J. of Marine Eng. Vol. 22, Iss. 49, 2026. (70-86)

Journal of Marine Engineering

Journal homepage: marine-eng.ir

Two-Dimensional Depth-Averaged Numerical Modeling of Sediment Transport and Evaluation of the Effects of Groynes Downstream of the Aras Dam Using the CCHE2D Model

Farshid Khosh-Akhlagh[1], Bahador Fatehi-Nobarian[2], Majid Farrin[3*]

[1] *M.Sc. Graduate in Civil Engineering-Geotechnic, Ara.C., Islamic Azad University, Jolfa, Iran. fariapple68@gmail.com*
[2] *Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Water Engineering and Hydraulic Structures, Ara.C., Islamic Azad University, Jolfa, Iran. bfatehinobarian@iau.ac.ir*
[3] *Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Geotechnical Engineering, Ara.C., Islamic Azad University, Jolfa, Iran. majid.farrin@iau.ac.ir*

ARTICLE INFO

Article History
Received: 10 May 2026
Last modification: 1 Sep 2026
Accepted: 2 Sep 2026
Available online: 2 Sep 2026

Article type:
Research paper

Keywords:
Aras Dam
Sediment Transport
CCHE2D Model
Two-Dimensional Depth-Averaged Model
Groynes
River Morphodynamics

ABSTRACT

Sedimentation downstream of dams is one of the major factors influencing river morphological changes and reducing the effective capacity of reservoirs. In this study, the hydrodynamic behavior of flow and sediment transport patterns downstream of the Aras Dam were investigated using the two-dimensional depth-averaged numerical model CCHE2D. The model incorporates hydrodynamic, sediment transport, and bed morphological change modules and was calibrated using hydrological data, bed topography, and sediment characteristics of the study area. To evaluate model sensitivity, the effects of several parameters, including Manning's roughness coefficient, turbulence model, sediment particle size, boundary conditions, and sediment transport capacity formulations, were investigated. Overall, the results indicated that areas characterized by high flow velocities and bed shear stresses are more susceptible to local erosion, whereas zones with recirculating currents and low velocities experience greater sediment deposition. Increasing the flow discharge also increased the sediment transport rate and altered the spatial distribution of bed shear stress within the channel. The sensitivity analysis showed that the model is highly sensitive to boundary conditions, Manning's roughness coefficient, and sediment transport capacity formulations, whereas the choice of turbulence model has a relatively limited influence on the sediment transport results. The simulations further demonstrated that the implementation of groynes can reduce sediment transport toward critical areas by approximately 30%. The findings demonstrate the suitability of two-dimensional depth-averaged models for analyzing hydrodynamic and morphodynamic processes downstream of dams. The results can also support sediment management strategies and the design of erosion-control structures along the Aras River.

ISSN: 2645-8136

DOI:

Copyright: © 2026 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license [https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/]

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-13]

نشریه مهندسی دریا، جلد ۲۲، شماره ۴۹، ۱۴۰۵، (۸۶-۷۰)

نشریه مهندسی دریا

صفحه اصلی نشریه: marine-eng.ir

مدل‌سازی عددی دوبعدی میانگین‌عمقی انتقال رسوب و ارزیابی اثر آب‌شکن‌ها در پایین‌دست سد ارس با استفاده از مدل CCHE2D

فرشید خوش اخلاق [۱]، بهادر فاتحی نوبریان [۲]، مجید فرّین [۳*]

[۱] دانش آموخته‌ی کارشناسی ارشد مهندسی عمران، واحد ارس، دانشگاه آزاد اسلامی، جلفا، ایران.، fariapple68@gmail.com

[۲] استادیار گروه مهندسی عمران، مهندسی آب و سازه‌های هیدرولیکی، واحد ارس، دانشگاه آزاد اسلامی، جلفا، ایران.، bfatehinobarian@iau.ac.ir

[۳] استادیار گروه مهندسی عمران، مهندسی ژئوتکنیک، واحد ارس، دانشگاه آزاد اسلامی، جلفا، ایران.، majid.farrin@iau.ac.ir

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۵/۰۲/۲۰

تاریخ اصلاح مقاله: ۱۴۰۵/۰۶/۱۰

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۵/۰۶/۱۰

تاریخ انتشار مقاله: ۱۴۰۵/۰۶/۱۱

نوع مقاله:

کلمات کلیدی:

سد ارس

انتقال رسوب

مدل CCHE2D

مدل دوبعدی میانگین‌عمقی

آب‌شکن

مورفودینامیک رودخانه

چکیده

رسوب‌گذاری در پایین‌دست سدها یکی از مهم‌ترین عوامل مؤثر بر تغییرات مورفولوژیکی رودخانه و کاهش ظرفیت مفید مخازن محسوب می‌شود. در این پژوهش، رفتار هیدرودینامیکی جریان و الگوی انتقال رسوب در پایین‌دست سد ارس با استفاده از مدل عددی دوبعدی میانگین‌عمقی CCHE2D مورد بررسی قرار گرفت. مدل شامل زیرمدل‌های هیدرودینامیک، انتقال رسوب و تغییرات مورفولوژیکی بستر بوده و با استفاده از داده‌های هیدرولوژیکی، توپوگرافی بستر و مشخصات رسوب منطقه کالیبره شده است، به‌منظور ارزیابی حساسیت سنجی مدل، اثر پارامترهایی نظیر ضریب زبری مانینگ، مدل آشفتگی، اندازه ذرات رسوب، شرایط مرزی و نوع رابطه ظرفیت انتقال رسوب بررسی گردید. بطورکلی نتایج نشان داد که نواحی دارای سرعت و تنش برشی بالا مستعد فرسایش موضعی بوده، در حالی‌که مناطق دارای جریانات گردابی و سرعت پایین، بیشترین میزان رسوب‌گذاری را تجربه می‌کنند. همچنین افزایش دبی جریان موجب افزایش نرخ انتقال رسوب و تغییر الگوی توزیع تنش برشی در کانال شد. تحلیل حساسیت نشان داد که مدل نسبت به شرایط مرزی، ضریب زبری و روابط ظرفیت انتقال رسوب حساسیت بالایی دارد، اما تأثیر مدل آشفتگی بر نتایج انتقال رسوب محدود است. نتایج شبیه‌سازی همچنین نشان داد که استفاده از آب‌شکن‌ها می‌تواند میزان رسوب انتقال‌یافته به نواحی بحرانی را تا حدود ۳۰ درصد کاهش دهد. یافته‌های این پژوهش بیانگر قابلیت مناسب مدل‌های دوبعدی میانگین‌عمقی در تحلیل فرآیندهای هیدرودینامیکی و مورفودینامیکی پایین‌دست سدها بوده و می‌تواند در مدیریت رسوب و طراحی سازه‌های کنترل فرسایش در رودخانه ارس مورد استفاده قرار گیرد.

ISSN: 2645-8136

DOI:

حق نشر: © ۲۰۲۶ توسط نویسندگان. این اثر برای انتشار با دسترسی آزاد، تحت شرایط و ضوابط مجوز (CC BY)ارسال شده است.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-13]

۱ - مقدمه

رسوب‌گذاری در رودخانه‌ها تحت تأثیر تحولات زمین‌ساختی و تغییرات سطح اساس رخ می‌دهد و احداث سد با برهم‌زدن ریتم طبیعی جریان، این فرآیند را تشدید می‌کند. اگرچه تخلیه آب از مخزن سد به‌سهولت انجام می‌شود، اما دفع رسوبات انباشته‌شده به‌سادگی ممکن نیست. وجود رسوبات ریزدانه در مخازن می‌تواند موجب ورود آن‌ها به تونل نیروگاه و ایجاد خسارت در تأسیسات و توربین‌ها شود. از این‌رو، توجه همزمان به ویژگی‌های زمین‌شناسی محل احداث سد و فرآیند رسوب‌زدایی ضروری است و اندازه‌گیری پارامترهای جریان و غلظت رسوب در مخازن اهمیت ویژه‌ای دارد.

درک صحیح از مکانیسم حرکت ذرات رسوب، گامی اساسی برای تعیین بار رسوبی است. پیچیدگی‌های جریان آشفته نزدیک بستر، وجود پیچان‌رودها، تغییرات دبی و فعل و انفعالات پیچیده میان جریان و رسوب در مقیاس‌های کوچک، باعث دشواری زیاد تحلیل این پدیده می‌شود. این فرآیندهای پیچیده، مورفولوژی رودخانه‌ها را تحت تأثیر قرار می‌دهند [۱].

پژوهش‌های متعددی به بررسی رفتار رسوب و هیدرولیک جریان پرداخته‌اند؛ از جمله بررسی تأثیر رسوب ورودی به آبگیر جانبی [۳-۲]، مطالعه تجربی عملکرد آب‌شکن‌ها در الگوی جریان آبگیرها [۴]، و بررسی‌های اخیر درباره تأثیر هندسه تخلیه و شکل ذرات بر فرآیندهای گرفتگی و حرکت رسوب [۶-۵]. همچنین پژوهش‌هایی درباره الگوی جریان و انتقال رسوب در آبگیرهای جانبی، پل‌ها و رودخانه‌های سینوسی انجام شده است [۱۰-۷].

مطالعات انجام‌شده در حوزه مدل‌سازی نیز نشان می‌دهد که مدل‌های دوبعدی میانگین‌عمق توانایی مناسبی برای شبیه‌سازی الگوی جریان، تنش برشی، انتقال رسوب و تغییرات بستر دارند و می‌توانند اطلاعات ارزشمندی برای مدیریت رسوبات ارائه دهند [۱۳-۱۱]. در مطالعات جدیدتر نیز کاربرد مدل‌های عددی برای بازنمایی فرآیندهای پیچیده انتقال رسوب مورد توجه قرار گرفته است. موحدی‌نژاد و همکاران با استفاده از مدل‌سازی عددی دوبعدی، انتقال رسوبات ریزدانه دریایی در کانال بندر بوشهر را بررسی کردند و قابلیت مدل عددی را در شبیه‌سازی جابه‌جایی و پراکنش رسوبات ریزدانه تحت شرایط هیدرودینامیکی نشان دادند [۱۴]. همچنین ایلدرمی با استفاده از مدل عددی فلوئنت، الگوی حرکت ذرات رسوبی رودخانه سد اکباتان را شبیه‌سازی و ارتباط رفتار ذرات رسوب با ویژگی‌های میدان جریان را بررسی کرد [۱۵]. در مطالعه‌ای جدیدتر، Tian و همکاران با توسعه یک مدل سه‌بعدی کوپل‌شده هیدرودینامیک-رسوب مبتنی بر FVCOM، انتشار رسوبات ناشی از برداشت ماسه دریایی در آب‌های Dingzi Bay چین را شبیه‌سازی کردند. این پژوهش علاوه بر بررسی تغییرات هیدرودینامیکی و تحول مورفولوژی بستر، اثر اندازه ذرات، شدت برداشت و روش برداشت را بر دامنه انتشار رسوبات معلق ارزیابی و با تحلیل حساسیت کمی، سهم نسبی پارامترهای مؤثر را تعیین کرد [۱۶].

مرور مطالعات گذشته نشان می‌دهد که بخش قابل‌توجهی از پژوهش‌ها بر تحلیل رفتار جریان و رسوب در مقیاس محلی، به‌ویژه پیرامون سازه‌های هیدرولیکی، آبگیرها و بازه‌های محدود رودخانه‌ای تمرکز داشته‌اند. مطالعات جدیدتر نیز قابلیت مدل‌های عددی دوبعدی و سه‌بعدی را در شبیه‌سازی انتقال رسوب، تغییرات مورفولوژیکی و ارزیابی حساسیت پارامترهای مؤثر نشان داده‌اند [۱۶-۱۴]. بااین‌حال، بررسی یکپارچه هیدرودینامیک، انتقال رسوب و پاسخ مورفولوژیکی در بازه پیچیده پایین‌دست سد ارس، همراه با تحلیل نظام‌مند حساسیت پارامترهای اصلی مدل و ارزیابی کمی عملکرد آرایش‌های مختلف آب‌شکن برای کنترل انتقال رسوب، تاکنون مورد توجه قرار نگرفته است. ازاین‌رو، پژوهش حاضر با استفاده از مدل دوبعدی میانگین‌عمقی CCHE2D این مؤلفه‌ها را در یک چارچوب عددی یکپارچه بررسی می‌کند.

رودخانه ارس یک رودخانه فعال از نظر مورفولوژیکی با الگوهای پیچیده جریان و انتقال رسوب است. سد ارس در ۳۵ کیلومتری شهر پلدشت (استان آذربایجان غربی) در مرز ایران و جمهوری آذربایجان قرار دارد. طی دو دهه گذشته، رسوبات گسترده‌ای در پایین‌دست و ورودی مخزن سد تجمع یافته که موجب بروز مشکلات متعدد و کاهش قابل‌توجه ظرفیت ذخیره مخزن شده است. انباشت رسوبات ریزدانه در امتداد سواحل و داخل دریاچه سد در صورت عدم مدیریت مناسب می‌تواند باعث تشکیل کانال‌های فرعی، تغییر مسیر جریان و ایجاد تغییرات چشمگیر در مورفولوژی رودخانه شود. این تغییرات در نهایت شرایط اقلیمی، جغرافیایی و زیست‌محیطی منطقه را نیز تحت تأثیر قرار خواهند داد.

نوآوری و سهم علمی این پژوهش صرفاً به مطالعه یک محدوده جغرافیایی جدید محدود نمی‌شود، بلکه در توسعه یک چارچوب یکپارچه برای تحلیل هیدرودینامیک، انتقال رسوب و پاسخ مورفولوژیکی در یک سامانه رودخانه‌ای پیچیده در پایین‌دست سد است. برخلاف بسیاری از مطالعات پیشین که بر بررسی موضعی الگوی جریان و رسوب در مجاورت سازه‌های هیدرولیکی، آبگیرها یا بازه‌های ساده رودخانه‌ای تمرکز داشته‌اند، در این پژوهش اثر متقابل هندسه بستر، انشعاب جریان، شرایط هیدرولیکی و فرآیند انتقال رسوب در یک بازه پیچیده پایین‌دست سد به‌صورت همزمان و با استفاده از مدل دوبعدی میانگین‌عمقی CCHE2D بررسی شده است. سهم علمی دوم پژوهش، ارزیابی نظام‌مند میزان حساسیت پاسخ مورفودینامیکی مدل نسبت به مجموعه‌ای از پارامترهای هیدرودینامیکی و رسوبی است. در این چارچوب، اثر مدل‌های مختلف آشفتگی، شرایط لغزش دیواره، ضریب زبری مانینگ، شرایط

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-13]

مرزی سطح آب در خروجی، اندازه شبکه، اندازه ذرات و روابط مختلف ظرفیت انتقال رسوب بر میزان حمل رسوب و الگوی تغییرات بستر بررسی شده است. این تحلیل امکان تفکیک پارامترهای مؤثر از پارامترهای کم‌تأثیر را فراهم کرده و نشان می‌دهد که انتخاب تنظیمات مدل تا چه اندازه می‌تواند بر پیش‌بینی مورفودینامیک پایین‌دست سد اثرگذار باشد. سومین سهم پژوهش، پیوند دادن تحلیل فرآیندهای رسوبی با ارزیابی یک راهکار سازه‌ای برای کنترل انتقال رسوب است. در این مطالعه، سه آرایش مختلف گروینز در همان چارچوب عددی مورد بررسی قرار گرفته و اثر آن‌ها بر میدان جریان، تنش برشی، تغییرات بستر و میزان رسوب منتقل‌شده به خروجی‌های رودخانه به‌صورت کمی ارزیابی شده است. از این منظر، پژوهش حاضر فراتر از توصیف الگوی رسوب‌گذاری، یک چارچوب کاربردی برای ارتباط بین ویژگی‌های هیدرودینامیکی، پاسخ مورفولوژیکی و عملکرد اقدامات کنترلی ارائه می‌کند. بنابراین، نوآوری اصلی پژوهش حاضر در ادغام سه مؤلفه شامل (۱) شبیه‌سازی همزمان جریان و انتقال رسوب در یک هندسه پیچیده پایین‌دست سد، (۲) تحلیل حساسیت نظام‌مند مؤلفه‌های اصلی مدل و روابط انتقال رسوب، و (۳) ارزیابی کمی اثر آرایش‌های مختلف گروینز بر کاهش انتقال رسوب است. این چارچوب می‌تواند علاوه بر افزایش درک فرآیندهای رسوبی در بازه‌های پایین‌دست سد، مبنایی برای انتخاب تنظیمات مناسب مدل و ارزیابی گزینه‌های مدیریتی کنترل رسوب در سامانه‌های مشابه فراهم کند.

۲ - روش بندی تحقیق

حوزه مورد مطالعه این پژوهش، حوضه رودخانه ارس است. موقعیت جغرافیایی محل مورد بررسی برابر با 39°05`26.3N 45°24`07.7E می باشد. داده‌های هیدرولوژیکی مورد استفاده شامل دبی روزانه اندازه‌گیری‌شده در ایستگاه پایین‌دست قبل از سد ارس طی سال‌های۱۹۹۶ تا ۲۰۱۷ و همچنین دبی روزانه اندازه‌گیری‌شده در ایستگاه پایین‌دست بعد از سد در دوره زمانی مشابه است [۱۷]. نقشه بستر آب از منطقه مطالعه‌شده در شکل (۱) ارائه شده است. در این پژوهش، مدل عددی CCHE2D برای شبیه‌سازی دوبعدی و میانگین‌عمقی جریان و انتقال رسوب مورد استفاده قرار گرفت. این مدل قادر به شبیه‌سازی انتقال بار بستر، بار معلق و مجموع آنها است. با توجه به شرایط رسوبی منطقه، حالت انتقال کل بار انتخاب شد تا هر دو جزء بار بستر و بار معلق در محاسبات لحاظ شود.

پارامترهای ورودی مدل شامل داده‌های هندسی بستر، دبی ورودی، اندازه ذرات رسوب، ضرایب زبری و ضرایب کالیبراسیون مدل است. میانگین اندازه ذرات رسوب بر اساس نتایج نمونه‌برداری آزمایشگاهی از بخش پایین‌دست سد برابر $D_{50} = 0.35$ mm به‌دست آمد که نشان‌دهنده رسوبات ریز تا متوسط است. ضریب زبری مانینگ با توجه به ویژگی‌های بستر و داده‌های میدانی، $n = 0.028$ در نظر گرفته شد. برای کالیبراسیون مدل، داده‌های اندازه‌گیری‌شده دبی، عمق جریان و نرخ رسوب در سه بازه زمانی خشک، نرمال و پُرآب به‌عنوان ورودی استفاده گردیده است. ضرایب کالیبراسیون شامل ضریب اختلاط عرضی ($E_t = 0.6$ m²/s) و ضریب انتقال رسوب ($P = 0.3$) بر اساس مقایسه نتایج مدل با داده‌های مشاهداتی تنظیم شدند. داده‌های رسوب ورودی بر مبنای اندازه‌گیری‌های ایستگاه بالادست سد و مدل برآورد Einstein–Brown محاسبه شد.

شکل ۱ - نقشه بستر جریان آب از منطقه مورد مطالعه

شرایط مرزی پایین‌دست به‌صورت جریان آزاد و مرزهای جانبی به‌صورت دیوار صلب تعریف شده و ضریب اختلاط عرضی (E_t) بیانگر میزان انتقال جانبی اندازه‌حرکت، جرم یا غلظت رسوب در اثر آشفتگی جریان است و نقش مهمی در مدل‌های دوبعدی دارد. مقدار E_t در مدل CCHE2D به‌عنوان پارامتر کالیبراسیون تعیین شده و در دقت شبیه‌سازی غلظت و پراکنش عرضی رسوب نقش مستقیم دارد. با توجه به هندسه پیچیده پایین‌دست سد ارس و وجود جریان آشفته با عمق متغیر، مقدار $E_t = 0.6$ m²/s پس از چندین مرحله آزمون و مقایسه با داده‌های میدانی به‌عنوان مقدار بهینه انتخاب شد. بار معلق بخشی از کل بار رسوبی رودخانه است که ذرات آن به‌دلیل نیروی آشفتگی جریان در داخل ستون آب معلق ملنده و به‌صورت پیوسته همراه با جریان انتقال می‌یابند. غلظت رسوب معلق در هر نقطه از جریان تابعی از سرعت جریان، اندازه ذرات و شدت آشفتگی جریان است. در مدل CCHE2D، انتقال بار معلق با استفاده از معادله انتقال–پخش دوبعدی (معادله۱) شبیه‌سازی می‌شود که شامل اثرات جابه‌جایی افقی، پخش عرضی و ته نشینی ثقلی ذرات رسوب است. اصطلاح ω_{ck} بیانگر سرعت ته نشینی مؤثر ذرات رسوب، C_{tk} و $C_{t'k}$ به‌ترتیب

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-13]

نشـــان‌دهنده غلظت رســـوب در لایه نزدیک بســـتر و در لایه آب بالادست می‌باشند.

$$\frac{\delta(hC_{tk})}{\delta t}+\frac{\delta(uhC_{tk})}{\delta x}+\frac{\delta(vC_{tk})}{\delta y}=\frac{\delta}{\delta t}\left(\delta sh\frac{\delta ctk}{\delta x}\right)+\frac{\delta}{\delta \gamma}\left(\delta sh\frac{\delta ctk}{\delta x}\right)+\alpha\omega_{sk}(C_{t`k}-C_{tk}) \quad (۱)$$

تغییرات زمانی بستر نیز بر اساس معادله پیوستگی رسوب (معادله۲) محاسبه می‌شود که ارتباط بین نرخ ته‌نشست و فرسایش را در طول زمان بیان می‌کند.

$$(1-\mathrm{p}`)\frac{\delta zbk}{\delta t}=\alpha\omega ck(C_{tk}-C_{t`k}) \quad (۲)$$

که در آن:

α: نسبت بین غلظت مواد نزدیک به بستر و غلظت متوسط عمق

C_{tk}: غلظت متوسط عمقی بار کل

$C_{t`k}$: غلظت متوسط عمقی در شرایط تعادل

δ: ضخامت بار بستر

ω_{sk}: سرعت رسوب ذرات کلاس اندازه k

h: عمق آب محلی

تنها شـاخه اصـلی ورودی به دریاچه اسـت و به همین دلیل می‌توان آن را بـه‌عنوان تخلیـه خروجی اســـتفـاده کرد. دبی‌هـای ورودی اســـتفاده‌شـــده بین ۳۰ تا ۲۰۰ مترمکعب بر ثانیه متغیر بودند. شبیه‌سازی‌ها تا رسیدن به همگرایی عددی ادامه یافتند.

به‌منظور تعریف مناسب ویژگی‌های رسوب در مدل CCHE2D، علاوه بر اندازه میانه ذرات، مشخصات دانه‌بندی و ویژگی‌های فیزیکی رسوبات نیز در نظر گرفته شد. نتایج تحلیل دانه‌بندی نمونه‌های برداشت‌شده از بستر نشان داد که اندازه میانه ذرات برابر با (D_{50}=0.35mm) است. توزیع اندازه ذرات نشان داد که بخش غالب رسوبات در محدوده ماسه ریز تا ماسه متوسط قرار دارد و حدود ۸ درصد از مواد دارای اندازه کمتر از ۰.۰۶۳ میلیمتر هستند. بر اساس منحنی دانه‌بندی، مقادیر شاخص اندازه ذرات به‌صورت تقریبی برابر با (D_{10}=0.12 mm)، (D_{30}=0.23 mm)، (D_{50}=0.35 mm)، (D_{60}=0.42mm) و (D_{90}=0.85mm) تعیین شد.

۲-۱ فرضیات و مبانی مدل‌سازی

با توجه به هدف پژوهش و مقیاس مکانی محدوده مورد مطالعه، شبیه‌سازی جریان و انتقال رسوب با استفاده از مدل دوبعدی میانگین‌عمقی CCHE2D انجام شد. این انتخاب با توجه به ماهیت سه‌بعدی موضعی جریان، اما غالب بودن فرآیندهای پلان‌فرم و عرضی در مقیاس مورد مطالعه، انجام گرفت. مدل دوبعدی میانگین‌عمقی قادر است توزیع پلان سرعت، تنش برشی بستر، نواحی جدایش و بازچرخش جریان و اثر سازه‌های جانبی بر مسیر جریان را با هزینه محاسباتی به‌مراتب کمتر از مدل‌های سه‌بعدی بازنمایی کند. از سوی دیگر، استفاده از مدل یک‌بعدی برای محدوده مورد مطالعه مناسب نبود، زیرا وجود انشعاب، خمیدگی، جریان‌های ثانویه و گروینزها موجب ایجاد تغییرات قابل‌توجه در راستای عرضی جریان می‌شود. در شبیه‌سازی هیدرودینامیکی، جریان در هر سناریو به‌صورت پایدار در نظر گرفته شد. این فرض به‌منظور بررسی کنترل‌شده اثر شدت جریان بر میدان سرعت، تنش برشی و انتقال رسوب اتخاذ شد و به معنی پایدار بودن کامل جریان رودخانه در شرایط طبیعی نیست. در این چارچوب، دبی‌های مختلف در محدوده ۳۰ تا ۲۰۰ مترمکعب بر ثانیه به‌صورت جداگانه شبیه‌سازی شدند تا اثر افزایش شدت جریان بر پاسخ هیدرومورفودینامیکی مشخص شود. استفاده از دبی ثابت در هر سناریو امکان مقایسه مستقیم شرایط مختلف جریان را فراهم می‌کند و اثر متغیر دبی را از اثر سایر پارامترهای مدل جدا می‌سازد. این فرض دارای محدودیت‌هایی است؛ به‌ویژه، فرآیندهای وابسته به تاریخچه جریان، مانند تغییرات تدریجی بستر در اثر سیلاب‌های متوالی، پالس‌های گذرای فرسایش و رسوب‌گذاری و اثر توالی زمانی رخدادهای هیدرولوژیکی، به‌طور کامل در این چارچوب بازنمایی نمی‌شوند. ازاین‌رو، نتایج این مطالعه باید عمدتاً به‌عنوان ارزیابی پاسخ هیدرومورفودینامیکی سیستم تحت سطوح مختلف دبی تفسیر شوند. برای انتقال رسوب، مدل انتقال کل بار شامل بار بستر و بار معلق انتخاب شد. این انتخاب بر اساس ویژگی رسوبات بستر و هدف پژوهش انجام گرفت، زیرا در محدوده مورد مطالعه هر دو فرآیند انتقال معلق و انتقال در نزدیکی بستر در تغییرات مورفولوژیکی نقش دارند. مقدار D_{50}=0.35mm براساس داده‌های نمونه‌برداری آزمایشگاهی تعیین شد و نشان‌دهنده وجود ذرات ریز تا متوسط در بستر است. بنابراین، محدود کردن شبیه‌سازی به تنها بار معلق یا تنها بار بستر نمی‌توانست تبادل رسوب میان بستر و ستون آب و تغییرات مورفولوژیکی ناشی از آن را به‌طور کامل بازنمایی کند. به‌طور کلی، فرضیات مدل با هدف ایجاد تعادل میان دقت فیزیکی، قابلیت بازنمایی فرآیندهای اصلی و هزینه محاسباتی انتخاب شدند. ازاین‌رو، مدل حاضر برای تحلیل حساسیت الگوهای جریان و انتقال رسوب و بررسی اثر گروینزها مناسب است، اما برای بازسازی دقیق تحول زمانی بستر تحت رخدادهای هیدرولوژیکی ناپایا، استفاده از شبیه‌سازی‌های ناپایا و در صورت نیاز مدل‌های سه‌بعدی می‌تواند در مطالعات آتی مورد توجه قرار گیرد.

منحنی‌های ارزیابی حاصل به صورت معادله (۳) برای ارتفاع سطح آب بالاتر و معادله (۴) برای ارتفاع سـطح آب پایین تنظیم شـدند، که در آنها Y ارتفاع سـطح آب بالاتر از تراز ۱۴۹.۷ متر و Q دبی بر حسب مترمکعب بر ثانیه است.

$$Y=0.0035Q+11.361 \quad (۳)$$

$$Y=0.005Q+10.169 \quad (۴)$$

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-13]

شـــبیه‌ســـازی‌ها با بار رســـوبی ماده یکنواخت انجام شـــدند. تعداد لایه‌های صاف به‌عنوان سادگی به یک تنظیم شد. ضخامت حداقل لایه مخلوط به مقدار پیش‌فرض گذاشـــته شـــد.شـــرایط مرزی برای مدل رسوب شامل تخلیه رسوب معلق و بستر در ورودی‌ها است.
گرویزها در CCHE2D به عنوان دیوارهای نازک در امتداد خطوط شـــبکه انتخاب شـــده تعریف شـــدند. هیچ ویژگی‌ای مانند عرض یا شـــیب‌های جانبی نمی‌تواند تعریف شـــود، زیرا این ســـاختارها ساختارهای یک خط شبکه‌ای هستند.
شـبیه‌سـازی‌ها به‌صـورت جفت‌شـده هیدرودینامیک–انتقال رسـوب انجام شـدند و هر شـبیه‌سـازی برای یک دوره یک‌سـاله اجرا گردید. این دوره به سه بازه مجزا تقسیم شد تا امکان بررسی اثرات تجمعی مورفودینامیکی در مقیاس زمانی میان‌مدت فراهم شـود (جدول ۱). تمامی شبیه‌سازی‌ها تحت شرایط جریان ورودی ثابت انجام شدند و یک پیکربندی پایه (پیکربندی اســـتاندارد) به‌منظور مقایســـه بین دبی‌های مختلف انتخاب شـــد؛ در حالی‌که ســـایر پیکربندی‌ها و تنظیمات پارامتری تنها برای دبی ($Q=100\ m^3/s$) به‌منظور تحلیل حســـاســـیت مورد اســـتفاده قرار گرفتند. انتخاب شـبیه‌سـازی با دبی ثابت بر دو مبنای اصلی روش‌شناختی استوار بود: نخست، جداسازی اثر دبی بر الگوهای فرسایش و رسوب‌گذاری به‌منظور درک مستقیم ارتباط میان شـــدت جریان و پاســـخ مورفولوژیکی؛ و دوم، تســـهیل فرآیند کالیبراسیون مدل با اسـتفاده از داده‌های نقطه‌ای و میانگین، که در شـــرایط جریان ثابت قابلیت تنظیم و انطباق بیشـــتری دارند. به‌منظور لحاظ‌کردن اثرات غیرملندگار و نوســـانات فصـــلی، دامنه دبی‌های انتخاب‌شـــده نمایانگر ســـطوح مختلف توزیع دبی‌های ثبت‌شده بوده و بدین‌ترتیب، تغییرپذیری فصلی تا حدی به‌صورت گســـسته در مدل بازنمایی شده است. برخی پدیده‌های وابسته به تاریخچه جریان، نظیر رســـوب‌گذاری تدریجی در طی ســـیلاب‌های متوالی یا فرسایش ناشی از پالس‌های گذرا، به‌طور کامل شبیه‌سازی نشـوند. ازاین‌رو، نتایج حاضـر باید به‌عنوان گامی مقدماتی در جهت شـناخت حساسـیت الگوهای مورفولوژیکی نسـبت به دامنه تغییرات دبی در نظر گرفته شـوند. تحلیل حسـاسـیت با مقایسـه پاسـخ مدل نســـبت به تغییر هر یک از پارامترهای ورودی، در مقایســـه با پیکربندی استاندارد و به‌صورت مجزا برای هر پارامتر انجام شد.

جدول ۱ - زمان‌بندی و گام زمانی شبیه‌سازی

مدل	زمان شبیه‌سازی [ثانیه]	گام زمانی [ثانیه]	تعداد اجراها	زمان کل اجرا [روز]
هیدرودینامیک	100,000	100	2	2
انتقال رسوب	1,544,500	10	3	365

در مدل هیدرودینامیک، به‌منظور دســـتیابی به پایداری عددی و همگرایی ســـریع، زمان کل اجرا دو روز در نظر گرفته شـــد و هر شبیه‌سازی در دو تکرار متوالی با گام زمانی ۱۰۰ ثانیه انجام گردید. به‌منظور حفظ دقت عددی در حل معادلات انتقال، گام زمانی کوچک‌تر (۱۰ ثانیه) انتخاب گردید و کل فرآیند در ســـه اجرای متوالی انجام شـــد تا پایداری حل و کنترل خطا در طول زمان تضمین شود. انتخاب این بازه‌ها مطابق با توصیه‌های راهنمای فنی مدل CCHE2D و مطالعات مشابه انجام گرفته است [۱۸]. آبشکن ها با تغییر الگوی جریان و الگوی انتقال رسوبات میتوانند شرایط هیدرولیکی را کنترل کرده و از فرسایش سواحل جلوگیری و باعث رسوبگذاری در آن ها شوند [۱۹]. جهت محافظت ساحل در قوس بیرونی روشهای متعددی وجود دارد که استفاده از آبشکن از جمله بهترین و اقتصادی‌ترین روش‌ها در اکثر نقاط دنیا مورد استفاده قرار می‌گیرد. در تحقیقی الگوی جریان و رسوب در یک قوس ۹۰ درجه ملایم، همراه و بدون حضور آبشکن‌ها با تغییر موقعیت قرارگیری و طول آبشـــکن‌ها با آرایش‌های ۱۵٪، ۲۰٪ و ۲۵٪ عرض فلوم با استفاده از مدل عددی CCHE2D بررسی شد و با در نظر گرفتن عملکرد هیدرولیکی آبشـــکن، ترکیب بهینه پارامترهای طول و موقعیت آبشـــکن در قوس مورد بررســـی قرارگرفت، نتایج بیانگر قابلیت بالای مدل عددی در شبیه‌سازی الگوی جریان و رسوب در قوس بود و نتایج حاصـــل از مقایســـه ســـرعت‌ها در مدل و نتایج آزمایشگاهی بیانگر دقتی بیش از ۹۴٪ بوده است.[۲۰]. با استفاده از یک مدل هیدرولیکی دوبعدی، تأثیر اجرای گســـترده اقدامات کنترل رواناب شـــهری (SCMs) را بر بهبود شـــرایط هیدرولیکی جریان و عملکرد اکوسیستم‌های رودخانه‌ای در مقیاس حوضه آبریز بررسـی شـده اسـت، نتایج نشـان داد که اجرای فشـرده‌SCM ها می‌تواند شـرایط هیدرولیکی جریان را به وضـعیت نزدیک به طبیعی بازگردلند، تحرک بســـتر را کاهش دهد، تنوع هیدرولیکی را بهبود بخشد و زیستگاه‌های مناسب‌تری برای اکوسیستم فراهم کند [۲۱]. جدول۲ خلاصـــه‌ای از پیکربندی‌های مختلف شـــبیه‌ســـازی مورد اســـتفاده در این پژوهش را ارائه می‌دهد. همچنین، پیکربندی‌های مربوط بـه حالـت‌های انتقال رســـوب و روابط ظرفیت انتقال در جدول۳ فهرست شده‌اند.

جدول ۲ - زمان‌بندی و گام زمانی شبیه‌سازی

پارامتر	پیکربندی استاندارد	تغییرات پیکربندی
مدل آشفتگی	مدلε-K	مدل ویسکوزیته پارابولیک، مدل طول اختلاط
ضریب لغزش دیواره	0.5	1 ،0
ارتفاع سطح آب خروجی برای $Q=100m^3/s$ (m)	10.8، منحنی رتبه‌بندی در معادله (۱۰)	11.8، منحنی رتبه‌بندی در معادله (۱۱)
ضریب زبری مانینگ	0.025	0.03 ،0.02

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-13]

اندازه شبکه[I*J]	301*81	293*49
اندازه رسوب (mm)	0.036	0.6

جدول۲ پیکربندی‌های مختلف مورد استفاده برای سنجش حساسیت مدل نسبت به پارامترهای اصلی را نشان می‌دهد. در این پیکربندی‌ها، مقدار «پیکربندی استاندارد» به‌عنوان مبنای مقایسه در نظر گرفته شده و در هر ردیف، یکی از پارامترهای مدل شامل مدل آشفتگی، ضریب لغزش دیواره، زبری مانینگ، اندازه شبکه و اندازه ذرات رسوب تغییر داده شده است تا تأثیر آن بر نتایج شبیه‌سازی بررسی شود. پیکربندی استاندارد از مدل $k-\varepsilon$ استفاده می‌کند، در حالی‌که در پیکربندی تغییریافته، مدل ویسکوزیته پارابولیک و مدل طول اختلاط به‌کار گرفته شده‌اند تا عملکرد مدل‌های مختلف آشفتگی در شرایط پایین‌دست سد ارس ارزیابی شود. در پیکربندی استاندارد، مقدار ارتفاع سطح آب خروجی ۱۰.۸ متر و در آزمون حساسیت ۱۱.۸متر در نظر گرفته شده است. این تغییرات به‌منظور بررسی تأثیر شیب هیدرولیکی مرز خروجی بر عمق جریان و در نتیجه بر انتقال رسوب اعمال شده‌اند.

جدول ۳ - حالت‌های انتقال رسوب و روابط ظرفیت

پیکربندی استاندارد-مدل ($k-\varepsilon$)	تغییرات پیکربندی
حالت انتقال	انتقال کل به صورت معلق و بستر
فرمول ظرفیت انتقال	وو و همکاران

گرویتزها در نزدیکی مرز ورودی به مدل اضافه شدند که محل قرارگیری آن‌ها در شکل ۲ مشخص شده است. این شکل به دو بخش تقسیم می‌شود؛ بخش چپ، قسمت شمالی و بخش راست، قسمت جنوبی را نشان می‌دهد. خط میانی، خط I را که نتایج از روی آن استخراج شده‌اند، مشخص می‌کند. همچنین، کادر قرمز خط‌چین ناحیه استقرار گرویتزها را نشان می‌دهد که در آن سه پیکربندی مختلف مورد بررسی قرار گرفت.

پس از شناسایی نواحی دارای تمرکز جریان، تنش برشی و پتانسیل بالاتر فرسایش در پیکربندی استاندارد، اثر استفاده از آبشکن‌ها در این نواحی بررسی شد. هدف از این بخش، تعیین آرایش بهینه آبشکن‌ها از طریق بررسی تمامی ترکیبات ممکن نبود؛ بلکه هدف، ارزیابی حساسیت پاسخ هیدرومورفودینامیکی رودخانه نسبت به تغییر تراکم و هندسه آبشکن‌ها بود. بر این اساس، سه آرایش نماینده با تراکم کم، متوسط و زیاد انتخاب شدند. معیار اصلی تفکیک آرایش‌ها، تعداد آبشکن‌ها و در نتیجه فاصله طولی بین سازه‌های متوالی بود، در حالی که طول آبشکن‌ها نیز به‌گونه‌ای تغییر داده شد که نسبت هندسی آن‌ها با عرض مؤثر کانال در محدوده قابل‌قبول باقی بماند. آرایش اول نماینده تراکم کم، آرایش دوم نماینده تراکم متوسط و آرایش سوم نماینده تراکم زیاد در نظر گرفته شد. در تمامی سناریوها، موقعیت کلی میدان آبشکن‌ها در ناحیه‌ای قرار گرفت که در شبیه‌سازی حالت پایه، تمرکز سرعت و تنش برشی و پتانسیل فرسایش بیشتری داشت.

شکل۲ - خروجی شبکه نهایی و مش‌بندی مدل عددی

شبیه‌سازی‌ها برای زمان شبیه‌سازی یک سال با دبی $Q=100m^3/s$ انجام شد. در این پژوهش، انتخاب شرایط جریان ثابت با هدف کنترل شرایط شبیه‌سازی و امکان مقایسه مستقیم پاسخ مورفودینامیکی در سناریوهای مختلف انجام شد. ازاین‌رو، تغییرات بستر پس از یک سال بیشتر به‌عنوان شاخصی برای ارزیابی روند فرسایش و رسوب‌گذاری و مقایسه عملکرد سناریوهای مختلف در نظر گرفته شده است، نه به‌عنوان بازسازی قطعی وضعیت واقعی بستر پس از یک سال. اگرچه دامنه دبی‌های ۳۰ تا ۲۰۰ مترمکعب بر ثانیه بخشی از تغییرپذیری مشاهده‌شده جریان در منطقه را پوشش می‌دهد، این رویکرد جایگزین استفاده از یک سری زمانی پیوسته و واقعی دبی نیست. در نتیجه، نتایج مربوط به تغییرات مورفولوژیکی بلندمدت باید با احتیاط تفسیر شوند. در مطالعات آینده، استفاده از شبیه‌سازی ناپایا با هیدروگراف واقعی، ورود بار رسوب متغیر در زمان و لحاظ رخدادهای سیلابی متوالی می‌تواند دقت پیش‌بینی تکامل بستر را افزایش دهد.

نسبت فاصله به ۳ تنظیم شد که در جدول۴ آورده شده است.

جدول ۴ - سه پیکربندی گرویتزهای مورد استفاده در شبیه‌سازی‌ها

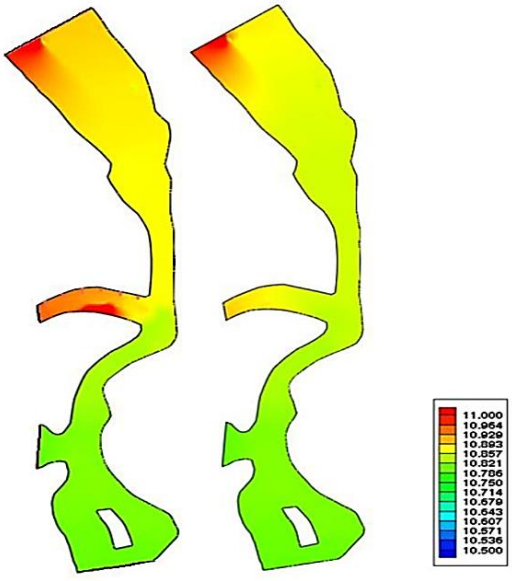
پیکربندی گرویتزها	تعداد / طول (متر)
پیکربندی ۱	۴-۷۰

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-13]

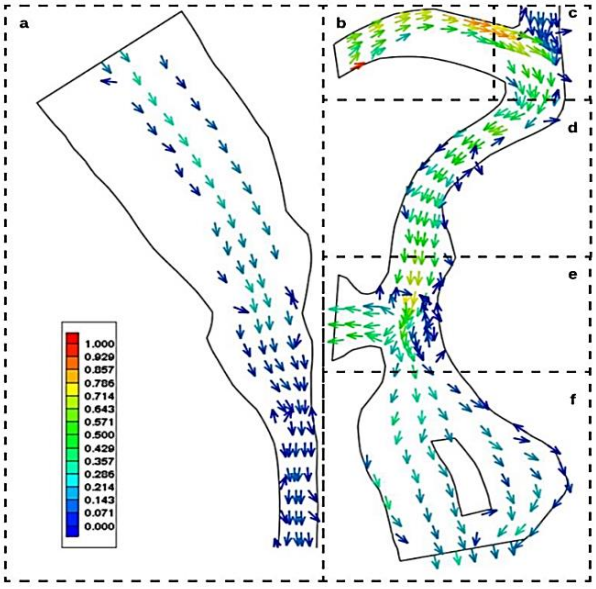
پیکربندی ۲	۶-۴۵
پیکربندی ۳	۹-۳۱

۳-پیکربندی استاندارد و نتایج انتقال رسوب

ارتفاع سطح آب در ورودی‌ها برابر با ۱۰.۹ متر است که نسبت به خروجی‌ها اختلافی در حدود ۰.۱ متر ایجاد کرده و شیب سطح آب را در حدود ۱۰—۵ نشان می‌دهد. شکل ۳-الف ارتفاع سطح آب را برای یکی از پیکربندی‌های گرویِنز (سمت چپ) و پیکربندی استاندارد (سمت راست) در دبی ($Q = 100\ m^3/s$) نشان می‌دهد. تقسیم جریان بین خروجی غربی و جنوبی، برای دبی‌های ورودی ۵۰، ۱۰۰، ۱۵۰ و ۲۰۰ مترمکعب بر ثانیه، به‌طور متوسط برابر با ۳۶٪ برای خروجی غربی و ۶۴٪ برای خروجی جنوبی به‌دست آمد. میدان بردار سرعت جریان برای دبی ($Q=100\ m^3/s$) در شکل ۳-ب ارائه شده است. نتایج شبیه‌سازی، میدان بردار سرعت با مقیاس یکنواخت (m/s) را برای پیکربندی استاندارد و دبی ($Q= 100\ m^3/s$) نشان می‌دهد که با نواحی a تا f مشخص شده‌اند. بر اساس این نتایج، سرعت جریان در ناحیه a پایین است، در حالی‌که در ناحیه b، به‌ویژه در بخش خارجی خم رودخانه، افزایش می‌یابد. همچنین، در ناحیه c و در محل تقاطع دو شاخه رودخانه، گردش جریان مشاهده می‌شود. همان‌گونه که در شکل ۴-الف دیده می‌شود، میدان سرعت در ناحیه e با لایه ویسکوزیته آشفتگی (m^2/s) برای پیکربندی استاندارد و دبی ($Q =100\ m^3/s$) نمایش داده شده است و نواحی گردش جریان و جریان معکوس به‌وضوح قابل مشاهده هستند.



(الف)

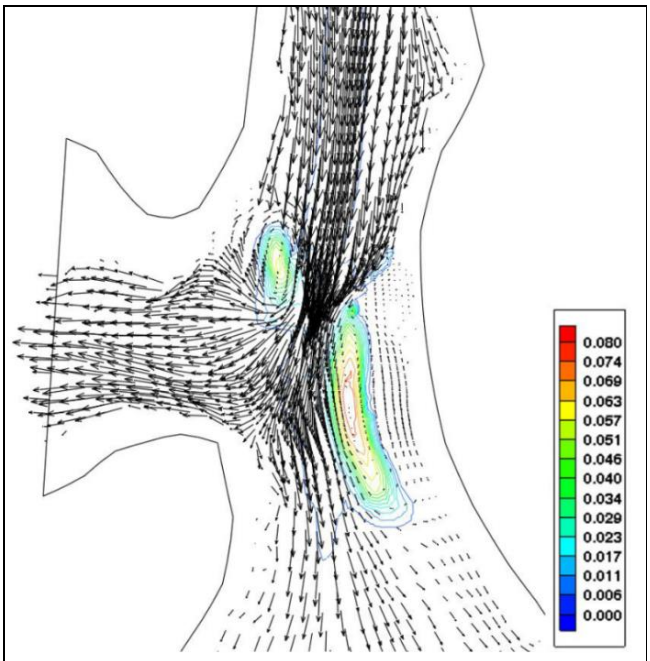


(ب)

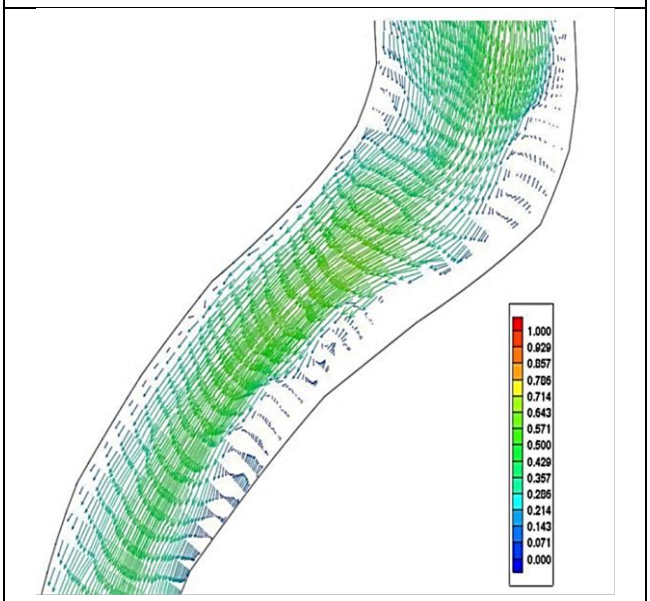
شکل ۳ - (الف): کانتور ارتفاع سطح آب رودخانه، (ب): نتایج شبیه‌سازی برای پیکربندی استاندارد در دبی ($Q=100\ m^3/s$)

همچنین، در ناحیه e گردش جریان مشاهده می‌شود؛ جایی که جریان به دو خروجی تقسیم می‌گردد (شکل ۴-الف). بخش‌هایی با جریان معکوس نیز در ساحل شرقی و در نواحی d و e وجود دارد. همان‌گونه که در شکل ۴-ب مشاهده می‌شود، میدان بردار سرعت [m/s] وجود جریان معکوس را در سمت شرقی کانال و در ناحیه d، برای پیکربندی استلندارد و دبی $Q=100\ m^3/s$، نشان می‌دهد. جریان در سراسر مدل دارای رژیم زیر بحرانی است و مطابق شکل ۴-الف، ویسکوزیته آشفتگی در نواحی دارای گردش جریان مقادیر بالایی را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل ۴-ب مشاهده می‌شود، میدان بردار سرعت بیانگر تشکیل جریان معکوس در بخش شرقی کانال در ناحیه d است که در مجاورت دیواره مقعر مسیر جریان شکل می‌گیرد. این جریان بازگردان ناشی از کاهش تنش برشی در ناحیه داخلی قوس و افزایش ناگهانی گرادیان سرعت در مرز جریان اصلی است. همچنین، شکل ۴-الف نشان می‌دهد که در همین ناحیه، لایه ویسکوزیته آشفتگی افزایش قابل‌توجهی داشته و بیانگر تمرکز گردابه‌های موضعی و انرژی جنبشی بالای آشفتگی در این بخش از کانال است. افزایش ویسکوزیته آشفتگی در این ناحیه موجب گسترش عمقی‌تر تلاطم و جابه‌جایی عرضی جریان شده و در نتیجه، جریان معکوس پایدارتری در پایین‌دست ایجاد می‌شود. این رفتار بیانگر وجود ارتباط مستقیم میان توپوگرافی بستر، تغییرات گرادیان فشار و تولید آشفتگی موضعی است که از ویژگی‌های شاخص رژیم‌های زیر بحرانی در مجاورت دیواره‌های خمیده محسوب می‌شود.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-13]



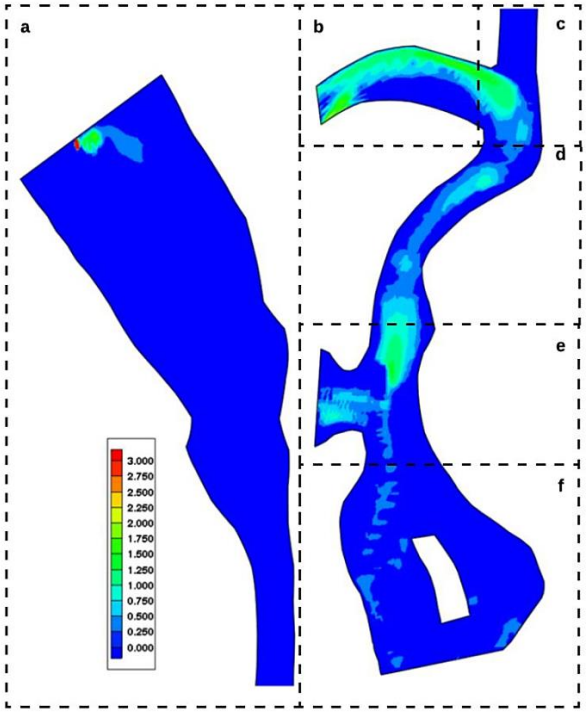
(الف)



(ب)

شکل ۴ - (الف): میدان سرعت در ناحیه e همراه با لایه ویسکوزیته آشفتگی، (ب): میدان بردار سرعت [m/s] همراه با جریان معکوس

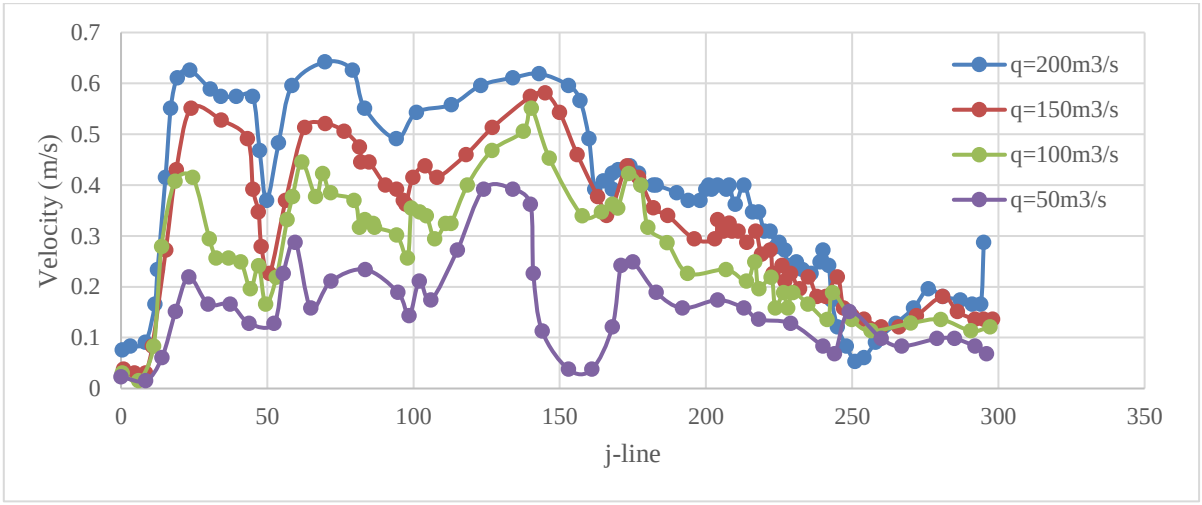
همان‌گونه که در شکل ۵ نشان داده شده است، مقادیر تنش برشی بستر در نواحی b، c و d نسبتاً زیاد بوده و در مقایسه با سایر بخش‌های مدل برجسته‌تر هستند. تنش برشی بستر همبستگی مناسبی با میدان سرعت دارد؛ به‌طوری‌که در نواحی با سرعت جریان بالا، مقادیر تنش برشی نیز افزایش یافته و در نواحی با سرعت کمتر، مقدار آن کاهش می‌یابد. همان‌طور که در نمودارهای شکل‌های ۶ و ۷ نشان داده شده است، نتایج این شکل‌ها از امتداد خط I استخراج شده‌اند. خط I در امتداد بخش مدل‌شده رودخانه، در مرکز کانال و از محل تقاطع رودخانه‌ها تا خروجی جنوبی، در محدوده نواحی c تا f ترسیم شده است.



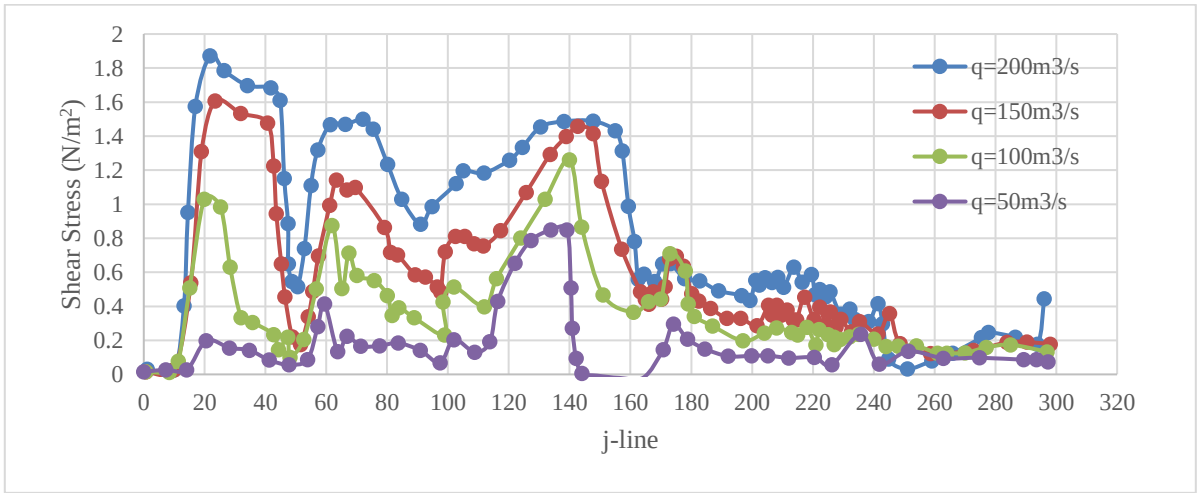
شکل ۵ - توزیع تنش برشی بستر بر حسب(N/m^2) برای پیکربندی استاندارد برای دبی ($Q= 100\ m^3/s$)

بزرگی سرعت و توزیع تنش برشی در سراسر مدل، به‌طور کلی با افزایش دبی جریان افزایش می‌یابد. شکل ۶ روند تغییرات تنش برشی و بزرگی سرعت استخراج‌شده در امتداد خط I را نشان می‌دهد. توزیع بزرگی سرعت، تنش برشی و الگوی جریان، با وجود تفاوت در دبی جریان، به‌طور کلی مشابه بوده و تنها مقادیر آن‌ها تغییر می‌کند. در بیشترین دبی جریان، یعنی$Q= 200\ m^3/s$، گرداب غربی در محل انشعاب از بین می‌رود (شکل ۷).

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-13]

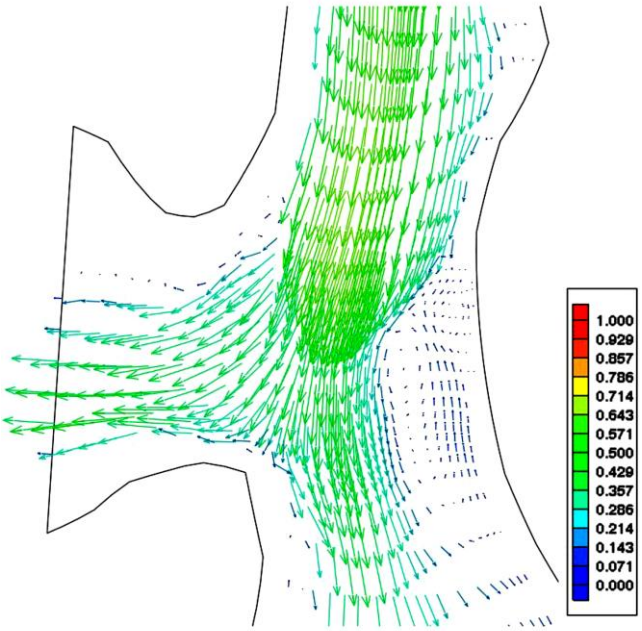


(الف)



(ب)

شکل۶- (الف): تغییرات سرعت، برای دبی‌های مختلف جریان در امتداد خط ثابت، (ب): تغییرات تنش برشی برای دبی‌های مختلف جریان در امتداد خط ثابتI

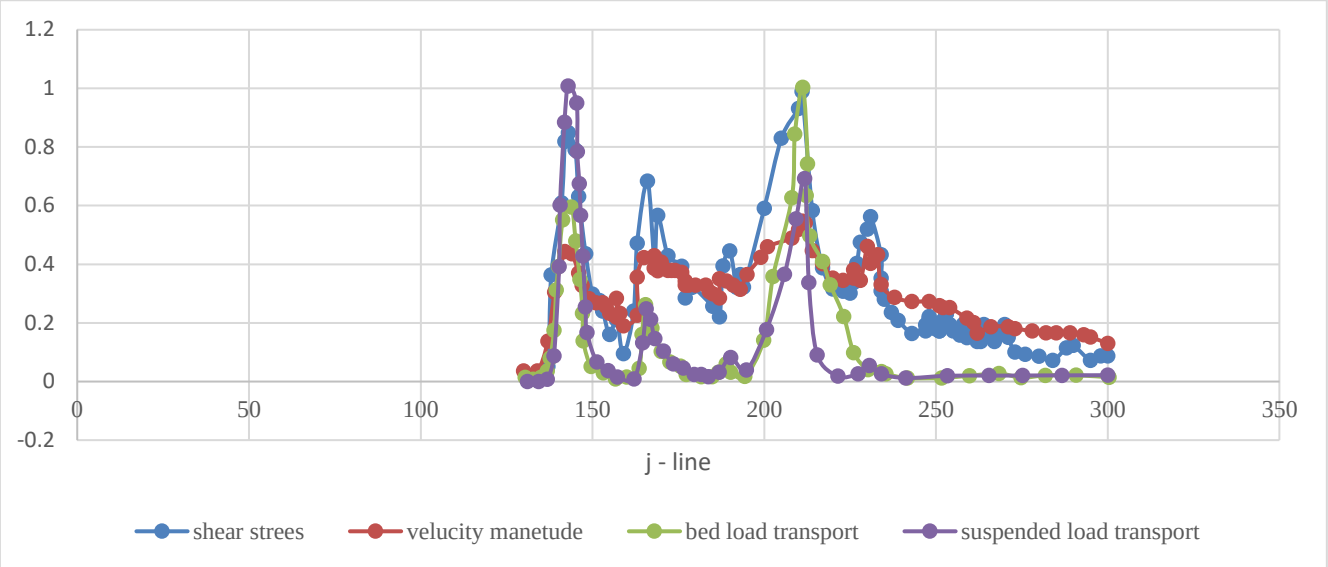


شکل ۷ - میدان سرعت [m/s] در ناحیه e، برای پیکربندی استاندارد و دبی $Q= 200\ m^3/s$

نتایج شبیه‌سازی انتقال رسوب به‌صورت نرخ انتقال رسوب معلق و بار بستر در طول مسیر، تغییرات سطح بستر و بازده رسوب در خروجی‌ها ارائه شده است. نرخ نرمال‌شده انتقال رسوب در شکل ۸، همراه با تغییرات تنش برشی نرمال‌شده و بزرگی سرعت، نشان داده شده است. نتایج بیانگر آن است که نرخ انتقال رسوب همبستگی مناسبی با تنش برشی دارد. افزایش سرعت و تنش برشی بستر با افزایش دبی را می‌توان بر اساس افزایش مومنتوم جریان و کاهش نسبی اثر مقاومت بستر تفسیر کرد. با افزایش دبی، سرعت میانگین جریان افزایش یافته و گرادیان سرعت در نزدیکی بستر نیز بیشتر بوده؛ بنابراین تنش برشی وارد بر ذرات بستر افزایش می‌یابد. افزایش تنش برشی، ظرفیت حمل رسوب را افزایش داده و احتمال شروع حرکت و انتقال ذرات را در نواحی پرانرژی بیشتر می‌کند. ازاین‌رو، مشابهت کلی شکل توزیع سرعت و تنش برشی در دبی‌های مختلف، در حالی که مقدار مطلق آن‌ها افزایش می‌یابد، نشان‌دهنده کنترل غالب هندسه بستر بر ساختار فضایی جریان و کنترل شدت دبی بر انرژی جریان است.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-13]

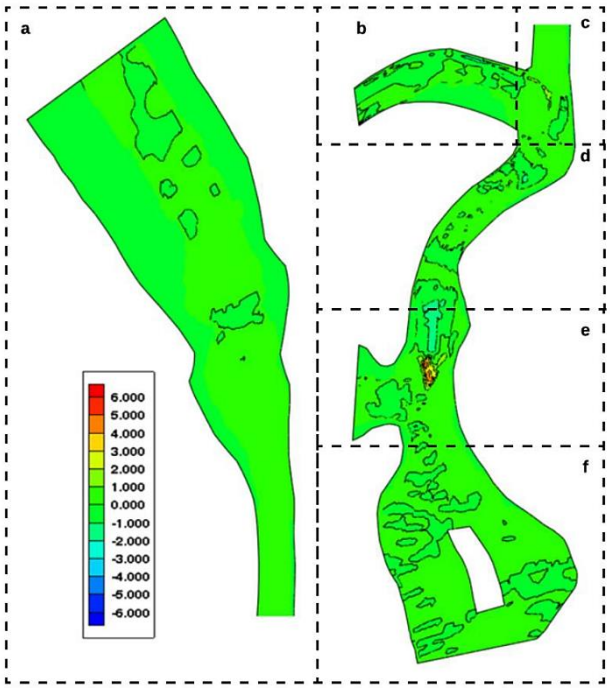
در دبی$Q=200\ m^3/s$، گردابه غربی در محل انشعاب از بین می‌رود. این تغییر را می‌توان ناشی از افزایش مومنتوم جریان اصلی و کاهش امکان جدایش جریان در ناحیه انشعاب دانست. در دبی‌های پایین‌تر، کاهش مومنتوم جریان و افزایش اثرات ناشی از هندسه موضعی موجب تشکیل ناحیه بازچرخشی می‌شود؛ در حالی‌که با افزایش دبی، مومنتوم جریان اصلی بر ساختار بازچرخشی غلبه کرده و ناحیه گردابه‌ای تضعیف یا حذف می‌شود. بنابراین، تغییر مشاهده‌شده صرفاً یک تغییر عددی در میدان سرعت نیست، بلکه نشان‌دهنده تغییر رژیم موضعی جریان و بازآرایی ساختار جریان ثانویه در محل انشعاب است.



شکل ۸ - نرخ نرمال شده انتقال رسوب، تنش برشی و بزرگی سرعت برای پیکربندی استاندارد در دبی $Q= 200\ m^3/s$ در امتداد خط I

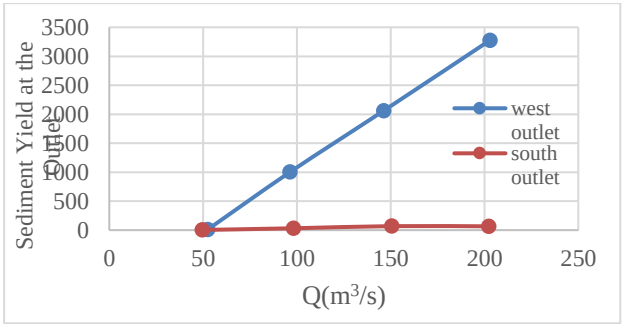
تغییرات شبیه‌سازی‌شده سطح بستر برای شناسایی نواحی رسوب‌گذاری و فرسایش در مدل مورد استفاده قرار گرفت. بیشترین میزان رسوب‌گذاری در محل تجمع رسوبات در بخش پایینی ناحیه d و همچنین در ناحیه e مشاهده شد. حداکثر تغییرات بستر، حدود ۵ متر برای رسوب‌گذاری و حدود ۲- متر برای فرسایش به‌دست آمد. فرسایش عمدتاً در خم خارجی ناحیه b رخ می‌دهد. همچنین، در ناحیه c و در محل تقاطع جریان، رسوب‌گذاری مشاهده شد. (شکل ۹).

در شکل ۱۰ نرخ انتقال رسوب به‌صورت تولید سالانه رسوب ارائه شده است که مقدار آن در خروجی‌ها به دبی جریان وابسته است.



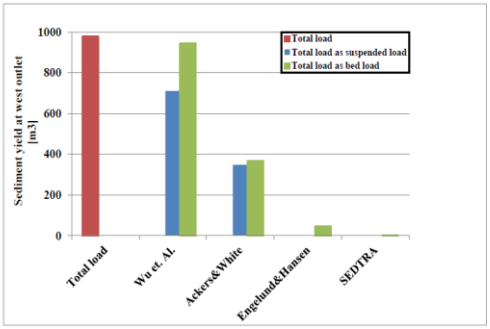
شکل ۹ - تغییرات سطح بستر [متر] برای پیکربندی استاندارد با دبی $Q= 100\ m^3/s$ پس از یک سال

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-13]



شکل۱۰ - تولید رسوب در خروجی‌ها پس از یک سال برای پیکربندی استاندارد و دبی‌های مختلف

تولید انتقال رسوب در خروجی جنوبی، برای تمامی مقادیر دبی جریان، پایین است و با تغییر فرمول ظرفیت انتقال تغییر می‌کند. در شکل ۱۱، میله قرمز نشان‌دهنده پیکربندی استاندارد است. الگوی تغییرات بستر نشان می‌دهد که توزیع فرسایش و رسوب‌گذاری مستقیماً از توزیع فضایی انرژی جریان و تنش برشی پیروی می‌کند. فرسایش غالب در خم خارجی ناحیه b را می‌توان به تمرکز جریان و افزایش تنش برشی ناشی از انحنای مسیر نسبت داد. در مقابل، رسوب‌گذاری در بخش پایینی ناحیه d و ناحیه e با کاهش سرعت، تشکیل جریان‌های بازچرخشی و کاهش ظرفیت حمل رسوب مرتبط است. در ناحیهc، محل تقاطع جریان‌ها، برهم‌کنش دو میدان جریان موجب تغییر ناگهانی در مومنتوم و ساختار آشفتگی شده و در نتیجه شرایطی برای تغییر موضعی ظرفیت انتقال رسوب فراهم می‌شود. بنابراین، الگوی نهایی تغییر بستر حاصل برهم‌کنش همزمان فرآیندهای انتقال مومنتوم، تولید تنش برشی، جدایش جریان و تغییر ظرفیت حمل رسوب است و نمی‌توان آن را صرفاً بر اساس مقدار سرعت جریان در یک نقطه تفسیر کرد.



شکل ۱۱ - تولید رسوب در خروجی غربی برای $Q= 100\ m^3/s$ پس از یک سال

استفاده از مدل انتقال بار کل، بیشترین میزان تولید رسوب را ایجاد می‌کند، در حالی‌که استفاده از فرمول‌های ظرفیت Engelund & Hansen یا ماژول SEDTRA منجر به تولید تقریباً صفر رسوب شده است. با استفاده از مدل انتقال بار کل، تولید سالانه رسوب در خروجی غربی، برای پیکربندی استاندارد و دبی $Q=100\ m^3/s$، حدود ۲۶۰۰ تن برآورد شد که از این مقدار، حدود ۱۸۰۰ تن مربوط به بار معلق است. تولید سالانه رسوب معلق نسبت به دو ایستگاه پایین‌دست کمتر است، در حالی‌که میزان تولید رسوب در ایستگاه‌های پایین‌دست حدود ۳۰ تا ۵۵ برابر بیشتر گزارش شده است.

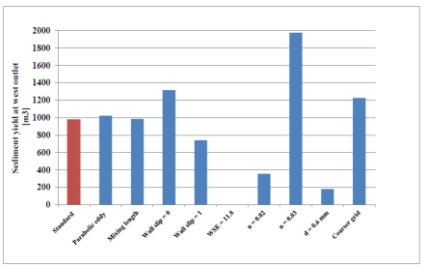
جدول ۵ - ایجاد رسوب در خروجی غربی پس از یک سال برای پیکربندی استاندارد با دبی $Q= 100\ m^3/s$

روش انتقال رسوب	حجم رسوب سالیانه (متر مکعب)	وزن رسوب سالیانه(تن)
بار معلق	675	1790
بار بستر	310	820

جدول ۶ - خلاصه تغییرات تولید رسوب در خروجی غربی برای یک سال با پیکربندی‌های مختلف

تغییر در پارامتر	تغییر [%]	روش انتقال	فرمول ظرفیت انتقال	تغییر [%]
پیکربندی استاندارد-بار کل	-	بار معلق	Wu. et al.	-27
ویسکوزیته گردابی پارابولیک	5	بار معلق	Ackers & White	-64
طول اختلاط	1	بار معلق	Engelund & Hansen	-100
لغزش دیواره = ۰	35	بار بستر	SEDTRA	-100
لغزش دیواره = ۱	-24	بار بستر	Wu. et al	-3
WSE = 11.8 m	-100	بار بستر	n = 0.02	-64
n = 0.02	-64	بار بستر	n = 0.03	102
n = 0.03	102	بار بستر	d = 0.6 mm	-81
d = 0.6 mm	-81	بار بستر	شبکه درشت‌تر	25

همان‌طور که در نمودار شکل ۱۲ مشاهده می‌شود، تولید رسوب همچنین با انتخاب برخی پارامترها، از جمله ارتفاع سطح آب در خروجی‌ها، ضریب زبری Manning و اندازه قطر ذرات رسوب، تغییر می‌کند. در مقابل، نتایج نسبت به انتخاب مدل تلاطم، شرایط لغزش دیواره و اندازه شبکه حساسیت کمتری نشان می‌دهند.



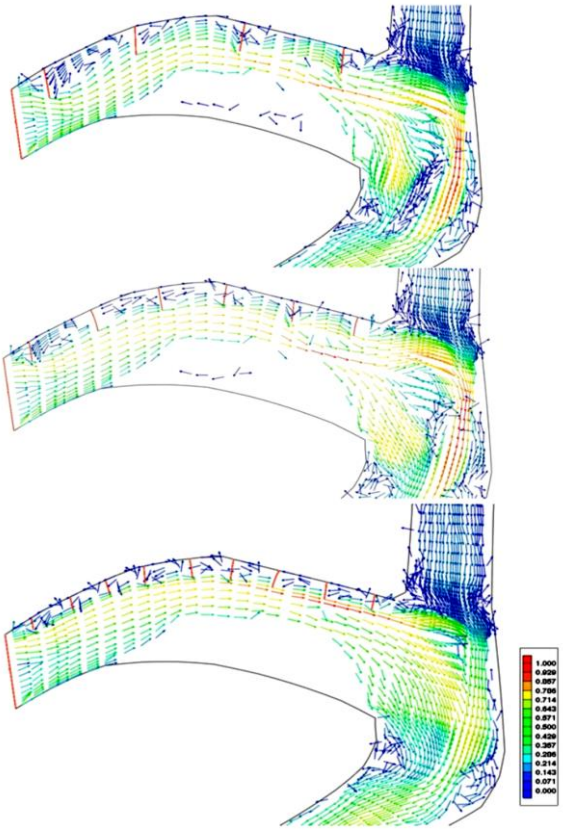
شکل ۱۲ - تولید رسوب در خروجی غربی برای دبی $Q= 100\ m^3/s$ پس از یک سال

۴-کاربرد گروینزها

هر سه پیکربندی مورد بررسی، منجر به تشکیل گردابه‌های ثانویه با شدت‌های متفاوت در فواصل بین گروینزها شدند. این گردابه‌ها از

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-13]

طریق جریان معکوس بین گروینزها، همان‌گونه که در شکل ۱۳ نشان داده شده است، قابل تشخیص هستند. با این حال، گروینزها در تمامی فواصل خود موجب تشکیل گردابه‌های ثانویه نشدند. در برخی نواحی میدان گروینز، به‌دلیل نفوذ جریان اصلی به داخل میدان گروینز، گردابه‌های اضافی تشکیل نشد. همچنین، گروینزها موجب انحراف مسیر جریان اصلی از دیواره بیرونی رودخانه به سمت کانال شدند در ورودی سد، میدان تنش برشی بالا از دیواره به سمت کانال اصلی منحرف می‌شود. نتایج نشان داد که در محل تقاطع رودخانه‌ها، افزایش تنش برشی رخ می‌دهد، در حالی‌که مقدار تنش برشی در پایین‌دست این تقاطع مشابه حالت بدون گروینز باقی می‌ماند. گروینزها تأثیر قابل‌توجهی بر مقدار و محل تغییرات بستر دارند. رسوب‌گذاری بین گروینزها و در میدان گروینز رخ می‌دهد و گروینزها در نوک خود و در کانال اصلی، حفره‌های فرسایشی مشخصی ایجاد می‌کنند. همچنین، هر دو پدیده فرسایش و رسوب‌گذاری در ناحیه تقاطع جریان مشاهده شد. انتقال رسوب در شبیه‌سازی‌های مربوط به گروینزها با استفاده از مدل بار کلی انجام شد. حضور گروینزها حجم رسوب حمل‌شده از خروجی غربی را بین ۲۱ تا ۳۴ درصد و از خروجی جنوبی را بین ۱۵ تا ۲۳ درصد کاهش داد؛ همان‌گونه که در جدول۷ نشان داده شده است.



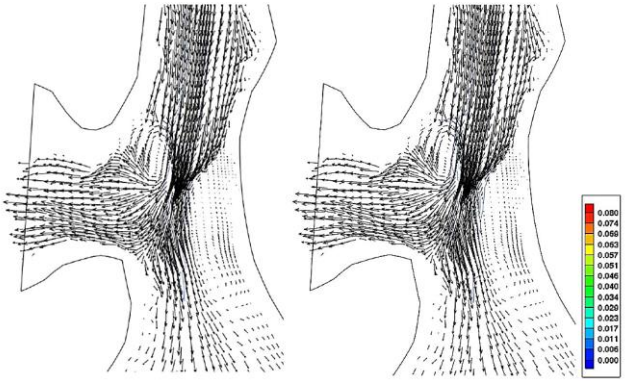
شکل ۱۳ - میدان یکنواخت بردار سرعت [m/s] برای پیکربندی‌های گروینزها در Q=100 m³/s پیکربندی‌های گروینز از بالا به پایین شامل ۴، ۶ و ۹ گروینز هستند

جدول ۷ - تغییر در حمل رسوب برای گروینزها در مقایسه با حالت بدون گروینز، پس از یک سال برای Q=100 m³/s

تعداد / طول طولی [متر]	کاهش در حمل رسوب[%] - خروجی غربی
4/45	-34
6/70	-31
9/30	-21

۴-۱ انتخاب مدل آشفتگی

انتخاب مدل آشفتگی بر توزیع و مقدار ویسکوزیته گردابی تأثیرگذار است. مدل آشفتگی $k-\varepsilon$ مقادیر بالایی از ویسکوزیته گردابی را در نواحی دارای جریان گردابه‌ای تولید می‌کند. سایر مدل‌ها، از جمله مدل ویسکوزیته گردابی سهموی و مدل طول اختلاط، این اثر را در نظر نمی‌گیرند؛ همان‌گونه که در شکل ۱۴ نشان داده شده است. در این مدل‌ها، مقدار ویسکوزیته گردابی در نواحی دارای گردش جریان پایین است.



شکل ۱۴: میدان بردار سرعت بر روی ویسکوزیته گردابی [m²/s] برای Q=100 m³/s با مدل آشفتگی ویسکوزیته گردابی سهموی (چپ) و مدل طول مخلوط (راست)

فرآیند کالیبراسیون مدل در چند مرحله انجام شد. در مرحله نخست، پارامترهایی که مستقیماً از داده‌های میدانی و آزمایشگاهی قابل استخراج بودند، از جمله هندسه بستر و اندازه مشخصه ذرات رسوب، بدون کالیبراسیون مستقیم وارد مدل شدند. در مرحله دوم، پارامترهای هیدرولیکی شامل ضریب زبری مانینگ و ضریب اختلاط عرضی در بازه‌های مشخص تغییر داده شدند و عملکرد مدل با داده‌های مشاهده‌ای مقایسه گردید. در مرحله سوم، پارامتر انتقال رسوب با استفاده از نرخ‌های مشاهده‌شده انتقال رسوب تنظیم شد. در نهایت، یک بررسی ترکیبی برای اطمینان از سازگاری پارامترهای انتخاب‌شده انجام گرفت. برای ضریب زبری مانینگ، مقادیر ۰.۰۲۰ تا ۰.۰۳۵ با گام ۰.۰۰۱ بررسی شدند و مقدار ۰.۰۲۸ به‌عنوان مقدار نهایی انتخاب شد. برای ضریب اختلاط عرضی، مقادیر ۰.۲ تا ۱.۰ m^2/sبا گام ۰.۱ m^2/s مورد بررسی قرار گرفتند و مقدار ۰.۶ m^2/s

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-13]

بهترین تطابق را با داده‌های مشاهده‌ای ایجاد کرد. ضریب انتقال رسوب نیز در محدوده ۰.۱۰ تا ۰.۵۰ با گام ۰.۰۵ بررسی شد و مقدار ۰.۳۰ به‌عنوان مقدار نهایی انتخاب گردید.انتخاب پارامترهای نهایی بر اساس کمینه‌کردن RMSE و MAE و بیشینه‌کردن NSE و R^2انجام شد. علاوه بر این، برای جلوگیری از انتخاب پارامترهایی که صرفاً از نظر آماری مناسب بوده ولی از نظر فیزیکی نامعقول هستند، الگوی میدان سرعت، تنش برشی بستر و مناطق فرسایش و رسوب‌گذاری نیز بررسی شد. بدین ترتیب، مقدار نهایی هر پارامتر حاصل مصالحه میان عملکرد آماری مدل و سازگاری فیزیکی نتایج با شرایط رودخانه بوده است.

جدول۷ - پارامترهای مورد استفاده در فرآیند کالیبراسیون مدل CCHE2D

پارامتر	مقدار اولیه	بازه بررسی	گام تغییر	مقدار نهایی	مبنای انتخاب
ضریب زبری مانینگ	0.025	0.02-0.035	0.001	0.028	کمینه خطای هیدرولیکی
ضریب اختلاط عرضی، Et (m^2/s)	0.5	0.2-1.0	0.1	0.6	بهترین تطابق هیدرولیکی-رسوبی
ضریب انتقال رسوب، P	0.30	0.1-0.5	0.05	0.3	کمینه خطای انتقال رسوب
اندازه متوسط ذرات، D50 (mm)	0.35	0.36-0.6	-	0.35	داده آزمایشگاهی
ضریب لغزش دیواره	0.5	0-1	0.5	0.5	بهترین پایداری عددی
مدل آشفتگی	k–ε	Public Mixing Length	-	k–ε	بهترین بازنمایی جریان ثانویه
شرایط مرزی خروجی	WSE=10.8 m	10.8-11.8	-	10.8	بهترین تطابق تراز آب

۵- بحث و نتایج

استفاده از مدل عددی دوبعدی میانگین‌عمقی نشان داد که الگوی جریان در پایین‌دست سد ارس تحت تأثیر شکل هندسی بستر و سازه‌های جانبی قرار دارد. نواحی با سرعت جریان زیاد و کم در بخش‌های مختلف شناسایی شدند که ارتباط مستقیمی با توزیع رسوبات داشتند. نتایج نشان داد که توزیع رسوبات در پایین‌دست سد به‌شدت به پارامترهایی نظیر دبی جریان و شکل بستر وابسته است. در نواحی با سرعت جریان پایین، میزان رسوب‌گذاری بیشتر بوده، در حالی‌که در نواحی با سرعت جریان بالا، احتمال شست‌وشوی رسوبات افزایش می‌یابد. وجود سد ارس موجب کاهش سرعت جریان آب در پایین‌دست شده و این مسئله باعث افزایش رسوب‌گذاری در این نواحی گردیده است.

نتایج نشان می‌دهد که فرسایش عمدتاً در نواحی دارای سرعت و تنش برشی بالا رخ می‌دهد، در حالی‌که رسوب‌گذاری در نواحی دارای جریان ثانویه، از جمله مناطق چرخشی و نواحی با سرعت پایین، اتفاق می‌افتد. مقدار رسوب حمل‌شده از خروجی غربی به‌طور مستقیم به شدت جریان وابسته است. این مطالعه نشان می‌دهد که میزان برداشت رسوب در خروجی غربی نسبت به مناطق پایین‌دست کمتر بوده و در نتیجه، نرخ حمل رسوب نیز پایین‌تر است.

نتایج همچنین نشان می‌دهد که امکان کاهش مشکل رسوب‌گذاری وجود دارد. این پژوهش با موفقیت نشان داد که استفاده از سازه‌های گروین در مدل می‌تواند میزان رسوب ورودی را به‌طور قابل‌توجهی کاهش دهد.

۵-۱- اعتبارسنجی مدل

به‌منظور ارزیابی قابلیت مدل CCHE2D در بازتولید شرایط هیدرودینامیکی و انتقال رسوب در محدوده مورد مطالعه، نتایج شبیه‌سازی با داده‌های مشاهده‌ای موجود مقایسه شدند. ارزیابی عملکرد مدل برای عمق جریان، سرعت جریان و نرخ انتقال رسوب انجام گرفت. برای این منظور، چهار شاخص آماری شامل ضریب تعیین(R^2)، ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE)، میانگین قدرمطلق خطا (MAE) و ضریب کارایی نش-ساتکلیف (NSE) مورد استفاده قرار گرفتند. مقادیر بالاتر R^2 و NSE و مقادیر پایین‌تر RMSE و MAE نشان‌دهنده تطابق بهتر نتایج مدل با داده‌های مشاهده‌ای هستند. نتایج ارزیابی کمی عملکرد مدل در جدول X ارائه شده است. برای عمق جریان، مقدار R^2 برابر با ۰.۹۴، مقدار RMSE برابر با ۰.۱۸ متر، مقدار MAE برابر با ۰.۱۳ متر و مقدار NSE برابر با ۰.۹۲ به‌دست آمد. برای سرعت جریان، مقادیر R^2، RMSE، MAE و NSE به‌ترتیب برابر با ۰.۹۱، ۰.۰۸۲ متر بر ثانیه، ۰.۰۶۱ متر بر ثانیه و ۰.۸۹ بودند. برای نرخ انتقال رسوب نیز مقادیرR^2=0.88،RMSE=164.7 تن در سال، MAE=121.5 تن در سال و NSE=0.86 به‌دست آمد.

جدول ۸ - شاخص‌های آماری عملکرد مدل در مرحله اعتبارسنجی

متغییر	R^2	RMSE	MAE	NSE
عمق جریان(m)	0.94	0.18	0.13	0.92
سرعت جریان(m/s)	0.91	0.082	0.061	0.89
نرخ انتقال رسوب (ton/year)	0.88	164.7	121.5	0.86

مقادیر به‌دست‌آمده نشان‌دهنده عملکرد مناسب مدل در بازتولید متغیرهای هیدرولیکی و انتقال رسوب هستند. تطابق بهتر مدل در شبیه‌سازی متغیرهای هیدرولیکی نسبت به نرخ انتقال رسوب را می‌توان به پیچیدگی بیشتر فرآیندهای فرسایش، انتقال و رسوب‌گذاری و حساسیت بالای آن‌ها به شرایط محلی بستر نسبت داد.

حساسیت مدل بر اساس میزان حمل رسوب از طریق خروجی غربی، برای دبی $Q=100\ m^3/s$ و طی یک سال شبیه‌سازی، به‌صورت

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-13]

برداشت سالانه رسوب ارزیابی شد. تحلیل حساسیت با مقایسه پاسخ مدل در پیکربندی‌های تغییریافته با پیکربندی استاندارد انجام شد. برای هر پارامتر، تنها همان پارامتر تغییر داده شد و سایر شرایط مدل ثابت نگه داشته شدند. شاخص حساسیت نسبی به‌صورت زیر محاسبه شد:

$$S_i = |(Y_i - Y_0)/Y_0| \times 100 \quad (۵)$$

که در آن:

S_i درصد حساسیت نسبت به پارامتر i

Y_i مقدار خروجی مدل پس از تغییر پارامتر i

Y_0 مقدار خروجی مدل در حالت استاندارد

به‌منظور تفسیر نتایج، یک طبقه‌بندی عملیاتی سه‌سطحی تعریف شد. تغییرات کمتر از ۳۴ درصد به‌عنوان حساسیت کم، تغییرات بین ۳۴ تا ۶۷ درصد به‌عنوان حساسیت متوسط و تغییرات بیشتر از ۶۷ درصد به‌عنوان حساسیت زیاد در نظر گرفته شدند. این حدود به‌عنوان آستانه عمومی یا استاندارد مستقل برای مدل‌های مورفودینامیکی در نظر گرفته نشده‌اند، بلکه صرفاً برای ایجاد یک چارچوب یکنواخت جهت مقایسه پارامترهای مورد بررسی در این پژوهش تعریف شده‌اند. ازاین‌رو، مقدار عددی (S_i) نیز برای تمامی پارامترها گزارش شده است تا ارزیابی حساسیت صرفاً متکی بر طبقه‌بندی کیفی نباشد.

۵-۲ تحلیل اثر عدم‌قطعیت پارامترهای ورودی

در تحلیل حساسیت اولیه بیشترین تأثیر را بر انتقال رسوب نشان داده بودند، به‌عنوان پارامترهای اصلی نامطمئن انتخاب شدند. این پارامترها شامل ضریب زبریManning، اندازه مشخصه ذرات رسوب و ارتفاع سطح آب در مرز خروجی بودند. برای بررسی اثر عدم‌قطعیت، مقدار هر پارامتر در یک دامنه مشخص پیرامون مقدار پایه تغییر داده شد، در حالی که سایر پارامترهای مدل ثابت نگه داشته شدند. برای ضریب زبریManning، مقادیر ۰.۰۲، ۰.۰۲۵ و ۰.۰۳، برای اندازه ذرات رسوب مقادیر ۰.۳۵ و ۰.۶۰ میلیمتر و برای ارتفاع سطح آب خروجی مقادیر متناظر با منحنی‌های رتبه‌بندی مورد استفاده در مدل در نظر گرفته شد. سپس برای هر حالت، میزان انتقال سالانه رسوب از خروجی غربی محاسبه و با مقدار حاصل از پیکربندی استاندارد مقایسه شد. نتایج نشان داد که دامنه تغییرات پارامترهای ورودی می‌تواند تغییر قابل‌توجهی در مقدار انتقال رسوب ایجاد کند. بیشترین تغییرپذیری خروجی مربوط به پارامترهای هیدرولیکی و رسوبی بود؛ به‌ویژه ضریب زبری Manning، شرایط مرزی خروجی و اندازه ذرات رسوب. در مقابل، تغییر مدل آشفتگی و اندازه شبکه در محدوده بررسی‌شده تأثیر کمتری بر مقدار انتقال رسوب داشتند. بنابراین، بخش عمده عدم‌قطعیت خروجی مدل به پارامترهایی مربوط است که مستقیماً بر عمق جریان، تنش برشی بستر و قابلیت انتقال ذرات اثر می‌گذارند.

نتایج نشان می‌دهد که مدل، از نظر حمل رسوب، حساسیت کمی نسبت به انتخاب مدل آشفتگی دارد و میزان حساسیت در محدوده ۱ تا ۵ درصد متغیر است. با این حال، در صورتی که هدف، بررسی و تحلیل جریان‌های ثانویه باشد، مدل دومعادله‌ای $k-\varepsilon$ در مقایسه با سه مدل بررسی‌شده، بهترین عملکرد را از نظر توزیع ویسکوزیته گردابی ارائه می‌دهد. از نظر شرایط لغزش دیواره، حساسیت مدل در محدوده کم‌حساس تا حساس قرار دارد. برای جریان‌های ویسکوز، معمولاً می‌توان شرط لغزش صفر را برای دیواره فرض کرد. همچنین، نتایج مدل نسبت به کاهش اندازه شبکه حساسیت قابل‌توجهی نشان ندادند، هرچند انتخاب اندازه مناسب شبکه همچنان اهمیت دارد. در برخی حالت‌ها، مدل یا اجرا نشد و یا نتایج معقولی از نظر هیدرولیک رودخانه ارائه نکرد.

۶- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، رفتار هیدرودینامیکی و مورفودینامیکی پایین‌دست سد ارس با استفاده از مدل دوبعدی میانگین‌عمقی CCHE2D بررسی شد. نتایج نشان داد که شکل هندسی بستر، توزیع سرعت و تنش برشی و وجود نواحی چرخشی، کنترل‌کننده اصلی مکانیزم‌های فرسایش و رسوب‌گذاری در محدوده مورد مطالعه هستند. از دیدگاه مهندسی، این موضوع نشان می‌دهد که مدیریت رسوب در پایین‌دست سد باید بر اساس توزیع مکانی فرآیندهای فرسایش و رسوب‌گذاری انجام شود و استفاده از یک راهکار یکنواخت برای کل محدوده نمی‌تواند لزوماً عملکرد مطلوبی داشته باشد. یکی از مهم‌ترین پیامدهای کاربردی مطالعه، شناسایی نواحی بحرانی مستعد فرسایش و رسوب‌گذاری است. نواحی با سرعت و تنش برشی بالا، به‌ویژه در خم‌های خارجی و محدوده‌های تمرکز جریان، مستعد فرسایش بستر هستند، در حالی که نواحی با سرعت پایین و جریان‌های گردشی ظرفیت بیشتری برای تجمع رسوب دارند. بنابراین، نقشه‌های حاصل از مدل می‌توانند به‌عنوان ابزار اولیه برای تعیین اولویت مکان‌های نیازمند پایش، لایروبی یا اقدامات حفاظتی مورد استفاده قرار گیرند. نتایج تحلیل حساسیت همچنین یک پیام مهم برای کاربرد مهندسی مدل دارد. انتقال رسوب به شرایط مرزی خروجی، ضریب زبری Manning و مشخصات اندازه ذرات حساس‌تر از برخی پارامترهای دیگر بود. بنابراین، در مطالعات طراحی و پیش‌بینی رسوب‌گذاری، جمع‌آوری دقیق داده‌های هیدرولیکی و رسوبی و تعریف صحیح شرایط مرزی باید در اولویت قرار گیرد. این یافته همچنین نشان می‌دهد که عدم قطعیت در این

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-13]

پارامترها می‌تواند مستقیماً بر برآورد حجم رسوب قابل انتقال و در نتیجه بر تصمیم‌های مدیریتی اثر بگذارد.

بررسی سناریوهای مختلف گروینزها نشان داد که این سازه‌ها با تغییر میدان سرعت و منحرف کردن جریان اصلی از نواحی بحرانی، قادر به ایجاد رسوب‌گذاری کنترل‌شده در میدان گروینز و کاهش انتقال رسوب به خروجی‌ها هستند. در شرایط شبیه‌سازی‌شده، کاهش انتقال رسوب از خروجی غربی در آرایش‌های مختلف بین حدود ۲۱ تا ۳۴ درصد به‌دست آمد. از نظر کاربردی، این نتیجه نشان می‌دهد که گروینزها می‌توانند به‌عنوان یکی از گزینه‌های اولیه برای مدیریت مسیر انتقال رسوب و کاهش ورود رسوبات به بخش‌های حساس پایین‌دست مورد بررسی قرار گیرند. با این حال، انتخاب آرایش نهایی گروینزها برای اجرای واقعی باید علاوه بر عملکرد رسوبی، بر اساس پایداری هیدرولیکی سازه، احتمال آبشستگی در نوک گروینز، اثرات زیست‌محیطی، شرایط بهره‌برداری و هزینه اجرا ارزیابی شود. از منظر مدیریت منابع آب، نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که مدل‌های دوبعدی می‌توانند در مرحله پیش‌طراحی و ارزیابی اولیه گزینه‌های مدیریت رسوب، پیش از اجرای اقدامات پرهزینه میدانی، برای مقایسه سناریوهای مختلف مورد استفاده قرار گیرند. این رویکرد می‌تواند به مدیران و طراحان کمک کند تا ابتدا نواحی بحرانی و راهکارهای محتمل را شناسایی کرده و سپس گزینه‌های منتخب را با مطالعات میدانی دقیق‌تر ارزیابی کنند. در نهایت، باید توجه داشت که شبیه‌سازی یک‌ساله با دبی ثابت، جایگزین شبیه‌سازی ناپایای مبتنی بر سری زمانی واقعی جریان و بار رسوب نیست. بنابراین، نتایج مورفولوژیکی این پژوهش بیشتر به‌عنوان ارزیابی روند و مقایسه نسبی عملکرد سناریوها تفسیر می‌شوند. برای تصمیم‌گیری اجرایی نهایی، استفاده از هیدروگراف‌های واقعی، بار رسوب متغیر در زمان، داده‌های میدانی گسترده‌تر و در صورت امکان مدل‌سازی سه‌بعدی پیشنهاد می‌شود. با وجود این محدودیت، نتایج حاضر یک چارچوب کاربردی برای شناسایی نواحی بحرانی، ارزیابی حساسیت پارامترهای اصلی و بررسی اولیه راهکارهای کنترل انتقال رسوب در پایین‌دست سد ارس فراهم می‌کند.

منابع

1- Salim, S., Pattiaratchi, C., Tinoco, R., Coco, G., Hetzel, Y., Wijeratne, S. and Jayaratne, R., (2017), *The influence of turbulent bursting on sediment resuspension under unidirectional currents*, Earth Surface Dynamics, Vol. 5, No. 3, p. 399-415. https://doi.org/10.5194/esurf-5-399-2017

2- Gharib Reza, M.R. and Masoumi, H.R., (2012), *Morphology of the Zohreh River and its changes in the coastal plain of Hendijan*, Proceedings of the 7th International Seminar on River Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran. (In Persian).

3- Shafaei Bajestani, M. and Nazari, S., (1998), *The effect of the diversion angle of an intake on sediment entry into lateral intakes at 90-degree river bends*, Scientific Journal of Agriculture, Shahid Chamran University of Ahvaz, Vol. 22, No. 1. (In Persian).

4- Monadizadeh, M., (2013), *Experimental investigation of flow hydraulics at the threshold of Dehkhoda intake using a micro-model*, M.Sc. Thesis, Shushtar Branch, Islamic Azad University, Shushtar, Iran. (In Persian).

5- Feng, Y., Wang, C., Wang, P., Qin, D. and Li, Y., (2022), *Influence of grain discharge rate on the normal force of arch*, The European Physical Journal E, Vol. 45, No. 9, Article 80. https://doi.org/10.1140/epje/s10189-022-00234-x

6- Hafez, A., Liu, Q., Finkbeiner, T., Alouhali, R.A., Moellendick, T.E. and Santamarina, J.C., (2021), *The effect of particle shape on discharge and clogging*, Scientific Reports, Vol. 11, No. 1, Article 3309. https://doi.org/10.1038/s41598-021-82744-w

7- Hartley, A.J., Chong, G., Houston, J. and Mather, A.E., (2005), *150 million years of climatic stability: Evidence from the Atacama Desert, northern Chile*, Journal of the Geological Society, Vol. 162, No. 3, p. 421-424. https://doi.org/10.1144/0016-764904-071

8- Schleiss, A.J., (2018), T*he challenge of restoring dynamics by river engineering: Where to find the truth about river flow-in the computer, in the lab or in the field?*, Proceedings of the 9th International Conference on Fluvial Hydraulics (River Flow 2018), Lyon, France.

9- Anim, D.O., Fletcher, T.D., Pasternack, G.B., Vietz, G.J., Duncan, H.P. and Burns, M.J., (2019), *Can catchment-scale urban stormwater management measures benefit the stream hydraulic environment?*, Journal of Environmental Management, Vol. 233, p. 1-11. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.12.023

10- Banasik, K., Hejduk, L., Krajewski, A. and Wasilewicz, M., (2021), *The intensity of siltation of a small reservoir in Poland and its relationship to environmental changes,*

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-13]

Catena, Vol. 204, Article 105436. https://doi.org/10.1016/j.catena.2021.105436

11- Blanckaert, K., (2011), *Hydrodynamic processes in sharp meander bends and their morphological implications*, Journal of Geophysical Research: Earth Surface, Vol. 116, No. F1, Article F01003. https://doi.org/10.1029/2010JF001806

12- Pirestani, M. and Salehi Neyshabouri, S.M., (2005), *Experimental study of the effect of hydraulic parameters on the separation zone of lateral intakes in arched channels*, Proceedings of the 5th Iranian Hydraulic Conference, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran. (In Persian).

13- East, A.E., Pess, G.R., Bountry, J.A., Magirl, C.S., Ritchie, A.C., Logan, J.B., Randle, T.J., Mastin, M.C., Minear, J.T., Duda, J.J. and Liermann, M.C., (2015), *Reprint of: Large-scale dam removal on the Elwha River, Washington, USA: River channel and floodplain geomorphic change*, Geomorphology, Vol. 246, p. 687-708. https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2015.04.027

14- Movahedinejad, S., Soyuf Jahromi, M., Haghshenas, S.A. and Siadat Mousavi, S.M., (2026), *Two-dimensional numerical simulation of fine-grained marine sediment transport in Bushehr Port channel*, Iranian Journal of Geophysics, Vol. 20, No. 4, p. 119-130. (In Persian). https://doi.org/10.30499/ijg.2026.565771.1742

15- Ildoromi, A., (2022), *Simulation of sediment particle movement pattern algorithm in the Ekbatan Dam River using the Fluent numerical model*, Quantitative Geomorphological Research, Vol. 11, No. 2, p. 14-31. (In Persian).

16- Tian, H., Zhao, J., Wang, L., Kan, J., Wu, F. and Tian, Z., (2026), *Numerical simulation of sediment diffusion induced by marine sand mining and sensitivity analysis of key parameters: A case study of the waters of Dingzi Bay, China*, Environmental Research, Vol. 305, Part 2, 125028. https://doi.org/10.1016/j.envres.2026.125028

17- SMH, (2018), *Daily discharge records for the hydrometric stations upstream and downstream of Aras Dam for 1996-2017*, Hydrological data set.

18- Khosravi, Q., (2018), *Hydrodynamic investigation of turbulence flow and sediment-transport pattern by CCHE2D: A case study of the downstream meander of Minab Dam*, Journal of Water and Soil Management and Modelling, Vol. 12, No. 40, p. 23-39. (In Persian), https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.20089554.1397.12.40.7.4

19- Abbasi, S., Poorshahbaz, H., & Taghvai, P. (2018). *Numerical investigation of flow pattern, erosion and sedimentation around parallel unequal spur dikes under different geometric and hydraulic condition: Numerical analysis.* Journal of Hydraulics, 13(3), 17-29. https://doi.org/10.30482/jhyd.2018.81354

20- Arman, A., Fattahi, P., & Zahiri, J. (2017). *Simulation of Flow and Sediment Pattern with Spurdikes Series in a 90 degree Mild Bend using CCHE2D Model*. Journal of Water and Soil Conservation, 24(3), 21-39. https://doi.org/10.22069/jwfst.2017.12018.2654

21- Anim, D.O., Fletcher, T.D., Pasternack, G.B., Vietz, G.J., Duncan, H.P. and Burns, M.J., (2019). *Can catchment-scale urban stormwater management measures benefit the stream hydraulic environment?*, Journal of environmental management, 233, pp.1-11. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.12.023

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-13]