

مدل‌سازی آبخستگی در اطراف لوله‌های مستغرق توسط روش دسته‌بندی گروهی داده‌ها

ابراهیم شهبازیگی^۱، فریبرز یوسفوند^{۲*}، بهروز یعقوبی^۳

۱- دانشجوی دکتری منابع آب، گروه مهندسی آب، واحد کرمانشاه، دانشگاه آزاد اسلامی، کرمانشاه، پست الکترونیکی: shahbazbigi@yahoo.com

۲- استادیار، هیات علمی گروه مهندسی آب، واحد کرمانشاه، دانشگاه آزاد اسلامی، کرمانشاه، پست الکترونیکی: fariborzosefvand@gmail.com

۳- استادیار، هیات علمی گروه مهندسی آب، واحد کرمانشاه، دانشگاه آزاد اسلامی، کرمانشاه، پست الکترونیکی: behrouz.yaghoubi.h@gmail.com

تاریخ پذیرش: ۹۷/۷/۲۴

* نویسنده مسوول

تاریخ دریافت: ۹۷/۲/۱۱

چکیده

در این مقاله، الگوی آبخستگی در اطراف لوله‌های مستغرق که روی بستر رسوبی قرار داشتند، به روش دسته‌بندی گروهی داده‌ها (GMDH) شبیه‌سازی شده است. به منظور بررسی توانایی مدل ترکیبی، از شبیه‌سازی‌های مونت کارلو استفاده گردید. همچنین از روش اعتبارسنجی چند لایه‌ای ($k=6$) برای بررسی قابلیت مدل‌های مذکور بهره گرفته شد. در ادامه با استفاده از پارامترهای موثر بر آبخستگی، شش مدل GMDH مختلف توسعه داده شدند. با تجزیه و تحلیل نتایج مدل‌سازی، مدل برتر معرفی شد. مدل مذکور نتایج آزمایشگاهی را با دقت قابل قبولی پیش‌بینی نمود. مقادیر ضریب همبستگی، شاخص پراکندگی و خطای جذر میانگین مربعات برابر با ۰/۹۱۴، ۰/۱۶۰ و ۰/۱۴۱ محاسبه شد. برای مدل برتر نیز روابطی برای پیش‌بینی آبخستگی اطراف لوله‌های مستغرق بدست آمد. همچنین با انجام حساسیت‌سنجی پارامترهای ورودی، موثرترین پارامتر شناسایی شد. در نهایت، مدل GMDH 4 به‌عنوان مدل برتر شناسایی شد و نسبت فاصله بین لوله و بستر رسوبی قبل از آبخستگی به قطر لوله (e/D) به‌عنوان موثرترین پارامتر ورودی شناسایی گردید.

کلمات کلیدی: آبخستگی، لوله مستغرق، مدل‌سازی، روش دسته‌بندی گروهی داده‌ها، آنالیز حساسیت.

۱. مقدمه

و عدد فراوانی بر نحوه آبخستگی در مجاورت این نوع از سازه‌ها انجام گرفته است.

Bijker و Leeuwestein (۱۹۸۴) نحوه آبخستگی در اطراف لوله‌های مستغرق دایروی شکل را در اثر امواج و جریان مورد مطالعه قرار دادند. همچنین تاثیر پارامترهایی همچون قطر لوله، سرعت جریان ورودی و ارتفاع نسبی لوله را روی الگوی آبخستگی بررسی نمودند.

لوله‌های مستغرق به صورت افقی از بستر رودخانه‌ها و نواحی ساحلی برای انتقال مواد نفتی و گاز، مورد استفاده قرار می‌گیرند. وجود جریان‌های انتقالی و امواج باعث آبخستگی در مجاورت لوله‌های افقی شده و پایداری خط لوله را به مخاطره می‌اندازند. به دلیل اهمیت موضوع مورد نظر، مطالعات آزمایشگاهی، تحلیلی

این محققین مدل عددی خود را با استفاده از روش تفاضل محدود توسعه دادند. Teh و همکاران (۲۰۰۶) در یک مطالعه تحلیلی پایداری لوله‌های مستغرق افقی روی بستر دریا را مورد بررسی قرار دادند و مکانیسم شکست لوله مذکور را ارزیابی نمودند. این محققین، نتایج مدل تحلیلی خود را با مقادیر آزمایشگاهی مقایسه نمودند و نشان دادند که این مدل عددی دارای دقت قابل قبولی است. Sumer و همکاران (۲۰۰۶) تاثیر امواج را روی پدیده روان‌گرایی در اطراف لوله‌های مدفون در بستر سواحل، مورد مطالعه آزمایشگاهی قرار دادند. آن‌ها نشان دادند که تحت شرایط مذکور، فشار منفذی در کف لوله در مقایسه با سایر بخش‌ها به سرعت افزایش می‌یابد. اخیراً استفاده از مدل‌های محاسبات نرم روش‌های هوش مصنوعی به صورت گسترده‌ای در پیش‌بینی پدیده‌های غیر خطی و پیچیده مورد استفاده قرار گرفته‌اند (Azamathulla et al., 2011; Zounemat-Kermani and Bay, 2013).

در این خصوص، Etemad-Shahidi و همکاران (۲۰۱۱) با استفاده از مدل ماشین یادگیری $M5'$ ، الگوی آبخستگی در اطراف لوله‌های افقی واقع بر روی بستر رسوبی را در شرایط آب شفاف مدل‌سازی نمودند. آن‌ها برای پیش‌بینی مقدار آبخستگی روابطی را نیز پیشنهاد دادند. Najafzadeh و همکاران (۲۰۱۴a) مقدار آبخستگی در اطراف لوله‌های مستغرق در شرایط بستر متحرک و آب زلال را توسط روش دسته‌بندی گروهی داده‌ها تخمین زدند. همچنین Najafzadeh و همکاران (۲۰۱۴b) آبخستگی ناشی از امواج را توسط مدل دسته‌بندی گروهی داده‌ها شبیه‌سازی نمودند.

همان‌طور که مشاهده می‌شود، نحوه تخمین و پیش‌بینی آبخستگی در مجاورت لوله‌های مستغرق که به صورت افقی روی بستر رسوبی واقع شده‌اند توسط محققین مختلف بررسی شده‌اند. همچنین مدل‌سازی الگوی آبخستگی در مجاورت لوله‌های مستغرق دارای نکات فراوانی است که در این مطالعه توسط روش دسته‌بندی گروهی داده‌ها این مهم صورت می‌گیرد. در ابتدا مهمترین پارامترهای تاثیرگذار روی آبخستگی برای توسعه شش مدل عددی مختلف استفاده گردیدند و سپس با تجزیه و تحلیل نتایج مدل‌سازی، مدل برتر و پارامتر موثر معرفی شدند. در ادامه برای مدل برتر یک رابطه صریح و کاربردی ارائه گردید.

Sumer و همکاران (۱۹۸۸) در یک مطالعه آزمایشگاهی، تاثیرات ارتعاش لوله‌های مستغرق روی بستر رسوبی را در اثر وجود جریان ساحلی مورد مطالعه قرار دادند. این محققین با بررسی نتایج آزمایشگاهی بیان نمودند که ارتعاش لوله باعث افزایش فرسایش اطراف آن می‌شود، به گونه‌ای که ابعاد حفره آبخستگی در حالت ارتعاش بیشتر از آبخستگی اطراف لوله بدون ارتعاش ثبت گردید. Fredsoe و همکاران (۱۹۸۸) تاثیر جریان-های ساحلی را بر رفتار سه بعدی آبخستگی اطراف لوله‌های افقی مستغرق انتقال مواد نفتی مورد ارزیابی قرار دادند. این محققین معادله‌ای برای محاسبه طول حفره‌های آبخستگی ارائه نمودند. همچنین تاثیرات نیروی وزن سیال درون لوله و خود لوله را نیز بر ابعاد حفرات آبخستگی در نظر گرفتند.

Chiew (1990) الگوی آبخستگی موضعی رسوبات غیر چسبنده در مجاورت لوله‌های مستغرق افقی را به صورت آزمایشگاهی مورد بررسی قرار داد. وی نشان داد که وجود لوله و گردابه‌های ایستا باعث فرسایش بستر زیر لوله و در نهایت تخریب آن می‌شود. Olsen و Melaaen (۱۹۹۳) جریان اطراف یک استوانه مستغرق که به صورت افقی روی یک بستر رسوب واقع شده بود را به صورت عدد با استفاده از روش حجم محدود شبیه‌سازی نمودند. آن‌ها برای حل میدان جریان از معادلات ناویر استوکس^۱ و برای مدل‌سازی آشفستگی میدان جریان نیز از مدل آشفستگی $k-\epsilon$ استفاده نمودند. این محققین ابعاد حفره آبخستگی مدل‌سازی شده را با مقادیر اندازه‌گیری شده آزمایشگاهی مقایسه نمودند و نشان دادند که مدل عددی دارای دقت قابل قبولی است.

Cheng و Li (۱۹۹۹) با استفاده از تئوری جریان پتانسیل، الگوی آبخستگی در اطراف لوله‌های مستغرق افقی را به صورت عددی مدل‌سازی نمودند. آن‌ها با استفاده از روش تفاضل محدود معادله لاپلاس را حل نمودند. همچنین، نتایج مدل‌سازی خود را با نتایج معادله‌های تجربی مقایسه کردند و نشان دادند که مدل مذکور دقت مناسبی در پیش‌بینی تخمین آبخستگی اطراف لوله‌های مستغرق دارد. Cheng و Jeng (۲۰۰۰) تاثیرات امواج را روی تغییرات بستر فرسایشی در شرایط لوله‌های مدفون، مورد بررسی عددی قرار دادند.

¹ Navier–Stokes

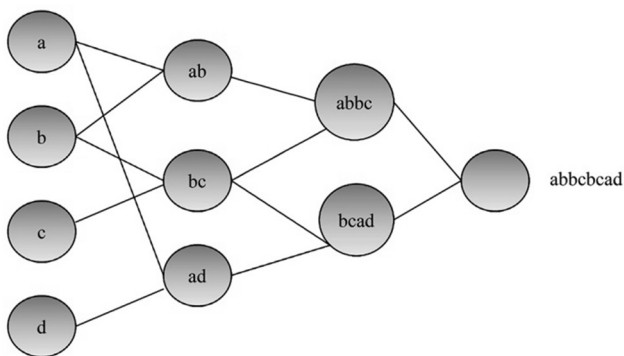
۲. روش کار

بازنویسی رابطه فوق با استفاده از دو نرون، منجر به ارائه یک رابطه ساده به صورت رابطه ۵ می‌گردد.

رابطه ۵

$$\hat{y} = G(x_i, x_j) = a_0 + a_1 x_i + a_2 x_j + a_3 x_i^2 + a_4 x_j^2 + a_5 x_i x_j$$

ضرایب رابطه فوق (ai) با استفاده از روش‌های رگرسیونی به گونه‌ای محاسبه می‌شوند که اختلاف بین خروجی واقعی (y) و مقدار محاسبه شده \hat{y} برای هر جفت متغیر ورودی x_i و x_j حداقل شوند (Iba et al., Farlow, 1984; Ivakhnenko, 1971). بنابراین، مجموعه ضرایب چند جمله‌ای‌های درجه دو ارائه شده به صورت رابطه ۵ محاسبه می‌شوند. این ضرایب برای هر تابع G_i (هر نرون ساخته شده در مدل‌سازی) به منظور حداقل کردن خطای کل نرون‌ها، برای بهینه شدن ورودی‌ها بر تمام جفت مجموعه‌های چند ورودی-یک خروجی بدست می‌آیند. شکل کلی شماتیک یک شبکه عصبی از نوع GMDH در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱: طرح شماتیک شبکه عصبی GMDH

در واقع روند مدل‌سازی به گونه‌ای ادامه می‌یابد که رابطه ۶ حداقل شود.

$$E = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M (y_i - G_i)^2 \rightarrow Min \quad \text{رابطه ۶}$$

در شکل پایه الگوریتم GMDH، تمامی نرون‌ها از n متغیر ورودی ساخته می‌شوند و ضرایب مجهول کلیه نرون‌ها با استفاده از روش حداقل مربعات بدست می‌آیند. بنابراین تعداد

$$\binom{n}{2} = \frac{n(n-1)}{2}$$

۱-۲ روش دسته‌بندی گروهی داده‌ها (GMDH)

GMDH یک روش خودسازمانده است که با استفاده از مجموعه‌ای از نرون‌ها، مدل‌های مختلفی را ارائه می‌دهد. این نرون‌ها از طریق یک چند جمله‌ای درجه دوم به یکدیگر متصل هستند که منجر به تولید نرون در لایه‌های بعد می‌شوند. هدف اصلی GMDH، یافتن تابع تقریبی \hat{f} با خروجی \hat{y} برای مجموعه‌ای از ورودی‌ها به صورت $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ است، به طوری که تابع ارائه شده مقادیر \hat{y} را با کمترین مقدار خطا نسبت به مقادیر واقعی y برآورد کند. برای M داده آزمایشگاهی که شامل n متغیر ورودی و یک خروجی است، مقدار خروجی واقعی (y_i) به صورت رابطه ۱ می‌باشد.

$$y_i = f(x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{in}) \quad (i=1, 2, \dots, M) \quad \text{رابطه ۱}$$

مقادیر خروجی شبکه GMDH در مرحله آموزش مدل به صورت رابطه ۲ بیان می‌شود.

$$\hat{y}_i = \hat{f}(x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{in}) \quad (i=1, 2, \dots, M) \quad \text{رابطه ۲}$$

در ادامه جهت رسیدن به یک جواب بهینه، می‌بایست مربع خطای ناشی از اختلاف مقادیر واقعی و آموزش دیده، به صورت رابطه ۳ حداقل شود.

$$E = \sum_{i=1}^M (\hat{f}(x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{in}) - y_i)^2 \rightarrow Min \quad \text{رابطه ۳}$$

در شبکه GMDH ارتباط بین متغیرهای ورودی و خروجی را می‌توان به صورت چند جمله‌ای پیچیده موسوم به چند جمله‌ای کولموگراف-گابور^۲ به صورت رابطه ۴ بیان نمود.

رابطه ۴

$$\hat{y} = a_0 + \sum_{i=1}^m a_i x_i + \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m a_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^m x_j a_{ijk} x_i x_j x_k + \dots$$

^۱ Group Method of Data Handling (GMDH)

^۲ Colombo-Gabor graph

ضرایب با استفاده از روش مربع حداقل^۱، احتمال بروز خطای ناشی از گرد کردن خطا و یا تکین^۲ در معادلات وجود دارد. در نتیجه، جهت حل مسئله مربع حداقل در این مطالعه، از روش تجزیه مقدار منفرد^۳ (SVD) استفاده گردید. در روش SVD ماتریس $A \in R^{M \times 6}$ به صورت رابطه ۱۳ تعریف می‌شود.

$$A = UWV^T \quad \text{رابطه ۱۳}$$

ماتریس فوق شامل سه ماتریس متعامد ($V \in R^{6 \times 6}$)، ماتریس متعامد ستونی ($U \in R^{M \times 6}$)، و یک ماتریس غیرمنفی قطری ($W \in R^{6 \times 6}$) است. جهت برآورد ضرایب رابطه ۵، شکل اصلاح شده معکوس ماتریس W به شکل رابطه ۱۴ تعیین می‌شود (Ivakhnenko, 1971).

$$a = V \operatorname{diag} \frac{1}{W_j} U^T Y \quad \text{رابطه ۱۴}$$

۲-۲ آبشستگی در مجاورت لوله مستغرق در شرایط آب شفاف

آبشستگی (d_s) در اطراف لوله‌های مستغرق افقی در مجاورت بستر رسوبی در شرایط آب شفاف به صورت رابطه ۱۵ نوشته می‌شود.

$$d_s = f(U, y, \rho, \rho_s, \mu, S_0, B, d_{50}, D, e, g) \quad \text{رابطه ۱۵}$$

در این رابطه، U سرعت متوسط جریان، y عمق جریان نرمال، ρ چگالی آب، ρ_s چگالی رسوب، μ ویسکوزیته دینامیکی آب، S_0 شیب کانال، B عرض کانال، d_{50} قطر مصالح بستر، D قطر لوله، e فاصله بین لوله و بستر رسوبی قبل از آبشستگی و g شتاب گرانش است. در ادامه پارامترهای رابطه ۱۵ بدون بعد می‌شوند و عدد فرود، عدد رینولدز و پارامتر شیلدز به‌علاوه انتقال رسوبات نیز به‌ترتیب به‌صورت $Fr = U/\sqrt{g \cdot y}$ ، $Re = UD\mu/g$ و $T_a = u_*^2/g \cdot (\rho_s/\rho - 1) \cdot d_{50}$ در نظر گرفته می‌شوند (Moncada-M and Aguirre-Pe, 1999):

نرون در اولین لایه مخفی به صورت $\{ (y_i, x_{ip}, x_{iq}) \mid (i=1,2,\dots,M) \& (p,q \in \{1,2,\dots,n\}) \}$ ساخته می‌شود. بنابراین در رابطه ۵، برای هر تعداد M داده سه‌گانه به صورت رابطه ۷ است.

$$\begin{bmatrix} x_{1p} & x_{1q} & \vdots & y_1 \\ x_{2p} & x_{2q} & \vdots & y_2 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_{Mp} & x_{Mq} & \vdots & y_M \end{bmatrix} \quad \text{رابطه ۷}$$

برای هر ردیف، می‌توان ماتریس معادلات زیر را نوشت (رابطه‌های ۸-۱۱):

$$Aa = y \quad \text{رابطه ۸}$$

که در آن:

$$a = \{a_0, a_1, a_2, a_3, a_4, a_5\} \quad \text{رابطه ۹}$$

$$y = \{y_1, y_2, \dots, y_M\}^T \quad \text{رابطه ۱۰}$$

$$A = \begin{bmatrix} 1 & x_{1p} & x_{1q} & x_{1p}x_{1q} & x_{1p}^2 & x_{1q}^2 \\ 1 & x_{2p} & x_{2q} & x_{2p}x_{2q} & x_{2p}^2 & x_{2q}^2 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1 & x_{Mp} & x_{Mq} & x_{Mp}x_{Mq} & x_{Mp}^2 & x_{Mq}^2 \end{bmatrix} \quad \text{رابطه ۱۱}$$

روش حداقل مربعات با استفاده از آنالیز رگرسیون چندگانه، ضرایب رابطه درجه دو (ai) را به شکل رابطه ۱۲ ارائه می‌دهد.

$$a = (A^T A)^{-1} A^T Y \quad \text{رابطه ۱۲}$$

با استفاده از رابطه فوق، بردار ضرایب مجهول چند جمله‌ای ارائه شده به صورت رابطه ۵ برای مجموعه‌ای از M ردیف سه-تایی محاسبه می‌شوند. این روند برای هر نرون و با توجه به شکل و ساختار شبکه عصبی تکرار می‌شود. در محاسبه بردار

¹ least square

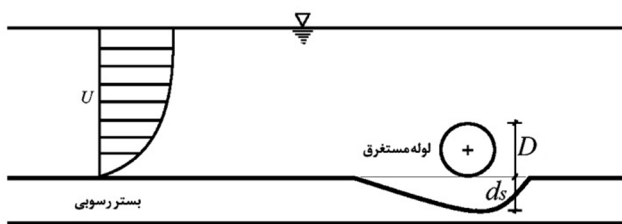
² singularity

³ singular value decomposition

اعتبارسنجی چند لایه‌ای، نمونه اصلی به طور تصادفی به k نمونه فرعی به اندازه مساوی تقسیم می‌شود. در بین نمونه‌های فرعی k یک نمونه به‌عنوان داده‌های اعتبارسنجی و مابقی به‌عنوان داده‌های تست برای هر یک از مدل‌های عددی استفاده می‌شوند. در این مطالعه مقدار k برابر ۶ بدست آمد. به بیان دیگر، روند اعتبارسنجی چند لایه، ۶ بار تکرار گردید (برابر تعداد لایه‌ها) و هر کدام از نمونه‌های فرعی ۶، دقیقاً یک‌بار به‌عنوان داده‌های اعتبارسنجی مورد استفاده قرار گرفتند. سپس نتایج بدست آمده از ۶ لایه‌ی مذکور متوسط‌گیری شده و به‌عنوان یک تخمین ارائه شدند.

۳-۲ مدل آزمایشگاهی

در این تحقیق به منظور اعتبارسنجی نتایج مدل‌سازی، از اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی Aguirre-Pe و Moncada-M (۱۹۹۹) بهره گرفته شد. مدل آزمایشگاهی Moncada-M و Aguirre-Pe (۱۹۹۹) متشکل از یک کانال مستطیلی به‌ترتیب به طول، عرض و ارتفاع ۸/۳، ۰/۵ و ۰/۵ متر است. این محققین، رسوبات با دو قطر مختلف را به‌عنوان مصالح بستر انتخاب نمودند. همچنین چهار دسته لوله به قطرهای متفاوت در آزمایش‌های خود مورد استفاده قرار دادند. طرح کلی مدل آزمایشگاهی مذکور در شکل ۳ قابل مشاهده است. محدوده مقادیر آزمایشگاهی مورد مطالعه Aguirre-Pe و Moncada-M (۱۹۹۹) که در این مطالعه به‌عنوان پارامترهای ورودی مدل‌های عددی استفاده می‌شوند، در جدول ۱ مرتب شده‌اند.



شکل ۳: طرح کلی مدل آزمایشگاهی (Moncada-M and Aguirre-Pe, 1999)

جدول ۱: محدوده اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی (Moncada-M and Aguirre-Pe, 1999) (تمامی پارامترهای استفاده شده بدون بعد هستند)

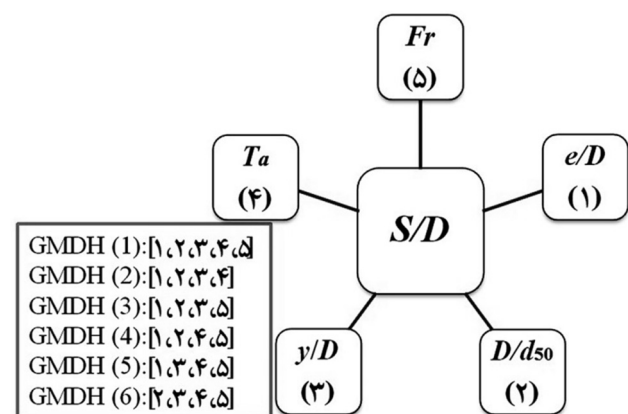
پارامتر	e/D	D/d_{50}	y/D	T_a	Fr	d_s/D
محدوده	۰/۱-۰	۳/۲۸۹-	۱/۰۶۷-	۰/۰۲۸-	۰/۲۳۴-	۰/۱۰۰۸-
	۱/۰۶۸	۶۶/۶۶۷	۵	۰/۱۶۶۵	۰/۱۸۳۶	۱/۶۰۶

$$d_s / D = f(Fr, Re, T_a, y/D, D/d_{50}, e/D, S_0, y/B)$$

Aguirre-Pe و Moncada-M (۱۹۹۹) بیان نمودند که پارامتر y/B تاثیر چندانی روی آبستتگی ندارد. همچنین شیب کانال (S_0) در کلیه آزمایش‌ها ثابت و ناچیز در نظر گرفته شده است. همچنین این محققین نشان دادند که عدد رینولدز آزمایش‌های آنها در محدوده‌ای است که این پارامتر تاثیری بر آبستتگی ندارد. بنابراین رابطه ۱۶ به‌صورت زیر بازنویسی می‌شود.

$$d_s / D = f(Fr, T_a, y/D, D/d_{50}, e/D) \quad \text{رابطه ۱۷}$$

بنابراین در این مطالعه از پارامترهای بدون بعد بعد رابطه ۱۷ که شامل عدد فرود، پارامتر شیلدز، نسبت عمق جریان نرمال به قطر لوله، نسبت قطر لوله به قطر مصالح بستر و نسبت فاصله بین لوله و بستر رسوبی قبل از آبستتگی به قطر لوله هستند، برای شبیه‌سازی آبستتگی در اطراف لوله‌های مستغرق استفاده می‌گردند. در شکل ۲ نحوه ترکیب پارامترهای ورودی برای شبیه‌سازی آبستتگی در اطراف لوله‌های مستغرق (d_s/D) نشان داده شده است.

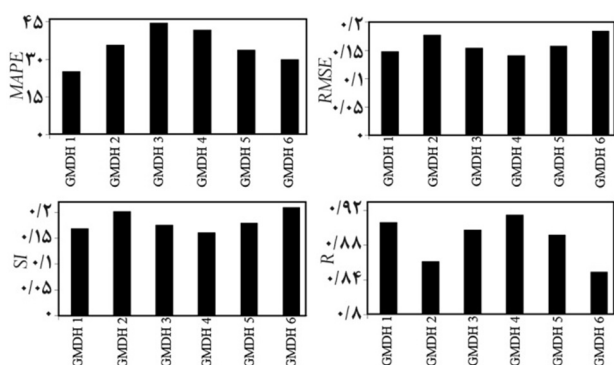


شکل ۲: طرح شماتیک ترکیب پارامترهای ورودی برای مدل‌های مختلف GMDH

در این مطالعه، برای ارزیابی توانایی مدل عددی از شبیه‌سازی‌های مونت کارلو استفاده گردید. شبیه‌سازی مونت کارلو یک طبقه‌بندی وسیع و جامع از الگوریتم‌های محاسباتی است که از نمونه‌گیری تصادفی برای محاسبه نتایج عددی استفاده می‌نماید. علاوه بر این، از روش اعتبارسنجی چند لایه‌ای برای آموزش و تست مدل‌های عددی استفاده می‌شود. در روش

۳. نتایج و بحث

از $T_a, y/D, D/d_{50}, e/D$ مقدار آبستگی در اطراف لوله‌های افقی مستغرق را مدل‌سازی می‌کند. برای مدل مذکور تاثیر پارامتر عدد فرود نادیده گرفته شد. برای مدل GMDH 2 مقادیر MAPE و SI به ترتیب برابر با ۳۵/۷۱۲ و ۰/۲۰۲ محاسبه گردیدند. در مقابل مقدار شاخص‌های خطای جذر میانگین مربعات و ضریب همبستگی برای این مدل به ترتیب برابر ۰/۱۷۷ و ۰/۸۶۱ تخمین زده شدند. تاثیر پارامتر بدون بعد T_a برای مدل GMDH 3 حذف شد.



شکل ۴: نتایج شاخص‌های آماری برای مدل‌های مختلف GMDH

این مدل مقادیر آبستگی در اطراف لوله‌های مستغرق افقی را بر حسب مقادیر $Fr, T_a, y/D, D/d_{50}, e/D$ مدل‌سازی نمود. برای مدل مذکور مقادیر R ، $MAPE$ و $RMSE$ به ترتیب برابر ۰/۸۹۷، ۴۴/۵۰۹ و ۰/۱۵۴ و مقادیر شاخص پراکندگی و پارامتر $BIAS$ برای GMDH 3 به ترتیب برابر با ۰/۱۷۵ و ۰/۰۰۴ محاسبه گردیدند. در بین کلیه مدل‌های با ۴ پارامتر ورودی مدل GMDH 4 دارای بالاترین ضریب همبستگی است. این شاخص برای مدل مذکور مساوی ۰/۹۱۴ است. همچنین مقادیر $RMSE$ ، SI و $BIAS$ برای GMDH 4 به ترتیب برابر ۰/۱۴۱، ۰/۱۶۰ و ۰/۰۰۲ هستند. برای مدل‌سازی مقادیر آبستگی توسط GMDH 4 تاثیر پارامتر y/D نادیده گرفته شد. به بیان دیگر این مدل تابعی از پارامترهای بدون بعد $Fr, T_a, D/d_{50}, e/D$ است. لازم به ذکر است که در بین تمامی مدل‌های GMDH، این مدل دارای کمترین مقدار خطا و بالاترین مقدار همبستگی است. مدل GMDH 5 مقدار تابع هدف را بر حسب مقادیر $Fr, T_a, y/D, e/D$ شبیه‌سازی می‌نماید. برای مدل مذکور تاثیر D/d_{50} نادیده گرفته شد. برای مدل GMDH 5 مقادیر ضریب همبستگی مساوی ۰/۸۹۱ و شاخص پراکندگی نیز برابر ۰/۱۸۰ بدست آمدند.

در مطالعه حاضر به منظور بررسی دقت مدل‌های عددی از شاخص‌های آماری درصد میانگین مطلق خطا (MAPE)، خطای جذر میانگین مربعات (RMSE)، شاخص پراکندگی (SI)، شاخص BIAS و ضریب همبستگی (R) استفاده شدند (رابطه‌های (Azimi et al., 2017) (۱۸-۲۱)).

رابطه ۱۸

$$MAPE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|(d_s/D)_{(Predicted)_i} - (d_s/D)_{(Observed)_i}|}{(d_s/D)_{(Observed)_i}} \times 100$$

رابطه ۱۹

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n ((d_s/D)_{(Predicted)_i} - (d_s/D)_{(Observed)_i})^2}$$

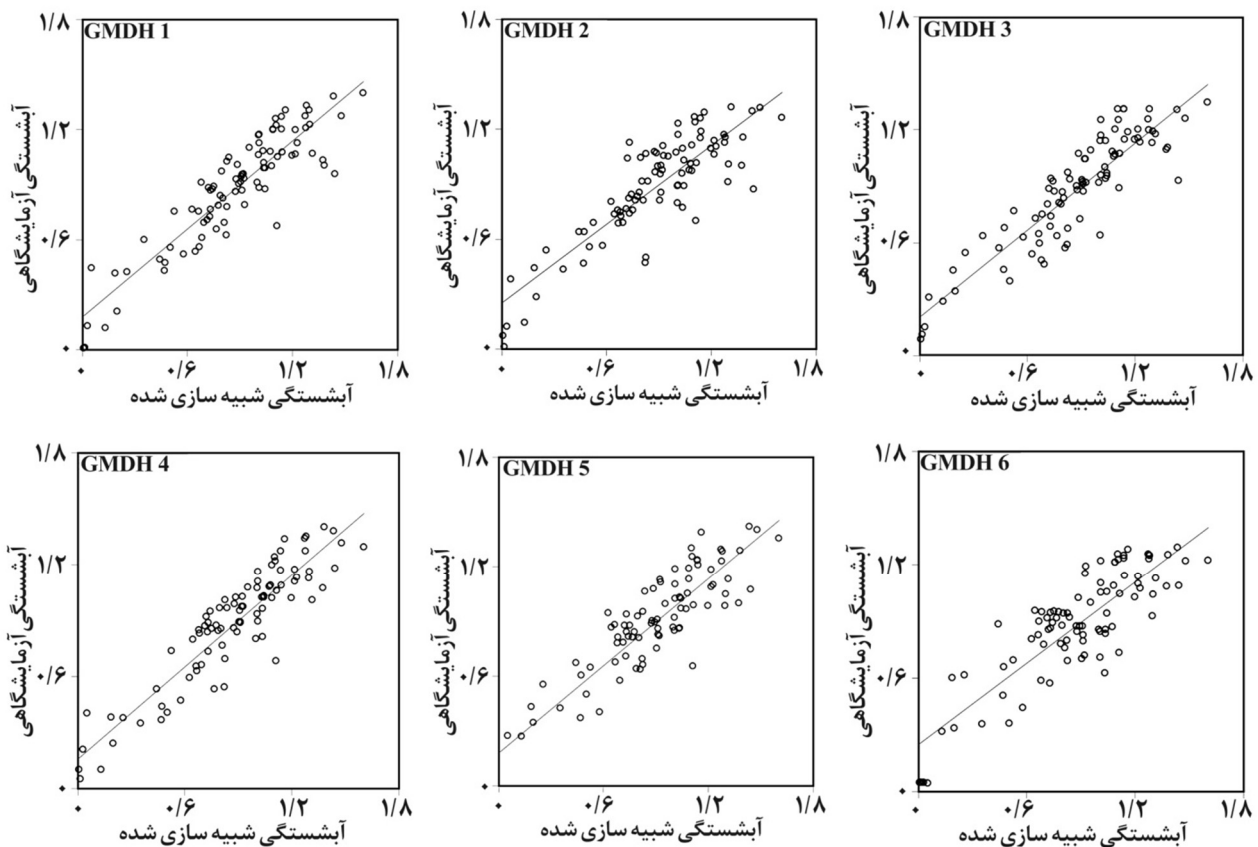
رابطه ۲۰

$$SI = \frac{RMSE}{(d_s/D)_{(Observed)}}$$

رابطه ۲۱

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n ((d_s/D)_{(Observed)_i} - \overline{(d_s/D)_{(Observed)}}) ((d_s/D)_{(Predicted)_i} - \overline{(d_s/D)_{(Predicted)}})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n ((d_s/D)_{(Observed)_i} - \overline{(d_s/D)_{(Observed)}})^2 \sum_{i=1}^n ((d_s/D)_{(Predicted)_i} - \overline{(d_s/D)_{(Predicted)}})^2}}$$

در رابطه‌های ۱۸ تا ۲۱ مقادیر $(d_s/D)_{(Observed)_i}$ آبستگی آزمایشگاهی، $(d_s/D)_{(Predicted)_i}$ آبستگی پیش‌بینی شده، $\overline{(d_s/D)_{(Observed)}}$ میانگین آبستگی آزمایشگاهی و n تعداد اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی است. بر اساس مطالب بیان شده در این مطالعه شش مدل عددی GMDH مختلف توسعه داده شدند. مقایسه شاخص‌های آماری مختلف برای مدل‌های عددی و نتایج مدل‌سازی در شکل‌های ۴ و ۵ نشان داده شده است. مدل GMDH 1 تابعی از کلیه پارامترهای ورودی $(Fr, T_a, y/D, D/d_{50}, e/D)$ است. برای این مدل مقدار ضریب همبستگی برابر ۰/۹۰۶ محاسبه گردید. همچنین مقادیر شاخص‌های $RMSE$ و $BIAS$ نیز به ترتیب برابر ۰/۱۴۸ و ۰/۰۰۳ و مقادیر درصد میانگین مطلق خطا و شاخص پراکندگی برای مدل مذکور به ترتیب برابر ۲۵/۱۸۵ و ۰/۱۶۸ بدست آمدند. در ادامه پنج مدل GMDH 2 تا GMDH 6 با ترکیبی از ۴ پارامتر ورودی معرفی شده‌اند. به عنوان مثال مدل GMDH 2 با ترکیبی



شکل ۵: مقایسه مقادیر آبشستگی شبیه‌سازی شده و آزمایشگاهی برای مدل‌های مختلف GMDH

می‌شوند. رابطه مربوط به مدل برتر به صورت رابطه‌های ۲۸-۲۲ ارائه می‌شود.

رابطه ۲۲

$$y_1 = 0.6851 + 0.881(e/D) + 0.0263(D/d_{50}) - 0.0297(e/D)^2 - 3.64E - 4(D/d_{50})^2 + 0.0042(e/D)(D/d_{50})$$

رابطه ۲۳

$$y_2 = 0.6294 + 0.7659(e/D) + 0.7442(Fr) + 0.4977(e/D)^2 + 0.1217(Fr)^2 - 0.818(e/D)(Fr)$$

رابطه ۲۴

$$y_3 = 0.5495 + 1.3011(e/D) + 3.7574(\tau) + 0.4396(e/D)^2 - 5.30(\tau)^2 + 0.624(e/D)(\tau)$$

رابطه ۲۵

$$y_4 = 0.7766 + 0.5902(\tau) - 1.0295(Fr) - 4.2708(\tau)^2 + 0.2483(Fr)^2 + 5.9585(\tau)(Fr)$$

علاوه بر این مقادیر $MAPE$ ، $RMSE$ و $BIAS$ برای مدل GMDH 5 به ترتیب برابر با ۰/۱۵۸، ۳۳/۷۰۶ و $۶/۰۴ \times ۱۰^{-۵}$ تخمین زده شدند. در میان مدل‌هایی که مقادیر آبشستگی را با ترکیبی از چهار پارامتر ورودی تخمین می‌زنند، مدل GMDH 6 دارای کمترین دقت است. برای شبیه‌سازی آبشستگی در مجاورت لوله‌های مستغرق توسط مدل GMDH 6، تاثیر پارامتر e/D نادیده گرفته شد. بدین معنی که مدل مذکور تابعی از $Fr, T_a, y/D, D/d_{50}$ است. برای این مدل مقدار $RMSE$ برابر ۰/۱۸۴ و $MAPE$ نیز مساوی ۲۹/۹۱۱ تخمین زده شد. شاخص‌های آماری SI و R نیز برای مدل GMDH 6 به ترتیب برابر ۰/۲۰۹ و ۰/۸۴۹ محاسبه گردیدند. بنابراین همان‌طور که بیان شد، در بین کلیه مدل‌های عددی توسعه داده شده، مدل GMDH 4 دارای بیشترین دقت است. در نتیجه، این مدل به‌عنوان مدل برتر معرفی می‌شود. همچنین نسبت فاصله بین لوله و بستر رسوبی قبل از آبشستگی به قطر لوله (e/D) به‌عنوان موثرترین پارامتر در شبیه‌سازی آبشستگی در مجاورت لوله‌های مستغرق شناسایی

رابطه ۲۶

$$y_5 = 0.172 - 0.1541(y_2) + 0.9679(y_3) - 1.4416(y_2)^2 - 2.0074(y_3)^2 + 3.5308(y_2)(y_3)$$

رابطه ۲۷

$$y_6 = 0.4095 + 1.2365(y_1) + 0.3232(y_4) + 0.0243(y_1)^2 + 0.5036(y_4)^2 - 0.6531(y_1)(y_4)$$

رابطه ۲۸

$$S/D = 0.0114 + 0.3975(y_5) + 0.4872(y_6) + 0.9685(y_5)^2 + 0.8871(y_6)^2 - 1.7446(y_5)(y_6)$$

در ادامه به منظور بررسی بیشتر نتایج مدل‌های عددی مختلف، پارامتر ضریب اختلاف (DR) به صورت رابطه ۲۹ معرفی می‌شود.

$$DR = \left(\frac{d_s}{D} \right)_{(Predicted)_i} - \left(\frac{d_s}{D} \right)_{(Observed)_i} \quad \text{رابطه ۲۹}$$

نزدیک بودن مقدار ضریب اختلاف به عدد یک، نشان‌دهنده نزدیک بودن مقادیر عددی به آزمایشگاهی است. همچنین مقادیر ضریب اختلاف حداکثر، حداقل و متوسط به ترتیب با DR_{max} ، DR_{min} و DR_{ave} نشان داده می‌شوند. نتایج پارامترهای مذکور برای مدل‌های مختلف GMDH در جدول ۲ ارائه شده است. بر اساس نتایج مدل‌سازی، مقادیر ضریب اختلاف حداکثر، حداقل و متوسط برای مدل GMDH 1 به ترتیب برابر با ۸/۵۹۱، ۰/۶۰۶ و ۱/۱۵۱ محاسبه گردید. همچنین مقدار DR_{max} برای مدل‌های GMDH 2 و GMDH 3 به ترتیب برابر با ۸/۸۴۸ و ۱۱/۰۰۷ است. علاوه بر این مقادیر DR_{min} و DR_{ave} برای مدل GMDH 4 به ترتیب برابر با ۰/۶۱۰ و ۱/۳۱۱ محاسبه گردید. این در حالی است که، برای مدل‌های GMDH 5 و GMDH 6 مقدار ضریب اختلاف متوسط به ترتیب برابر با ۰/۹۹۰ و ۱/۱۶۱ بود. بنابراین همان‌گونه که مشاهده می‌شود، در بین کلیه مدل‌های عددی، نزدیک‌ترین DR_{ave} به عدد یک برای مدل GMDH 5 بدست آمده است.

جدول ۲: نتایج ضریب اختلاف حداکثر، حداقل و متوسط برای مدل‌های مختلف GMDH

	DR_{max}	DR_{min}	DR_{ave}
GMDH 1	۸/۵۹۱	-۰/۶۰۶	۱/۱۵۱
GMDH 2	۸/۸۴۸	-۰/۵۷۰	۱/۲۴۲
GMDH 3	۱۱/۰۰۷	-۰/۶۲۴	۱/۳۳۵
GMDH 4	۱۲/۳۵۸	-۰/۶۱۰	۱/۳۱۱
GMDH 5	۵/۲۱۷	-۴/۷۵۸	-۰/۹۹۰
GMDH 6	۵/۸۱۱	-۰/۶۰۲	۱/۱۶۱

در ادامه نتایج مدل برتر با نتایج مدل‌های ارائه شده توسط Azamathulla و همکاران (۲۰۱۱) و Etemad-Shahidi و همکاران (۲۰۱۱) مورد مقایسه قرار گرفت. در جدول ۳ نتایج مدل برتر مطالعه حاضر (GMDH 4)، مدل‌های ارائه شده توسط Azamathulla و همکاران (۲۰۱۱) و Etemad-Shahidi و همکاران (۲۰۱۱) برای مدل‌های ارائه شده توسط Azamathulla و همکاران (۲۰۱۱) و Etemad-Shahidi و همکاران (۲۰۱۱)، کلیه شاخص‌های آماری مورد استفاده در این مطالعه موجود نیستند. به‌عنوان مثال، شاخص آماری SI برای مدل‌های GMDH 4 و مدل ارائه شده توسط Etemad-Shahidi و همکاران (۲۰۱۱)، به ترتیب برابر با ۰/۱۶۰ و ۰/۲۱۳ محاسبه شده‌اند. همچنین برای مدل GMDH 4 مقدار $BIAS$ به ترتیب مساوی با ۰/۰۰۲ و -۰/۰۱۲ تخمین زده شدند. این در حالی است که مقدار ضریب همبستگی برای مدل GMDH 4 و مدل‌های ارائه شده توسط Azamathulla و همکاران (۲۰۱۱) و Etemad-Shahidi و همکاران (۲۰۱۱) به ترتیب برابر با ۰/۹۱۴، ۰/۹۴۳ و ۰/۹۵۰ محاسبه شده‌اند. بر اساس نتایج مدل‌های مذکور، همبستگی مدل ارائه شده توسط Etemad-Shahidi و همکاران (۲۰۱۱) از مدل GMDH 4 بیشتر است. این در حالی است که برای مدل GMDH 4 مقادیر خطا برای سایر شاخص‌های آماری کمتر است. نکته قابل توجه این است که در مطالعه حاضر یک رابطه صریح و کاربردی برای تخمین عمق آبشستگی در مجاورت لوله‌های مستغرق ارائه شده است که در مطالعات دیگر این مهم صورت نگرفته است.

جدول ۳: مقایسه نتایج مدل GMDH 4 با مدل‌های ارائه شده توسط Azamathulla و همکاران (۲۰۱۱) و Etemad-Shahidi و همکاران (۲۰۱۱)

مدل	MAPE	RMSE	SI	BIAS	R
GMDH 4	۴۱/۶۴۲	-۰/۱۴۱	-۰/۱۶۰	-۰/۰۰۲	۰/۹۱۴
Azamathulla و همکاران (۲۰۱۱)	-	-۰/۰۳۵	-	-	۰/۹۰۶
Etemad-Shahidi و همکاران (۲۰۱۱)	-	-	-۰/۲۱۳	-۰/۰۱۲	۰/۹۵۰

۴. نتیجه‌گیری

به طور کلی خطوط انتقال نفت و گاز از بستر دریا و نواحی ساحلی عبور می‌کنند و به دلیل وجود امواج و جریان‌ها احتمال وقوع آبشستگی در مجاورت این لوله‌ها وجود دارد. با توجه به اهمیت موضوع، مطالعات فراوانی روی آبشستگی اطراف خطوط

- Fredsoe, J.; Hansen, E.A.; Mao, Y.; Sumer, B.M., 1988. Three-dimensional scour below pipelines. *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, 110(4): 373-379.
- Iba, H.; DeGaris, H.; Sato, T., 1996. A numerical approach to genetic programming for system identification. *Evolutionary Computation*, 3(4): 417-452.
- Ivakhnenko, A.G., 1971. Polynomial theory of complex systems. *IEEE transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 1(4): 364-378.
- Jeng, D.S.; Cheng, L., 2000. Wave-induced seabed instability around a buried pipeline in a poro-elastic seabed. *Ocean Engineering*, 27(2): 127-146.
- Li, F.; Cheng, L., 1999. Numerical model for local scour under offshore pipelines. *Journal of Hydraulic Engineering*, 125(4): 400-406.
- Moncada, M., A.T.; Aguirre-Pe, J., 1999. Scour below pipeline in river crossings. *Journal of Hydraulic Engineering*, 125(9): 953-958.
- Najafzadeh, M.; Barani, G.A.; Azamathulla, H.M., 2014a. Prediction of pipeline scour depth in clear-water and live-bed conditions using group method of data handling. *Neural Computing and Applications*, 24(3-4): 629-635.
- Najafzadeh, M.; Barani, G.A.; Hessami Kermani, M.R., 2014b. Estimation of pipeline scour due to waves by GMDH. *Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice*, 5(3): 06014002.
- Olsen, N.R.; Melaaen, M.C., 1993. Three-dimensional calculation of scour around cylinders. *Journal of Hydraulic Engineering*, 119(9): 1048-1054.
- Sumer, B.M.; Mao, Y.; Fredsøe, J., 1988. Interaction between vibrating pipe and erodible bed. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 114(1): 81-92.
- Sumer, B.M.; Truelsen, C.; Fredsøe, J., 2006. Liquefaction لوله مستغرق انجام شد. در این مطالعه با استفاده از روش دسته-بندی گروهی داده‌ها (GMDH) الگوی آبخستگی اطراف این لوله‌ها مدل‌سازی شدند. با استفاده از پارامترهای موثر بر آبخستگی، ۶ مدل متفاوت GMDH معرفی شدند که با بررسی نتایج مدل‌سازی، مدل برتر شناسایی شد. مدل مذکور مقدار آبخستگی را با دقت مناسبی تخمین زد. همچنین برای تخمین عمق آبخستگی در مجاورت این دسته از سازه‌ها روابطی صریح و کاربردی ارائه گردیدند. لازم به ذکر است که این رابطه در محدوده پارامتر شیلدز ۰/۶۶۵-۰/۳۸ و عدد فرود ۰/۸۳۶-۰/۲۳۴، مقادیر آبخستگی در اطراف لوله‌های مستغرق را با دقت بالایی تخمین می‌زنند.

منابع

- Azamathulla, H.M.; Guven, A.; Demir, Y.K., 2011. Linear genetic programming to scour below submerged pipeline. *Ocean Engineering*, 38(8): 995-1000.
- Azimi, H.; Shabanlou, S.; Ebtehaj, I.; Bonakdari, H.; Kardar, S., 2017. Combination of computational fluid dynamics, adaptive neuro-fuzzy inference system, and genetic algorithm for predicting discharge coefficient of rectangular side orifices. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 143(7): 04017015.
- Bijker, E.W.; Leeuwestein, W., 1984. Interaction between pipelines and the seabed under the influence of waves and currents. In *Seabed mechanics*. Springer Netherlands, 235-242P.
- Chiew, Y.M., 1990. Mechanics of local scour around submarine pipelines. *Journal of Hydraulic Engineering*, 116(4): 515-529.
- Etemad-Shahidi, A.; Yasa, R.; Kazeminezhad, M.H., 2011. Prediction of wave-induced scour depth under submarine pipelines using machine learning approach. *Applied Ocean Research*, 33(1): 54-59.
- Farlow, S.J., 1984. Self-organizing method in modelling: GMDH type algorithm, 54: Chemical Rubber Company Press.

- Engineering, 132(4): 244-251.
- Zounemat-Kermani, M.; Bay, Y., 2013. Efficiency analysis of artificial neural networks and multiple linear regression methods for tides prediction. Journal of Oceanography, 4(13): 1-10.
- around pipelines under waves. Journal of waterway, port, coastal, and ocean engineering, 132(4): 266-275.
- Teh, T.C.; Palmer, A.C.; Bolton, M.D.; Damgaard, J.S., 2006. Stability of submarine pipelines on liquefied seabeds. Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean