های داده محور برای مدل‌سازی و پیش‌بینی رفتار نامعلوم یا پیچیده سیستم‌ها گسترش یافته است. یکی از انواع این روش‌ها، روش برخورد گروهی با داده‌ها (GMDH) است که با رویکرد خود سازماندهی داده‌ها، به تدریج مدل‌های پیچیده‌تری را در طول ارزیابی عملکرد مجموعه داده‌های ورودی و خروجی تولید می‌کند. هدف از انجام این تحقیق بررسی کارایی روش GMDH و توسعه مدلی بر مبنای آن برای تخمین صحیح ابعاد حفره فرسایش (ماکزیمم عمق آب‌شستگی، فاصله ماکزیمم عمق آب‌شستگی تا لبه سرریز و طول حفره فرسایش) در پایین دست سرریز سیفونی با مستهلک کننده انرژی جامی شکل برای مجموعه‌ای از داده‌های مشاهداتی آزمایشگاهی است. ۸۰ درصد داده‌ها در دوره آموزش و ۲۰ درصد باقی‌مانده برای دوره آزمون استفاده شد. متوسط مقادیر معیارهای آماری MSRE، MPRE، CE و RB در دوره آزمون برای تابع انتقالی غیرخطی درجه دوم (FUNC1) به ترتیب ۰/۹۲، ۰/۰۲، ۸/۷۴ و ۰/۰۱- و برای تابع انتقالی غیرخطی درجه اول (FUNC2) به ترتیب ۰/۸۵، ۰/۰۲، ۱۰/۴۳ و ۰/۰۲- محاسبه شدند و نتایج نشان داد عملکرد (FUNC1) بهتر از (FUNC2) بوده است. همچنین مقدار ضریب تبیین (R2) برای تخمین ابعاد هندسه حفره فرسایش با روش‌های رگرسیون خطی، رگرسیون غیرخطی و شبکه‌های عصبی نیز مقایسه شد. نتایج حاکی از عملکرد بسیار مناسب مدل توسعه داده شده GMDH در تخمین صحیح ابعاد حفره فرسایش است.

واژه‌های کلیدی: روش‌های داده محور، فرسایش، GMDH، سرریز سیفونی، مدل‌سازی، پرش اسکی

۱. گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید باهنر کرمان

۲. گروه مهندسی آب، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد اراک، ایران

\*: مسئول مکاتبات: پست الکترونیکی: kouroshqaderi@uk.ac.ir

## مقدمه

آب‌شستگی بستر و دیواره رودخانه‌ها، پدیده‌ای است که به‌صورت طبیعی و یا غیرطبیعی و به‌دلیل تغییرات ایجاد شده توسط بشر در اطراف سازه‌های هیدرولیکی در اثر عبور جریان آب ایجاد می‌شود. گودال‌های ایجاد شده در اثر آب‌شستگی در اطراف این سازه‌ها ممکن است خطرات جدی را برای پایداری سازه به‌همراه داشته باشد (۲۲). از این‌رو بررسی مکانیزم آب‌شستگی به‌خصوص در پایین‌دست حوضچه‌های آرامش، سرریزها و پایه پل‌ها از اهمیت زیادی برخوردار است.

انواع متعددی از سرریزها در سازه‌های هیدرولیکی برای عبور آب‌های اضافی ناشی از سیلاب و یا برای کنترل جریان مورد استفاده قرار می‌گیرند (۹). در تمام انواع سرریزها می‌بایست به نوعی انرژی اضافی جریان عبوری از روی سرریز مستهلک شود. یکی از راه‌های مستهلک کردن انرژی استفاده از سرریز جامی شکل پرش اسکی است که جت آب را به ناحیه‌ای دورتر از حاشیه سرریز جامی شکل به هوا پرتاب می‌کند. به علت تأثیر سرعت بالای جت آب، در اطراف محل برخورد آب فرسایش موضعی اتفاق می‌افتد (۸). سرریز جامی شکل نسبت به حوضچه‌های آرامش و سایر مستهلک‌کننده‌های انرژی اقتصادی‌تر و بهینه‌تر است. این سرریزها قادر به مستهلک کردن انرژی در سرعت‌های بالای ۲۰ متر بر ثانیه هستند (۲۸). لذا اطلاع از مقدار حداکثر آب‌شستگی اطراف این سازه از اهمیت خاصی برخوردار است.

در چند دهه اخیر تلاش‌های زیادی برای مدل‌سازی و تخمین صحیح ابعاد حفره فرسایش در اطراف سازه‌های هیدرولیکی با استفاده از معادلات تجربی، مدل‌های فیزیکی و رویکردهای تئوری انجام شده است. معادلات تجربی متعددی برای این منظور توسعه داده شده که در فرم معادلات و تخمین مقادیر فرسایش دارای تفاوت‌های زیادی هستند. این معادلات اغلب در شرایط محدودی دارای اعتبار هستند (۱۷).

از لحاظ تئوری برای مدل کردن یک سیستم لازم است که روابط ریاضی صریح بین ورودی‌ها و خروجی‌ها به‌طور دقیق

معلوم باشد. استخراج یک مدل‌سازی صریح بسیار مشکل است و در بسیاری از سیستم‌ها این روابط نامعلوم هستند. در این حالت روش‌های داده‌محور که محاسبات را بر مبنای داده‌های ورودی و خروجی انجام می‌دهند مورد توجه قرار می‌گیرند (۲۳). روش‌های داده‌محور دارای توانایی‌های زیادی در شناسایی سیستم‌های غیرخطی و مسائل کنترلی دارند. تحقیقات زیادی برای استفاده از این روش‌ها به‌عنوان ابزار مؤثری جهت شناسایی و مدل‌سازی سیستم‌های پیچیده صورت گرفته است (۲۶). شین و پارک (۲۵) از رویکرد شبکه‌های عصبی برای فرموله کردن فرسایش اطراف پایه‌های پل، گون و گونال (۱۴) از شبکه‌های عصبی برای تخمین میزان فرسایش در پائین‌دست سازه‌های کنترلی، گوئل و پال (۱۲) از روش ماشین‌بردار پشتیبان برای پیش‌بینی حداکثر عمق فرسایش در پائین‌دست دریاچه‌های رسوب‌شوی، سرریزها و سدهای کنترلی، گوون و مصطفی (۱۵) از برنامه‌ریزی ژنتیک در تخمین فرسایش در پایین‌دست سرریز لبه تیز، ریاحی مدوار و همکاران (۵) از سیستم تطبیقی استنتاج فازی عصبی برای تخمین فرسایش پایین‌دست سرریز، دهقانی و همکاران (۴) از شبکه‌های عصبی و سیستم استنتاج تطبیقی فازی عصبی برای تخمین فرسایش اطراف آب‌شکن‌های L شکل، غضنفری هاشمی و اعتماد شهیدی (۶) از روش ماشین‌بردار پشتیبان برای مدل‌سازی فرسایش اطراف پایه پل و گوون (۱۳) از شبکه‌های عصبی توصیفی برای تخمین ابعاد فرسایش در پایین‌دست سازه‌های هیدرولیکی استفاده نمودند. همچنین عظمت‌اله و همکاران (۹ و ۱۰) در تحقیقات مختلفی از روش‌های شبکه عصبی پیش‌رونده، تابع پایه شعاعی (Radial Basis Function)، برنامه‌ریزی ژنتیک و سیستم استنتاج تطبیقی فازی عصبی برای تخمین میزان فرسایش در پائین‌دست سرریزهای جامی شکل استفاده نمودند. نتایج حاکی از دقت و توانایی بالای روش‌های فوق در برآورد میزان فرسایش در پایین‌دست سرریز جامی شکل است.

یکی از انواع روش‌های هوشمند داده‌محور، روش برخورد

و کارایی روش داده محور GMDH برای تخمین صحیح هندسه حفره فرسایش در پایین دست سرریز سیفونی با مستهلک کننده انرژی جامی شکل برای مجموعه‌ای از داده‌های آزمایشگاهی است. به این منظور مدلی براساس رویکرد استقرائی GMDH برای تخمین صحیح حفره فرسایش در پایین دست سرریز سیفونی با مستهلک کننده انرژی جامی شکل در قسمت برنامه نویسی نرم افزار MATLAB توسعه داده شده است.

### مواد و روش‌ها

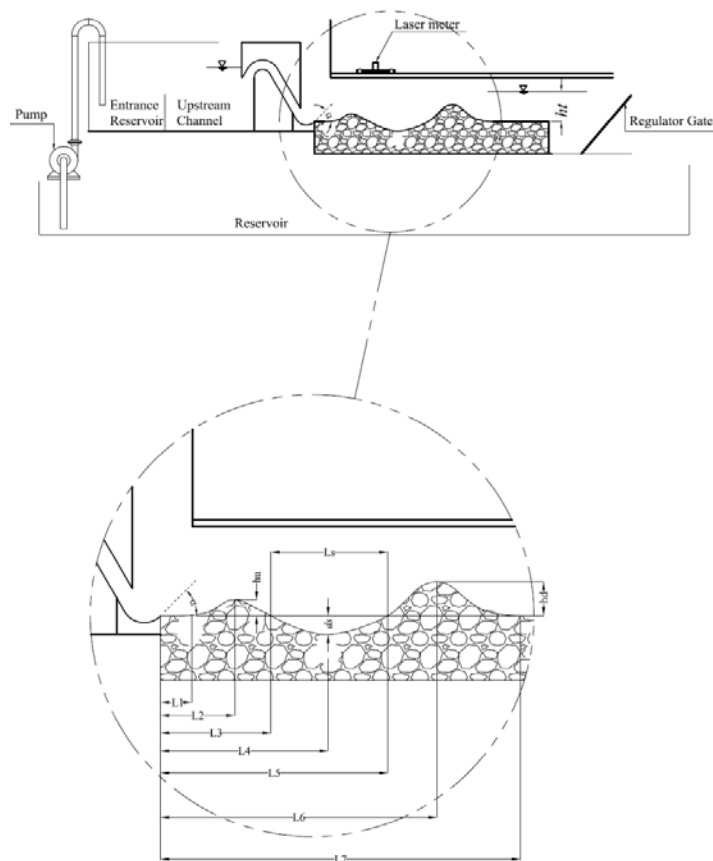
در این تحقیق نیز برای مدل سازی تخمین هندسه حفره فرسایش در پایین دست سرریز سیفونی با مستهلک کننده انرژی جامی شکل از داده‌های برداشت شده از مدل فیزیکی ساخته شده توسط جعفری نیا و همکاران (۲) استفاده شده است. آزمایش‌ها در یک فلوم آزمایشگاهی به طول ۱۹ و عرض یک متر انجام شده است. یک سرریز سیفونی از جنس پلاکسی گلاس به طول ۷۷، ارتفاع ۹۵ و عرض ۳۰ سانتی متر طراحی و در ابتدای قسمت میانی فلوم آزمایشگاهی در وسط عرض فلوم و به فاصله ۳۰ سانتی متری از کف فلوم طوری نصب شد که حفره فرسایشی ایجاد شده در پایین دست آن تحت تأثیر دیواره‌های فلوم قرار نگیرد (شکل ۱). همچنین سه باکت با زوایای پرتاب ۳۰، ۴۵ و ۶۰ درجه برای این سرریز طراحی و کلیه آزمایش‌ها تحت تأثیر این زوایای پرتاب مختلف انجام شد. از سه نوع مصالح بستر، با دانه بندی یکنواخت و قطر متوسط معادل ۱/۴، ۳/۷ و ۸/۱ میلی متر استفاده شد. در مجموع ۱۲۵ آزمایش انجام شده است. جدول (۱) محدوده تغییرات متغیرها در آزمایش‌ها مختلف را نشان می دهد. تمامی آزمایش‌ها در حالت جت مستغرق و تراز مخزن بالاتر از تاج سیفون انجام شده‌اند.

### آنالیز ابعادی

متغیرهای اصلی تأثیرگذار در پدیده آب شستگی در پایین دست سرریز سیفونی عبارتند از Q: دبی،  $\rho_w$ : جرم حجمی آب،  $\rho_s$ : جرم حجمی مصالح بستر،  $\mu$ : لزوجت دینامیکی آب،

گروهی با داده‌ها (GMDH) است که یک رویکرد خود سازماندهی بوده و به تدریج مدل‌های پیچیده تری در طول ارزیابی عملکرد مجموعه داده‌های ورودی و خروجی تولید می شود. ایده اصلی GMDH به صورت ساختن یک تابع تحلیلی مبتنی بر یک شبکه پیش رونده براساس توابع انتقالی دو جمله‌ای است که ضرایب آن از طریق تکنیک‌های رگرسیونی به دست می آید. استفاده از چنین شبکه خود سازماندهی دارای کاربردهای موفقیت آمیزی در مهندسی، علوم و اقتصاد بوده است (۲۰). کاربردهای بسیار کمی از این روش در مهندسی منابع آب گزارش شده است (۲۷). قادری و همکاران (۷) به منظور بهره برداری سیستماتیک از مخازن چندگانه موجود در دشت تهران شامل سدهای لار، لتیان و کرج، مدل هائی براساس الگوریتم GMDH توسعه دادند و نشان دادند که نتایج حاصل از مدل سازی GMDH برای بهره برداری از مخازن چندگانه دشت تهران دارای عملکرد بسیار بالائی هستند. ایوانی و همکاران (۱) روش GMDH را جهت ارائه یک مدل پیش بینی نرخ انتقال رسوب در سیستم رودخانه‌ای به کار بردند و جهت ارزیابی مدل از معیارهای ضریب تبیین، CE و MSE استفاده کردند. نتایج حاصل از این مطالعه نشان دادند که روش GMDH نسبت به سایر انواع روش‌ها از قابلیت بالاتری جهت پیش بینی و شبیه سازی نرخ انتقال رسوب در رودخانه‌ها برخوردار است. نیکولایف و هیتوشی (۲۱)، نریمان زاده و همکاران (۲۰)، حسین زاده و همکاران (۳) و ... از این روش در مدل سازی فرایندهای مختلف استفاده نموده‌اند.

بررسی مطالعات پیشین نشان داد که عمده آنها بر روی پیش بینی ماکزیمم عمق آب شستگی در شرایط جت آزاد متمرکز بوده و کمتر به ابعاد حفره آب شستگی شامل حداکثر عمق حفره آب شستگی، فاصله محل وقوع حداکثر عمق حفره تا لبه سرریز و طول حفره آب شستگی پرداخته شده است. همچنین مدل سازی پدیده آب شستگی در پایین دست سرریز سیفونی با استفاده از روش‌های داده محور، تاکنون مورد بررسی قرار نگرفته است. بنابراین هدف از انجام این تحقیق بررسی توانایی



شکل ۱. فلوم آزمایشگاهی و ملحقات وابسته به آن و پارامترهای مورد اندازه‌گیری حفره فرسایش

جدول ۱. محدوده تغییرات متغیرها

زاویه پرتاب باکت $\alpha$ (درجه)	عمق پایاب $t$ (cm)	ضخامت مصالح بستر (cm)	$d_{50}$ (mm)	$Q$ (l/s)
۶۰ و ۴۵، ۳۰	۱۵-۳۵	۳۰	۱/۴-۸/۱	۳۹/۲-۴۹/۷۶

باشد. پارامترهای بی‌بعد فرسایش در پایین‌دست سرریز سیفونی با مستهلک کننده انرژی جامی شکل به صورت زیر به دست می‌آید:

$$\frac{\phi}{h_t} = f \left( \frac{H}{h_t}, \frac{d_{50}}{h_t}, \frac{\rho_s}{\rho_w}, \frac{Q}{h_t^2 \sqrt{gh_t}}, \alpha \right) \quad [2]$$

در روابط تابعی فوق نسبت  $\rho_s/\rho_w$  ثابت است و می‌تواند از تجزیه و تحلیل حذف شود.

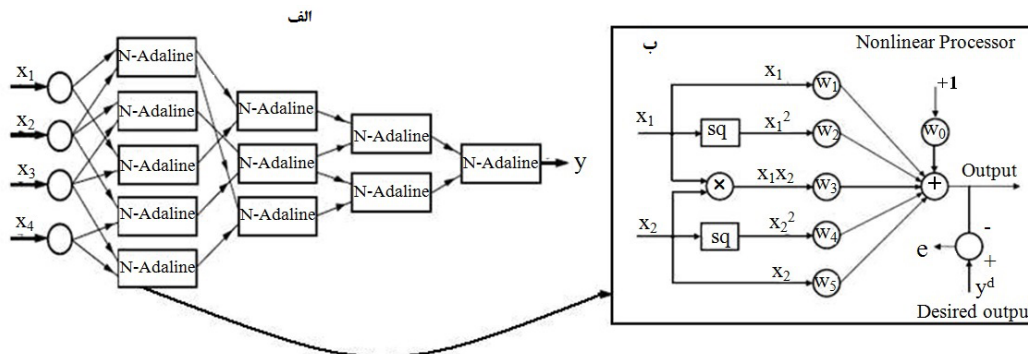
#### روش GMDH

یکی از انواع روش‌های داده محور، رویکرد استقرائی GMDH است که توسط ایواخنکو (۱۶) به‌عنوان یک روش

$h_t$ : عمق پایاب،  $d_{50}$ : اندازه ذرات مصالح بستر،  $\alpha$ : زاویه پرتابه،  $R$ : شعاع پرتابه،  $g$ : شتاب ثقل،  $H$ : اختلاف ارتفاع بین تراز بالادست و پایین‌دست،  $d_s$ : ماکزیم عمق آب‌شستگی،  $L_f$ : فاصله ماکزیم عمق آب‌شستگی تا لبه سرریز و  $L_s$ : طول حفره آب‌شستگی است. متغیرهای مذکور در شکل (۱) نشان داده شده‌اند.  $\phi$  را می‌توان به صورت تابعی از متغیرهای مستقل زیر نوشت:

$$\phi = f(Q, \rho_w, \rho_s, \mu, H, h_t, d_{50}, \alpha, g) \quad [1]$$

که  $\phi$  می‌تواند بیانگر یکی از نسبت‌های  $\frac{d_s}{h_t}$ ،  $\frac{L_s}{h_t}$  و یا  $\frac{L_f}{h_t}$



شکل ۲. الف). شماتیکی از ساختار GMDH و ب). ساختار هر نرون (N-Adaline) با تابع انتقال FUNC1

هر نرون در شبکه از طریق رویکرد حداقل مربعات (Least Square Estimation) محاسبه می‌شوند. بعد از به دست آمدن ضرایب براساس داده‌های آموزشی، شاخص عملکرد هر نرون محاسبه می‌شود و تنها نرون‌هایی که دارای شاخص عملکرد بالاتر از مقدار آستانه هستند، برای ادامه مسیر انتخاب می‌شوند. این معیار انتخاب به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$R^2 = \frac{\sum_{t=1}^N (\hat{y}(t) - \bar{\hat{y}})^2}{\sum_{t=1}^N (y(t) - \bar{y})^2} \quad [5]$$

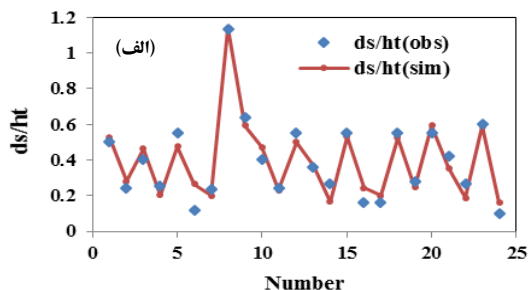
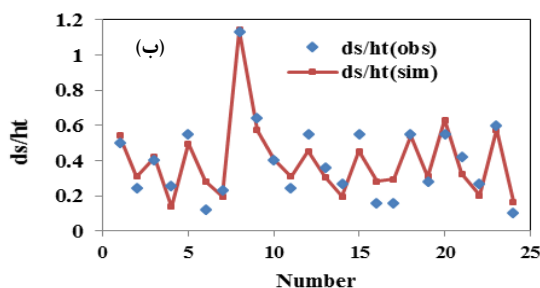
که  $y$  خروجی مطلوب،  $\hat{y}$  خروجی محاسباتی،  $\bar{\hat{y}}$  میانگین خروجی‌های محاسباتی و  $\bar{y}$  میانگین خروجی‌های مطلوب است. شماتیکی از ساختار این روش همراه با ساختار هر نرون (آدالین) در شکل (۲) ارائه شده است. در الگوریتم GMDH برای تولید نرون‌های لایه اول، تمام متغیرهای ورودی با هم ترکیب شده و تمام ترکیبات دوتائی متغیرهای ورودی در نظر گرفته می‌شوند. به عنوان مثال اگر تعداد متغیرهای ورودی  $m$  باشد، تعداد نرون‌های لایه اول برابر با  $m(m-1)/2$  است. الگوریتم GMDH این نرون‌ها را آموزش می‌دهد و با توجه به مقدار معیار رابطه (۵)، تعداد  $F$  نرون برای تولید لایه بعدی انتخاب می‌شود. برای ایجاد لایه دوم، تمام ترکیبات دوتائی خروجی‌های نرون‌های انتخاب شده لایه قبل ساخته می‌شوند.

تجزیه و تحلیل چند متغیره برای شناسایی و مدل‌سازی سیستم‌های پیچیده توسعه داده شده است. از قابلیت‌های این روش می‌توان به مدل‌سازی سیستم‌های پیچیده با دانش ویژه اولیه محدود اشاره نمود. ایده اصلی GMDH به صورت ساختن یک تابع تحلیلی مبتنی بر یک شبکه پیش‌رونده براساس توابع انتقالی دو جمله‌ای است (۱۹). روش GMDH برای شناسایی سیستم‌های غیرخطی با متغیرهای ورودی زیاد است که شکل ریاضی آن توسط شبکه‌ای متوالی از توصیفات جزئی (Partial description) بیان می‌شود. خروجی هر لایه به عنوان ورودی لایه بعدی به کار می‌رود. ساختار آن به صورت یک شبکه چند لایه پیش‌رونده است که مشابه با شبکه‌های عصبی مصنوعی است با این تفاوت که برعکس شبکه‌های عصبی، ساختار این شبکه، تعداد نرون‌ها در هر لایه و تعداد لایه‌ها نامعلوم بوده و در طول فرایند آموزش تعیین می‌شود (۲۲). ساختار این روش به صورت یک شبکه پیش‌رونده چند لایه است که از یک سری نرون‌های پشتیبانی تشکیل شده است. هر نرون در یک شبکه GMDH معمولاً دارای دو ورودی  $x_1$  و  $x_2$  است که ترکیبات چند جمله‌ای آنها منجر به محاسبه  $Y$  به عنوان خروجی می‌شود. تابع انتقال این نرون‌ها می‌تواند به صورت یک چند جمله‌ای به شکل‌های مختلف بیان شود:

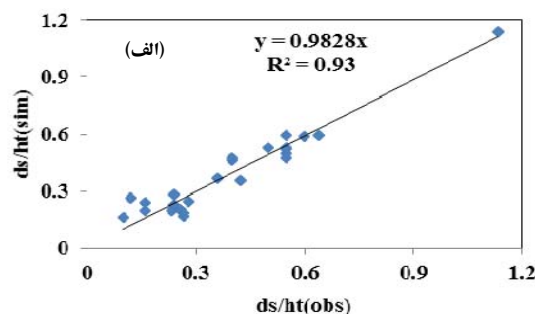
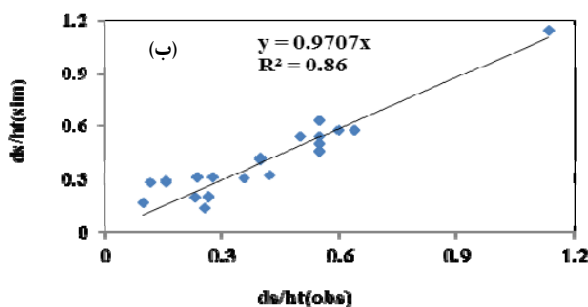
$$Y = w_0 + w_1x_1 + w_2x_2 + w_3x_1^2 + w_4x_2^2 + w_5x_1x_2 \quad [3]$$

$$Y = w_0 + w_1x_1 + w_2x_2 + w_3x_1x_2 \quad [4]$$

که  $w_0$  تا  $w_5$  ضرایب چند جمله‌ای هستند. ضرایب



شکل ۳. مقادیر مشاهداتی و محاسباتی  $d_s/h_t$  در دوره آزمون: الف) (FUNC1) و ب) (FUNC2)



شکل ۴. مقایسه مقادیر مشاهداتی و محاسباتی  $d_s/h_t$  در دوره آزمون: الف) (FUNC1) و ب) (FUNC2)

$\frac{H}{h_t}$ ،  $\frac{d_{s_0}}{h_t}$  و  $\frac{Q}{h_t \sqrt{gh_t^3}}$  و  $\alpha$  و متغیر خروجی از مدل‌های توسعه

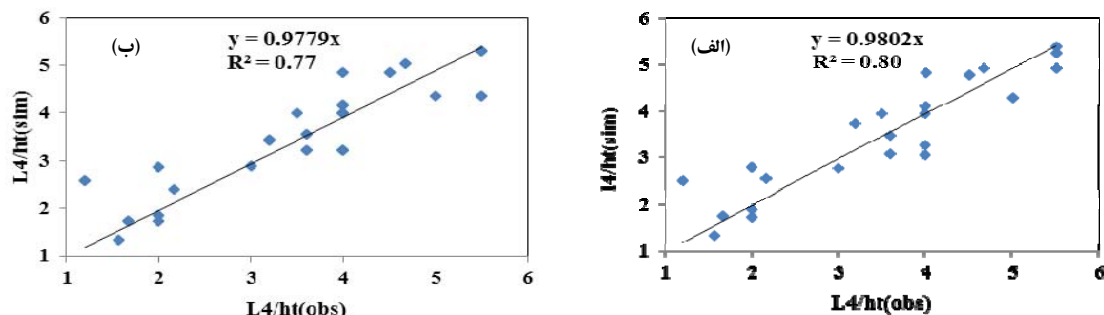
داده شده به ترتیب شامل  $d_s$ ،  $L_p$  و  $L_s$  بوده است. در ابتدا داده‌ها نرمال شده‌اند. تعداد متغیرهای ورودی برابر با ۶ و تعداد نرون‌های لایه اول براساس ترکیبات دوتایی از متغیرهای ورودی برابر با ۱۵ نرون است. بنابراین در این تحقیق ۳ مدل برای تخمین حداکثر عمق حفره آب‌شستگی ( $d_s$ )، فاصله محل وقوع حداکثر عمق حفره تا لبه سرریز ( $L_p$ ) و طول حفره آب‌شستگی ( $L_s$ ) توسعه داده شده است. برای آموزش وزن‌ها در هر نرون از رویکرد تخمین حداقل مربعات (LSE) و در هر نرون از دو تابع محرک روابط (۳) و (۴) استفاده شده است. از رابطه (۳) به‌عنوان تابع انتقالی FUNC1 و از رابطه (۴) به‌عنوان تابع انتقالی FUNC2 استفاده شده است.

در شکل (۳) نتایج حاصل از مدل‌سازی برای تخمین نسبت  $\frac{d_s}{h_t}$  در دوره آزمون برای توابع انتقالی (FUNC1) و (FUNC2) و در شکل (۴) مقایسه مقادیر مشاهداتی و محاسباتی برای

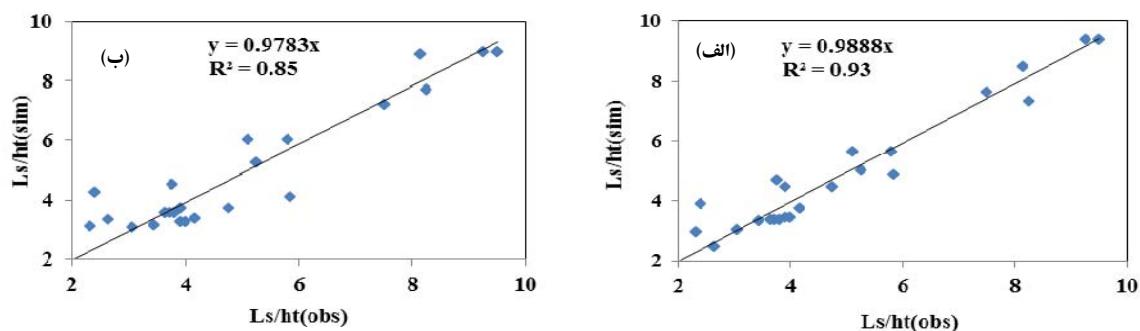
بهترین عملکرد مدل زمانی به دست می‌آید که  $F=0/4L_1$  باشد (۱۸ و ۱۱).

### مدل‌سازی و نتایج

در این بخش چگونگی و نتایج توسعه مدل GMDH در تخمین میزان حداکثر ابعاد حفره فرسایش در پایین‌دست سرریز سیفونی با مستهلک کننده جامی شکل ارائه می‌شود. ابتدا ساختار مدل، متغیرهای ورودی و خروجی و سپس نتایج کلی اجرای مدل برای دوره آزمون ارائه خواهد شد. با هدف تخمین صحیح ابعاد هندسه حفره فرسایش در پایین‌دست سرریز سیفونی با مستهلک کننده انرژی، ابتدا مدلی براساس رویکرد داده محور GMDH در قسمت برنامه‌نویسی نرم‌افزار MATLAB تهیه شد. همان‌طور که گفته شده ۱۲۵ سری داده‌های ورودی خروجی از انجام آزمایش‌ها در دسترس است که ۸۰ درصد داده‌ها برای آموزش و ۲۰ درصد باقی‌مانده برای آزمون انتخاب شده‌اند. متغیرهای ورودی برای مدل توسعه داده شده شامل نسبت‌های



شکل ۵. مقایسه مقادیر مشاهداتی و محاسباتی  $L_4/h_t$  در دوره آزمون: الف) (FUNC1) و ب) (FUNC2)



شکل ۶. مقایسه مقادیر مشاهداتی و محاسباتی  $L_s/h_t$  در دوره آزمون: الف) (FUNC1) و ب) (FUNC2)

تغییرات MSRE بین صفر تا  $\infty$  است درحالی که مقادیر بین صفر تا ۰/۵ مقادیر قابل قبول هستند (۲۴).

همچنین نتایج مدل سازی با روش GMDH برای تخمین ابعاد هندسه حفره فرسایش در پایین دست سرریز سیفونی با مستهلک کننده انرژی جامی شکل با نتایج مدل سازی با روش های رگرسیون خطی، رگرسیون غیرخطی و شبکه های عصبی نیز مقایسه شد. در جدول ۲ مقادیر معیارهای آماری با روش های مختلف جهت پیش بینی ابعاد حفره آبستنگی ارائه شده اند. مقادیر معیار آماری ضریب تبیین  $R^2$  با روش های فوق در جدول (۳) ارائه شده اند. همچنان که مقادیر این معیار آماری نشان می دهند مدل توسعه داده شده در این تحقیق با تابع انتقالی FUNC1 دارای ضریب تبیین مناسبی در مقایسه با دیگر روش ها و به ویژه شبکه های عصبی است. مقادیر بالای ضریب تبیین مدل GMDH حاکی از عملکرد مناسب این روش همانند شبکه های عصبی در تخمین ابعاد هندسه حفره فرسایش در پایین دست سرریز سیفونی با مستهلک کننده انرژی جامی شکل است.

توابع انتقالی مذکور ارائه شده است. شکل ها بیانگر تطابق خوبی بین داده های مشاهداتی و تخمین زده شده توسط روش GMDH هستند. همچنین مقایسه مقادیر مشاهداتی و محاسباتی برای نسبت های  $\frac{L_s}{h_t}$  و  $\frac{L_4}{h_t}$  با هر دو تابع انتقالی در شکل های (۵) و (۶) ارائه شده اند. تطابق مناسب بین داده های مشاهداتی و محاسباتی در این شکل ها مشهود است.

همچنین برای بررسی بیشتر نتایج به دست آمده از مدل سازی از چندین معیار آماری استفاده شده است. این معیارهای آماری شامل مجموع مربعات میانگین خطای نسبی (MSRE)، مجموع مطلق میانگین خطای نسبی (MPRE)، ضریب راندمان (CE) و انحراف نسبی (RB) است. MSRE و MPRE بیانگر شاخصی برای بیان دقت نسبی مدل سازی، RB بیانگر این است که پاسخ های تولید شده نسبت به مقادیر مطلوب کمتر تخمین زده شده اند یا بیشتر و CE بیان کننده شاخصی برای تولید مناسب پاسخ ها توسط مدل است. دامنه

جدول ۲. شاخص‌های آماری در دوره آزمون

مدل	تابع محرک	CE	MSRE	MPRE	RB
$\frac{d_s}{h_t}$	FUNC1	۰/۹۴۵	۰/۰۰۹۸	۷/۶	-۰/۰۰۸۷
$h_t$	FUNC2	۰/۸۷۸۶	۰/۰۱۵۳	۹/۷۷	-۰/۰۱۱۳
$\frac{L_f}{h_t}$	FUNC1	۰/۸۸۲۱	۰/۰۲۸۱	۱۱/۲۲	-۰/۰۲۰۹
$h_t$	FUNC2	۰/۸۱۲۶	۰/۰۳۱۵	۱۱/۰۷	-۰/۰۲۲۴
$\frac{L_S}{h_t}$	FUNC1	۰/۹۳۲۳	۰/۰۱۰۸	۷/۴۱	-۰/۰۰۹۵
$h_t$	FUNC2	۰/۸۶۹	۰/۰۲۱۵	۱۰/۴۴	-۰/۰۱۸۱

جدول ۳. مقادیر ضریب تبیین در دوره آزمون با استفاده از روش‌های مختلف

روش	GMDH FUNC1	GMDH FUNC2	شبکه عصبی	رگرسیون خطی	رگرسیون غیرخطی
$\frac{d_s}{h_t}$	۰/۹۲۵	۰/۸۶۴	۰/۹۳۰	۰/۸۴۱	۰/۸۷۱
$\frac{L_S}{h_t}$	۰/۸۷۲	۰/۷۷۴	۰/۸۷۱	۰/۷۶۲	۰/۷۴۵
$\frac{L_f}{h_t}$	۰/۹۲۸	۰/۸۵۲	۰/۸۶۲	۰/۸۵۵	۰/۸۳۲

## نتیجه‌گیری

در این تحقیق مدلی براساس رویکرد داده محور GMDH برای تخمین صحیح ابعاد هندسه حفره فرسایش در پایین‌دست سرریز سیفونی با مستهلک کننده انرژی توسعه داده شد. به این منظور مدلی در قسمت برنامه‌نویسی نرم‌افزار MATLAB تهیه شد. مجموعه‌ای از ۱۲۵ مجموعه داده‌های آزمایشگاهی برداشت شده برای مدل‌سازی استفاده شد. ۸۰ درصد از مجموعه داده‌های مشاهداتی آزمایشگاهی، برای آموزش مدل و ۲۰ درصد باقی‌مانده برای آزمون استفاده شد. خروجی مدل توسعه داده شده شامل  $d_s$ : ماکزیمم عمق آب‌شستگی،  $L_f$ : فاصله ماکزیمم عمق آب‌شستگی تا لبه سرریز و  $L_S$ : طول حفره

آب‌شستگی بوده است. در مدل توسعه داده شده از ۲ تابع انتقالی درجه اول غیرخطی و درجه دوم غیرخطی استفاده شد. مقادیر معیارهای آماری محاسبه شده برای تخمین ابعاد هندسه حفره فرسایش به‌ویژه با استفاده از تابع انتقالی FUNC1 در حد بسیار خوب قرار دارد. همچنین مقایسه نتایج مدل توسعه داده شده در مقایسه با دیگر روش‌های آماری و داده محور حاکی از عملکرد مناسب این روش و توانایی بالای این روش در تخمین ابعاد هندسه حفره فرسایش در پایین‌دست سرریز سیفونی با مستهلک کننده انرژی جامی شکل دارد. بنابراین می‌توان گفت که روش GMDH روش مناسبی در تخمین میزان فرسایش موضعی اطراف سازه‌های هیدرولیکی است.

## منابع مورد استفاده

- ایوانی، ز.، احمدی، م.م. و قادری، ک. ۱۳۹۲. توسعه مدل پیش بینی نرخ انتقال بار رسوبات معلق در سیستم با استفاده روش گروهی کنترل داده‌ها (GMDH)، دوازدهمین همایش ملی آبیاری و کاهش تبخیر، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان.
- جعفری نیا، ر. ۱۳۸۸. بررسی آزمایشگاهی ابعاد حفره آب‌شستگی در پایین‌دست سرریز سیفونی. پایان‌نامه دکتری، دانشگاه آزاد



- تهران واحد علوم تحقیقات. تهران. ایران.
۳. حسین زاده، م.، ک. قادری و م. م. احمدی. ۱۳۹۲. مدل‌سازی رابطه دبی اشل در رودخانه با استفاده از روش‌های هوشمند (GMDH, NF-GMDH)، اولین همایش ملی بهینه سازی مصرف آب، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان.
۴. دهقانی، آ. آ.، س. ف. هاشمی نجفی، س. ع. ایوب‌زاده و م. ا. مشکاتی. ۱۳۸۸. تخمین هوشمند حداکثر عمق آب شستگی اطراف آب‌شکن‌های L شکل با استفاده از شبکه های عصبی مصنوعی و سیستم استنتاج فازی-عصبی. مجله پژوهش های حفاظت آب و خاک ۱۶(۱): ۱۶۱-۱۴۳.
۵. ریاحی مدوار، ح.، س. ع. ایوب‌زاده و ع. خاشعی. ۱۳۸۶. استفاده از سیستم تطبیقی استنتاج فازی (ANFIS) در تخمین ابعاد حفره آب‌شستگی پایین‌دست سرریز. ششمین کنفرانس هیدرولیک ایران.
۶. غضنفری هاشمی، س. و ا. اعتماد شهیدی. ۱۳۹۱. پیش‌بینی عمق آب‌شستگی اطراف پایه پل با استفاده از ماشین‌های بردار پشتیبان. مجله علمی - پژوهشی عمران مدرس ۱۲(۲): ۳۶-۲۳.
۷. قادری، ک.، د. ر. عرب، م. تشنه‌لب و آ. قزاق. ۱۳۸۹. مدل‌سازی بهره‌برداری هوشمند از مخازن با استفاده از روش برخورد گروهی با داده‌ها. تحقیقات منابع آب ایران ۶(۳): ۶۷-۵۵.
8. Ayoubloo, M. K., H. Z. Azamathullah, Z. Ahmad, A. Ghani, J. Mahjoobi and A. Rasekh. 2011. Int. J. comput. Appl. 33(1): 92-97.
9. Azmatullah, H., M. C. Md. Deo and P. B. Deolalikar. 2008. AlternativeNeuralnetworksto estimation scours below spillway. Adv. Eng. Softw. 39: 689-698.
10. Azmatullah, H., M. C. Md. Deo and P. B. Deolalikar. 2005. Neuralnetworks for estimation of scour downstream of a ski-jump bucket. J. Hydraul. Eng. 131(10): 898-908.
11. Farlow S. J. 1984. Self-Organizing Method in Modeling: GMDH Type Algorithms. Marcel Dekker. Inc.
12. Goel, A. and M. Pal. 2009. Application of support vector machines in scour prediction on grade-control structures. Eng. Appl. Artif. Intel. 22: 216-223.
13. Guven, A. 2011. A multi-output descriptive neural network for estimation of scour geometry downstream from hydraulic structures. Adv. Eng. Softw. 42: 85-93.
14. Guven, A. and M. Gunal. 2008. Prediction of scour downstream of grade-control structures using neural networks. J. Hydraul. Eng. ASCE. 134(11):1656-1660.
15. Guven, A. and G. Mustafa. 2008. Genetic programming approach for prediction local scour downstream of hydraulic structure. J. Hydraul. Eng. ASCE. 134(2): 241-249.
16. Ivakhnenko, A. G. 1968. The group method of data handling – a rival of the method of stochastic approximation. Soviet Automatic Cont. c/c of Avtomatika 1(3):43-55.
17. Khwairakpam, P. and A. Mazumdar. 2009. Local scour around hydraulic structures. Int. J. of Recent Trends Eng. 1(6): 59-61.
18. Madala, H. R. and A. G.Ivakhnenko. 1994. Inductive Learning Algorithms for Complex Systems Modeling. CRC Press, Inc., 2000 corporate Blvd., Boca Raton, Florida 33431, ISBN: 0-8493-4438-7.
19. Muller, J. A. and A. G. Ivakhnenko. 1996. Self-organizing modeling in analysis and prediction of stock market. In: Proceedings of the Second International Conference on Application of Fuzzy Systems and Soft Computing- ICAFS'96, Siegen, Germany. pp: 491-500
20. NarimanZadeh, N., A. Darvizhe and H. Gharabaghi. 2002. Modeling of explosive cutting process of plates using GMDH neural networks and singular value decomposition. J. Mater. Process Technol. 128(1): 80-87.
21. Nikolaev, Y. and I. Hitoshi, 2003. Polynomial harmonic GMDH learning networks for time series modeling. Neural Networks, 16:1527-1540.
22. Onwubolu, G. C. 2008. Design of hybrid differential evolution and group method of data handling networks for modeling and prediction groups using neural network and adaptive Neuro-fuzzy inference system. Appl. Soft Computing. 746-755.
23. Sanchez, E., T. Shibata and L. A. Zadeh. 1997. Genetic algorithms and fuzzy logic systems. Reveredge: word scientific. World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd. P O Box 128, Farrer Road, Singapore 912805.
24. Shamseldin, A. Y. 1997. Application of a neural network technique to rainfall-runoff modeling. J. Hydrol. Eng. ASCE. 199: 272 - 294.
25. Shin, J. H. and H. I. Park. 2010. Neural network formula for local scour at piers using field data. Mar. Georesour.

- Geotec. 28:37-48.
26. Solomatin, D. and A. Ostfeld. 2008. Data-Driven modeling: some past experiences and new approaches. J. Hydroinform. 10(1): 3-22.
  27. Sumsudin, R., P. Saad and A. Shabri. 2010. A hybrid least square support vector machines and GMDH approach for river flow forecasting. Hydrol. Earth. Syst. Sci. Discussions 7: 3691-3731.
  28. Vischer, D. L. and W. H. Hager. 1997. Energy Dissipaters, Balkema, Rotterdam, the Netherlands.

## Estimation of Local Scour Dimension below Siphon Spillway with the Ski-jump Bucket Energy Dissipater Using the Group Method of Data Handling (GMDH)

K. Qaderi<sup>1\*</sup>, R. Jafarinia<sup>2</sup>, B. Bakhtiari<sup>1</sup> and Z. Afzali grouh<sup>1</sup>

(Received: Nov. 22-2014; Accepted: July 17-2017)

### Abstract

The investigation of local scour below hydraulic structures is so complex that makes it difficult to establish a general model to provide an accurate estimation for the local scour dimension. During the last decades, Data Driven Methods (DDM) have been used extensively in the modeling and prediction of unknown or complex behaviors of systems. One of these methods is Group Method of Data Handling (GMDH), that is a self-organization approach and increasingly produces a complex model during the performance evaluation of the input and output data sets. So, the objective of this study was to investigate the potential of the GMDH method in the accurate estimation of local scouring geometry (maximum scour depth, the distance of maximum local scour depth till Ski-jump bucket and length of local scour) below the Siphon spillway with Ski-jump bucket energy dissipaters for a set of experimental data. 80% of data set was used for the training period and the remaining data set was used for the test period. The average values of MSRE, MPRE, CE and RB for the nonlinear second order transfer function (FUNC1) were calculated to be 0.92, 0.02, 8.74, -0.01; also, for the nonlinear first order transfer function (FUNC2), they were 0.85, 0.02, 10.43 and -0.02, respectively. The results indicated that the performance of FUNC1 was better than FUNC2. Also, the value of the coefficient of determination ( $R^2$ ) for the estimation of local scour dimension using different methods such as linear regression, nonlinear regression and ANN indicated the high performance of the developed model of GMDH in the accurate estimation for local scour dimensions.

**Keywords:** Data Driven Methods, Local Scour, GMDH, Siphon Spillway, Modeling, Ski-jump Bucket.

---

1. Dept. of Water Eng., Faculty of Agric., Shahid Bahonar Univ. of Kerman, Kerman, Iran.

2. Dept. of Water Eng., Islamic Azad Univ. of Arak, Arak, Iran.

\*: Corresponding Author, Email: kouroshqaderi@uk.ac.ir