

شبیه سازی دو بعدی مهاجرت چاله برداشت مصالح، مطالعه موردی رودخانه حله در استان بوشهر

رضا شعبانی^۱، سید محمدعلی زمردیان^{۲*} و مسیح ذوالقدر^۳

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد سازه های آبی، دانشگاه شیراز

۲- دانشیار بخش مهندسی آب، دانشگاه شیراز*

۳- استادیار گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه جهرم

mzomorod@shirazu.ac.ir

تاریخ دریافت: ۹۸/۴/۲۰ تاریخ پذیرش: ۹۸/۱۰/۲

چکیده

برداشت بی‌رویه و غیرفنی شن و ماسه از رودخانه‌ها آثار نامطلوب مورفولوژیکی و محیط زیستی زیادی را به همراه داشته است. با توجه به پرهزینه بودن ساخت مدل‌های فیزیکی از رودخانه‌ها، استفاده از مدل‌های عددی برای شبیه‌سازی هیدرودینامیک و انتقال رسوب کمک قابل توجهی به شناخت پدیده‌های مرتبط از جمله بررسی آثار منفی برداشت شن و ماسه در رودخانه‌های مختلف می‌کند. در این پژوهش ابتدا درستی آزمایشی مدل دو بعدی MIKE21 در شبیه‌سازی مهاجرت چاله برداشت مصالح از طریق مقایسه با داده‌های آزمایشگاهی انجام شده است. نتایج نشان دهنده عملکرد قابل قبول مدل MIKE21 در شبیه‌سازی هیدرودینامیک جریان و رسوب هستند. پس از درستی‌سنجی مدل، بازه‌ای از رودخانه‌ی حله به عنوان مطالعه موردی بررسی شده است. در بازه مورد مطالعه، بررسی آثار برداشت شن و ماسه بر رودخانه و پل موجود در آن مورد توجه قرار گرفت. نتایج حاکی از آن است که در رودخانه‌ی حله به ازای هیدروگراف سیل با دوره بازگشت ۲۵ ساله، چاله برداشت شن و ماسه موجب کاهش تراز نیمرخ بستر به میزان ۱/۲۷ متری در محدوده پل شده است.

واژگان کلیدی: چاله برداشت مصالح، شبیه‌سازی عددی، انتقال رسوب، مدل MIKE21

مقدمه

بهره‌برداری غیر اصولی از رودخانه از طریق برداشت بی‌رویه شن و ماسه و تعدی به حریم رودخانه از طریق کشاورزی و ساخت ابنیه و راه‌ها، می‌تواند باعث ایجاد تغییرات سریع در شکل رودخانه شده و آن را چند شاخه نماید. چند شاخه‌ای شدن باعث افزایش عرض رودخانه و نواحی سیل‌گیر شده که خود سبب افزایش خسارت به مناطق مسکونی، اراضی کشاورزی و سازه‌های در طول مسیر رودخانه می‌شود. در صورت وقوع سیل در این حالت، خسارت‌های مالی و جانی دو چندان خواهد شد. رودخانه تجن در ساری، سفیدرود در استان گیلان، رودخانه مرزی ارس در استان آذربایجان شرقی، رودخانه میناب در استان هرمزگان و رودخانه تیره در استان لرستان فقط نمونه‌هایی از این تخریب گسترده هستند. به طور کلی پژوهش‌های صورت گرفته در خصوص آثار برداشت شن و ماسه را به چند دسته پژوهش‌های میدانی، مدل‌های فیزیکی و مدل‌های عددی می‌توان تقسیم بندی کرد [1].

کوهنکن و ریتول (۲۰۱۸) طی گزارشی جامع آثار متعدد برداشت مصالح رودخانه‌ای بر سازه‌ها، اکوسیستم، تنوع زیستی، کیفیت آب، فرآیندهای رودخانه‌ای و مسائل اجتماعی را بررسی کردند. در این پژوهش چهار مطالعه موردی در کشورهای مختلف دنیا از جمله چین و هند بررسی شد [2]. در مطالعه میدانی دیگری، آثار برداشت شن و ماسه بر رودخانه ده‌بالا در استان کرمان بررسی شد. پارامترهای هندسی رودخانه مانند طول موج، ضریب خمیدگی، شعاع نسبی و زاویه مرکزی اندازه‌گیری شد. نتایج حاکی از افزایش سیمای پیچان‌رودی رودخانه و افزایش طول رودخانه در سال‌های ۱۳۶۷ تا ۱۳۸۴ بود که نشان‌گر تحت فشار قرار گرفتن رودخانه از نظر هیدرولیکی و به دنبال آن افزایش ناپایداری، توسعه و گسترش فرسایش کناری به دنبال برداشت مصالح از بستر رودخانه بوده است [3]. پژوهش‌های صحرائی استو و چانگ (۱۹۸۷) در مورد رودخانه‌ی سن‌خوان در کالیفرنیا که بیش از ده سال

در معرض برداشت شن و ماسه بوده است، نشان می‌دهد که تغییرات ایجاد شده در عرض رودخانه بسیار بیشتر از عمق آن بوده است. این تغییرات به صورت تعریض رودخانه در پایین‌دست محل برداشت نمایان شده است؛ به طوری که عرض رودخانه در فاصله زمانی دو ماه حدود ۶۰ متر افزایش یافته است [4]. در پژوهش آزمایشگاهی دیگری در یک فلوم با طول ۱۳ متر و عرض ۰/۶ متر بررسی حرکت و تغییر شکل حفره‌های متقارن نسبت به محور فلوم انجام شد. نتایج نشان داد که با افزایش یا کاهش طول چاله، سرعت مهاجرت حفره‌ها متناسباً افزایش یا کاهش می‌یابد [5]. لیزل و همکاران (۱۹۹۳) فرآیند تغییرات رقوم کف در برداشت مصالح را با مدل سازی یک رودخانه در آزمایشگاه بررسی کردند. آن‌ها نتیجه گرفتند که در رودخانه‌های دارای بستر درشت‌دانه با بار رسوبی متوسط، فرسایشی که در محل برداشت مصالح رخ می‌دهد باعث تولید بار رسوبی شده که خود منجر به تغییر ریخت شناسی و بار رسوبی رودخانه می‌شود. [6]

مدل‌های عددی از نظر تحمیل هزینه و زمان کمتر و عدم محدودیت در شبیه سازی‌های بزرگ مقیاس و همچنین امکان تعریف سناریوهای متنوع، نسبت به مدل‌های فیزیکی، برتری دارند و مورد توجه پژوهشگران هستند. به عنوان نمونه پژوهشی توسط آرچتی و گائتا (۲۰۱۸) برای ارائه طرح‌های حفاظتی چند منظوره ساحلی در دهانه رودخانه رنو در ایتالیا صورت گرفت. آن‌ها برای ارائه طرح‌های حفاظتی وضعیت جریان در منطقه همراه با طرح‌های حفاظتی جایگزین مثل موج شکن در سناریوهای مختلف را با استفاده از نرم‌افزار MIKE21 شبیه سازی کردند و نتایج مدل را با یکدیگر در شرایط بار موج، نرخ فرورانش و تغییر رقوم کف مقایسه کردند. در نهایت طرح موج شکن مناسب با الگوی جریان ارائه شد [7]. همچنین پژوهشی روی رودخانه کلارنس در استرالیا توسط آخوند علی (۱۹۹۷) انجام شد. در این پژوهش بستر رودخانه در سه

می‌نماید. همچنین تا جایی که مرور پژوهش‌های گذشته نشان می‌دهد بررسی مهاجرت چاله برداشت مصالح توسط این مدل انجام نشده است.

ابزار و روش

مدل **MIKE21** برای شبیه سازی هیدرودینامیکی جریان، انتقال رسوب، کیفیت آب در دریاچه‌ها، خورها، خلیج‌ها، دریاها و نواحی ساحلی توسط موسسه هیدرولیک دانمارک توسعه یافته است. به منظور شبیه‌سازی در مطالعه حاضر از مدول‌های هیدرودینامیک و انتقال رسوب غیر چسبنده به روش انگلوند هسن استفاده شده است [10]. در این مدل معادلات حاکم بر جریان شامل پیوستگی و مومنت دو بعدی به شرح زیر است:

معادله پیوستگی:

$$(1) \quad \frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial(p)}{\partial x} + \frac{\partial(q)}{\partial y} = 0$$

مومنت در جهت **x**

$$(2) \quad \frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial(p^2 H)}{\partial x} + \frac{\partial(g H^2/2)}{\partial x} + \frac{\partial(pq/H)}{\partial y} = gH \left(\frac{-\partial h_0}{\partial x} - \frac{p\sqrt{p^2+q^2}}{C^2 H^2} \right) + \nu \left[2 \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 q}{\partial x \partial y} \right]$$

مومنت در جهت **y**

$$(3) \quad \frac{\partial q}{\partial t} + \frac{\partial(q^2 H)}{\partial y} + \frac{\partial(g H^2/2)}{\partial y} + \frac{\partial(pq/H)}{\partial x} = gH \left(\frac{-\partial h_0}{\partial y} - \frac{q\sqrt{p^2+q^2}}{C^2 H^2} \right) + \nu \left[2 \frac{\partial^2 q}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 q}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial x \partial y} \right]$$

در این معادلات **H** عمق آب، **p** و **q** به ترتیب بده جریان در جهت **x** و **y**، **C** ضریب شزی (Chezy)، **v** ضریب لزجت تلاطم، **h₀** عمق آب در زیر سطح آب ساکن **g** شتاب جاذبه می‌باشد. به منظور شبیه سازی فرایند انتقال رسوب از روش انگلوند-هسن استفاده شده است. این روش به فرم کلی زیر است:

مقطع عرضی در طی نقشه برداری‌های مختلف اندازه‌گیری شد. وی از مدل ریاضی **Hec_6** برای پیش‌بینی تغییرات بستر در مقایسه با تغییرات اندازه‌گیری شده استفاده کرده است، که نتایج بدست آمده در دو مقطع همبستگی خوبی را نشان می‌دهد [8]. صمدی و عزیزیان (۱۳۹۶) بررسی حرکت چاله برداشت شن و ماسه توسط مدل یک بعدی هک راس و دو بعدی **CCHE2D** را مورد مطالعه قرار دادند. این مطالعه روی رودخانه سرباز در استان سیستان و بلوچستان انجام گرفت و نتایج نشان داد که برداشت مصالح از بستر رودخانه در اعماق زیاد، تغییر تراز بستر رودخانه را شدیدتر خواهد کرد. [9]

با استفاده از مدل‌های دوبعدی می‌توان در تجزیه و تحلیل از تحمیل هزینه در مدل‌های فیزیکی و ساده سازی در مدل‌های یک بعدی اجتناب کرد و نتایج بهتری را در شبیه‌سازی رقم زد. در این پژوهش ابتدا کارایی مدل **MIKE21** در پیش‌بینی مهاجرت حفره ناشی از برداشت مصالح، در مقیاس آزمایشگاهی بررسی شد. سپس رودخانه حله به عنوان مطالعه موردی برای بررسی حرکت چاله‌ی برداشت شن و ماسه مورد توجه قرار گرفت. طبق مطالب ذکر شده در مورد آثار برداشت شن و ماسه و از طرفی وجود معادن پراکنده در منطقه، وجود نخلستان‌های وسیع و مناطق مسکونی در حاشیه رودخانه حله، بررسی آثار برداشت شن و ماسه در این رودخانه از اولویت‌های شرکت سهامی آب منطقه‌ای استان بوشهر است که در این پژوهش مورد ملاحظه قرار گرفته است. با توجه به اینکه استفاده از مدل‌های عددی به علت تحمیل هزینه‌های کمتر رو به افزایش بوده و از طرفی مدل **MIKE21** یک مدل شناخته شده برای شبیه‌سازی جریان در دریاها و خلیج‌ها و محیط‌های مشابه است، درستی‌آزمایی و کاربرد این مدل در مبحث مهندسی رودخانه و به طور خاص مهاجرت چاله رسوبی، ابزار مناسبی را به جامعه علمی کشور معرفی کرده به بررسی این پدیده در رودخانه‌های کشور کمک شایانی

نسبت سرعت متوسط جریان به سرعت بحرانی نیز معادل ۰/۹۵ لحاظ شده است. عمق جریان در همه آزمایش ها ثابت و معادل ۱۲ سانتی متر، عدد فرود در کانال ۰/۱ و جریان آشفته بوده است. با توجه به اینکه رودخانه حله رودخانه‌ای پیچانرودی و بالغ است شرایط جریان در کانال مناسب و تقریباً مشابه با رودخانه در نظر گرفته شده است. در مطالعه‌ای که توسط رزمخواه و هاشمی (۱۳۸۶) انجام شد، عدد فرود در رودخانه حله در دوره بازگشت‌های ۲ تا ۳۰ ساله بین ۰/۰۶ تا ۰/۵ گزارش شده است. مشخصات رسوب مورد استفاده در جدول (۲) ذکر شده است. [12,11]

شکل ۱. فلوم آزمایشگاهی واقع در آزمایشگاه هیدرولیک رسوب دانشگاه شیراز



Fig. 1. Laboratory flume in Shiraz university

جدول ۱. آزمایش‌های چاله برداشت مصالح

Pit length, in flow direction (cm)	Pit depth (cm)	Test No.
17.5	14	1
35	14	2
17.5	7	3
35	7	4
17.5	20	5
35	20	6
70	7	7
70	14	8
70	20	9

Table. 1. Sand and gravel mining tests properties

$$\frac{Q_t}{Q} = 0.05 \left(\frac{G_s}{G_s - 1} \right) \frac{VS}{\sqrt{[(G_s - 1)gD_m]}} \frac{RS}{(G_s - 1)D_m} \quad (4)$$

در این رابطه، Q_t دبی رسوب، Q دبی جریان، G_s چگالی ذرات رسوب، V سرعت جریان، D_m اندازه ذره‌ای که ۵۰ درصد وزنی ذرات از آن کوچک‌ترند، R شعاع هیدرولیکی و S شیب طولی است.

مدل MIKE21 یک مدل دو بعدی است که معادلات حاکم را در به روش احجام محدود حل می‌کند. این مدل برای شبیه سازی جریان‌های با سطح آزاد در دریاها، خلیج‌ها، خورها و نواحی ساحلی توسط موسسه هیدرولیک دانمارک (DHI) توسعه یافته است [10]. در مطالعه پیش رو، به کارکرد مدل در شبیه سازی جریان در رودخانه توجه شده است. ماژول استفاده شده هیدرودینامیک با مش منعطف (FM Flow Model) به همراه تحلیل انتقال رسوب به صورت همزمان (در هر بازه زمانی مدل به صورت همزمان دو ماژول هیدرودینامیک و انتقال رسوب را حل می‌کند) برای دستیابی به اهداف مورد نظر استفاده شده است.

برای درستی‌آزمایی مدل عددی آزمایش‌هایی در فلوم تحقیقاتی با طول ۱۵ و عرض و عمق ۰/۷ متر صورت گرفت شکل (۱). ارتفاع رسوبات در کف فلوم ۲۰ سانتی‌متر بوده و عرض همه چاله‌ها معادل عرض فلوم، ۷۰ سانتی‌متر در نظر گرفته شده است.

آزمایش‌های ارزیابی مدل عددی

تعداد ۹ آزمایش به منظور ارزیابی دقت مدل عددی در شبیه سازی مهاجرت چاله برداشت مصالح، در فلوم آزمایشگاهی طبق جدول (۱) و در شرایط آب زلال ترتیب داده شد. با توجه به مطالعات رادکیوی (۱۹۹۸) شرایط آبشستگی آب زلال در $u \leq 0.95u_c$ است و همچنین بیشینه آبشستگی در $u = 0.95u_c$ اتفاق می‌افتد (u سرعت متوسط جریان و u_c سرعت بحرانی یا آستانه حرکت ذرات). از این رو

شکل ۲. نقاط برداشت اطلاعات برای مقایسه بین نتایج آزمایش‌ها و شبیه‌سازی، (الف) چاله‌های مثلثی (ب) چاله‌های ذوزنقه‌ای

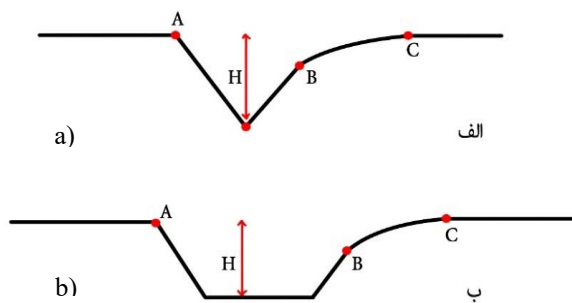


Fig. 2. Main points for comparison of experimental and numerical results, (a) Triangular pits, (b) Trapezoidal pits

مطالعه موردی

پس از درستی‌آزمایی شبیه‌سازی انتقال چاله آبستگي به وسیله مدل عددی از طریق مقایسه با نتایج آزمایشگاهی، رودخانه حله در استان بوشهر به عنوان مطالعه موردی، مورد نظر قرار گرفت. بازه بررسی شده ۲/۵ کیلومتر بالادست و ۲/۵ کیلومتر پایین دست روستای بنار آزادگان از شهرستان آبپخش است. دلیل انتخاب این بازه را می‌توان وجود مشخصه‌های از جمله منطقه مسکونی و نخلستان‌های مجاور رودخانه، ۲ قوس متوالی، بازه مستقیم در مرزهای بالادست و پایین دست و مماندری بودن (دو بعدی بودن جریان) بیان کرد. طول قسمت مستقیم بالادست تقریباً ۲ کیلومتر و پایین دست تقریباً ۱/۷ کیلومتر است. این مشخصات دلایل اصلی انتخاب این بازه بوده‌اند اگر چه وجود اطلاعات مورفولوژیکی در این انتخاب بی‌تاثیر نبوده است. پل موجود در این بازه راه ارتباطی شهرستان است. (شکل ۴).

برای آنالیز انتقال چاله برداشت شن و ماسه در رودخانه‌ی حله ابتدا نیاز به اطلاعاتی از جمله توپوگرافی منطقه مورد بررسی، هیدروگراف سیلاب، اطلاعات جنس بستر رودخانه در محل آنالیز و اطلاعات در باره‌ی چاله‌های برداشت شن و ماسه و پل موجود، است.

جدول ۲. مشخصات رسوب

C_u	σ_g	γ_d	G_s	D_{50}
1.7	1.3	1.553 GR/ CM^3	2.635	0.7 MM

Table. 2. Sediment properties

در جدول فوق D_{50} : قطر متوسط ذرات، G_s : چگالی دانه‌های جامد، γ_d : وزن مخصوص خشک، σ_g : انحراف معیار هندسی، C_u : ضریب یکنواختی ذرات رسوبی است. با توجه به مقادیر ضریب یکنواختی و انحراف معیار هندسی، یکنواختی اندازه ذرات رسوبی مشخص است. برای انجام آزمایش دو صفحه‌ی فلزی مدرج به طول ۷۰ سانتی‌متر (برابر با عرض فلوم) به صورت قائم در رسوب قرار گرفته و چاله مورد نظر با طول و عمق مشخص تخلیه شده است. پس از دست‌یابی به مشخصات جریان مورد نظر، دو صفحه مدرج برداشته شده و آزمایش از این لحظه شروع شده است. شکل (۲) نشان‌دهنده پروفیل طولی چاله ایجاد شد در بستر ماسه‌ای و در آزمایشگاه است. شکل (۲ الف) نشان‌دهنده چاله‌های با طول ۱۷/۵ سانتی‌متر (مثلثی شکل) و شکل (۲ ب) نشان‌دهنده چاله‌های با طول بیش از ۱۷/۵ سانتی‌متر (ذوزنقه‌ای شکل) بلافاصله بعد از شروع آزمایش (برداشتن صفحات مدرج) است. به طور کلی بیشینه عمق آبستگي (H)، نقاط ابتدا (A) و انتهای چاله آبستگي (C)، نقطه میانی در دامنه پایین دست چاله آبستگي (B) و مساحت چاله آبستگي از دید پروفیل طولی (S)، پارامترهای مورد توجه به منظور درستی‌آزمایی مدل عددی بوده است. مقایسه بین اطلاعات برداشت شده در دو حالت شبیه‌سازی و آزمایشگاهی در نقاط ذکر شده و زمان‌های مشخص (۱۰، ۲۰، ۳۰، ۶۰، ۹۰، ۱۲۰، ۱۸۰ و ۳۰۰ دقیقه بعد از شروع آزمایش) در قسمت نتایج ارائه شده است.

در حالت ناماندگار شبیه سازی شده است. شرایط مرزی مدل در این حالت شامل هیدروگراف جریان با دوره بازگشت ۲۵ سال در بالادست، عمق نرمال در پایین بازه منتهی به تالاب حله و تغییرات تراز آب در اثر جذر و مد در انتهای بازه منتهی به خلیج فارس است. شرایط مرزیمدل دو بعدی در ابتدا و انتهای بازه موردنظر شامل هیدروگرافهای جریان بوده و از مدل یک بعدی به دست آمده و به مدل دوبعدی معرفی شده است. همچنین شرایط اولیه نیز از مدل یک بعدی به دو بعدی معرفی شده‌اند. لازم به ذکر است که کل بازه زمانی سیلاب ۱۶ روز بوده و تمامی آنالیزها در مدت زمان ۱۶ روز انجام شده‌اند. شکل (۳) بازه‌های مختلف رودخانه حله و همچنین بازه شبیه‌سازی به وسیله مدل یک بعدی و دوبعدی نشان داده شده است. در این محدوده ۲۲۲ مقطع عرضی برای برپایی مدل یک بعدی و بیش از ۴۰۰۰۰ نقطه ارتفاعی موجود بوده است.

توپوگرافی منطقه بررسی شده با تبدیل عکس برداری هوایی به نقاط دارای رقوم ارتفاعی به دست آمده است. همچنین مقاطع عرضی به وسیله نقشه برداری توسط شرکت سهامی آب منطقه‌ای بوشهر تهیه شده است. با نمونه‌گیری از رودخانه در نقاط مختلف مقادیر ضرایب مانینگ با توجه به منحنی دانه‌بندی محاسبه شده و به صورت فایل مورد نیاز مدل (شبکه بندی شده) تهیه شده است. شکل (۴)، نقاط برداشت نمونه‌های رسوب را نشان می‌دهد. در واقع هر نمونه تشکیل شده از ساحل چپ، ساحل راست و کانال اصلی است که برای تهیه اطلاعات مربوط به زبری لحاظ شده‌اند. لازم به ذکر است که در حاشیه رودخانه حله به منظور جلوگیری از سیلاب و تحمیل خسارت به منازل مسکونی و باغات و غیره، دایک‌هایی توسط شرکت سهامی آب منطقه‌ای استان بوشهر طراحی شده‌اند. طراحی این دایک‌ها بر اساس سیلاب ۲۵ ساله صورت گرفته است. به منظور شبیه سازی، ابتدا در مدل HEC-RAS کل رودخانه‌ی حله شامل سه بازه نشان داده شده در شکل (۳)

شکل ۳. رودخانه‌ی حله و بازه‌های شبیه‌سازی شده به وسیله مدل یک بعدی و دوبعدی

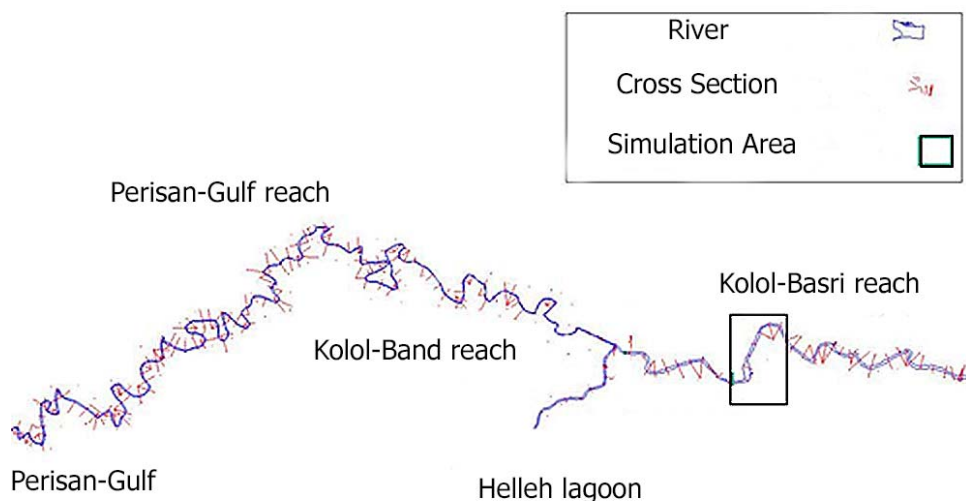


Fig. 3. Helleh river and its main reaches with the area simulated by MIKE21

شکل ۴. محل برداشت نمونه‌های شن و ماسه از رودخانه

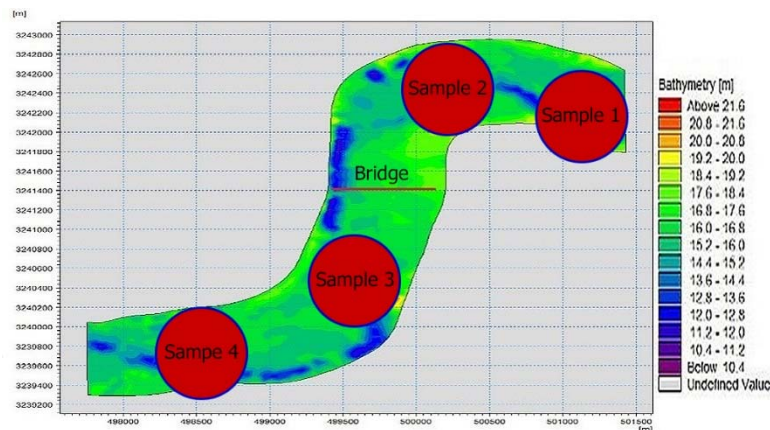


Fig. 4. Locations of sand and gravel sampling

مش‌بندی منطقه توسط ماژول **Mesh Generator** مدل **MIKE21** صورت گرفته است. مش‌بندی به صورت مثلثی شکل بوده که در نقاط برداشت اطلاعات (پایه پل) تراکم‌تر شده است. عواملی مانند پایداری مدل، دقت نتایج و سرعت آنالیز در انتخاب اندازه مش مورد توجه بوده‌اند. در نهایت با آنالیز و بررسی نتایج طی چندین شبیه‌سازی ابعاد مش بین ۸۰۰ مترمربع (در بیشترین مقدار) تا ۲ مترمربع (کمترین مقدار در کنار پایه‌های پل) انتخاب شده است. به طوری که با کوچکتر کردن ابعاد مش تغییری در نتایج حاصل نشده است.

دو سناریو مختلف چاله برداشت شن و ماسه تعریف شد که فواصل مشخص چاله از پایه پل مد نظر بوده است. ابتدا حالت طبیعی رودخانه و بدون چاله برداشت مصالح شبیه سازی شد و در ادامه سناریو ۱ (چاله برداشت با فاصله ۱۰۰۰ متری) و سناریو ۲ (فاصله برداشت از ۱۰۰ متری پل) شبیه‌سازی شدند. در نهایت نتایج مقایسه دو سناریو با فواصل متفاوت با حالت بدون چاله (حالت طبیعی یا اولیه رودخانه) گزارش شد. لازم به ذکر است که زمان شبیه سازی در هر سناریو با رایانه ۷ هسته‌ای و حافظه ۱۶ گیگابایت بین ۱۵ تا ۲۰ ساعت به طول انجامیده است.

خطوط رسم شده در شکل (۵) محل استخراج اطلاعات هیدرولیکی و مورفولوژیکی برای بررسی اثر برداشت

با توجه به نتایج آزمایش‌ها ارزیابی و مشاهدات صورت گرفته در منطقه مساحت چاله‌های طراحی شده در شبیه‌سازی با توجه به مساحت تقریبی یکی از معادن موجود در منطقه در نظر گرفته شد (۴۰×۲۵۰ مترمربع). پس از چاله مثلثی شکل صرف‌نظر شده است. همچنین مساحت چاله به نسبت بزرگ است. پل در نظر گرفته شده برای بررسی دارای ۴۰ پایه دایره‌ای با قطر ۲ متر و فواصل ۴۰ متری بوده است.

به طور معمول مهم‌ترین پارامتری که در مدل‌های هیدرولیکی باید کالیبره شود، ضریب زبری مانینگ است. در این پژوهش اطلاعاتی برای کالیبراسیون در دسترس نبوده است. بنابراین به جای تخمین ضریب مانینگ از جداول موجود در مراجع هیدرولیک مستقیماً از بستر رودخانه در بازه‌ها و نقاط مختلف نمونه برداری شده است (از هر نقطه در شکل ۴ سه نمونه که مجموعاً ۱۲ نمونه برداشت شده است). سپس با استفاده از رابطه استریکلر ضریب زبری

مانینگ محاسبه شده است. [13]

$$(5) \quad n = 0.0474 \times \sqrt{D_{50}}$$

همچنین قبل از ورود به مطالعه موردی، درستی‌آزمایی مدل از طریق مقایسه نتایج شبیه‌سازی عددی با داده‌های آزمایشگاهی انجام گرفته است.

نمودارهای مقایسه را تشکیل داده‌اند (شکل ۶). عمق آب، سرعت جریان و پروفیل کف پارامترهایی هستند که در محور عمودی نمودارها نشان داده شده‌اند.

مصلح در سناریوهای ذکر شده را نشان می‌دهند که در وسط هر چاله رسم شده‌اند. این خطوط دارای طول ۸۰۰ متر و هر خط دارای ۱۰۰ نقطه است که هر نقطه شامل اطلاعات خروجی مدل هستند. این نقاط محور افقی

شکل ۵. عمق‌سنجی محل بررسی شده، حالت اولیه رودخانه و محل سناریوها

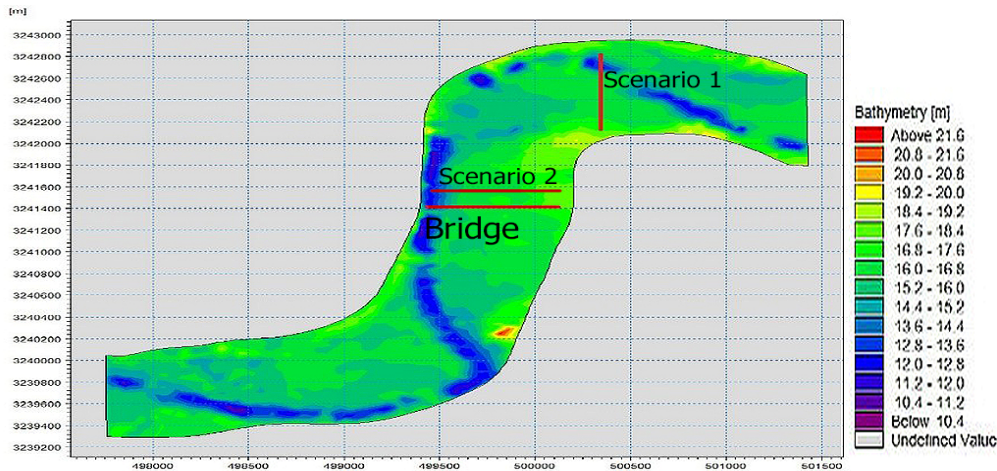


Fig. 5. Bathymetry of the simulated reach, initial conditions and location of the scenarios

نقاط مورد مقایسه و S مساحت چاله برداشت مصالح است. عدد اول در هر ستون نشان دهنده عمق و عدد دوم نشان دهنده طول چاله بر حسب سانتی‌متر است.

مطالعه موردی

شکل‌های (۱۰ و ۱۱) نشان دهنده مقایسه تراز بستر در سناریوهای مختلف تعریف شده است. در این نمودارها تاثیر وجود چاله برداشت شن و ماسه روی پل، مشخص است. اختلاف یک متری ایجاد شده در بستر در سناریوی دوم، در اثر چاله برداشت شن و ماسه است

نتایج

آزمایش‌های ارزیابی مدل

آزمایش‌هایی به منظور درستی آزمایشی مدل عددی در شبیه‌سازی انتقال چاله حفر شده در بستر رسوبی ترتیب یافتند. نیمرخ بستر در زمان‌های ذکر شده برای هر دو حالت شبیه‌سازی و آزمایشگاهی مقایسه شد و بیشینه خطا در محاسبه بعد طولی در جدول (۳) گزارش شد. لازم به ذکر است که تفاوت عمقی نقاط A، B و C در طول آزمایش در مقدار بیشینه برابر ۱۰ میلی‌متر بوده و تغییرات عمده در راستای طول صورت گرفته است؛ بنابراین مبنای مقایسه این سه نقطه بعد طولی در پروفیل طولی چاله بوده است. در این جدول A، H، C، B

جدول ۳. مقایسه نتایج مدل عددی و داده‌های آزمایشگاهی (خطا-درصد)

Test No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Pit Dimensions Comparison points	14*17.5	14*35	7*17.5	7*35	20*17.5	20*35	7*70	14*70	20*70
A	12.37	11.29	11.45	8.16	6.95	5.66	10.82	9.33	5.66
H	5.23	3.89	43.88	15.62	11.23	0.62	2.82	0.8	1.03
B	0.00	2.08	7.62	0.82	0.44	0.42	1.49	0.36	2.91
C	16.00	21.82	23.18	12.4	6.69	5.88	18.37	17.17	14.24
S	6.76	10.6	17.9	19.14	5.49	7.49	11.04	6.97	4.08

Table 3. Comparison of numerical results and experimental data (Error-%)

شکل ۶. مقایسه عمق آب سناریو ۱ (فاصله ۱۰۰۰ متری) با وضعیت طبیعی رودخانه

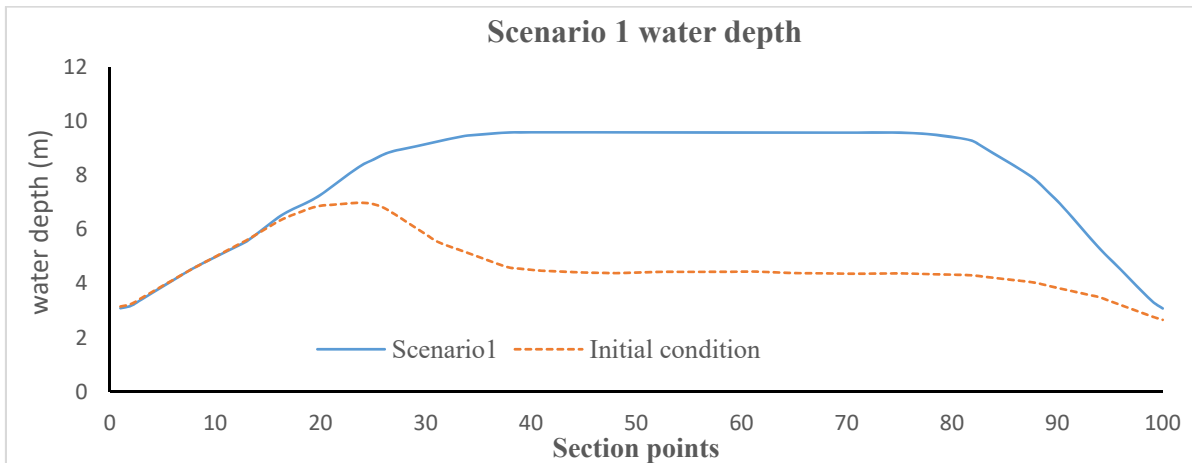


Fig. 6. Comparison of flow depth in the 1st scenario (1000m distance) with river initial conditions

شکل ۷. مقایسه سرعت جریان سناریو ۱ (فاصله ۱۰۰۰ متری) با وضعیت طبیعی رودخانه

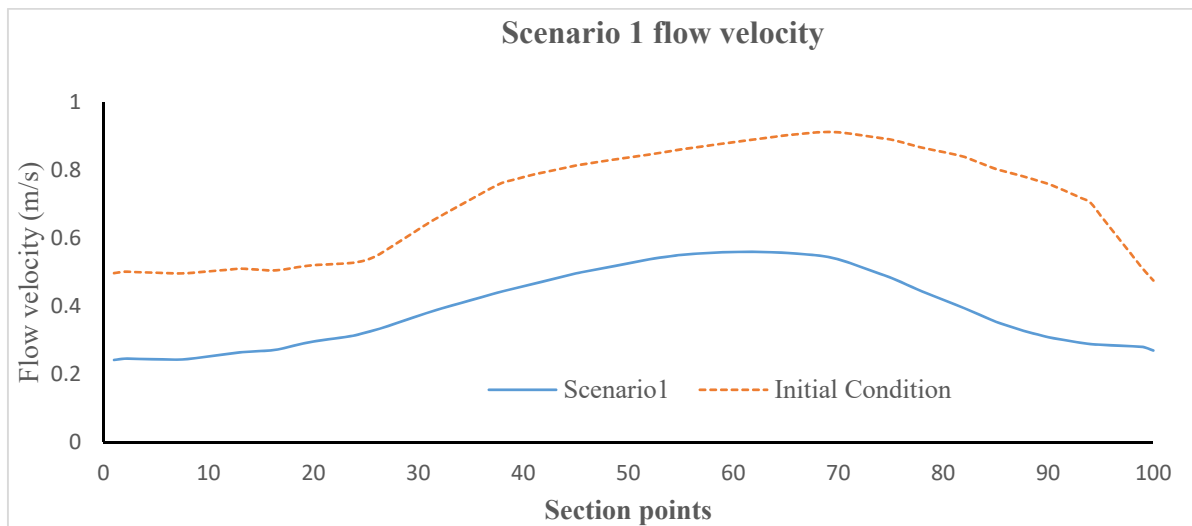


Fig. 7. Comparison of flow velocity in the 1st scenario (1000m distance) with river initial conditions

شکل ۸. مقایسه عمق آب سناریو ۲ (فاصله ۱۰۰ متری) با وضعیت طبیعی رودخانه

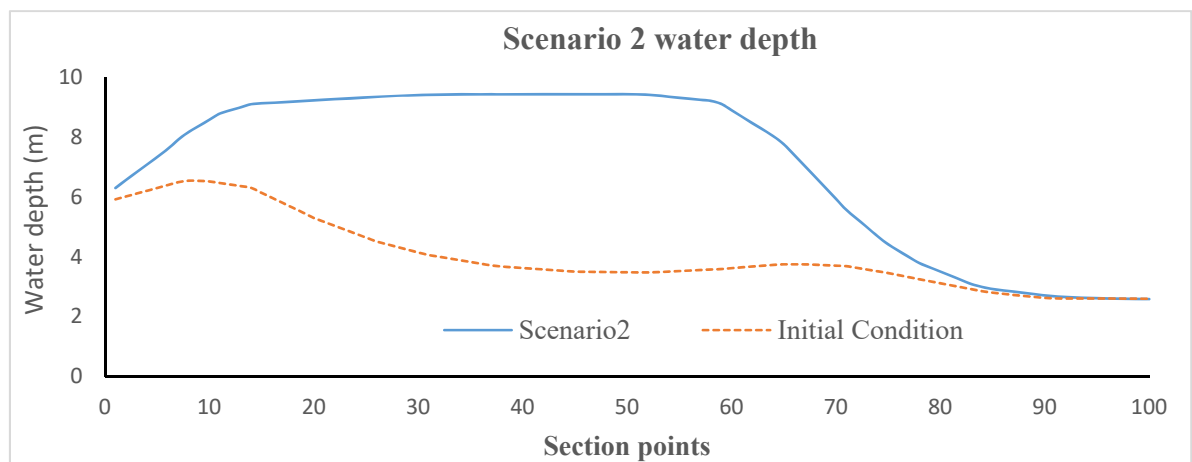


Fig. 8. Comparison of water depth in the 2nd scenario (100m distance) with river initial conditions

شکل ۹. مقایسه سرعت جریان سناریو ۲ (فاصله ۱۰۰ متری) با وضعیت طبیعی رودخانه

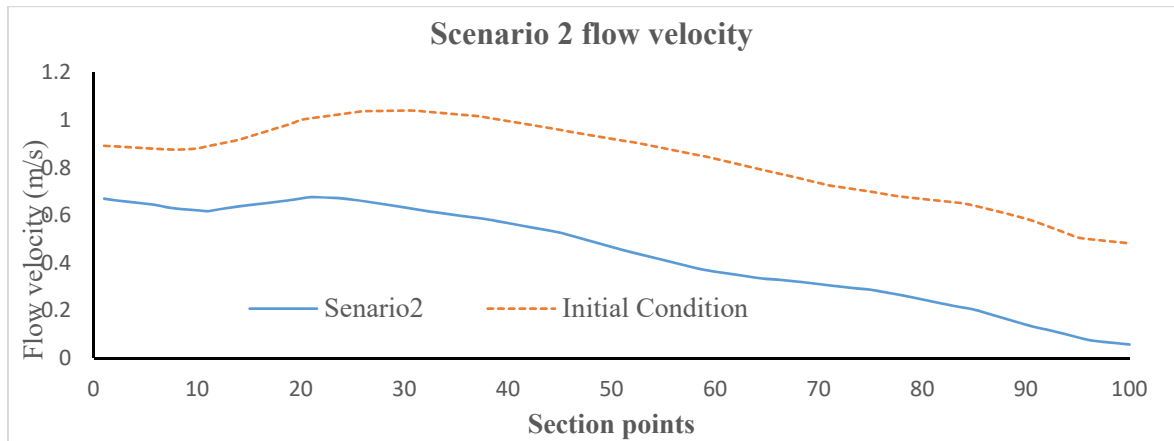


Fig. 9. Comparison of flow velocity in the 2nd scenario (100m distance) with river initial conditions

شکل ۱۰. تغییرات پروفیل کف در سناریو ۱ (فاصله ۱۰۰۰ متری) در مقطع پل

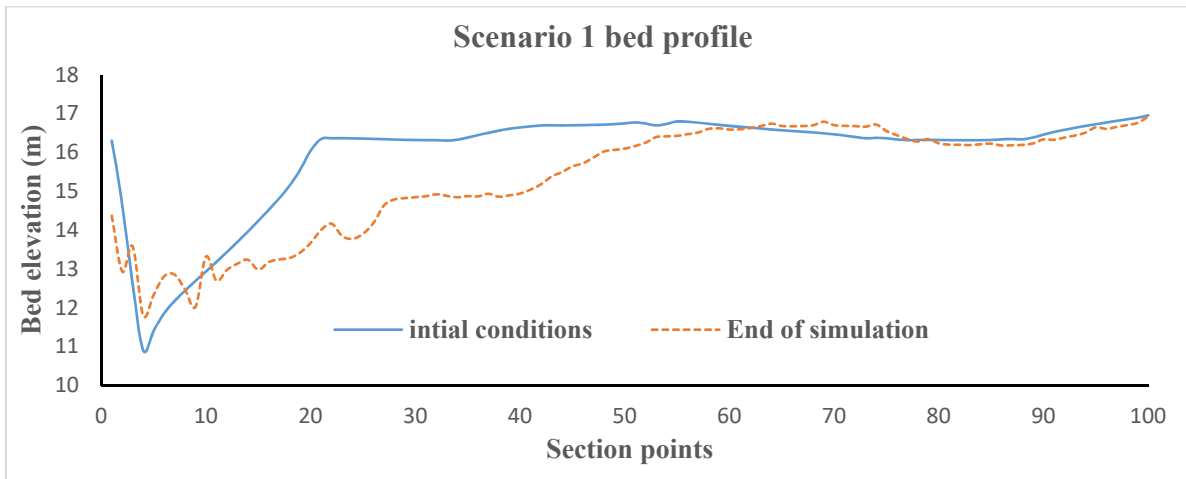


Fig. 10. Bed profile changes in the 1st scenario at bridge location

شکل ۱۱. تغییرات پروفیل کف در سناریو ۲ (فاصله ۱۰۰ متری) در مقطع پل

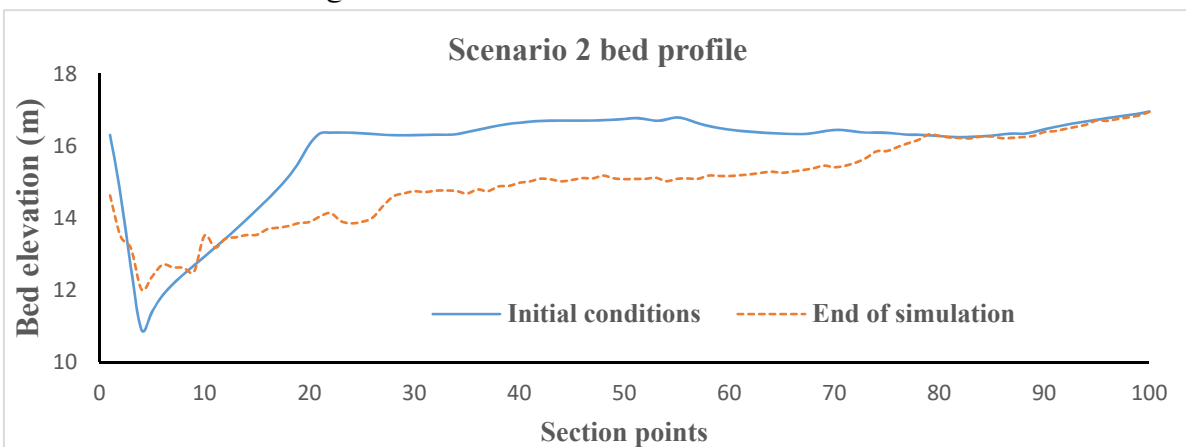


Fig. 11. Bed profile changes in the 2nd scenario 2 at bridge location

بحث

آزمایش‌های ارزیابی مدل

جدول (۳) نتایج مقایسه بین اطلاعات آزمایشگاهی و خروجی‌های مدل در نقاط کلیدی و همچنین مساحت چاله برداشت مصالح را به صورت بیشینه درصد خطا نمایش می‌دهد. مقایسه نتایج در چاله‌های مثلثی بیان‌گر این است که در اعماق کم چاله خطای مدل در پیش بینی حرکت چاله بیشتر است، به طوری که بیشینه خطا را می‌توان در کمترین عمق یعنی ۷ سانتی‌متر مشاهده کرد. دلیل این موضوع را می‌توان به دانه‌بندی رسوب نسبت داد. همان‌گونه که اشاره شد، مقدار $C_u = 1.3$ است و این به معنی بالاترین حد یکنواختی است. در این حالت، رسوبات ریزتر فرسایش یافته و رسوبات درشت‌تر در جای خود باقی می‌مانند و باعث کاهش نرخ فرسایش می‌شوند. این در حالی است که در مدل عددی فقط یک مقدار ثابت از D_{50} را می‌توان تعریف نمود. بنابراین در مدل عددی یکنواختی کامل رسوبات اعمال شده است. با توجه به یکسانی جنس رسوبات در همه آزمایش‌ها این میزان تغییرات در چاله‌های با ابعاد کوچکتر بیشتر به چشم می‌آید.

مقایسه بین نتایج شبیه‌سازی و اطلاعات آزمایشگاهی در چاله‌های دوزنقه‌ای شکل بیان‌گر این است که در این چاله‌ها هرچقدر حجم و عمق چاله‌ها افزایش یافته، دقت شبیه‌سازی نیز افزایش چشم‌گیری داشته است. بیشینه خطا در این نوع چاله‌ها در نقاط A و C رخ داده است شکل (۲) و جدول (۳). این نقاط در واقع نقاط ابتدایی و انتهایی چاله‌ها هستند. لازم به ذکر است که مبنای مقایسه در این نقاط فاصله طولی بین حالت آزمایشگاهی و شبیه‌سازی بوده است. این بدین معناست که نقاط A و C در مکان‌هایی تعریف شده‌اند که خط پروفیل به سطح مبنا یعنی سطح رسوب رسیده است. باید در نظر داشت که حرکت چاله‌ها به سمت جلو بوده و مقدار حرکت عمودی نقاط A و C حداکثر ۱۰ میلی‌متر بوده که در

مقابل حرکت طولی آن‌ها مقداری ناچیز است پس مبنای مقایسه فاصله‌ی طولی قرار گرفته است.

پژوهش‌های مشابه نشان می‌دهد که تاثیر تعمیق محل برداشت روی تغییرات بستر بیشتر از تعریض چاله است، چراکه جریان‌های ثانویه شکل گرفته در چاله‌های عمیق گرفتار شده و درون‌گودال باقی می‌مانند. این جریان‌های ثانویه در مستهلک کردن قدرت جریان نقش بسزایی دارند. ولی در گوال‌های کم عمق جریان‌های ثانویه در طول گودال حرکت می‌کنند و تاثیری روی جریان پر قدرتی که مستعد کف کنی است نخواهند داشت [9]. همچنین هرچه عمق و طول اولیه چاله‌ها بیشتر باشد بیشینه عمق آبستگي بیشتر است. گرچه با گذشت زمان بیشینه عمق آبستگي کاهش می‌یابد [14]. نتایج پژوهش حاضر نیز بیان‌گر این مطالب است. هر چقدر عمق چاله‌های ایجاد شده بیشتر باشد، عمق آبستگي نهایی نیز بیشتر است. گرچه با گذشت زمان ارتفاع کف چاله روند کاهشی داشته است. این روند در پژوهش حاضر در تمامی چاله‌ها مشاهده گردیده است. مطالعه موردی در رودخانه‌ی حله با رسیدن جریان به چاله‌ها عمق افزایش یافته و در نتیجه بیشترین مقادیر تغییر تراز بستر در سناریو ۲ گزارش شد که برابر با ۱/۲۷- متر (علامت منفی نشان دهنده‌ی فرسایش است) بوده است. این مقدار در تفاوت با سناریو ۱ که مقدار ۰/۰۶- متر را داشته است، نشان دهنده حرکت چاله و اثر گذاری آن روی پایه پل بوده است.

در این پژوهش طبق شکل (۱۲) می‌توان مشاهده کرد که جریان به سمت حوضچه برداشت منحرف شده و آثار اولیه پیچشی شدن رودخانه را می‌توان در شکل (۱۲) مشاهده کرد. با توجه به مطالعات استو و چانگ آثار برداشت شن و ماسه در عرض رودخانه بیشتر از عمق آن است و در دراز مدت باعث پیچشی شدن رودخانه خواهد شد. مربع رسم شده در شکل (۱۲) محدوده برداشت شن و ماسه در سناریو ۲ را نمایش می‌دهد [4].

سانتی متر طول در ۷ سانتی متر عمق در ۷۰ سانتی متر عرض (کوچکترین چاله) در آزمایش ۳ گزارش شده که مربوط به مقایسه عمق این آزمایش با شبیه سازی بوده که برابر $43/88\%$ گزارش شده است. بهترین شبیه سازی مربوط به بزرگترین چاله با ابعاد ۷۰ سانتی متر طول در ۲۰ سانتی متر عمق در ۷۰ سانتی متر عرض در آزمایش ۹ بوده که در مقادیر خطای عمق $1/03$ گزارش شده که در مقایسه با آزمایش ۳ بسیار کاهش یافته است. همچنین خطا در نقطه میانی و مساحت چاله از دید پروفیل طولی در آزمایش ۳ به ترتیب $7/62$ و $17/9$ و در آزمایش ۹ به ترتیب $2/91$ و $4/08$ گزارش شده که نشان دهنده بهبود عملکرد مدل عددی در چاله با ابعاد بزرگتر است. در نهایت مقایسه بین دو نقطه A و C نیز نشان دهنده خطای به ترتیب $11/45$ و $23/18$ برای آزمایش ۳، $5/66$ و $14/24$ برای آزمایش ۹ بوده است. می توان مشاهده نمود که دقت در شبیه سازی برای چاله با ابعاد بزرگتر در این سری آزمایش ها بیشتر بوده است.

با توجه به نتایج فوق در قسمت مطالعه موردی از شکل مثلی چاله صرف نظر شده و مساحت به نسبت بزرگی در نظر گرفته شده است. نتایج نشان می دهد که چاله برداشت شن و ماسه تاثیر مستقیمی روی عمق آب و سرعت جریان دارد. به صورتی که عمق آب در محل چاله افزایش یافته و سرعت جریان کاهش می یابد. در سناریو ۱ عمق جریان $24/14\%$ افزایش و سرعت $75/36\%$ کاهش و در سناریو ۲ عمق $77/17\%$ افزایش و سرعت $9/32\%$ کاهش داشته است. این کاهش سرعت جریان باعث رسوب گذاری در کف چاله شده و از میزان رسوبات حمل شده توسط جریان می کاهد. این امر باعث می شود که ظرفیت حمل رسوب افزایش یابد. همچنین با کاهش عمق و افزایش سرعت در پایین دست چاله تنش برشی نیز افزایش می یابد و در نتیجه فرسایش وجه پایبند دست چاله و مهاجرت آن در جهت جریان را به دنبال دارد.

نتایج نشان داد که که جریان به سمت حوضچه برداشت منحرف شده و آثار اولیه پیچشی شدن نمایان می شود شکل

همانطور که اشاره شد در مطالعه موردی تنها یک سیلاب با دوره بازگشت ۲۵ ساله و دوره ۱۶ روزه در نظر گرفته شده است. چنانچه شبیه سازی به ازای دوره بازگشت های بیشتر و یا سیلاب هایی با تداوم بیشتر صورت گیرد نتایج برداشت مصالح بر موفولوژی رودخانه و سازه های در مسیر جریان بیشتر خواهد بود.

سرعت جریان کاهش می یابد. در نتیجه این کاهش سرعت رسوبات حمل شده توسط جریان از بالادست درون چاله ترسیب می شوند. این امر باعث افزایش ظرفیت حمل رسوب می شود که خود منجر به فرسایش در پایین دست چاله و انتقال چاله برداشت شن و ماسه به در جهت جریان می شود. از طرفی در انتهای چاله برداشت عمق جریان کم و سرعت زیاد شده و پتانسیل ایجاد فرسایش تقویت می شود.

شکل ۱۲. منحرف شدن جریان به سمت حوضچه برداشت شن و ماسه در سناریو ۳

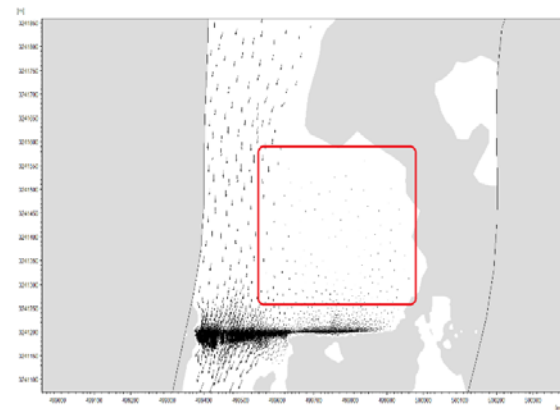


Fig. 12. Flow deviation into the sand mining pit in the 2nd scenario

نتیجه گیری

از آزمایش های ارزیابی می توان نتیجه گرفت که هرچقدر ابعاد چاله افزایش می یابد دقت مدل عددی در تخمین عمق، نقاط میانی، ابتدایی و انتهایی بیشتر می شود. به دلیل وجود مقدار کمی پراکنندگی در اندازه های رسوبات آزمایش ها و ضریب یکنواختی $\sigma_g = 1.3$ ، امکان وقوع آرمورینگ در بستر ایجاد می شود. پس رسوبات ریزتر شسته شده و رسوبات درشت تر باقی می ماند که باعث کاهش نرخ فرسایش می شود. در حالی که در مدل عددی همه رسوبات را به اندازه تعریف شده D_{50} در نظر می گیرد. بیشترین خطا در چاله با ابعاد $17/5$

- [5] Farhadzadeh A. 2000 Investigating Hole Transportation Due to Sand and Gravel Mining in Bed Profile of a Canal. *M.Sc Thesis, Tarbiat Modarres University, Tehran, Iran*. (In Persian)
- [6] Lisle T.E., Iseya F. & Ikeda H. 1993 Response of a channel with alternate bars to a decrease in supply of mixed-size bed load: A flume experiment. *Water Resources Research*, 29(11), 3623-3629.
- [7] Archetti R. & Gaeta M. G. 2018 Design of multipurpose coastal protection measures at the Reno river mouth (Italy). *28th International Ocean and Polar Engineering Conference*.
- [8] Akhoond-Ali A. M. 1997 River response to sand extraction. *phD thesis, Sydney: University of New South Wales*.
- [9] Samadi A., Azizian A. & Mozaffari J. 2018 A Numerical Study of Movement Pattern of Sand and Gravel Mining Using 1D/2D Models. *Journal of Management System* 6(3), 74-89. (In Persian)
- [10] Danish Hydraulic Institute. 2012 MIKE21 and MIKE 3 Flow Model FM: Sand Transport Module, Scientific Documentation, Danish Hydraulic Institute, *Horsholm, Denmark*.
- [11] Raudkivi A.J. 1998 Loose boundary hydraulics. CRC Press.
- [12] Razmkhah H. & Hashemi, M. R. 2007 Problems of Determining River Catchment in Lowlands Areas, Case Study: Helleh River. *6th Iranian Hydraulic Conference*, 15(13), 319-327. (In Persian)
- [13] Abrishami, J. & Hoseini, H. 2011 Open-Channel Hydraulics (in Persian).
- [14] Ghafouri Azar M., Davari M. H. & Amiri Takeldani A. 2011 Effects of Sand and Gravel Removal on River Bed Profile. *6th National Congress on Civil Engineering*.
- (۱۲) که منطبق با یافته‌های سایر پژوهشگران است (چانگ استو و چانگ، ۱۹۸۷).
- بیشترین تغییرات صورت گرفته در پروفیل کف رودخانه مربوط به سناریو ۲ است. بیشینه تغییرات به مقدار ۱/۲۷ متر در کنار دوازدهمین پایه از شرق صورت گرفته است.
- حرکت چاله برداشت شن و ماسه با توجه به شرایط مورفولوژیکی و هیدرودینامیکی رودخانه و همچنین مدت زمان بررسی متفاوت است. ولی در هر صورت مهاجرت چاله برداشت مصالح امری غیر قابل اجتناب است. حرکت چاله در بازه‌های زمانی طولانی‌تر نتایج دیگری خواهد داشت و شبیه سازی آن پیشنهاد می‌شود.

منابع

- [1] Plan and Budget Organization. 2005 Guideline on Sand and Gravel Mining from Rivers. *Tehran, Iran: Publication of Plan and Budget Organization*. No 336. (In Persian)
- [2] Koehnken L., & Rintoul M. 2018 Impacts of sand mining on ecosystem, structure, process and biodiversity in rivers. *World Wild Life Organization, Review*.
- [3] Mohammadkhan S., Normanshiri F. & Yazdanpanah A. 2016 Investigating the Effects of sand and Gravel Removal on River Geomorphology: Case Study, Deh-Bala River. *Journal of Management System* 1, 14-26. (In Persian)
- [4] Stow D.W. & Chang H.H. 1987 Magnitude-frequency relationship of coastal sand delivery by a southern California stream. *Geo-marine letters*, 7(4), 217-222.

Experimental investigation of effective parameters on lateral resistance of single piles

, A.H. Vakili^{3*}, M. Memar¹, S.M.A. Zomorodian²

- PhD student, Department of Civil Engineering, Estahban Branch, Islamic Azad University, Estahban,¹
Iran

Shiraz, Iran - Associate Professor, Water Engineering Department, Shiraz University,²

- Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Zand Institute of³
Higher Education, Shiraz, Iran

mzomorod@shirazu.ac.ir*

Abstract

Assessment of bearing capacity of single pile under lateral loading has been always an attractive matter for engineers. Piles are usually subjected to moment, vertical, and horizontal loads. The Lateral loads are including wind, earthquakes, ship decking, earth pressure, wave, and ice thrust. The behavior of laterally loaded single pile is complicated and still is a useful research area. There are a lot of parameters which affect on pile behavior under lateral loading. One of these important factors is cross section shape of pile. When a pile is subjected to lateral loading, the passive force performed in front of the pile, has an important role on lateral resistance of pile which is exactly related to cross section shape of pile. Physical modeling is a reliable approach in geotechnical engineering to take into account all of these factors simultaneously. In this experimental study the effect of cross sections shapes of pile on single pile behavior under lateral loading in sandy soil were assessed. Four different cross sections shapes of pile which are commonly used in real projects were employed. These pile shapes were including: H pile, and closed-end square, pipe, and fin piles. In concept of optimum design the surface areas of all different cross sections shapes of piles were considered to be the same but with comparative moment inertias. In this condition the amount of material used for pile construction was the same for all different pile shapes used in this study and thus it was possible to comparison the results and find the best pile shape in any conditions. The lateral resistances of these single piles were investigated in different conditions such as different soil relative densities including 35, 65, and 85 % corresponds to loose, medium dense, and dense sand and different embedment pile lengths including 250, 500, and 980 mm corresponds to short rigid, intermediate, and long flexible piles. Results revealed that the ratios of lateral bearing capacity of short rigid H pile, square pile and fin pile to that of pipe pile in loose sand were 0.82, 1.21, and 1.43 respectively. The lateral resistances of single short rigid piles in medium dense sand were about 150 to 155% (152 % in average) higher than loose sand and they were in dense sand about 335 to 356 % (348 % in average) greater than loose sand for different pile shapes. When the soil relative density changed from loose state to medium state the lateral resistance of single piles were about 74 % higher in comparison to the case which soil relative density changed from medium state to dense state. The increase in lateral resistance of H pile in dense sand in comparison to loose sand was higher than fin pile, pipe pile and square pile by about 2, 10, and 22 % respectively. The lateral bearing capacity of long flexible piles and intermediate piles with different pile shapes in dense sand was respectively by about 290 % and 179 % greater than short rigid piles. The efficiency of fins in long flexible fin pile on improvement of lateral bearing capacity was lower in comparison to short rigid fin pile.

Key words: Pile Shape, Lateral Resistance, Sand, Relative Density