

مدل سازی عددی به منظور تعیین توپوگرافی بستر جریان بر اساس سرعت سطح آزاد

محمدرضا رئیسی دهکردی

دانشجو دکتری عمران، گرایش مدیریت منابع آب دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران.

نام نویسنده مسئول:

محمدرضا رئیسی دهکردی

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۷/۷

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۹/۱۱

چکیده

یکی از پارامترهای مهم در مبحث ریخت شناسی رودخانه، توپوگرافی بستر رودخانه است. از اینرو ارائه راهکارهای عددی که بتواند تعیین آن را با حداقل هزینه ممکن کند؛ از اهمیت ویژه ای برخوردار است. با توجه به اندازه گیری ساده تر سرعت سطح آزاد جریان نسبت به توپوگرافی بستر، در این تحقیق مدل عددی یک بعدی ارائه شد که بتوان با دانستن سرعت سطح آزاد جریان به پروفیل طولی بستر جریان دست یافت. این امر با انتگرال گیری حالت ماندگار یک بعدی معادلات سنت و نانت میسر شده و منجر به یک معادله انتگرالی گردید. با این کار توپوگرافی بستر به طور ضمنی به صورت تابعی از سرعت سطح آزاد یا متوسط گیری شده در عمق، نسبت سرعت و ضریب اصطکاک مانینگ بدست آمد. یک روش ساده ی پیمایش همراه با قانون دوزنقه نیز برای حل این معادله انتگرالی به کار رفت.

نتایج نشان داد که نوسانات موجود در داده های ورودی سرعت سطح آزاد، در روند شبیه سازی تقویت نشده و انطباق مناسب شکل بستر واقعی و شبیه سازی شده، حتی برای داده های آزمایشگاهی دارای نوسان، نشان از قابلیت مدل پیشنهادی دارد.

واژگان کلیدی: پروفیل سطح آزاد جریان، سرعت جریان، مدل عددی، معادلات سنت و نانت.

مقدمه

رودخانه ها جریان حیاتی زمین را تشکیل می دهند، زیرا مایع حیات در این مجاری جریان دارد که موجب داوم زندگی موجودات زنده بر روی زمین می شود. همواره در طول تاریخ، قدرت رودخانه ها الهام بخش بشر بوده و او را به تحیر واداشته است. چه زمانیکه در نهایت صلح و آرامش، بستری امن و زیبا را در کنار خود فراهم کرده و منظره های زیبا را پیش روی بشر به نمایش گذاشته و چه آن هنگام که با خشم و طغیان خود باعث ویرانی حیات بشر گشته است.

توجه به دیدگاه های توسعه پایدار و پایداری به آن ها به منظور حفظ بهترین شرایط بقا و تداوم آن روی زمین، هم زمان با بهره برداری مناسب از طبیعت و افزایش سطح رفاه و کیفیت زندگی اجتماعی، مستلزم توجه به رودخانه ها به عنوان یکی از پایه های حیات و از مهم ترین منابع مورد بهره برداری انسان است. بشر، چه قبل از آغاز روند صنعتی شدن و چه پس از آن، همواره با رودخانه ها، زندگی در کنار آنها و بهره برداری مداوم از آنها در تعامل بوده است. که این تعامل مثل تمام تعاملات بشر با طبیعت، بعد از توسعه دانش تجربی، بهره برداری از طبیعت، شدت و سرعت زیادی پیدا کرده است.

بعضی از مهم ترین جنبه های بهره برداری و تعامل انسان و رودخانه، عبارت است از: بهره برداری از منابع آبی رودخانه ها برای مصارف شرب، آبیاری زمینهای زراعی و صنعت، بهره برداری به عنوان یک منبع انرژی سبز و پایدار، استفاده به عنوان مسیرهای حمل و نقلی، زندگی و کشاورزی در زمینهای کنار رودخانه ها و یا در پهنه های سیلابدشتی آنها و بهره برداری های توریستی و تفریحی از رودخانه ها.

تمایل بشر به سکونت در مجاورت رودخانه ها در طول تاریخ، همراه با افزایش چشمگیر جمعیت در چند قرن اخیر و توسعه مراکز اقتصادی، صنعتی، جمعیتی و کشاورزی در حاشیه رودخانه ها باعث شده است که میزان تلفات جانی و صدمات مالی ناشی از رخداد سیل در رودخانه ها به شدت افزایش پیدا کند. تا حدی که براساس آمار جهانی، بیش از نیمی از حوادث طبیعی غیر مترقبه در جهان را وقوع سیلاب تشکیل می دهد. هم چنین سیلاب ها حدود یک سوم تلفات ناشی از حوادث طبیعی را به خود اختصاص داده اند. تحلیل آماری این رخدادها، افزایش روند این آمار در طول سال های آینده را تایید می کند.

تجاوز به حریم سیلاب دشت و تاثیر فعالیت های بشری در افزایش پتانسیل سیلاب، علت اصلی افزایش وقوع سیل و افزایش خسارات ناشی از آن می باشد. بسیاری از شهر ها و خطوط ارتباطی کشور در مجاورت رودخانه های خروشان با حوضه های آبریز وسیع قراردارند و هر از چندگاهی درگیر سیل می شوند و خسارات و ضایعات سنگین و زیادی را متحمل می گردند. آبدهی رودخانه در زمان وقوع سیل، به طور ناگهانی افزایش یافته و منجر به غرقاب شدن مناطق وسیعی از زمینهای مجاور می شود که تخریب راه ها، پل ها، خطوط ارتباطی، تخریب تاسیسات شهری و روستایی، تلف شدن احشام، از بین رفتن مزارع و مرگ و آوارگی انسان ها را به دنبال دارد.

کشور ایران به علت داشتن اقلیم خشک و نیمه خشک، در بخش وسیعی همراه با بارش محدودی بوده که متأسفانه در معرض خطر سیل هم قرار دارد. تخریب منابع طبیعی چه به صورت بهره برداری بی رویه از جنگل ها و مراتع و چه به شکل تغییر کاربری اراضی و تبدیل آنها به زمینهای کشاورزی نامناسب و یا ساخت و ساز مناطق مسکونی به شکل بی رویه و همچنین فقدان مدیریت قوی و نگاه مدیریتی به بهره برداری از سیستم حوزه ای یا ساخت و سازهای نامناسب در مسیر جریان رودخانه باعث گردیده که شرایط برای ایجاد سیلاب در اکثر مناطق مهیا شود و هر سال شاهد سیل های شدیدتر و مخرب تر باشیم. این مسأله مسؤولیت مهندسين رودخانه در انجام مطالعات و ارائه راهکارهای مهندسی برای کاهش خطرات و تلفات سیلاب و پیامد های آن را به شدت افزایش می دهد.

آبهای جاری را می توان مهمترین عامل تغییر دهنده خشکیهای سطح زمین دانست. تغییرات ناشی از آبهای جاری از سه طریق، فرسایش، حمل و رسوبگذاری صورت می گیرد. رودخانه ها در ضمن حرکت باعث فرسایش بستر خود شده و دائماً آنرا عمیقتر و وسیعتر می کند. ته نشینی ذرات منتقل شده به پایین دست توسط این فرسایش ها می تواند به طور قابل توجهی ظرفیت انتقال آب در پایین دست رودخانه را کاهش داده و مناطق ساحلی را مستعد سیل گرفتگی کند. در این راستا بررسی و پایش توپوگرافی بستر رودخانه می تواند به مدیریت رودخانه کمک شایانی کرده و تعیین آن از اهمیت ویژه ای برخوردار است.

یکی از راهکارهای موجود در زمینه ی تعیین توپوگرافی بستر رودخانه استفاده از حل همزمان معادلات جریان و رسوب می باشد که با تعیین میزان آبستگي می توان این پارامتر مهم را تعیین کرد. اما این روش از پیچیدگی های قابل توجهی برخوردار است. از سوی دیگر اندازه گیری های میدانی نیز هزینه های زیادی را طلب می کند. از اینرو دانشمندان به دنبال روش های ساده تر و کم هزینه تری جهت دستیابی به توپوگرافی بستر رودخانه هستند.

اهمیت و ضرورت انجام تحقیق

اکثر تمدن های بشری در کنار رودخانه ها شکل گرفته که نشانگر نیاز بشر به آب می باشد. با توسعه شهرنشینی و اجرای طرح های عمرانی و دوری انسانها از رودخانه ها و با برداشت بی رویه شن و ماسه از بستر رودخانه، ساخت و ساز در حریم و بستر رودخانه، احداث سازه های تقاطعی و... بشر اقدام به تعرض به رودخانه و بر هم زدن تعادل و سیستم پایدار آن نمود. رودخانه ها شبیه موجودات زنده ای هستند که در مقابل این تعرض اقدام متقابل کرده و لذا رژیم هیدرولیکی آن در یک مسیر برای رسیدن به تعادل مجدد قرار می گیرد. رودخانه ها جریان های اصلی حیات کلیه سازه های آبی محسوب می گردند و حفاظت و بهره برداری بهینه از آنها و همچنین حراست از بستر و حریم آنها از مهم ترین مسائل رودخانه است. به خاطر نزدیکی سازه های تغذیه کننده از آب رودخانه و زمین های کشاورزی اطراف رودخانه نیاز به یک برنامه ریزی علمی جهت حفظ و حراست از این سازه ها اجتناب ناپذیر است. بسیاری از رودخانه ها در معرض تغییر و تحول قرار داشته و کارهای مهندسی رودخانه برای تغییر میزان رسوب و مطالعه آن، مسیر رودخانه، عمق آبراهه، پهنه سیل گیر و کیفیت آب، مورد نیاز است.

سرعت سطح آزاد جریان در کانال های روباز بسته به نوع، شکل، میزان پیچ و خم، شیب و طول کانال به طور موضعی تغییر می کند. این تغییرات به حالت جریان یعنی یکنواخت یا غیر یکنواخت، آرام یا آشفته بود آن نیز وابسته است. پروفیل سرعت در جریان کانال باز میتواند به تغییرات در زبری کانال، شیب طول و عرضی بستر هم بستگی داشته باشد. سرعت سطح آزاد را می توان با تکنیک های مختلفی اندازه گیری کرد. به طور مثال پلنت و همکاران (۲۰۵) از حسگرهای مایکروویو موج پیوسته برای اندازه گیری سرعت سطح آزاد استفاده کرده و نشان دادند که نتایج بدست آمده در انطباق مناسبی با سرعت های نزدیک سطح آزاد اندازه گیری شده توسط داپلرهای صوتی بود. همچنین از تکنیک سرعت موج الکترومغناطیس توسط برای اندازه گیریهای سرعت سطح آب از پل ها و سواحل رودخانه استفاده شده است (لی و جولین، ۲۰۰۶). موست و همکاران (۲۰۰۵) از موج های سطحی کنترل شده برای اندازه گیری سرعت سطح آزاد یک جریان سیال که میدان سرعت لحظه ای را بر روی ناحیه مورد نظر می دهد استفاده کردند. محققان زیادی از تکنیک سرعت سنجی در مقیاس بزرگ تصویر ذرات (PIV) برای اندازه گیری میدان دو بعدی سرعت در سطح آزاد جریان های آب کم عمق برای تعیین ویژگی های بنیادین جریان استفاده کردند (به طور مثال وتبرجت و همکاران، ۲۰۰۲؛ موست و همکاران، ۲۰۰۸)

بنابراین بر خلاف توپوگرافی بستر که اندازه گیری آن از مشکلات زیادی برخوردار است. سرعت جریان به خصوص در سطح آزاد را می توان با سرعت و دقت بالاتر و هزینه کمتری اندازه گیری کرد. از اینرو در این تحقیق مدل عددی یک بعدی بر مبنای معادلات آب کم عمق ارائه می شود تا بتوان با در اختیار داشتن میزان سرعت سطح آزاد، توپوگرافی بستر را پیشبینی کرد.

اهداف و سوالات تحقیق

هدف از این تحقیق یافتن داده های هیدرولیکی که اندازه گیری آن مشکل تر از مقداری است که با سهولت بیشتری قابل اندازه گیری است. در این راستا مدلی یک بعدی به کمک معادلات آب های کم عمق ارائه شده تا عمق جریان با استفاده از داده های اندازه گیری شده ی سرعت جریان در سطح آزاد پیشبینی گردد. در قالب این هدف کلی اهداف جزئی زیر را می توان بیان نمود:

- تعیین دقت مدل پیشنهادی در پیشبینی توپوگرافی بستر
- بررسی نتایج پیشبینی های توپوگرافی بستر با وجود خطا در داده های اندازه گیری شده ی سرعت
- تعیین قدرت مدل در تعیین دقیق توپوگرافی بستر با بررسی شرایط مختلف

روند تحقیق

در این تحقیق در فصل دوم مبانی نظری موجود در زمینه ی عوامل و روند فرسایش و رسوب در بستر رودخانه ها که عامل اصل تغییر توپوگرافی بستر رودخانه است مورد بحث قرار گرفته و سپس مفاهیم و نحوه استخراج معادلات حاکم آب های کم عمق ارائه شده است. و انتهای این فصل نیز تحقیقات سایر پژوهشگران در زمینه ی ریخت شناسی رودخانه و مدل های پیشگویی فرسایش و رسوب بیان شده است. در فصل سوم معادلات حاکم جهت استفاده در مدل آماده گردیده و روش حل عددی ارائه خواهد شد. در فصل چهارم نیز نتایج مدل عددی با و بدون نوسان با نتایج سایر پژوهشگران در شرایط مختلف هیدرولیکی مورد مقایسه قرار خواهد گرفت. در فصل پنجم نیز به نتیجه گیری بدست آمده از تحقیق پرداخته و نهایتاً پیشنهادات موجود به منظور ادامه تحقیق ارائه خواهد شد.

مبانی نظری

فرسایش و رسوبگذاری در رودخانه ها

استفاده بهینه از رودخانه ها به لحاظ اهمیتی که این منابع طبیعی در برآورد نیازهای بشری، از دیرباز تاکنون داشته اند از انگیزه های مهم به وجود آمدن بهره برداری صحیح از رودخانه بوده است. به علت نزدیکی سازه های تغذیه کننده از آب رودخانه و زمین های کشاورزی اطراف رودخانه نیاز به یک برنامه ریزی علمی جهت حفظ و حراست از این سازه ها اجتناب ناپذیر می باشد. رودخانه ها به مثابه موجودات زنده ای هستند که در مقابل تعارض بشر اقدام متقابل نموده و لذا رژیم هیدرولیکی آن در یک روند برای رسیدن به تعادل مجدد قرار می گیرد. کلیه رودخانه ها در معرض تغییر و تحول قرار دارند. از جمله مباحث مهم در حفاظت از رودخانه شناخت شکل رودخانه (مورفولوژی) تثبیت، سواحل و بستر رودخانه، کانالیزه کردن و کنترل سیلاب می باشد. با توجه به اینکه کلیه رودخانه ها در معرض تغییر و تحول قرار دارند. به کمک مورفولوژی رودخانه می توان اطلاعاتی از شکل هندسی آبراهه، شکل بستر و پروفیل طولی رودخانه به دست آورد. بطور کلی شناختن شکل و ساختمان رودخانه مورفولوژی رودخانه نامیده می شود به عبارتی به کمک مورفولوژی رودخانه می توان اطلاعاتی از شکل هندسی آبراهه، شکل بستر و پروفیل طولی رودخانه به دست آورد. مورفولوژی یک رودخانه تحت تاثیر عوامل متفاوتی مثل سرعت جریان فرسایش و نحوه رسوب گذاری قرار دارد.

انواع فرسایش و رسوبگذاری

انواع فرسایش و رسوبگذاری در رودخانه ها را می توان در چهار گروه عمده زیر طبقه بندی کرد:

- فرسایش یا رسوبگذاری مستمر^۱ (کف کنی یا تراز افزایی)
- فرسایش عمومی^۲ (آبشستگی عمومی)
- فرسایش موضعی^۳ (آبشستگی موضعی) تشکیل تلماسه ها^۴،
- جزایر و پشته های رسوبی^۵ در بستر رودخانه

فرسایش یا رسوبگذاری مستمر

فرسایش مستمر به حالتی گفته می شود که در آن بستر رودخانه دچار کف کنی فراگیر بوده و این پدیده برای مدت زمان مدیدی تداوم دارد. در چنین وضعیتی عوامل طبیعی و دخالت های انسانی مؤثرند. از جمله عوامل انسانی می توان به تغییر کاربری اراضی، ساخت سدهای مخزنی و برداشت شن و ماسه از رودخانه اشاره کرد. این کارها موجب کاهش تغذیه رسوبی رودخانه شده و در نتیجه فرایند کف کنی تا رسیدن به وضعیت تعادل ادامه می یابد، در شکل ۱-۲ نمونه ای از این نوع فرسایش در نمونه ای از این نوع فرسایش در ۲-۲ فرسایش در بالادست محل برداشت مصالح رودخانه ای نشان داده شده است.

¹ Long term Aggradation or Degradation

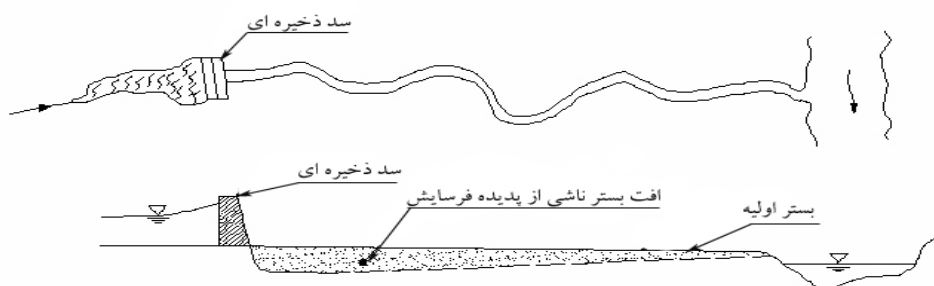
² General Scour

³ Local Scour

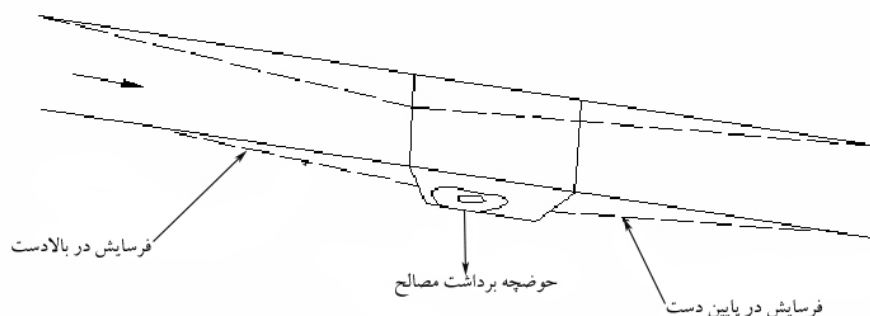
⁴ Sand Dunes

⁵ Islands & Bars

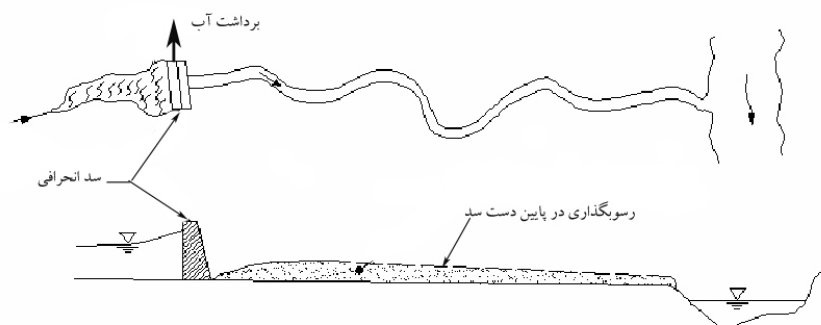
رسوبگذاری مستمر یا تراز افزایشی فرایندی است که طی آن در بخش عمد های از مسیر رودخانه تراز بستر بطور مستمر در اثر رسوبگذاری افزایش می یابد. در چنین حالتی تغذیه رسوبی رودخانه بیشتر از ظرفیت حمل آن م یباشد. تشدید عوامل ناپایداری خاک در سطح حوضه آبریز، وقوع زمین لغزه ها، کوه ریزشها، اتصال شاخه های پر رسوب، ساخت سدهای انحرافی و برداشت آب در مسیر رودخانه از جمله عواملی هستند که موجب افزایش رسوب ورودی به رودخانه و بالا آمدن بستر آن می شوند. در شکل ۳-۲ تأثیر ساخت سد انحرافی (سیمونز و سنتارک، ۱۹۹۲) و در شکل ۴-۲ تأثیر فرسایش اراضی بالادست حوضه آبریز در افزایش تراز بستر رودخانه نشان داده شده است (مهندسی مشاور سازه پرداز ایران، ۱۳۸۰).



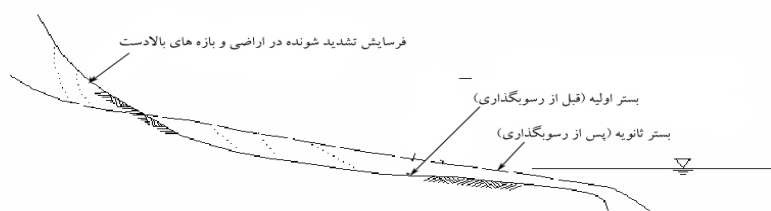
شکل ۱- پدیده کف کنی مستمر در پایین دست سد مخزنی (سیمونز و سنتارک، ۱۹۹۲)



شکل ۲- پدیده گودافتادگی بستر در بالادست محل برداشت مصالح رودخانه ای (هی، ۱۹۸۶)



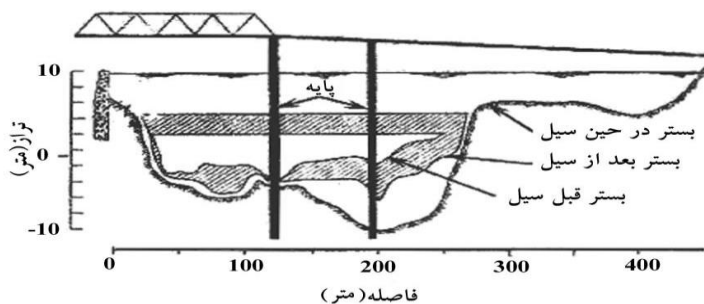
شکل ۳- نحوه رسوبگذاری در پایین دست سد انحرافی (راینو و پچینو، ۱۹۸۶)



شکل ۴- نمونه ای از رسوبگذاری ناشی از تشدید فرسایش در بالادست حوضه آبریز (مهندسین مشاور سازه پرداز ایران، ۱۳۸۰)

فرسایش یا رسوبگذاری عمومی

در اثر وقوع سیلاب ها و افزایش سرعت جریان آب، مواد رسوبی موجود در بستر رودخانه شسته شده و در قسمت عمده ای از مسیر رودخانه حالت گودافتادگی پدیدار می گردد. این حالت را در رودخانه می توان به عنوان فرسایش عمومی یا آبشستگی عمومی قلمداد نمود. بدیهی است افت بستر در چنین حالتی موقتی بوده و در مرحله فروکش سیلاب در اثر رسوبگذاری، بستر به تدریج تراز اولیه خود را باز می یابد. رسوبگذاری فراگیر در بستر رودخانه بعد از فروکش سیلاب در دوره جریانهای کم ادامه می یابد، از این فرایند به عنوان رسوبگذاری عمومی می توان نام برد. شکل ۲-۵ نمونه ای از وقوع فرسایش و رسوبگذاری عمومی در بستر رودخانه را در هنگام وقوع سیلاب و پس از خاتمه آن به نمایش می گذارد. مطابق شکل ۲-۵ بستر رودخانه قبل از وقوع سیلاب دارای تراز حداقل برابر با ۴- متر بوده و عرض رودخانه نیز کمتر است (حدود ۲۰۰ متر). در هنگام وقوع سیلاب تراز کف بستر به ۱۰- متر کاهش یافته و عرض بستر نیز در اثر فرسایش کناره ها افزایش پیدا می کند (حدود ۲۸۰ متر). بعد از فروکش سیل مجدداً کف بستر به تدریج در اثر رسوبگذاری وضعیت اولیه خود را باز یافته و تراز حداقل ۵- متر را تجربه می کند (لنسلی، ۱۹۷۵). همچنین در نتیجه ساخت سازه های حفاظتی مانند آبشکن^۶ و یا خاکریزهای سیل بند (گوره ها)^۷ مقطع رودخانه کاهش یافته و این پدیده منجر به وقوع آبشستگی عمومی می گردد. این نوع آبشستگی عمومی را آبشستگی تنگ شدگی^۸ می نامند.



شکل ۵- نمونه ای از فرسایش عمومی ناشی از وقوع سیلاب و رسوبگذاری عمومی مجدد (لنسلی، ۱۹۷۵)

آبشستگی موضعی و رسوبگذاری موضعی

آبشستگی موضعی بیشتر در اطراف پایه های پل، نوک آبشکن ها، خم رودخانه ها و به طور کلی در محدوده و پایین دست موانع ایجاد شده در مقابل جریان طبیعی رودخانه که منجر به انحراف خطوط جریان و تمرکز و تفرق آنها می شود حادث می گردد. عمق آبشستگی موضعی به مراتب بیشتر از کف کنی ایجاد شده توسط آبشستگی عمومی است. از این رو تعیین عمق چاله آبشستگی ناشی از فرسایش موضعی در طراحی و بررسی پایداری سازه های ساماندهی دارای اهمیت زیادی است.

⁶ Groin

⁷ Levee

⁸ Contraction (constriction) Scour

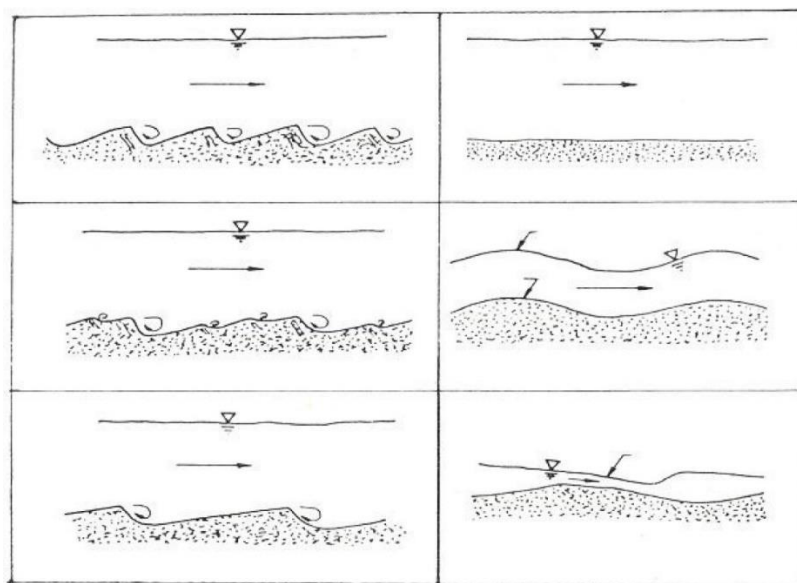
رسوبگذاری موضعی نیز از جمله فرایندهایی است که به طور مکرر در رودخانه ها حادث می شود. این نوع رسوبگذاری در قوس داخلی خمهای رودخانه، در محل اتصال شاخه های جانبی، در بالادست و پایین دست پلها، در فضای بین آبشکنهای مجاور در بالادست سدهای انحرافی و سایر تأسیسات هیدرولیکی مشاهده می شود. شکل ۲-۸ نمونه ای از رسوبگذاری موضعی در میدان آبشکنها را به نمایش می گذارد. همچنین در شکل ۲-۱۲ رسوبگذاری موضعی در قوس داخلی خمها نشان داده شده است.

تشکیل تلماسه ها، جزایر و پشته های رسوبی در بستر رودخانه

جابه جایی مواد رسوبی در بستر رودخانه ها به شکلهای مختلف صورت م ی گیرد. در رودخانه های با بستر ماسه ای حرکت مواد رسوبی به صورت امواج ماسه ای است که بسته به شرایط هیدرولیکی از نوع شکنج^۹، تلماسه^{۱۰} یا پادتلماسه^{۱۱} می باشد و عموماً از آنها با عنوان تلماسه یاد می شود (یانگ، ۱۹۹۶).

شکل های مختلف بستر

اگر بستر دچار فرسایش شود، شکل های مختلف بستر با توجه به شرایط مختلف جریان می تواند حاصل گردد. انواع مختلف نوع بستر در شکل ۶ نشان داده شده است. با افزایش سرعت جریان هنگامیکه تنش برشی کف از حد مجاز تجاوز کند، بر روی بستر ناهمواری های کوچک مثلثی شکل به نام ریبیل پدیدار می شود و با ازدیاد تنش برشی ابعاد این ناهمواری ها بزرگتر شده و به ناهمواری های مثلثی شکل بزرگتری به نام دیون تبدیل می گردد. با ازیاد تنش برشی جریان، در یک فاز انتقالی، این ناهمواری ها محو شده و کف بستر صاف و هوار می شود. با ازیاد مجدد تنش برشی ناهواری های مثلثی شکلی که به لحاظ شکل شبیه دیون ها بوده ولی تاج آن در خلاف حرکت دیون ها حرکت می کند بوجود می آید که به آن دیون معکوس^{۱۲} گویند. در نهایت در اعداد فرود بالا با تنش برشی زیاد، موج های شنی^{۱۳} بوجود می آید.



شکل ۶- شکل های مختلف بستر

^۹ Ripples

^{۱۰} Dunes

^{۱۱} Anti-dunes

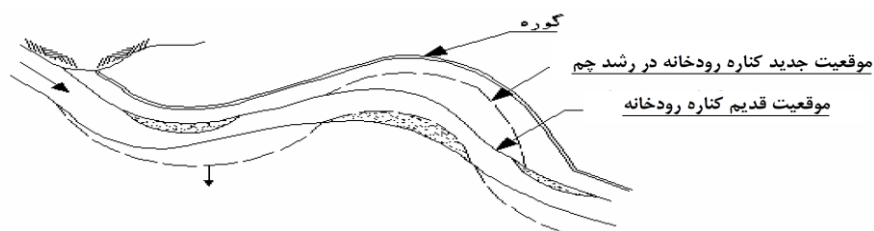
^{۱۲} Anti Dune

^{۱۳} Sand Waves

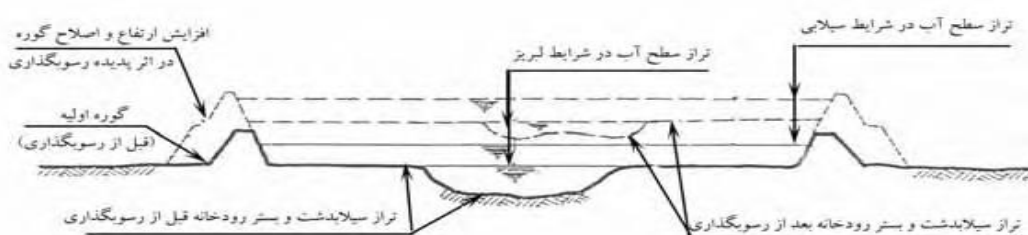
پیامدهای فرسایش و رسوبگذاری

رودخانه ها در اثر پدیده فرسایش و رسوبگذاری دستخوش تغییرات مستمر می‌باشند. شناخت چنین تغییرات برای اهداف ساماندهی و ایمن سازی رودخانه در مقابل نتیجه های به دست آمده دارای اهمیت فراوانی است در حالت طبیعی، فرسایش بستر منجر به ناپایداری کناره ها گردیده و این امر ریزش توده ای خاک و تغییر شکل مقطع هندسی رودخانه را به دنبال دارد. قوس رودخانه ها نیز در اثر فرسایش موضعی جابه جا شده و تأسیسات ساحلی را تهدید می کند. افت تراز بستر پایه های پل را عریان کرده و احتمال تخریب آن را افزایش می‌دهد. شکل ۷ تغییر مسیر رودخانه در اثر فرسایش قوس‌ها را به نمایش می‌گذارد. در پایین دست سازه های هیدرولیکی، اطراف پایه‌های پل و دماغه آبشکن‌ها نیز، فرسایش‌های موضعی سلامت و استحکام سازه را به مخاطره می‌اندازد. بسیاری از سازه های حفاظتی مانند دیواره های سیل بند، خاکریزها (گوره‌ها)، کف بندها، پوشش‌های کناره و کف و بدنه آبشکن‌ها در معرض آسیب دیدگی ناشی از فرسایش قرار دارند.

تأثیر رسوبگذاری بر رفتار رودخانه ها و نقش آن در فرایند ساماندهی نیز قابل توجه است. در مراحل اولیه اثر رسوبگذاری به صورت تثبیت بستر و پایداری کناره ها و سواحل رودخانه ظاهر می‌شود. اما با ادامه روند رسوبگذاری تراز بستر افزایش یافته و در نتیجه تغییراتی در ریخت شناسی رودخانه ها پدیدار می‌گردد که به نوبه خود بر عملکرد کارهای ساماندهی تأثیر می‌گذارد. رسوبگذاری ممتد و افزایش تراز بستر موجب عریض تر شدن بستر در اثر جریان رودخانه و به ویژه در مواقع سیلابی موجب سیل‌گیر شدن اراضی اطراف خواهد شد. در شکل ۸ نمونه ای از عکس العمل رودخانه و تغییر شکل مقطع عرضی ناشی از رسوبگذاری و تأثیر آن بر سازه های حفاظتی نشان داده شده است (مهندسین مشاور سازه پرداز ایران، ۱۳۸۰). ساخت پل و بوجود آمدن شرایط هیدرولیکی جدید به مرور زمان موجب انباشتن مواد رسوبی در بالادست سازه می‌شود. این پدیده بر افزایش تراز آب به خصوص در مواقع سیلابی مؤثر است.



شکل ۷- نمونه ای از فرسایش در خم رودخانه و تأثیر آن در جابجایی مسیر (پترسن، ۱۹۶۸)



شکل ۸- نمونه ای از عکس العمل رودخانه و تغییر شکل مقطع ناشی از رسوبگذاری

طبقه‌بندی جریان در رودخانه ها

جریان رودخانه ای با روش‌های مختلفی طبقه‌بندی می‌شوند. اگر زمان به‌عنوان معیار در نظر گرفته شود، جریان رودخانه ای به جریان دائمی (پایدار)^{۱۴} و غیردائمی (ناپایدار)^{۱۵} طبقه‌بندی می‌شود. اگر در یک سطح مقطع معلوم، ویژگی‌های جریان نسبت به زمان ثابت باقی بماند، جریان را دائمی گویند و اگر ویژگی‌های جریان نسبت به زمان تغییر کند، جریان غیردائم است.

¹⁴ steady

¹⁵ unsteady

اگر مکان به عنوان معیار لحاظ شود، جریانی را یکنواخت^{۱۶} گویند که ویژگی‌های جریان در طول و امتداد رودخانه ثابت باقی بماند. در غیر این صورت جریان غیریکنواخت^{۱۷} است. بر اساس تدریجی یا سریع بودن تغییرات پارامترهای جریان در طول رودخانه، جریان غیریکنواخت را می‌توان به ترتیب به جریان متغیر تدریجی و متغیر سریع طبقه‌بندی کرد.

انواع مختلف نیروهای اعمال شده بر جریان رودخانه ای بر رفتار هیدرولیکی جریان مؤثر است. عدد رینولدز^{۱۸} به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$R_e = \frac{4VR}{v} \quad (1-2)$$

که v لزجت سینماتیکی آب بوده و نشان‌دهنده نسبت نیروی اینرسی به نیروی لزجت عمل‌کننده بر جریان است. در اعداد رینولدز پایین، $Re < 500$ ، جریان شامل مجموعه‌ای منظم از لایه‌های سیال بوده که عموماً منطبق با شرایط مرزی می‌باشد. این نوع جریان به جریان لایه‌ای یا آرام^{۱۹} معروف است. اگر به جریان لایه‌ای یکنواخت رنگ اضافه شود، در امتداد یک خط مستقیم جریان خواهد یافت. هر آشفتگی که در جریان لایه‌ای ایجاد می‌شود، برای مثال به دلیل مرزهای نامنظم، نهایتاً توسط نیروهای لزجت مستهلک می‌گردد. برای $Re > 12500$ ، نیروهای لزجت برای مستهلک کردن آشفتگی‌های ایجاد شده در جریان کافی نمی‌باشند. آشفتگی‌های جزئی همیشه در جریان آب وجود داشته و در اعداد رینولدز بالا چنین آشفتگی‌هایی رشد کرده و در تمام منطقه‌ی حرکت پخش خواهد شد. چنین جریان‌هایی را جریان متلاطم یا آشفته^{۲۰} گویند. در این نوع جریان‌ها ذرات آب مسیرهای نامنظمی را دنبال کرده که پیوسته نیستند. یک حالت انتقال نیز بین حالت جریان متلاطم و آرام وجود دارد. باید این نکته را یادآور شد که محدودیت‌های ارائه شده برای حالت‌های آرام و متلاطم به هیچ وجه دقیق نیست. برای مثال تحت شرایط آزمایشگاهی، جریان لایه‌ای را می‌توان برای اعداد رینولدز خیلی بیشتر از ۵۰۰ حفظ کرد. با این وجود، تحت بیشتر شرایط طبیعی و عملی کانال باز، جریان متلاطم است.

نسبت نیروی اینرسی به نیروی ثقل اعمال شده بر جریان توسط عدد بی بعد فرود^{۲۱} ارائه گردیده و به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$F_r = \frac{V}{\sqrt{gD}} \quad (2-2)$$

که g شتاب ثقل می‌باشد. زمانی که $F_r = 1$ جریان بحرانی، اگر $F_r < 1$ جریان زیربحرانی و هنگامی که $F_r > 1$ جریان فوق بحرانی است. رفتار هیدرولیکی جریان کانال باز به طور بسیار چشمگیری وابسته به بحرانی، زیربحرانی یا فوق بحرانی بودن جریان است.

معادلات آبهای کم عمق

با توجه به استفاده از معادلات یک بعدی آبهای کم عمق در این پژوهش، در این بخش به اختصار این معادلات معرفی می‌شود. در مدل سازی جریان رودخانه ها و کانال های روباز که فشار غیر هیدرواستاتیکی حاکم است؛ اغلب معادلات ناویر استوکس سه بعدی مورد استفاده قرار می گیرد. مزیت این مدل این است که می تواند جریان در اعداد رینولدز واقعی در هندسه های پیچیده را پیشبینی کند. اما حل معادلات ناویر استوکس در مقیاس های بزرگ زمانی و مکانی به دلیل هزینه ی بالای محاسباتی مشکل می باشد. به منظور رفع این مشکل ساده سازی های مشخصی بر این سیستم معادلات اعمال شده است. با متوسط گیری

¹⁶ uniform

¹⁷ Non-uniform

¹⁸ Reynolds

¹⁹ laminar

²⁰ turbulent

²¹ Froude

جریان ها در زمان، معادلات معروف به معادلات ناویر استوکس متوسط گیری شده رینولدز (RANS) بدست آمده که در این معادلات تاثیرات آشفتگی وابسته به جریان اصلی است. مدل RANS به طور وسیعی در شبیه سازی جریان مورد استفاده قرار گرفته است؛ اما هنوز از نظر محاسباتی هزینه زیادی را به خود اختصاص می دهد. بعضی مواقع، در موقعیت هایی که جریان مقیاس های خیلی بزرگتر در سطح افقی نسبت به جهت عمودی دارد، مولفه مومنتوم در جهت عمودی ناچیز است. در این حالت با انتگرال گیری در عمق، معادلات ناویر استوکس را می توان به معادلات آبهای کم عمق دو بعدی ساده کرد. این معادلات در حالتی که عمق آب در مقایسه با مقیاس ها در صفحه ی افقی نسبتاً کم است؛ هیدرودینامیک جریان را به خوبی تشریح می کند. معادلات آبهای کم عمق جزئی معادلات دیفرانسیل جزئی (PDES) هذلولی وابسته به زمان می باشد.

به منظور فهم محدودیتهای موجود در این معادلات بهتر است مراحل توسعه آن از مبانی اولیه دنبال شود. با اعمال قانون دوم نیوتن بر یک جزئی سیال معادلات ناویر استوکس حاصل شده که رفتار فیزیکی سیالات نیوتنی را در زمینه های مختلف به طور دقیقی ارائه می کند. در تشریح حالت های خاصی از جریان سیال، فرضیاتی را می توان به منظور کاهش پیچیدگی معادلات کامل ناویر استوکس اعمال کرد. معادلات ۲-۳، ۲-۴ و ۲-۵ جریان آب سه بعدی با فرض توزیع فشار هیدروستاتیکی و استفاده از متوسط گیری رینولدز را تشریح می کند:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} = -g \frac{\partial \eta}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\nu \frac{\partial u}{\partial z} \right) + f_v \quad (3-2)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} = -g \frac{\partial \eta}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\nu \frac{\partial v}{\partial z} \right) - f_u \quad (4-2)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (5-2)$$

در این معادلات $u(x,y,z,t)$ ، $v(x,y,z,t)$ و $w(x,y,z,t)$ به ترتیب مولفه های سرعت در راستای x ، y و z ، زمان t ، $\eta(x,y,z,t)$ ارتفاع سطح آزاد اندازه گیری شده از سطح آب توسعه نیافته، f پارامتر کوریولیس، μ ضریب لزجت گردابی افقی و ν ضریب لزجت گردابی عمودی می باشد.

با فرض مخلوط شدن مناسب ستون آب و کوچک بودن عمق جریان نسبت به عرض آن می توان از متغیرهای اصلی معادلات مذکور در راستای عمودی انتگرال گیری کرد. با استفاده از این انتگرال گیری عمودی مطابق معادلات ۲-۶ و ۲-۷ سرعت در راستای x ، $U(x,y,t)$ و سرعت در راستای y ، $V(x,y,t)$ تشکیل می شود. این انتگرال گیری بین بستر، که با $-h$ داده شده و h عمق توسعه نیافته می باشد، و سطح آب، η ، که بر روی عمق توسعه نیافته قرار دارد، انجام می شود.

$$U = \left(\frac{1}{H} \right) \int_{-h}^{\eta} u dz \quad (6-2)$$

$$V = \left(\frac{1}{H} \right) \int_{-h}^{\eta} v dz \quad (7-2)$$

انتگرال گیری عمودی معادلات مومنتوم محافظه ای در معادلات ۲-۳ و ۲-۴ نیازمند شرایط مرزی در بالا و پایین ستون آب است. ضریب تنش باد، γ_T ، و سرعت های باد، U_a و V_a ، مطابق معادلات ۲-۸ این شرایط مرزی را در سطح آب فراهم می کند. شرایط مرزی در کف نیز با فرمول مانینگ - شزی، معادله ۲-۹ که یک ضریب اصطکاک شزی، C_z ، را اعمال می کند، تشریح می شود:

²² Reynolds-Averaged Navier-Stokes

²³ Partial Differential Equation

$$\tau_x^w = \nu \frac{\partial u}{\partial z} = \gamma_T (U_a - U) \quad \tau_y^w = \nu \frac{\partial v}{\partial z} = \gamma_T (V_a - V) \quad (۸-۲)$$

$$\nu \frac{\partial u}{\partial z} = \frac{g \sqrt{U^2 + V^2}}{Cz^2} U \quad \nu \frac{\partial v}{\partial z} = \frac{g \sqrt{U^2 + V^2}}{Cz^2} V \quad (۹-۲)$$

تجزیه و تحلیل یافته‌ها

جریان ایده‌ال زیربحرانی بر روی برآمدگی

کانالی به طول ۲۵ متر و عرض ۱ متر برای بررسی جریان زیربحرانی بر روی یک برآمدگی در نظر گرفته شده است. کانال مورد نظر دارای سطح مقطع مستطیلی و بدون اصطکاک است. شکل واقعی بستر در معادله ۴-۱ نشان داده شده است. این حالت تست به عنوان معیاری برای بررسی توانایی مدل عددی برای هر دو حالت مسائل رو به جلو و روبه عقب در جریان های آب کم عمق ماندگار یک بعدی می باشد.

$$z = \begin{cases} 0 & x < 8 \text{ and } x > 12 \\ 0.2 - 0.05(x-10)^2 & 8 \leq x \leq 12 \end{cases} \quad (۴-۱)$$

جریان زیربحرانی با دبی $Q = ۴/۴۲ \text{ m}^3/\text{s}$ و شرط مرزی بالادست $z(0) = 0$ است. مقادیر سرعت سطح آزاد به طور مستقیم معلوم بوده؛ اما به طور غیرمستقیم با استفاده از رابطه‌ی بین سرعت سطح آزاد و سرعت متوسط‌گیری شده در عمق آن را بدست آورد. برای کانال بدون اصطکاک مورد بحث، رابطه‌ی سرعت طبق معادله ۳-۳ با مقدار مشخص α داده شده است. اما با جایگزینی معادله ۳-۳ در معادله ۱۲-۳ برای α ، سرعت سطح آزاد با سرعت متوسط‌گیری شده در عمق جایگزین می شود. انتخاب مقدار نسبت سرعت α برای این تست تاثیری بر نتایج ندارد زیرا با جایگزینی دوتایی در این روند ناپدید می شود؛ یعنی جایگزینی u_s معادله ۱۲-۳ با αu_s پارامتر α در معادله ۲-۴ حذف می گردد. بنابراین برای کانال بدون اصطکاک ($n = 0$) معادله ۱۲-۳ را می توان به صورت زیر بازنویسی کرد:

$$z_i = z_0 + \frac{1}{2g} (u_0^2 - (u)_i^2) + q_0 \left(\frac{1}{u_0} - \frac{1}{(u)_i} \right) \quad (۴-۲)$$

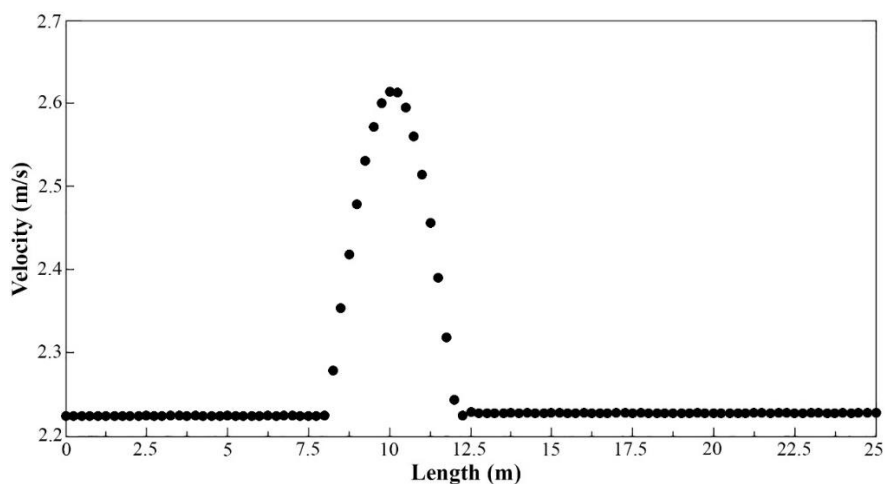
با حل مسئله مستقیم برای بستر تعریف شده توسط معادله ۴-۱، می توان عمق و سرعت متوسط‌گیری شده در عمق را محاسبه کرده و از یک رابطه‌ی تابعی معلوم بین سرعت متوسط و سرعت سطح آزاد، سرعت سطح آزاد را بدست آورد. این داده های آزمایشگاهی ساختگی را می توان به عنوان ورودی جهت مساله معکوس مورد استفاده قرار داد. جهت محاسبات پیشبینی بستر، گام مکانی $\Delta x = ۰/۲۵ \text{ m}$ همراه با مقادیر شرایط مرزی مورد استفاده قرار گرفت.

در شکل ۴-۱ پروفیل طولی سرعت متوسط‌گیری شده در عمق داده شد است. این سرعت یکی از متغیرهای ورودی برای پیشبینی توپوگرافی بستر می باشد.

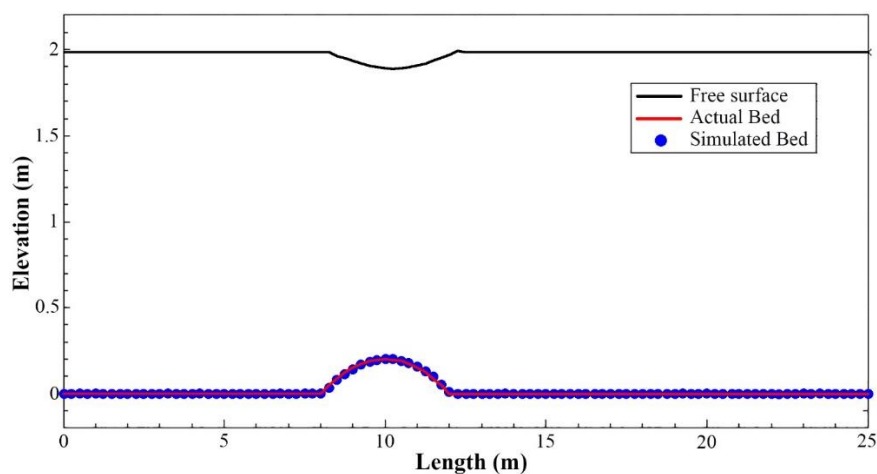
از شکل ۴-۲ می توان مشاهده کرد که توپوگرافی بستر پیشبینی شده به طور کامل با توپوگرافی واقعی بستر منطبق است. این نتیجه نشان می دهد که روش پیشنهادی توانایی شبیه سازی بسترهای رودخانه در جریان های زیربحرانی از سرعت سطح آزاد و سرعت متوسط‌گیری شده در عمق، که از اندازه گیری های میدانی بدست می آیند؛ را دارد.

به منظور در نظر گرفتن خطاهای اندازه گیری موجود و شبیه سازی تاثیرات این خطاها در داده های میدانی، به طور میانگین ۵ درصد نوسان برای سرعت جریان در نظر گرفته شد. مطابق شکل ۴-۳ ابزار نرم کننده متحرک ۵ نقطه ای در نرم افزار متلب برای نرم کردن داده های دارای نوسان در همه ی مقاطع آنالیز انجام گرفته است.

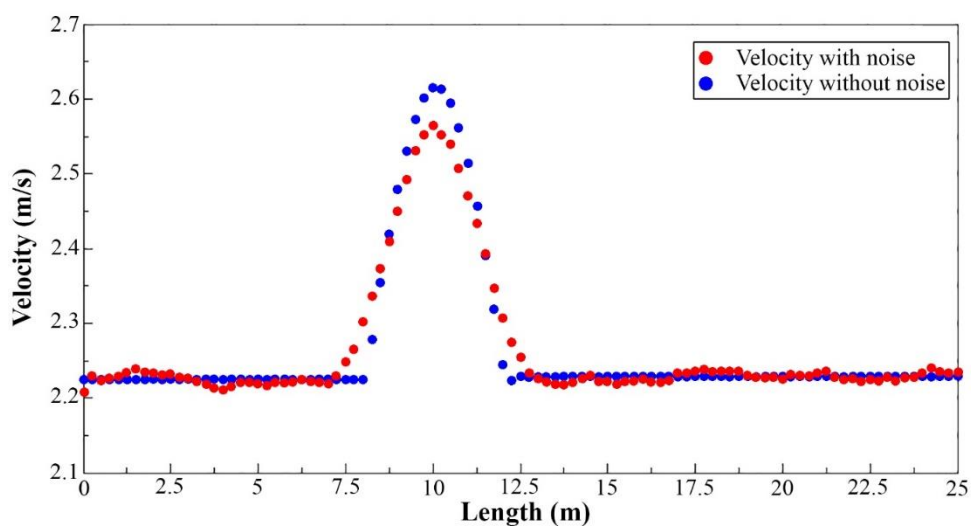
شکل ۴-۴ مقایسه ی بین شکل بستر واقعی و پیشبینی شده را نشان می دهد. در این شکل، تفاوت نسبی بستر پیشبینی شده ناشی از وجود نوسان ۴/۵ درصد است. می توان مشاهده کرد که در روند شبیه سازی نوسانات قدرت نگرفته و الگوریتم نتایج قابل قبولی را ارائه می کند.



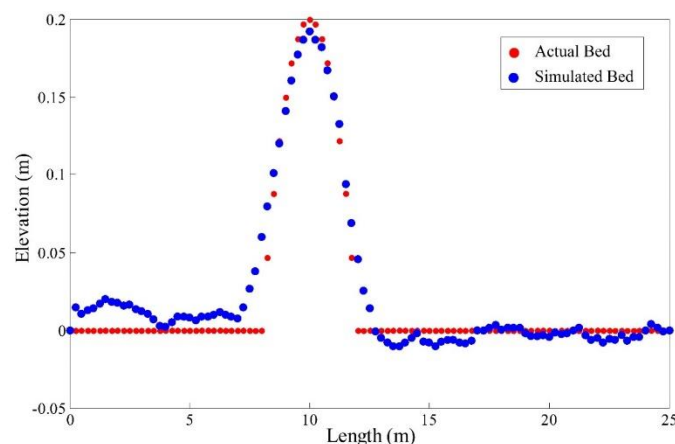
شکل ۴-۱- تغییرات سرعت متوسط‌گیری شده در عمق در طول کانال



شکل ۴-۲- مقایسه‌ی پروفیل طولی بستر واقعی و شبیه‌سازی شده برای حالت جریان زیربحرانی



شکل ۴-۳- پروفیل سرعت در طول کانال در حالت با و بدون نویز



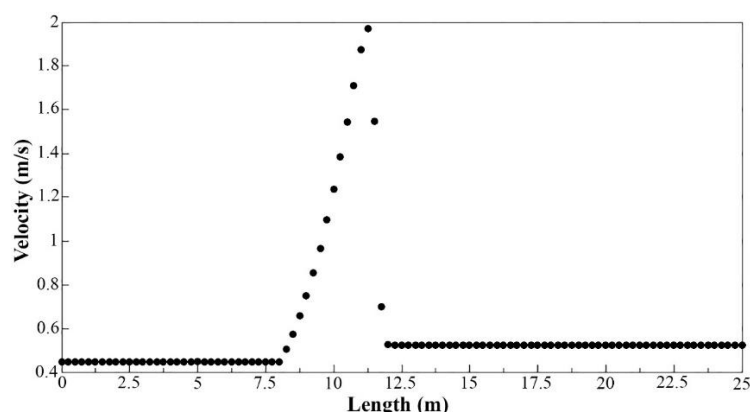
شکل ۴-۴- مقایسه پروفیل طولی بستر واقعی و پیشبینی شده بدست آمده از داده های دارای نوسان سطح آزاد

جریان ایده ال همزمان زیر و فوق بحرانی بر روی برآمدگی

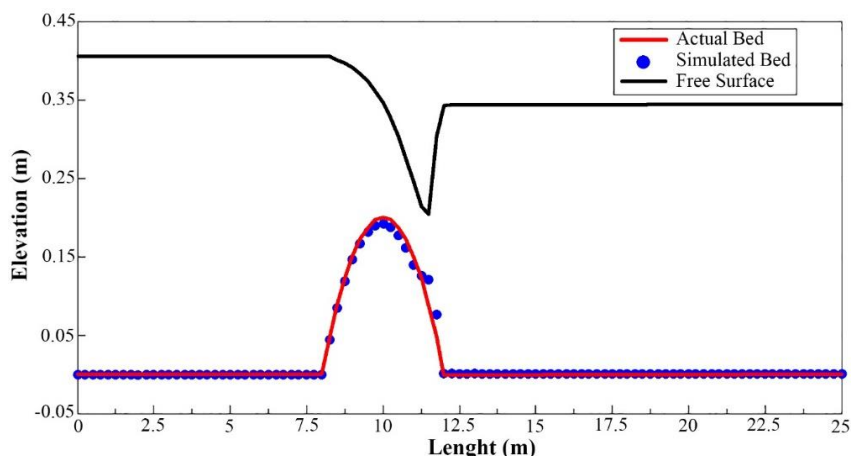
در این حالت از نتایج مدل شاهرخی و محبی گاکیه (۱۳۹۸) استفاده شده و توپوگرافی بستر مشابه حالت قبل است. دبی جریان اعمال شده $Q = 0.18 \text{ m}^3/\text{s}$ و بستر بالادست به صورت $z(0) = 0$ تعریف شده است. میدان سرعت در ناحیه ی محاسباتی نیز در شکل ۴-۵ نشان داده شده است. این بررسی به منظور مطالعه ی عملکرد روش حل عددی در روند پیشبینی پروفیل یستر تحت شرایط جریان همزمان زیر و فوق بحرانی انجام گرفته است. در این مدل گام زمانی $\Delta x = 0.25 \text{ m}$ مورد استفاده قرار گرفته و به منظور ضبط پرش هیدرولیکی، بر خلاف حالت زیربحرانی بررسی شده، روند پیشبینی از هر دو جهت شرایط مرزی انجام گرفته است.

در شکل ۴-۶، توپوگرافی بستر کانال پیشبینی شده با شکل واقعی بستر مورد مقایسه قرار گرفته است. نتایج نشان می دهد که شکل و اندازه برآمدگی با اختلاف ناچیز قابل قبولی شبیه سازی شده است.

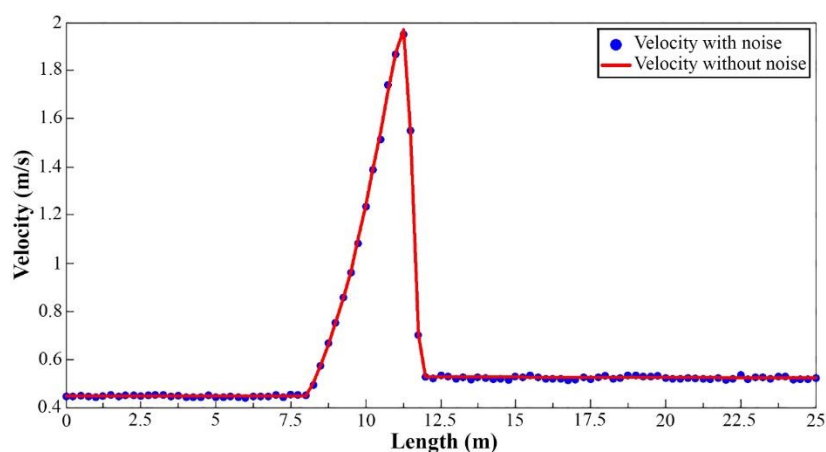
به منظور بررسی تاثیر نوسان در داده های سرعت سطح آزاد، مشابه حالت جریان زیربحرانی قبل، ۵ درصد نوسان بر اساس سرعت متوسط بر داده ها اعمال شده است. مقایسه پروفیل سرعت در حالت با و بدون نوسان در شکل ۴-۷ نشان داده شده است.



شکل ۴-۵- تغییرات سرعت متوسط گیری شده در عمق در طول کانال در حالت جریان همزمان فوق و زیربحرانی

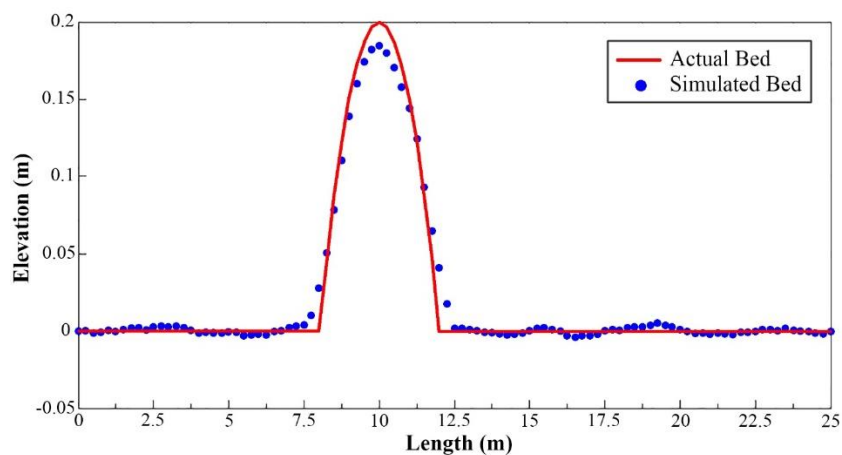


شکل ۴-۶- مقایسه‌ی پروفیل طولی بستر واقعی و شبیه‌سازی شده برای حالت جریان همزمان فوق و زیر بحرانی



شکل ۴-۷- پروفیل سرعت متوسط‌گیری شده در عمق در طول کانال در حالت با و بدون نوسان

مقایسه‌ی شکل بستر پیش‌بینی شده و واقعی با استفاده از داده‌های سطح آزاد دارای نوسان در شکل ۴-۸ نشان داده شده است. مطابق شکل مذکور، انطباق خوبی بین نتایج وجود دارد. می‌توان مشاهده کرد که توپوگرافی بستر بدون قدرت گرفتن نوسانات به خوبی پیش‌بینی شده است. انحراف حداکثر در پیش‌بینی بستر ناشی از وجود نوسان در سرعت سطح آزاد ۵/۵ درصد است. این نتیجه با میزان نوسان معرفی شده برای داده‌های تراز سطح آزاد قابل مقایسه است.

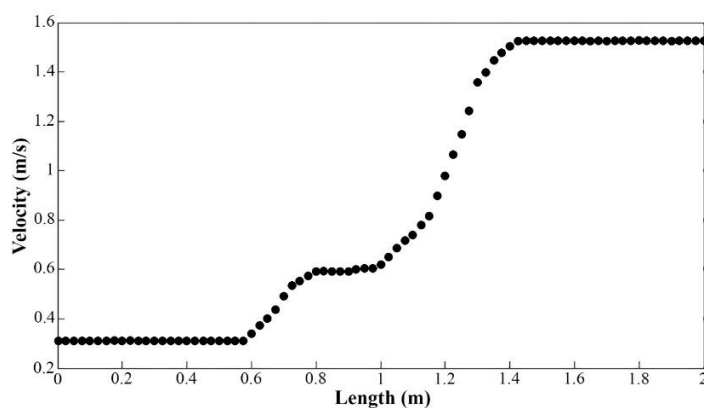


شکل ۴-۸- مقایسه‌ی تراز بستر واقعی و شبیه‌سازی شده در حالت جریان همزمان فوق و زیر بحرانی از داده‌های دارای نوسان

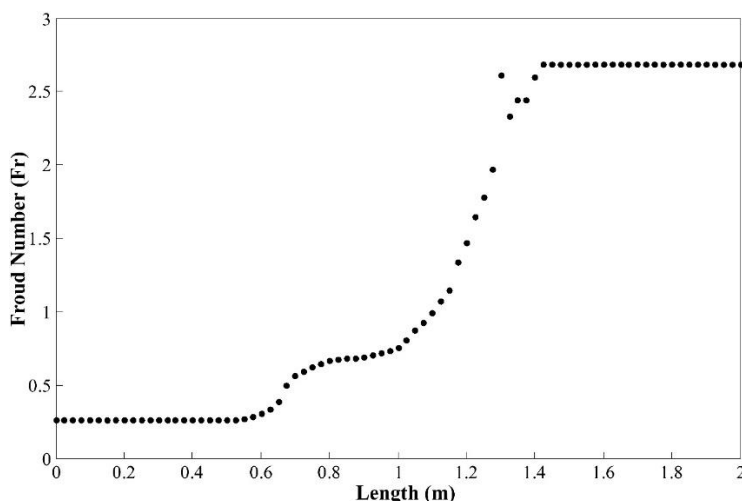
جریان بر روی یک پله

یک سری آزمایش به منظور اندازه گیری داده های سطح آزاد برای یک جریان دائم مشخص در فلوم افقی در دیپارتمان مهندسی عمران دانشگاه کانترپوری انجام گرفته است. فلوم از یک کانال با سطح مقطع مستطیلی به عرض 0.56 m تشکیل شده است. شکل بستر با پروفیل ثابت بر روی بستر مسطح کانال سوار شده تا سطح ناهموار کف را ایجاد کند. ابتدا دبی حالت ثابتی در کانال برقرار کرده و تراز سطح آزاد در جهت جریان با عمق سنج اندازه گیری می شود.

این بخش از نتایج این آزمایش ها جهت تعیین توانایی روش شبه تحلیلی و عددی برای پیشبینی توپوگرافی بستر کانال استفاده شده است. یک فوم آزمایشگاهی افقی جهت تعیین رفتار جریان بر روی یک برآمدگی با شکل ثابت در عرض به صورت یک بعدی شبیه سازی شده است. دبی و عمق جریان ماندگار در مرز بالادست به ترتیب $0.25\text{ m}^3/\text{s}$ و 144 mm می باشد. مقدار ضریب زبری مانینگ مورد استفاده نیز $n = 0.01$ می باشد. مقادیر عدد فرود (Fr) محاسبه شده دارای دامنه ای از 0.26 تا 2.74 در ورودی و خروجی جریان است. در شرایط موجود سرعت متوسط گیری شده در عمق از داده های اندازه گیری شده ی سطح آزاد و عمق جریان محاسبه شده است. سرعت متوسط گیری شده در عمق در شکل ۴-۹ نشان داده شده و توزیع عدد فرود در طول کانال را می توان در شکل ۴-۱۰ مشاهده کرد. این مطالعه آزمایشگاهی نشان می دهد که جریان از هر دو رژیم زیر و فوق بحرانی برخوردار است.



شکل ۴-۹- تغییرات سرعت متوسط گیری شده در عمق در طول کانال

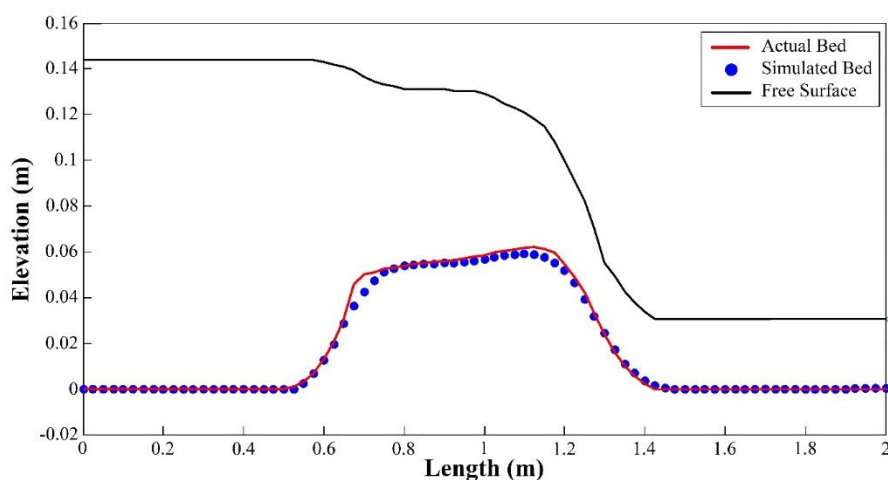


شکل ۴-۱۰- تغییرات عدد فرود جریان در طول کانال

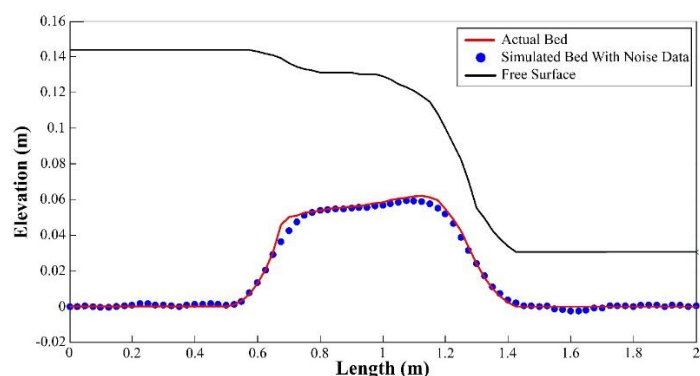
با استفاده از سرعت سطح آزاد محاسبه شده و شرایط مرزی اندازه گیری شده، توپوگرافی بستر زیر سطح آب به صورت عددی با معادله ۳-۱۰ قابل تعیین است. بستر پیشبینی شده از این حالت انطباق خوبی با بستر واقعی که از مطالعه آزمایشگاهی بدست آمده دارد. انحراف اندک نتایج نیز ناشی از تقریب ضریب زبری و خطاهای اندازه گیری در آزمایش ها می باشد. به روشنی

در شکل ۴-۱۱ می توان مشاهده کرد که بستر واقعی به خوبی از مقادیر معلوم سرعت که از داده های آزمایشگاهی تعیین شده، شبیه سازی شده است. به منظور بررسی توانایی پیشبینی روش از داده های دارای نوسان، ۵ درصد نوسان بر اساس سرعت سطح آزاد بر مدل اعمال شده است.

مطابق شکل ۴-۱۲، توپوگرافی بستر کانال به خوبی از داده های دارای نوسان سرعت سطح آزاد پیشبینی شده است. انطباق خوب بین شکل بستر واقعی و شبیه سازی شده نشان از رفتار مناسب تکنیک پیشنهادی می باشد.



شکل ۴-۱۱- مقایسه ی پروفیل طولی بستر واقعی و شبیه سازی شده

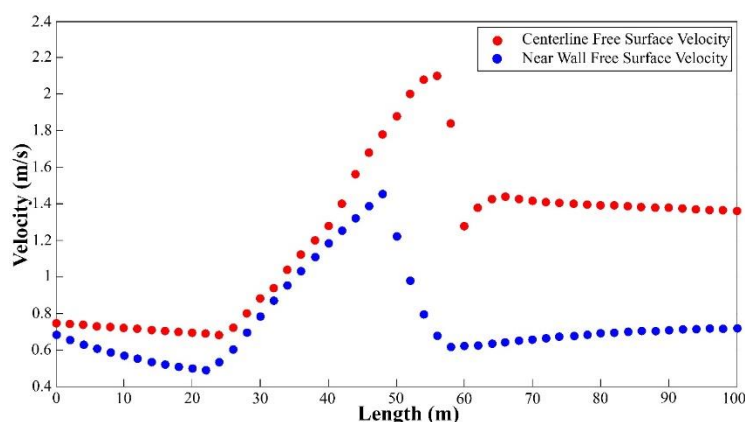


شکل ۴-۱۲- مقایسه ی پروفیل طولی بستر واقعی و شبیه سازی شده با داده های دارای نوسان

جریان بر روی یک پله در کانال شیبدار

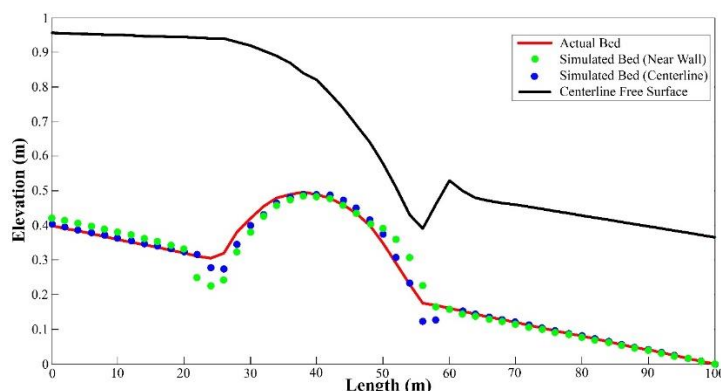
در این بخش از داده های ارائه شده توسط هونورت و مونیر (۲۰۰۹)، که سرعت های سطح آزاد را برای یک شکل مشخصی از بستر اندازه گیری کردند، استفاده شده است. این آزمایش ها در یک کانال مستطیلی به طول ۱۰۰ و عرض ۱۶ متر با شیب طولی ۰/۴ درصد انجام گرفته که برآمدگی با ارتفاع ۰/۲۵ و طول ۳۰ متر در فاصله ی $x = 40 \text{ m}$ از ابتدای کانال نصب شده است. وجود این برآمدگی شتابی را در دامنه ی $25 \leq x \leq 60$ در جریان ایجاد می کند. دبی ثابت $8 \text{ m}^3/\text{s}$ برای مرز ورودی (۰) در نظر گرفته شده است. مرزهای $y = 0$ و $y = 16$ به صورت دیوار در نظر گرفته شده است. مقدار ضریب زبری مانینگ در جهت عرضی متغیر بوده اما برای بخش مرکزی (یعنی در ۸ متر وسط کانال) $n = 0.02$ در نظر گرفته شده و مقدار آن به طور خطی از $n = 0.02$ تا مقدار حداکثر $n = 0.04$ در دیواره های جانبی تغییر می کند. در پژوهش هونورت و مونیر (۲۰۰۹) سرعت چندین ردیاب ذره بر روی یک نمودار بدون تعیین موقعیتشان در ناحیه جریان، رسم شده است. از آنجاییکه ناحیه ی جریان دارای ضریب زبری متغیر بوده؛ از اینرو انتخاب یک پروفیل جریان و یک مقدار ضریب زبری غیر ممکن بود. بنابراین تصمیم بر این گرفته شد که دو پروفیل سرعت که بیشترین تفاوت را با یکدیگر داشتند (احتمالاً یکی مربوط به پروفیل طولی نزدیک دیوار و دیگری مربوط به خط مرکزی است) انتخاب شده تا به عنوان نماینده ی همه ی پروفیل ها برای ورودی مدل پیشنهادی در نظر

گرفته شود. برای الگوریتم شبیه سازی یک بعدی پژوهش حاضر، از مقادیر ضریب زبری $\Pi = 0.2$ برای پیشبینی توپوگرافی بستر از سرعت سطح آزاد خط مرکزی کانال و از $\Pi = 0.4$ برای شبیه سازی شکل بستر از پروفیل سرعت سطح آزاد نزدیک دیوار استفاده شده است. سرعت های سطح آزاد در نزدیکی دیوار و خط مرکزی در طول کانال در شکل ۴-۱۳ نشان داده شده است.



شکل ۴-۱۳- تغییرات سرعت سطح آزاد جریان در امتداد خط مرکزی و نزدیک دیوار جانبی کانال

پروفیل طولی سرعت نشان داده شده در شکل ۴-۱۳ و مقدار $\alpha = 1$ ارائه شده توسط هونورت و مونیر (۲۰۰۹) به عنوان متغیرهای ورودی برای مدل پیشنهادی مورد استفاده قرار گرفت. مقایسه‌ی بستر شبیه سازی شده با بستر واقعی در شکل ۴-۱۴ نشان داده شده است. می توان مشاهده کرد که حداکثر اختلاف بین شکل بستر واقعی و پیشبینی شده از سرعت سطح آزاد خط مرکزی کمتر از ۵ درصد عمق جریان است. اما هنگامی که سرعت سطح آزاد نزدیک دیوار در نظر گرفته می شود؛ این اختلاف بیش از ۱۲/۵ درصد عمق جریان است. دلیل اصلی این تفاوت در نزدیک دیوار ناشی از این واقعیت است که جریان اصطکاک بالاتری را به دلیل مقادیر بیشتر ضریب مانینگ تجربه می کند. به علاوه، تغییر عرضی ضریب زبری منجر به تغییرات عرضی سرعت شده که ماهیت جریان را دو بعدی کرده و مدل یک بعدی این پژوهش نمی تواند آن را لحاظ کند. بنابراین در این حالت خاص جریان دو بعدی، سرعت نزدیک دیوار نمی تواند نشان دهنده‌ی متوسط سرعت سطح آزاد جریان باشد.



شکل ۴-۱۱- مقایسه‌ی پروفیل طولی بستر واقعی و شبیه سازی شده

نتیجه گیری

از بررسی های انجام گرفته بر روی مدل یک بعدی پیشنهادی می توان نتیجه گرفت که توپوگرافی بستر کانال را می توان از سرعت سطح آزاد پیشبینی کرد به شرطی که دبی جریان در حالت ماندگار همراه با عمق جریان در مرزها و ضریب زبری مانینگ معلوم باشد. همچنین باید تاکید کرد که دانست رابطه‌ی بین سرعت سطح آزاد و سرعت متوسط گیری شده در عمق ضروری است. اگر این امکان وجود نداشته باشد؛ روش پیشنهادی هنوز کاربردی بوده اما با جایگزینی سرعت سطح آزاد با سرعت

متوسط‌گیری شده در عمق؛ اولویت استفاده از سرعت سطح آزاد به دلیل اندازه‌گیری ساده تر آن نسبت به سرعت متوسط‌گیری شده در عمق می باشد.

در حالت جریان زیربحرانی بستر کانال با خطای جزئی شبیه سازی می شود؛ اما با حضور پرش هیدرولیکی، اختلاف بین بستر واقعی و پیشبینی شده نسبتاً افزایش می یابد. در واقع خطاها با خارج شدن جریان ها از حالت یک بعدی زیاد می شوند. با اعمال ۵ درصد نوسان (بر اساس سرعت متوسط‌گیری شده در عمق)، نتایج نشان می دهد که توپوگرافی بستر کانال را می توان با اختلالات اندکی پیشبینی کرد. این نتیجه نشان می دهد که در روند شبیه سازی مدل پیشنهادی نوسانات تقویت نمی شوند.

در این پژوهش یک تکنیک عددی جدید به منظور شبیه سازی توپوگرافی بستر جریان کم عمق یک بعدی از مقادیر معلوم سرعت متوسط‌گیری شده در عمق یا سرعت سطح آزاد ارائه گردید. اگر سرعت سطح آزاد مورد استفاده قرار گیرد؛ رابطه ای که سرعت سطح آزاد را به طور مستقیم به سرعت متوسط‌گیری شده در عمق مرتبط می کند باید مشخص باشد. این امر با انتگرال گیری حالت ماندگار یک بعدی معادلات سنت و نانت میسر بوده و منجر به یک معادله انتگرالی شده که به طور ضمنی توپوگرافی بستر به صورت تابعی از سرعت سطح آزاد یا متوسط‌گیری شده در عمق، نسبت سرعت و ضریب اصطکاک مانینگ بدست می آید. یک روش ساده‌ی پیمایش همراه با قانون دوزنقه برای حل این معادله انتگرالی ارائه شد. یکی از مزایای ویژه این فرمولبندی انتگرالی، بر اساس مطالعات آزمایشگاهی موجود، این است که نوسانات موجود در داده های ورودی مثل سرعت سطح آزاد، در روند شبیه سازی تقویت نمی شوند. این قابلیت در یک سری از مسائل معیار اثبات گردید. در ابتدای روند تحقیق پروفیل سرعت سطح آزاد جریان بدست آمده از حل مستقیم معادلات حاکم توسط محققان پیشین (شاهری و محبی گاکیه، ۱۳۹۸) به عنوان داده های ورودی مدل پیشنهادی پژوهش حاضر استفاده شد. بررسی های بعدی نیز بر اساس داده های آزمایشگاهی صورت گرفت. انطباق خوب بین شکل بستر واقعی و شبیه سازی شده حتی برای داده های آزمایشگاهی که اندکی نوسان داشتند؛ نشان از رفتار مناسب مدل پیشنهادی در روند حل است. باید توجه داشت که در مقایسه الگوریتم های پیشبینی بر اساس تکنیک های بهینه سازی، روش پیشنهادی سریعتر، دقیقتر و در اجرا ساده تر می باشد. حتی برای حالات سختی که جریان همزمان زیر و فوق بحرانی وجود دارد (مثل پرش هیدرولیکی) مدل پیشنهادی شکل بستر را با دقت قابل قبولی پیشبینی می کند.

پیشنهادهای

پیشنهادهای زیر جهت ادامه تحقیق ارائه می گردد:

- در این تحقیق از مدلی یک بعدی به منظور پیشبینی پروفیل طولی بستر جریان استفاده شده است. توصیه می شود جهت مشاهده تغییرات عرض بستر از مدل دو بعدی استفاده گردیده و یا جهت دستیابی به نتایج دقیقتر از مدل های سه بعدی استفاده گردد.

- پیشنهاد می شود نتایج مدل پیشنهادی با نتایج حاصل از مدل های عددی فرسایش و ابشستگی مورد مقایسه قرار گیرد. به منظور ساده سازی، معادلات آشفتگی به مدل وارد نشده است. توصیه می شود جهت دقت بهتر نتایج، مدل های آشفتگی در معادلات حاکم وارد شده و تاثیر آنها بر دقت نتایج مورد ارزیابی قرار گیرد.

منابع و مراجع

- [1] C. Heining and N. Aksel, Bottom reconstruction in thin-film flow over topography: Steady solution and linear stability. *Physics of Fluids*, 2009. 21.
- [2] Colombo O (1981) Numerical methods for harmonic analysis on the sphere, Report No.310, Dept. Geod. Sci and Surv., Ohio State Univ., Columbus, Ohio.
- [3] Comiti, F., Da Canal, M., Surian, N., Mao, L., Picco, L. & Lenzi, M. A., Channel adjustments and vegetation cover dynamics in a large gravel bed river over the last 200 years, *Geomorphology*, Vol. 125 (1): 147-159, 2011.
- [4] Gibson, S. 2010. Mobile Bed Modeling of the Cowlitz River Using HEC-RAS: Assessing Flooding Risk and Impact Due to System Sediment. 2nd Joint Federal Interagency Conference, Las Vegas, NV. 9 pp
- [5] H. Roux and D. Dartus. Estimating hydraulic parameters and geometric characteristics of a river from remote sensing data using optimization methods in The Second International Conference on Fluvial Hydraulics 2004. Napoly, Italy A. A. BALKE
- [6] Haghiabi, A.H. and E. Zaredehdasht. 2012. Evaluation of HEC-RAS Ability in Erosion and Sediment Transport Forecasting. *World Applied Sciences Journal*, 17: 1490-1497.
- [7] Hemphill, R.W. and M.E. Bramley, (1989) "Protection of river and canal banks. "CIRIA, Butter Worths, London.
- [8] Henderson, F.M., (1966). "Open Chennel Flow, Ch. On Sediment transport", Mc Millan Publishing Co, New York.
- [9] Hooke, J. M., Temporal variations in fluvial processes on an active meandering river over a 20-year period, *Geomorphology*, Vol. 100: 3-13, 2008.
- [10] Hosseini, S.A. and N. Javaheri. 2010. Locating Appropriate Points for Harvest River Sediment. 9th Iranian Hydraulic Conference. Tarbiat Modarres University, 7 pp (In Persian).
- [11] J. S. Lee and P.Y. Julein, Electromagnetic wave surface velocimetry. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2006. 132: p. 146-153 .
- [12] Jansen, p.ph., (1983), principles of rivers Engineering, pitman, pub.co., London.
- [13] Linsley, R.K, (1975), "Hydrology for engineers ", Mc Graw – Hill Book Co. U.S.A.
- [14] M. Honnorat, J. Monnier, and F.-X. LeDimet, Lagrangian data assimilation for river hydraulics simulations. *Computing and Visualization in Science*, 2009. 12: p. 235-246.
- [15] M. Muste, I. Fujita, and A. Hauet, Large-scale particle image velocimetry for measurements in riverine environments. *Water Resource Research*, 2008. 44.
- [16] M. Muste, J. Schöne, and J.-D. Creutin, Measurement of free-surface flow velocity using controlled surface waves. *Flow Measurement and Instrumentation*, 2005. 16: p. 47-55 .
- [17] M. Sellier, Substrate design or reconstruction from free surface data for thin film flows. *Physics of Fluids*, 2008. 20.(۶)
- [18] Nagy, A. C., Toth, T., Vajk, O. & Sztano, O., Erosional scours and meander development in response to river engineering: middle Tisza region, Hungary, *Proceedings of the Geologists Journal*, Vol. 121 (4): 238– 247, 2010.
- [19] Peyro, M., M. Ghomeysi and E. Nohani. 2012. Evaluating the River Bed Sediment from HECRAS. 4 Numerical Model. (Case Study: Beshar River, Kohgiluyeh and Boyer-Ahmad Province). National Conference on Inter Basin Water Transfer. Islamic Azad University of Shahrekord, 9 pp.
- [20] R. Balachandar, K. Hagel, and D. Blakely, Velocity distribution in decelerating flow over rough surfaces. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 2002. 29: p. 211-221.

- [21] R.A. Yahia-Djouadi, D. Hernane-Boukari, and D. Teniou, A study of the inverse of a free surface problem. *Abstract and Applied Analysis*, 2005. 2005(2): p. 159-171.
- [22] R.C. Hildale and D. Raff, Assessing the ability of airborne LiDAR to map river bathymetry. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2008. 33: p. 773-783.
- [23] R.M. Westaway, S.N. Lane, and D.M. Hicks, The development of an automated correction procedure for digital photogrammetry for the study of wide, shallow, gravel-bed rivers. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2000. 25: p. 209-225.
- [24] Hey, R.D., (1986), "River response to hydraulic structures", Paris, UNESCO.
- [25] Roshun, H., G. Vahabzadeh, K. Solaimani and R. Farhadi. 2013. Simulation of River Hydraulics Behavior Using HEC-RAS Model in GIS Environment (Case Study: Beshar River, Kohgiluyeh and Boyer-Ahmad Province). *Journal of Watershed Management Research*, 4: 70-84 (In Persian).
- [26] Simons, D.B., & Senturk, F., (1992), "Sediment transport technology", Book Crafters Inc., Chelsea, Michigan, USA.
- [27] V. Weitbrecht, G. Kühn, and G.H. Jirka, Large scale PIV-measurements at the surface of shallow water flows. *Flow Measurement and Instrumentation* 2002. 13: p. 237-245.
- [28] Van Vuren S., Van Der Klis H., De Vriend H. 2002. Large-scale floodplain lowering along the River Waal: a stochastic prediction of morphological impacts. In: *River Flow*, Vol. 2 edited by D. Bousmar and Y. Zech. A.A. Balkema Publishers.
- [29] W.J. Plant, W.C. Keller, K. Hayes, and K. Spicer, Streamflow properties from time series of surface velocity and stage. *Journal of Hydraulic Engineering* 2005. 131: p. 657-664.
- [30] Y. Hirose and Y. Imai, Airborne remote sensing for river environmental assessment The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 2008. 37: p. 1149-1152.
- [31] Yang, C.T., (1996), "Sediment transport", M. Graw-Hill Book Co., U.S.A.
- [۳۲] اسدی، ف. ز. فضل‌اولی، ر. عمادی، ع. ر (۱۳۹۶) "بررسی تغییرات بستر رودخانه با استفاده از مدل HEC-RAS4.0 (مطالعه موردی: رودخانه تالار)" پژوهشنامه مدیریت حوزه آبخیز، ۸(۱۵): ۲۵-۳۵.
- [۳۳] پوربخشیان، س. مجدزاده طباطبائی، م. ر. موسوی ندوشنی، س. منصوری، ش. (۱۳۹۰) "مدل تصادفی پیش بینی عمق آبشستگی بستر رودخانه شریانی براساس تغییرات ریخت‌شناسی رودخانه‌ها" نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)، ۲۵(۲): ۲۱۶-۲۲۸.
- [۳۴] جلیلود، ر. حافظی مقدس، ن. وسلوکی، ح. ر. (۱۳۹۱) "مهندسی رودخانه سیستم براساس شاخص‌های ژئومورفیک (از محل سد کهک تا دریاچه هامون)" دومین همایش علوم زمین، دانشگاه آزاد آشتیان.
- [۳۵] محبی‌گاکیه، م. شاه‌رخ، م (۱۳۹۸) "پیش‌بینی پروفیل طولی بستر جریان با استفاده از مدل سازی عددی معکوس" پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه غیاث‌الدین جمشید کاشانی.
- [۳۶] مصباحی، ج. چیتی، م. ح. (۱۳۷۷) "فرهنگ مهندسی رودخانه، انتشارات دفتر مهندسی رودخانه‌ها و سواحل کشور" دفتر استاندارد مهندسی آب (وزارت نیرو) تهران.
- [۳۷] مهندسین مشاور سازه‌پردازی ایران، (۱۳۸۰) "راهنمای طراحی و ساخت دیوارهای مهار سیلاب (گوره‌ها)، سازمان مدیریت منابع آب، وزارت نیرو، انتشارات آوای روز، تهران.
- [۳۸] میرزایی، ح. آذرهمایون، آ. فضلی، م. (۱۳۹۴) "مقایسه مدل‌های مختلف آشفستگی در پیش‌بینی توپوگرافی بستر و میدان جریان در قوس ۹۰ درجه با بستر متحرک با استفاده از مدل عددی FLOW3D" کنفرانس بین‌المللی پژوهش‌های نوین در عمران، معماری و شهرسازی، تهران، ایران.
- [۳۹] نیکنام، ا. خسروی، غ. ر. نوحه‌گر، ا. حلی‌ساز، ا. (۱۳۹۷) "مدل‌سازی تغییرات ریخت‌شناسی رودخانه‌ی کر با استفاده از مدل CCHE2D (در پیچان‌رودهای سراب سد درودزن)" پژوهش‌های آبخیزداری، ۳۱(۴): ۶۹-۸۳.