



مدیریت آب و آبیاری

دوره ۱۱ ■ شماره ۴ ■ زمستان ۱۴۰۰

صفحه‌های ۷۱۳-۷۲۴

DOI: 10.22059/jwim.2021.330171.918

مقاله پژوهشی:

مدل‌سازی توزیع اندازه ذرات رسوبی در قوس رودخانه با استفاده از رگرسیون جمعی تعمیم‌یافته

آرمان نجات دهکردی^۱، احمد شرافتی^{۲*}، مجتبی مهرآیین^۳، سید عباس حسینی^۲
۱. دانشجوی دکتری، گروه مدیریت ساخت و آب، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.
۲. استادیار، گروه مدیریت ساخت و آب، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.
۳. استادیار، گروه آموزشی مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران.
تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۰/۰۶/۱۸ تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۰۸/۲۰

چکیده

توزیع اندازه ذرات رسوبی یکی از موضوع‌های مهم در دینامیک رسوبات است که به واسطه اثرگذاری بر انتقال رسوب، زبری بستر و شرایط زیست‌محیطی رودخانه مورد توجه قرار دارد و با وجود اهمیت بیش‌تر این موضوع در بسترهای قوسی به دلیل شرایط هندسی رودخانه و پیچیدگی جریان‌های حاکم، شناخت کم‌تری نسبت به آن وجود دارد. در این پژوهش توزیع اندازه ذرات رسوبی در قوس رودخانه‌های با بستر شنی تحت اثر مؤلفه‌های هندسی قوس و مشخصات هیدرولیکی جریان و با استفاده از داده‌های میدانی مطالعه شده است. ۱۸۰ نمونه رسوبی از لایه سطحی بستر، پارامترهای هیدرولیکی جریان شامل سرعت و عمق جریان و مشخصات هندسی، از نه قوس آزاد رودخانه برداشت شده و پس از تعیین مشخصات دانه‌بندی رسوبات در آزمایشگاه و محاسبه سایر پارامترهای مورنیناز، از تئوری پی-باکینگهام برای شناسایی پارامترهای مؤثر بی‌بعد و تعیین معادله مشخصه استفاده شده است. به‌منظور پرهیز از ایجاد خطا در نتایج، متغیرهای دارای ضریب همبستگی بیش‌تر از ۰/۵ و دارای مقدار احتمال بیش‌تر از ۰/۰۵ از فرایند مدل‌سازی حذف شده‌اند و در نهایت با به‌کارگیری روش رگرسیون جمعی تعمیم‌یافته یک مدل ریاضی برای توزیع اندازه ذرات رسوبی براساس پارامترهای هندسی قوس و مشخصات جریان ارائه شده است. رابطه به‌دست‌آمده اثرگذاری عدد فرود (F_r)، پارامتر شیلدز ($\theta_{shields}$) و نسبت شعاع قوس به عرض مقطع ($\frac{R_c}{T}$) بر متوسط اندازه رسوبات بستر ($\frac{T}{d_s}$) با مقدار ضریب تعیین (R^2) برابر ۰/۷۶ را نشان می‌دهد.

کلیدواژه‌ها: آنالیز ابعادی، اندازه ذرات رسوبی، رگرسیون جمعی تعمیم‌یافته، قوس رودخانه.

Modelling of sediment grains size distribution in river bend using generalized additive model

Arman Nejat Dehkordi¹, Ahmad Sharafati^{2*}, Mojtaba Mehraein³, Seyed Abbas Hoseini²

1. Ph.D. Candidate, Department of Water and Construction Management, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.
2. Assistant Professor, Department of Water and Construction Management, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.
3. Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Kharazmi University, Tehran, Iran.

Received: September, 09, 2021

Accepted: November, 11, 2021

Abstract

Sediment grains size have always been considered as one of the crucial issues in the case of sediment dynamics. This seems necessary as it significantly affects sediment transport, bed roughness, and river environmental conditions. Since the geometric factors and characteristics of hydraulic flow in river bends are very complex, the analysis of sediment grain size distribution becoming an essential issue in bends that has been studied less so far. In this research, the distribution of the sizes of sediment grains in natural river bends having gravel beds was taken into consideration using field data. To achieve such a goal, 180 sedimentary samples from upper layers and other hydraulic flow parameters, including the velocity and depth of the flow and the characteristics of geometric beds, were gathered from nine different river bends. After determining the grain sizes of the sediments in the laboratory and calculating other required parameters, the P-Buckingham theory was applied to identify both the effective non-dimensional parameters and the characteristic equation. Then, the Generalized Additive Model (GAM) was used to determine the relationship between variables. Also, to avoid errors in the results, variables with a correlation coefficient greater than 0.5 and a probability value (p-value) greater than 0.05 were removed from the modeling process. Finally, a mathematical model for the distribution of sediment particle sizes based on the geometric parameters of the bends and the flow characteristics was developed. The obtained equation, with a coefficient of determination (R^2) equal to 0.76, shows that Froude Number (F_r), Shields parameter ($\theta_{shields}$), and the proportion of curvature radius to the top width section (R_c/T) affect on the median sizes of sediments in the gravel river bends.

Keywords: Dimensional analysis, Generalized additive model, River bend, Sediment grain size.

مقدمه

یکی از مهم‌ترین ویژگی رودخانه‌های طبیعی ترکیب اندازه ذرات رسوبی است که به واسطه تأثیر بر مکانیسم انتقال رسوب (Rovira *et al.*, 2018)، زبری بستر (Fernandez *et al.*, 2020)، تغییرات مورفودینامیکی (Cordier *et al.*, 2020) و شرایط اکولوژیکی رودخانه (Li *et al.*, 2021) بسیار حایز اهمیت می‌باشد.

پژوهش‌گرانی هم‌چون Parker & Andrews (1985) و Julien & Anthony (2002) به صورت تحلیلی حرکت ذرات رسوبی را تحت تأثیر پارامترهای دیگر در قوس بررسی نموده‌اند. Wright & Parker (2005) با استفاده از مدل‌سازی عددی به مطالعه توزیع اندازه ذرات رسوبی و تغییر پروفیل طولی بستر رودخانه‌های ماسه‌ای می‌پردازند و Pitlick *et al.* (2008) یک رابطه رگرسیونی برای توزیع اندازه ذرات رسوبی در لایه‌های سطحی و زیرسطحی در رودخانه‌های با بستر شنی براساس مشخصات جریان ارائه نموده‌اند. هم‌چنین، Jang *et al.* (2011) با به‌کارگیری مدل‌سازی عددی اثرات نیروی لیفت بر دانه‌بندی ذرات رسوبی در قوس را بررسی می‌نمایند و Natio *et al.* (2019) با بهره‌گیری از روش کم‌ترین مربعات در رگرسیون خطی یک رابطه برای رسوبات با اندازه‌های مختلف در رودخانه‌های با بستر ریزدانه توسعه داده‌اند. Tian *et al.* (2021) ارتباط اندازه ذرات رسوب با خصوصیات معدنی را توسط یک رابطه رگرسیونی بیان نموده و Kuhnle *et al.* (2019) و McKie *et al.* (2020) به صورت آزمایشگاهی تأثیر تغییر اندازه ذرات رسوبی بر شرایط جریان و تغییر مورفولوژی رودخانه را مطالعه کرده‌اند.

سوابق بالا نشان می‌دهد بیش‌تر پژوهش‌گران اثر اندازه رسوبات بر پدیده‌های دیگر مانند تغییرات تراز بستر، تغییر شرایط اکولوژیکی و مورفودینامیکی را بررسی نموده و به مطالعه ارتباط بین متغیرهای مؤثر با اندازه

ذرات رسوبی به‌ویژه در قوس‌ها کم‌تر پرداخته شده است. از این‌رو، شناخت پارامترهای مؤثر در توزیع اندازه رسوبات هم‌چنان به‌عنوان یک مبحث مهم در دینامیک رسوبات محسوب می‌شود و به همین دلیل در این مطالعه بررسی ارتباط اندازه ذرات رسوبی غیریکنواخت با پارامترهای مؤثر هیدرولیک جریان و مؤلفه‌های هندسه قوس در بسترهای شنی به‌عنوان یک ایده نو و موضوع اساسی پژوهش مدنظر قرار گرفته است. از طرف دیگر، اغلب مطالعات انجام‌شده با استفاده از روش‌های تئوری یا عددی، از طریق اعمال برخی فرضیات ساده‌کننده و براساس داده‌های آزمایشگاهی صورت گرفته‌اند؛ که در تعمیم بسیاری از روابط به‌دست‌آمده به رودخانه‌های طبیعی همواره جانب احتیاط در نظر گرفته می‌شود. بنابراین در مطالعه حاضر برای دستیابی به نتایجی نزدیک‌تر به شرایط واقعی، از داده‌های میدانی استفاده شده است.

برای شناسایی پارامترهای هیدرولیکی و هندسی مؤثر در توزیع اندازه رسوبات از روش تحلیل ابعادی استفاده شده و پارامترهای بی‌بعد با به‌کارگیری تئوری پی-باکینگهام مشخص شده‌اند و معادله مشخصه بین متغیرها با استفاده از روش رگرسیون تعیین شده است. با وجود استفاده گسترده از روش‌های کلاسیک رگرسیون در مطالعات گذشته، بسیاری از این تکنیک‌ها دقت کافی در پیش‌بینی پدیده‌های طبیعی را ندارند و داده‌های مربوط به علوم زیست‌محیطی با مدل‌های ساده خطی قابل ارائه نمی‌باشند (Mohanta & Patra, 2019). بر همین اساس به نظر می‌رسد برای توصیف چنین مسائلی روش‌های بهبودیافته‌ای که قابلیت بالاتری برای مدل‌سازی دارند، مناسب‌تر می‌باشند.

در این مطالعه به‌دلیل تصادفی بودن و نوسانات بسیار زیاد داده‌های میدانی از روش رگرسیون جمعی تعمیم‌یافته (GAM)^۱ به‌عنوان کاربرد یک مدل جدید در مبحث

امکان جابه‌جایی و حرکت را دارند و تحت عنوان قوس‌های آزاد معرفی می‌شوند، منحصر می‌شود. به همین منظور از میان ۱۱ رودخانه بررسی شده، تعداد سه رودخانه که دارای شرایط ذکر شده بودند و امکان کار صحرایی بر روی آن‌ها میسر می‌شد، انتخاب شدند. این رودخانه‌ها به نام‌های میان‌رودان و نیاکان به ترتیب به طول‌های ۴ و ۶/۴ کیلومتر در حوزه آبریز زاینده‌رود و سبزکوه به طول سه کیلومتر از حوزه آبریز کارون می‌باشند (شکل ۱). داده‌های میدانی به صورت عرضی برداشت شده‌اند و برای پوشش کامل قوس به صورت طولی و عرضی، مقاطع برداشت به نحوی انتخاب شده‌اند که ابتدا، میانه و انتهای قوس در نظر گرفته شود و اطلاعات برداشت شده معرف مشخصات قوس انتخابی، داده‌های جریان و رسوب بستر باشند. لازم به ذکر است که عرض گسترده رودخانه به همراه عمق و سرعت زیاد جریان به‌ویژه در دو رودخانه میان‌رودان و سبزکوه امکان حضور و برداشت داده‌ها به صورت عادی را مهیا نمی‌نمود و برای انجام عملیات و برداشت داده‌ها از طناب‌کشی و قایق استفاده شد (شکل ۲). از بین قوس‌های موجود در این رودخانه‌ها تعداد ۱۱ قوس برای برداشت داده‌ها برگزیده و در نهایت با انتخاب ۳۶ مقطع عرضی در محدوده قوس‌ها، داده‌های مورد نظر اندازه‌گیری و برداشت شد. این داده‌ها شامل مشخصات هندسی قوس، عرض سطح آزاد هر مقطع عرضی، عمق جریان در طی عرض کانال، سرعت جریان که با استفاده از دستگاه مولینه اندازه‌گیری شده و هم‌چنین رسوبات لایه سطحی در بستر رودخانه می‌باشند. به‌طور کلی، در ۱۸۰ موقعیت از سطح بستر رودخانه در امتداد عرض قوس‌ها، نمونه رسوبات سطحی، سرعت و عمق جریان برداشت شده است.

به‌طور کلی برای انجام پژوهش حاضر مراحل زیر انجام شده است.

دینامیک رسوبات استفاده شده است. مدل GAM به جای توصیف پارامتر با استفاده از یک تابع خطی یا چند جمله‌ای، توابعی هموار را بر متغیرهای پیش‌بینی کننده اعمال می‌کند (Asquith, 2013). از این‌رو، این مدل برای توصیف پدیده‌های غیرخطی طبیعی انعطاف بیش‌تر و توصیف واقع‌بینانه‌تری دارد و با بهره‌گیری از توابع غیرپارامتری برای توزیع‌های مختلف، کیفیت پیش‌بینی متغیر وابسته را افزایش می‌دهد (Leathwick et al., 2006). برای ارائه مدل بین متغیرها از محیط برنامه‌نویسی R که قابلیت مناسبی در مدلسازی روابط رگرسیونی دارد، استفاده شده و رابطه بین پارامترهای هندسی رودخانه، مشخصات جریان و اندازه رسوبات تعیین شده است.

مواد و روش‌ها

پژوهش‌گران برای انجام مطالعات جریان و رسوب در رودخانه‌ها از بررسی‌های میدانی، مدلسازی فیزیکی و یا شبیه‌سازی عددی استفاده می‌کنند. با وجود راحتی و کم‌هزینه بودن مدلسازی‌های فیزیکی و شبیه‌سازی‌های عددی در مقایسه با بررسی‌های میدانی، به دلیل ساده‌سازی‌های گسترده در مدل‌های عددی و عدم امکان ایجاد تمام شرایط واقع در رودخانه‌ها به‌ویژه هندسه پیچیده قوس‌ها در محیط آزمایشگاهی، نتایج حاصل شده قابلیت تعمیم به تمام رودخانه‌های طبیعی را ندارند. از طرف دیگر غالب کارهای انجام شده در سابقه پژوهش‌های اخیر به صورت آزمایشگاهی انجام شده و حضور داده‌های میدانی در کارهای صورت گرفته به‌طور عمده غایب می‌باشد. به همین دلیل در این پژوهش روش مطالعات صحرایی و برداشت داده‌های میدانی انتخاب شده است.

دامنه پژوهش حاضر به رودخانه‌های با بستر شنی با قطر متوسط رسوبات بین هشت تا ۶۴ میلی‌متر ($8 < d_{50} < 64$) و قوس‌هایی از رودخانه که در دو سوی خود

- تعداد داده‌های محدود با توجه به دشواری نمونه‌برداری‌های میدانی
 - برداشت سرعت جریان به صورت یک بعدی در امتداد مسیر حرکت جریان
 - محدود شدن دامنه مطالعات به رودخانه‌های با بستر شنی و قوس‌های آزاد
 - ثابت فرض نمودن مشخصات آب (جرم مخصوص $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$ و لزجت سینماتیک $\nu = 1 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$)

- شناسایی رودخانه‌ها و قوس‌های متناسب با دامنه پژوهش و برداشت داده‌های میدانی از قوس‌های منتخب
 - تعیین پارامترهای آزمایشگاهی و محاسباتی داده‌های برداشت شده
 - انجام آنالیز ابعادی و به کارگیری تئوری پی-باکینگهام برای به دست آوردن متغیرهای بی بعد مؤثر
 - مدل سازی بین متغیرها با مدل رگرسیون GAM و تعیین رابطه بین متغیرها
 با توجه به شرایط میدانی محدودیت‌های زیر در این مطالعه مدنظر قرار گرفته است.

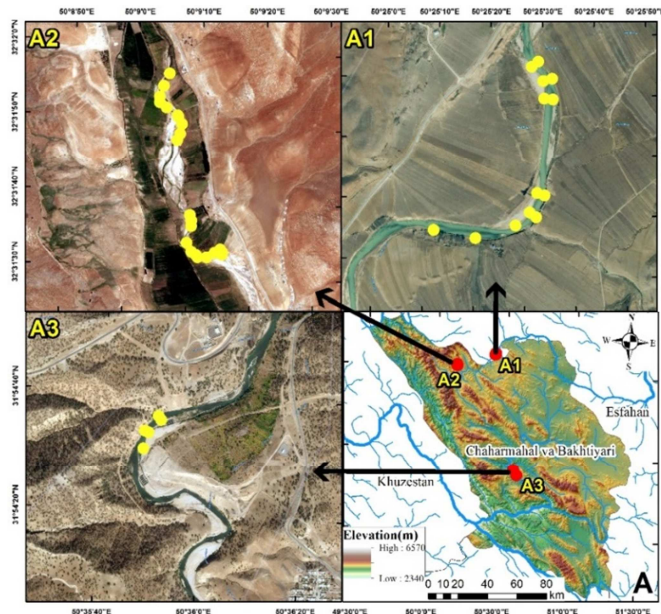


Figure 1. Location of rivers and study areas (A1: Mianroodan, A2: Niakan, A3: Sabzkooh)



Figure 2. Field measurement in abzkooh river as a case study

داده‌های آزمایشگاهی و محاسباتی

غوطه‌وری ذرات رسوب می‌باشد. آزمایش‌های فوق برای تمام دانه‌های رسوبی انجام شده است و در طی آزمایش‌ها، خطاهای احتمالی برطرف شده و از طریق مقایسه داده‌ها با یکدیگر و کنترل آن‌ها با مراجع، از صحت آن‌ها اطمینان حاصل شد. داده‌های میدانی جریان با استفاده از روابط ریاضی موجود به داده‌های محاسباتی تبدیل شده‌اند و پارامترهای هندسی قوس نیز از روی داده‌های توپوگرافی استخراج شده است. جدول (۱) خلاصه مشخصات پارامترهای هندسی قوس، جریان و ذرات رسوبی را نشان می‌دهد.

دو پارامتر متوسط اندازه ذرات رسوبی برداشت شده از لایه سطحی بستر (d_s) و وزن مخصوص آن‌ها (S) برای تمام نمونه‌ها در آزمایشگاه مکانیک خاک اندازه‌گیری شده است. اساسی‌ترین آزمایش صورت گرفته بر روی ذرات رسوبی، دانه‌بندی رسوبات به منظور استخراج دامنه و اندازه متوسط آن‌ها (d_s) بوده است. رسوبات برداشت شده از بستر رودخانه دارای طیف وسیعی از اندازه می‌باشند، لیکن با توجه به درشت‌دانه‌بودن آن‌ها، آزمایش دانه‌بندی براساس شیوه ASTM6913 و به روش الک استاندارد صورت گرفته است.

نتایج و بحث

هدف از پژوهش حاضر بررسی ارتباط بین اندازه ذرات رسوبی و مشخصات جریان در حضور پارامترهای هندسی قوس و ارائه یک رابطه ریاضی بین پارامترهای مؤثر می‌باشد. برای تحلیل مسأله از روش آنالیز ابعادی براساس تئوری پی-باکینگهام (Albrecht et al., 2013) استفاده شده و پس از شناخت روابط بی‌بعد، با استفاده از روش رگرسیون جمعی تعمیم یافته رابطه بین پارامترها تعیین شده است.

تجزیه و تحلیل اندازه ذرات به تشخیص درصد ذرات برحسب جرم خشک اشاره دارد، بر همین اساس کلیه نمونه‌های رسوبی پس از شست‌وشو، به‌طور کامل در دستگاه خشک و سپس با استفاده از الک‌های استاندارد دانه‌بندی شده و منحنی دانه‌بندی آن‌ها استخراج شده است. هم‌چنین وزن مخصوص ذرات (S) به صورت یک کمیت بی‌بعد به صورت نسبتی از جرم مخصوص ذرات رسوبی به جرم مخصوص آب ($\frac{\rho_s}{\rho_w}$) تعیین می‌شود و برای اندازه‌گیری آن از روش پیشنهادی استاندارد ASTM854 و به شیوه غوطه‌وری ذرات رسوبی (ارشمیدس) اندازه‌گیری و براساس رابطه (۱) محاسبه شده است (Germaine, 2009).

$$G_S = \frac{m_d}{m_d - m'_{sat}} \quad (1)$$

در این رابطه m_d و m'_{sat} به ترتیب جرم خشک و

آنالیز ابعادی و برقراردنمودن رابطه بین متغیرها مستلزم شناخت پارامترهای مؤثر در مسأله می‌باشد و عوامل متعددی در پدیده انتقال و توزیع رسوبات مؤثر است که با تغییر هر کدام از آن‌ها، پارامترهای ترکیبی متعددی استخراج می‌شود.

Table 1. Summary of the field measurements ranges in the bends

Filed Case	Curvature radius	Top crossing width	Mean flow depth	Mean flow velocity	Median grain size	Specific Gravity
	Rc (m)	T (m)	h (m)	u (m/s)	ds (mm)	S
Case 1	77.99	4.15-6.50	0.13-0.22	0.41-0.86	31.79-40.99	2.67
Case 2	71.43	4.30-7.0	0.11-0.15	0.37-0.70	25.84-30.46	2.67
Case 3	84.22	4.60-6.40	0.11-0.13	0.44-0.57	28.57-30.66	2.67
Case 4	64.50	3.60-6.90	0.14-0.26	0.15-0.51	24.86-32.50	2.69
Case 5	17.11	4.20-5.70	0.13-0.26	0.26-0.69	25.30-28.79	2.67
Case 6	233.10	32.0-58.50	0.43-0.58	0.56-0.86	25.56-34.01	2.67
Case 7	140.07	39.0-42.0	0.42-0.95	0.57-0.91	33.25-37.43	2.69
Case 8	171.82	23.0-35.0	0.79-1.29	0.70-0.88	24.37-30.22	2.71
Case 9	188.37	19.70-24.0	1.15-1.38	0.70-0.95	28.75-35.93	2.67

تکراری و پس از یک سری ساده‌سازی‌ها و ترکیب پارامترهای بی‌بعد اولیه تعداد هفت عدد پارامتر نهایی به صورت $\pi_1 = \frac{\rho_s - \rho}{\rho}$ ، $\pi_2 = \frac{\tau_0}{\rho g (s-1) d_s}$ ، $\pi_3 = \frac{d_s \sqrt{\tau_0 \rho}}{\mu}$ ، $\pi_4 = \frac{h}{T}$ ، $\pi_5 = \frac{T}{d_s}$ ، $\pi_6 = \frac{R_C}{T}$ و $\pi_7 = \frac{R_C}{T}$ تعیین می‌گردد. پارامترهای π_1 تا π_4 به ترتیب معرف پارامترهای شناخته‌شده $S-1$: چگالی نسبی ذره رسوبی، $\theta_{shields}$ پارامتر شیلدز، Re_* : رینولدز ذره و F_r : عدد فرود می‌باشند و پارامتر π_5 معرف نسبت بی‌بعد عرض مقطع به متوسط اندازه ذرات رسوبی، پارامتر π_6 بیانگر نسبت عمق متوسط به عرض متوسط مقطع عرضی و π_7 نسبت شعاع قوس به عرض متوسط می‌باشد. با انتخاب $\frac{T}{d_s}$ به عنوان پارامتر وابسته که مشخص‌کننده اندازه متوسط ذرات رسوبی در امتداد عرض قوس می‌باشد معادله مشخصه به صورت رابطه (۳) تبدیل خواهد شد.

$$\frac{T}{d_s} = \left(S - 1, \theta_{shields}, Re_*, F_r, \frac{h}{T}, \frac{R_C}{T} \right) \quad (3)$$

پارامترهای فوق با توجه به ارتباط مشخصات ذرات رسوبی و هیدرولیک جریان با ویژگی‌های هندسی بستر رودخانه از لحاظ فیزیکی معنی‌دار بوده و با مطالعات علمی محققین دیگر نیز انطباق دارند. همچنین با وجود امکان پیش‌بینی ارتباط پارامترهای $\theta_{shields}$ و Re_* و تأثیر $S-1$ به عنوان یک پارامتر ثابت، در این مرحله هیچ پارامتری حذف نگردید تا ارتباط بین پارامترها براساس آزمون همبستگی بررسی شود و نقش هر پارامتر براساس ارتباط داده‌ها مشخص شود.

مدل سازی ریاضی با استفاده از روش رگرسیون جمعی تعمیم یافته (GAM)

مدل‌های آماری با یک سعی و خطایی بین قابلیت تفسیرپذیری و منعطف بودن مواجه هستند. به عنوان مثال مدل‌های خطی قابلیت تفسیرپذیری مناسبی دارند، اما از آنجایی که برازش مناسبی بر داده‌های میدانی واقع در طبیعت

به‌کارگیری همه این عوامل علاوه بر این‌که نیازمند صرف زمان زیادی برای شناسایی روابط بین متغیرها می‌باشد، به واسطه حضور خطاهای حاصل از هر پارامتر نیز موجب ایجاد روابط پیچیده‌تر و با صحت کم‌تری خواهد شد. بنابراین می‌بایست با حذف پارامترهای مرتبط و در نظر گرفتن پارامترهای مستقل، تعداد متغیرهای مؤثر را به گونه‌ای که به‌طور کامل بیانگر رفتار پدیده موردنظر باشند و بتوان نتایج را طبق رابطه حاصله به درستی تفسیر نمود، کاهش داد (Dutta & Garcia, 2018).

در این پژوهش پارامترهای مؤثر براساس فیزیک پدیده انتقال و توزیع رسوبات و سابقه پژوهش شناسایی شده‌اند و آن‌ها را می‌توان در سه دسته مشخصات جریان و رسوب، خصوصیات جریان و هندسه کانال تقسیم نمود که پارامترهای تأثیرگذار در هر قسمت عبارتند از:

مشخصات سیال و رسوب

ρ : جرم مخصوص سیال $[ML^{-3}]$ ، μ : لزجت دینامیکی سیال $[ML^{-1}T^{-1}]$ ، g : شتاب ثقل $[LT^{-2}]$ ، $\rho_s - \rho$: جرم مخصوص غوطه‌وری رسوبات $[ML^{-3}]$ و d_s : اندازه متوسط ذرات رسوب $[L]$.

خصوصیات جریان

H : عمق متوسط جریان $[L]$ ، u : سرعت متوسط جریان در مقطع $[LT^{-1}]$ و τ_0 : تنش برشی متوسط بستر $[ML^{-1}T^{-2}]$.

مشخصات هندسی کانال

T : عرض سطح آزاد $[L]$ و R_C : شعاع قوس $[L]$.
بنابراین ارتباط بین پارامترها را می‌توان به شکل تابع مشخصه در رابطه (۲) بیان نمود.

$$f(\rho, \rho_s - \rho, g, \mu, d_s, h, u, \tau_0, T, R_C) = 0 \quad (2)$$

با لحاظ پارامترهای τ_0 ، ρ و d_s به عنوان متغیرهای

در این پژوهش برای انجام مدلسازی و به دست آوردن معادله‌ای تقریبی از ارتباط $\frac{T}{d_s}$ با سایر متغیرها از محیط برنامه‌نویسی نرم‌افزار R (نسخه 4.0.5)، که به صورت منبع باز می‌باشد و مدل GAM در بسته‌های الحاقیه آن قرار دارد، استفاده شده است. برای مدلسازی، ۲۵ درصد داده‌ها به عنوان داده‌های آزمایش جهت صحت‌سنجی مدل و مقایسه نتایج نهایی، به صورت تصادفی جدا شده و باقیمانده داده‌ها به عنوان داده‌های آموزش برای فرایند مدلسازی مورد استفاده قرار گرفته‌اند.

قبل از شروع مدلسازی در مرحله پیش‌پردازش، خطای جمع‌آوری داده‌ها با حذف داده‌های پرت برطرف شده و همبستگی بین پارامترهای منتخب با استفاده از آزمون‌ها بررسی شده است.

از آنجایی که همبستگی بین متغیرها باعث ایجاد هم‌خطی در مدل و بروز خطا در نتایج می‌شود؛ داده‌ها به گونه‌ای پردازش شده‌اند که تنها متغیرهایی باقی بمانند که ضریب همبستگی هر جفت از آن‌ها کمتر از مقدار ۰/۵ باشد. این پردازش باعث حذف متغیر Re_* که در جدول همبستگی با متغیرهای $\frac{Rc}{T}$ و $\theta_{Shields}$ به ترتیب دارای همبستگی ۰/۵۶ و ۰/۸۲ می‌باشد، شده است (جدول ۲). البته ارتباط بین دو پارامتر Re_* و $\theta_{Shields}$ از لحاظ فیزیک مسأله نیز قابل تفسیر است.

بنابراین از میان متغیرهای کمکی در معادله مشخصه با حذف پارامتر Re_* پارامترهای $\frac{Rc}{T}$ ، F_r ، $\theta_{Shields}$ و $\frac{h}{T}$ به عنوان پارامترهای مستقل تأثیرگذار باقی مانده‌اند. هم‌چنین به منظور برطرف نمودن خطاهای وارد شده در مقادیر داده‌ها، با استفاده از آزمون‌های آماری مانند روش بون‌فرونی^۲ (Freund et al., 2010) و با توجه به ماتریس متغیرهای کمکی^۳، مقادیر داده‌های پرت از متغیرها حذف شده‌اند.

برای پردازش داده‌ها براساس مدل GAM ابتدا برای هر متغیر کمکی به صورت جداگانه، فرم‌های معمول و رایج شامل

ایجاد نمی‌نمایند برای مسائل پیچیده‌تر می‌باید از مدل‌های پیشرفته یادگیری ماشین استفاده نمود. این مدل‌ها در کنار قابلیت‌های بالایی که دارند به تعداد داده‌های زیادتری نیاز دارند و تفسیر آن‌ها به راحتی امکان‌پذیر نیست (Froehlich, 2020). در بین مدل‌های پیچیده یادگیری ماشین (مثل شبکه عصبی) و مدل‌های رگرسیون خطی، مدل رگرسیون جمعی تعمیم یافته روش ساده‌ای را ارائه می‌کند و در آن پیش‌بینی نتایج حتی برای مدل‌های پیچیده و روابط غیرخطی به درستی انجام می‌پذیرد. از این رو، با توجه به ماهیت میدانی این مطالعات و هم‌چنین عدم امکان برداشت داده‌های زیاد، روش GAM به عنوان یک مدل مناسب نسبت به مدل‌های خطی و یادگیری ماشین انتخاب شده است.

مدل GAM (Hastie & Tibshirani, 1990) نوعی مدل خطی تعمیم یافته است که از یک پیش‌بینی کننده به صورت جمعی از توابع هموار بهره می‌برد و تفاوت اصلی آن با سایر مدل‌های خطی تعمیم یافته در همین می‌باشد. این مدل به صورت نیمه پارامتریک است و با دقت قابل قبول نسبت به سایر مدل‌های کلاسیک برتری دارد (Pourghasemi & Rossi, 2016) و به طور کلی ساختار آن براساس یک مدل جمعی طبق رابطه (۴) تعیین می‌شود.

$$g(E(y)) = \beta_0 + f_1(x_1) + f_2(x_2) + \dots + f_m(x_m) \quad (4)$$

که در این رابطه $g(E(y))$ تابع واسطی بین متغیرهای پیش‌بینی کننده x_1 ، x_2 ، ... و x_m و مقادیر قابل انتظار می‌باشد. β_0 مقدار ثابت و f_i ممکن است توابعی با یک فرم پارامتریک مشخص مانند چندجمله‌ای، نمایی، لگاریتمی و ... از یک متغیر یا به صورت غیرپارامتری و یا نیمه پارامتریک به صورت توابعی هموار مطرح شوند. روش‌های رگرسیونی برای زمان‌هایی که اطلاع قبلی و مشخصی از نحوه رفتار و تغییرات متغیرهای کمکی در ارتباط با متغیر پاسخ وجود ندارد، مناسب می‌باشند و رابطه مناسب از طریق برازش و یافتن ارتباط بهینه بین این متغیرها به دست می‌آید.

ساده‌تر یعنی مرتبه دو به‌عنوان فرم برازش چندجمله‌ای، برگزیده شده است تا با سایر فرم‌ها مقایسه شود. سپس برای هر متغیر فرمی که دارای بهترین برازش (R^2 بالاتر) می‌باشد، انتخاب شده است (شکل ۳) و در نهایت فرم‌های منتخب به‌صورت معادله جمعی کنار هم قرار گرفته‌اند تا یک معادله واحد برای پیش‌بینی متغیر هدف به‌وجود آید (جدول ۳).

چند جمله‌ای (در نهایت تا مرتبه سه)، توانی (در نهایت تا مرتبه سه)، نمایی و لگاریتمی استفاده شده‌اند. از بین فرم‌های چندجمله‌ای مراتب یک تا سه به‌کمک آزمون تحلیل واریانس^۴ (Thompson & Lowthian, 2011) مرتبه مناسب انتخاب و با سایر فرم‌ها مقایسه شده است. به‌عنوان مثال چنانچه براساس این آزمون مرتبه سه با دو تفاوتی نداشته باشد، فرم

Table 2. Correlation coefficient between variables

Variables	$\frac{R_c}{T}$	F_r	$S - 1$	$\theta_{shields}$	$\frac{h}{T}$	Re_*	$\frac{T}{d_s}$
$\frac{R_c}{T}$	1	0.36	-0.33	0.47	0.32	0.56	0.057
F_r	0.36	1	-0.19	0.38	-0.19	0.45	0.01
$\theta_{shields}$	0.47	0.38	-0.26	1	0.14	0.82	-0.04
$\frac{h}{T}$	0.32	-0.19	-0.15	0.14	1	0.26	0.01
Re_*	0.56	0.45	-0.30	0.82	0.26	1	-0.01
$\frac{T}{d_s}$	0.06	0.10	-0.01	-0.04	0.01	-0.01	1

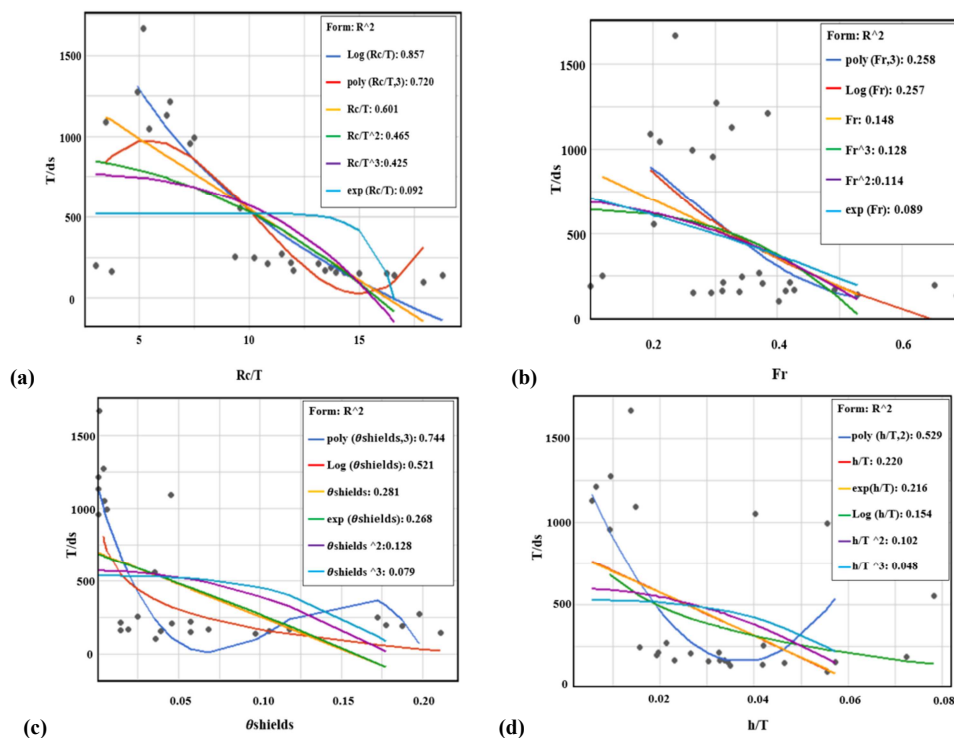


Figure 3. Fitting polynomial, exponential and logarithmic forms for a) R_c/T , b) F_r , c) $\theta_{shields}$, d) h/T to T/d_s

Table 3. Selected fitting form for auxiliary variables

Variables	$\frac{R_c}{T}$	F_r	$\theta_{shields}$	$\frac{h}{T}$
Selected form	$\log(\frac{R_c}{T})$	$Poly(F_r, 3)$	$Poly(\theta_{shields}, 3)$	$Poly(\frac{h}{T}, 2)$

درصد، برای تعیین رابطه باقی می ماند. در جدول تحلیل واریانس (جدول ۵) علاوه بر پارامترهای درجه آزادی (Df)، مقادیر مجموع مربعات ($Sum Sq.$)، میانگین مربعات ($Mean Sq.$)، مقدار آماره F (F value.) مقدار $Pr(> F)$ که همان مقدار احتمال می باشد، نیز دیده می شود. مقدار p -value برای متغیر $\frac{h}{T}$ با فرم $poly(\frac{h}{T}, 2)$ بیش تر از ۵ درصد بوده و به این معنا است که حضور یا عدم حضور این تابع، به عنوان بهترین تابع از متغیر $\frac{h}{T}$ تفاوتی ندارد و حضورش در مدل معنی دار نمی باشد و به همین دلیل از مدل حذف می شود. مقدار احتمال برای سایر متغیرها کم تر از ۵ درصد می باشد و این نشان می دهد که اثر این متغیرها بر روی متغیر پاسخ معنی دار است و تغییر در آن ها متغیر $\frac{T}{d_s}$ را تحت تأثیر قرار می دهد.

پس از حذف متغیر $\frac{h}{T}$ و بررسی مجدد آزمون تحلیل واریانس برای متغیرهای باقی مانده، مشخص می شود که مقادیر تابع p -value آن ها در مدل کم تر از ۵ درصد می باشد (جدول ۶) و بر این اساس مدل نهایی استخراج شده برای $\frac{T}{d_s}$ براساس توابع $\frac{R_C}{T}$ ، $\theta_{Shields}$ و F_r تعیین می شود. با محاسبه ضرایب ثابت و متغیرهای کمکی محاسبه شده (جدول ۷)، مدل نهایی توزیع اندازه ذرات رسوبی ($\frac{T}{d_s}$) و متاثر از پارامترهای بی بعد مستقل به صورت روابط (۹) تا (۱۱) تعیین می شود.

در این مرحله متغیر $S-1$ در روند رگرسیون بین متغیرها و انتخاب بهترین حالت، به عنوان یک پارامتر کم تأثیر عمل می نماید و حضور آن در مجموعه متغیرهای کمکی تأثیری در فرم معادله منتخب ندارد. به همین دلیل از مجموعه متغیرهای کمکی حذف شده است و پارامترهای $\frac{R_C}{T}$ ، F_r و $\theta_{Shields}$ به عنوان پارامترهای مستقل تأثیرگذار باقی می ماند. با به کارگیری مدل GAM و براساس فرم مناسب برازش هر متغیر، ضرایب ثابت و متغیرهای کمکی محاسبه (جدول ۸) و فرم تجمعی پیشنهادی براساس پارامترهای مستقل به صورت معادلات (۵) تا (۸) تعیین شده است.

$$\frac{T}{d_s} \approx 979.763 - 220.184 \times \log\left(\frac{R_C}{T}\right) + \quad (5)$$

$$f(F_r) + g(\theta_{Shields}) + k\left(\frac{h}{T}\right)$$

$$f(F_r) = \quad (6)$$

$$F_r \times (-351.188 + 70.58 \times F_r + 411.418 \times F_r^2)$$

$$g(\theta_{Shields}) = \theta_{Shields} \times \quad (7)$$

$$(-771.595 + 827.056 \times \theta_{Shields} - 305.378 \times \theta_{Shields}^2)$$

$$k\left(\frac{h}{T}\right) = \frac{h}{T} \times (-3331.717 + 359.43 \times \frac{h}{T}) \quad (8)$$

با استفاده از روش حذف برگشتی (Witten et al., 2011) و به کارگیری مجدد آزمون تحلیل واریانس متغیرهایی که دارای مقدار احتمال (p -value) بیش تر از ۵ درصد هستند را حذف می کنیم و متغیرهای داری p -value کم تر از ۵

Table 4. Coefficients of variables in the selected form- First step

$\log\left(\frac{R_C}{T}\right)$	Poly (F_r , 3)			Poly ($\theta_{Shields}$, 3)			Poly ($\frac{h}{T}$, 2)	
	O (1)	O (2)	O (3)	O (1)	O (2)	O (3)	O (1)	O (2)
-220.184	-351.188	70.580	411.418	-771.595	827.056	-305.378	-331.717	359.430

*Cons.=979.763; ** $R^2=0.78$; ***O:Order of polynomial

Table 5. Analysis of variance for variables-First step

Selected Form	df	Sum Sq.	Mean Sq.	F value.	Pr(> F)
$\log\left(\frac{R_C}{T}\right)$	1	2342003.30	2342003.30	31.67	0.00
poly (F_r , 3)	3	703283.63	234427.87	3.17	0.04
poly ($\theta_{Shields}$, 3)	3	1396732.66	465577.55	6.29	0.01
poly ($\frac{h}{T}$, 2)	2	113490.92	56745.46	0.76	0.48

Table 6. Analysis of variance for variables-Second step

Selected Form	df	Sum Sq.	Mean Sq.	F value.	Pr(> F)
$\log\left(\frac{R_c}{T}\right)$	1	2342003.30	2342003.30	32.47	0.00
$poly(F_r, 3)$	3	703283.63	234427.88	3.25	0.04
$poly(\theta_{shields}, 3)$	3	1396732.66	465577.55	6.46	0.00

Table 7. Coefficients of variables in the selected form-Second step

$\log\left(\frac{R_c}{T}\right)$	Poly ($F_r, 3$)			Poly ($\theta_{shields}, 3$)		
	O (1)	O (2)	O (3)	O (1)	O (2)	O (3)
-278.180	-341.909	-18.890	434.691	-817.363	1,004.840	-465.779

*Cons.= 1,108.799; ** $R^2=0.76$; *** O:Order of polynomial

هستند، منجر شد و پس از ترکیب آن‌ها، پارامترهای نهایی به صورت $S - 1$ ، Re_* ، Fr ، $\theta_{shields}$ و $\frac{R_c}{T}$ مشخص شدند. در فرایند مدل‌سازی، Re_* به دلیل وابستگی به متغیرهای $\frac{R_c}{T}$ و $\theta_{shields}$ و پارامترهای $S - 1$ و $\frac{h}{T}$ به دلیل تأثیر کم و داشتن مقدار احتمال (p-value) بیش‌تر از ۵ درصد از متغیرها حذف شدند و با تعیین فرم منتخب برای $\frac{R_c}{T}$ به صورت لگاریتمی و برای F_r و $\theta_{shields}$ چند جمله‌ای از مرتبه سه ترکیب نهایی مدل به صورت تابعی از متغیرها با $R^2 = 0.76$ تعیین شد.

نتیجه به دست آمده از مدل‌سازی مشخص نمود بین پارامترهای معرف هیدرولیک جریان و هندسه قوس با اندازه ذرات رسوب بستر ارتباط معنی‌داری وجود دارد و توزیع اندازه ذرات رسوب بستر در قوس‌ها $\left(\frac{T}{d_s}\right)$ متأثر از سه پارامتر بی‌بعد شامل نسبت انحنا قوس $\left(\frac{R_c}{T}\right)$ ، عدد فرود جریان (F_r) و پارامتر شیلدز $(\theta_{shields})$ می‌باشد. مدل ارائه شده نسبت به کار سایر پژوهش‌گران نظیر Wright & McKie et al. (2019) و Parker (2005)، Natio et al. (2020) به دلیل لحاظ نمودن پارامتر معرف هندسه قوس، استفاده از داده‌های میدانی و به کارگیری روش GAM، که دقت بالاتر و پیش‌بینی بهتری نسبت به مدل‌های کلاسیک دارد، دارای نوآوری است. نتیجه صحت‌سنجی این مدل با ۲۵ درصد از داده‌ها نشان می‌دهد انطباق مناسبی بین آن‌ها وجود دارد و بنابراین رابطه نهایی برای تعیین اندازه

$$\frac{T}{d_s} \approx 1108.799 - 278.18 \times \quad (9)$$

$$\log\left(\frac{R_c}{T}\right) + f(F_r) + g(\theta_{shields})$$

$$f(F_r) = \quad (10)$$

$$F_r \times (-341.909 - 18.89 \times F_r + 434.691 \times F_r^2)$$

$$g(\theta_{shields}) = \theta_{shields} \times \quad (11)$$

$$(-817.363 + 1004.84 \times \theta_{shields} - 465.779 \times \theta_{shields}^2)$$

نتیجه گیری

این مطالعه یک مدل رگرسیونی برای توزیع اندازه رسوبات غیریکنواخت در قوس رودخانه‌های دارای بستر شنی تحت اثر مشخصات هیدرولیکی جریان و پارامترهای هندسی قوس ارائه می‌نماید. برای تحلیل مسأله و شناسایی پارامترهای مؤثر از روش آنالیز ابعادی و تئوری پی-باکینگهام استفاده گردیده و با بکارگیری مدل تجمعی تعمیم‌یافته (GAM) یک رابطه ارائه شده است. مدل به دست آمده براساس مجموعه‌ای از داده‌های میدانی، برداشت شده از نُه قوس رودخانه با محدوده سرعت متوسط جریان $0.17 \leq \bar{u} \leq 0.95 \text{ m/s}$ ، اندازه متوسط ذرات رسوب $24.37 \leq d_{50} \leq 40.99 \text{ mm}$ و شعاع قوس $17 \leq R_c \leq 188 \text{ m}$ استوار گردیده است.

نتیجه تحلیل ابعادی انجام شده، به تعیین هفت عدد متغیر بی‌بعد (π_i) که هر کدام معرف یک پارامتر شاخص

- Engineers*. New Jersey, John Wiley & Sons, Inc.
9. Hastie, T., & Tibshirani, R.J. (1990). *Generalized Additive Models. Monographs on Statistics and Applied Probability*. London, Chapman and Hall.
 10. Jang, J., Ho, H., & Yen, C. (2011). Effects of Lifting Force on Bed Topography and Bed-Surface Sediment Size in Channel Bend. *Journal of Hydraulic Engineering*, 137(9), 911-920.
 11. Julien, P. Y., & Anthony, D. J. (2002). Bed load motion and grain sorting in a meandering stream. *Journal of Hydraulic Research*, 40(2), 125-133.
 12. Kuhnle, R. A., Wren, D. G., & Langendoen, E. J. (2019). Structural Changes of Mobile Gravel Bed Surface for Increasing Flow Intensity. *Journal of Hydraulic Engineering*, 146(2), [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HY.1943-7900.0001699](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0001699).
 13. Leathwick, J. R., Elith, J., & Hastie, T. (2006). Comparative performance of generalized additive models and multivariate adaptive regression splines for statistical modelling of species distributions. *Ecological Modelling*, 199(2), 188-196.
 14. Li, J., He, X., Wei, J., Bao, Y., Tang, Q., Nambajimana, J. de D., Nsabimana, G., & Khurram, D. (2021). Multifractal features of the particle-size distribution of suspended sediment in the Three Gorges Reservoir, China. *International Journal of Sediment Research*, 36(4), 489-500.
 15. McKie, C. W., Juez, C., Plumb, B. D., Annable, W. K., & Franca, M. J. (2020). How Large Immobile Sediments in Gravel Bed Rivers Impact Sediment Transport and Bed Morphology. *Journal of Hydraulic Engineering*, 147(2), [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HY.1943-7900.0001842](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0001842).
 16. Mohanta, A., & Patra, K. C. (2019). MARS for Prediction of Shear Force and Discharge in Two-Stage Meandering Channel. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 145(8), [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)IR.1943-4774.0001402](https://doi.org/10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0001402).
 17. Naito, K., Ma, H., Nittrouer, J. A., Zhang, Y., Wu, B., Wang, Y., Fu, X., & Parker, G. (2019). Extended Engelund-Hansen type sediment transport relation for mixtures based on the sand-silt-bed Lower Yellow River, China. *Journal of Hydraulic Research*, 57(6), 770-785.

متوسط ذرات رسوب (d_{50}) در سایر رودخانه‌های قوسی شکل با بستر شنی می‌تواند قابلیت استفاده داشته باشد.

پی‌نوشت‌ها

1. Generalized Additive Model (GAM)
2. Bonferroni test
3. Hat Matrix
4. Analysis of Variance (ANOVA)

تعارض منافع

هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان وجود ندارد.

منابع

1. Albrecht, M. C., Nachtsheim, C. J., Albrecht, T. A., & Cook, R. D. (2013). Experimental design for engineering dimensional analysis. *Technometrics*, 55(3), 257-270.
2. Asquith, W. H. (2013). Regression Models of Discharge and Mean Velocity Associated with Near-Median Streamflow Conditions in Texas: Utility of the U.S. Geological Survey Discharge Measurement Database. *Journal of Hydrologic Engineering*, 19(1), 108-122.
3. Cordier, F., Tassi, P., Claude, N., Crosato, A., Rodrigues, S., & Pham Van Bang, D. (2020). Bar pattern and sediment sorting in a channel contraction/expansion area: Application to the Loire River at Bréhémont (France). *Advances in Water Resources*, 140(1), 1-18.
4. Dutta, S., & Garcia, M. H. (2018). Nonlinear Distribution of Sediment at River Diversions: Brief History of the Bulle Effect and Its Implications. *Journal of Hydraulic Engineering*, 144(5), 1-12.
5. Fernández, R., Vitale, A. J., Parker, G., & García, M. H. (2020). Hydraulic resistance in mixed bedrock-alluvial meandering channels. *Journal of Hydraulic Research*, 59(2), 298-313.
6. Freund, R.J., Wilson, W.J. and Mohr, D.L. (2010). *Statistical Methods*. Cambridge, Academic Press.
7. Froehlich, D. C. (2020). Neural Network Prediction of Maximum Scour in Bends of Sand-Bed Rivers. *Journal of Hydraulic Engineering*, 146(10), [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HY.1943-7900.0001804](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0001804).
8. Germaine, J. T., & Germaine, A. V. (2009). *Geotechnical Laboratory Measurements for*

18. Parker, G., & Andrews, E. D. (1985). Sorting of Bed Load Sediment by Flow in Meander Bends. *Water Resources Research*, 21(9), 1361-1373.
19. Pitlick, J., Mueller, E. R., Segura, C., Cress, R., & Torizzo, M. (2008). Relation between flow, surface-layer armoring and sediment transport in gravel-bed rivers. *Earth Surface Processes and Landforms*, 33(8), 1192-1209.
20. Pourghasemi, H. R., & Rossi, M. (2016). Landslide susceptibility modeling in a landslide prone area in Mazandarn Province, north of Iran: a comparison between GLM, GAM, MARS, and M-AHP methods. *Theoretical and Applied Climatology*, 130(1), 609-633.
21. Rovira, A., Núñez-González, F., & Ibañez, C. (2018). Dependence of sediment sorting on bedload transport phase in a river meander. *Earth Surface Processes and Landforms*, 43(10), 2077-2088.
22. Thompson, M., & Lowthian, P. J. (2011). *Analysis of Variance (ANOVA) and Its Applications*. London. Imperial college Press.
23. Tian, S., Li, Z., Wang, Z., Jiang, E., Wang, W., & Sun, M. (2021). Mineral composition and particle size distribution of river sediment and loess in the middle and lower Yellow River. *International Journal of Sediment Research*, 36(3), 392-400.
24. Witten, I. H., Frank, E., & Hall, M. A. (2011). *Data Mining: Practical Machine Learning Tools and Techniques*. Burlington, Morgan Kaufmann publications.
25. Wright, S., & Parker, G. (2005). Modeling downstream fining in sand-bed rivers. I: formulation. *Journal of hydraulic research*, 43(6), 613-620.