

## بررسی تأثیر فرم بستر بر روی ضریب زبری به کمک تلفیق روش عددی و آزمایشگاهی در جریان‌های غیر ماندگار

کاظم اسماعیلی<sup>۱\*</sup> - سید محمود کاشفی پور<sup>۲</sup> - محمود شفاعی بجزستان<sup>۳</sup>

تاریخ دریافت: ۸۷/۱۲/۱۹

تاریخ پذیرش: ۸۸/۳/۳۱

### چکیده

مجموعه‌ای از آزمایشات برای بررسی اثر تغییر فرم بستر در آبراهه‌های آبرفتی بر میزان رسوب کف انتقالی در یک کانال آزمایشگاهی با قابلیت شب‌پذیری و تحت شرایط جریان غیرماندگار انجام شد. هیدروگراف‌های تولیدی از نوع مثلثی و تغییرات دبی حداکثر آن بین ۳۰ تا ۴۵ لیتر بر ثانیه بر واحد عرض انتخاب گردید. ذرات از جنس کوارتز با  $d_{50} = 1.5, 2.1, 3 \text{ mm}$  و آب تمیز بدون تغذیه رسوب از بالا دست در نظر گرفته شد. برای تکمیل اطلاعات لازم و تحلیل تغییرات زمانی ضریب مقاومت بستر از یک مدل عددی استفاده شد. خروجی‌های مدل شامل عمق، سرعت و دبی می‌باشند. نتایج نشان داد که جریان ورودی فرسایش قابل توجهی را در ابتدای زمانی جریان و ابتدای مکانی بستر بوجود آورده و سبب تغییر فرم بستر و افزایش زبری و بیشتر شدن مقاومت بستر در برابر جریان می‌گردد. علیرغم افزایش شرایط تلاطمی جریان با نزدیک شدن شدت جریان به مقدار حداکثر و افزایش عمق جریان عدد فرود بتدریج کاهش یافته میزان فرسایش کاهش و روند تغییر فرم بستر کند می‌شود. در این فرآیند بدلیل تغییر تراز بستر در طول آبراهه عدد فرود در هر نقطه از بستر با سایر نقاط متفاوت بوده و ذرات بستر بصورت یک موج پیش رونده به سمت پایین دست حرکت می‌نمایند. روند تغییرات ضریب مقاومت بستر  $\Pi$  نیز با گذشت زمان و براساس شرایط فرسایش، ابتدا روند افزایشی داشته سپس کاهش و مجدداً افزایش می‌یابد.

**واژه‌های کلیدی:** بسترهای متحرک، فرم بستر، ضریب زبری، جریان غیردائمی

### مقدمه

رفتار رسوب خواهد داشت. جریان رواناب روی بستر قابل فرسایش موجب حرکت ذرات بستر شده مقاومت جریان ناشی از تماس آن با ذرات یکی از متغیرهایی است که بر سرعت جریان مؤثر و روند فرسایش بستر را کنترل می‌نماید.

بعضی از محققین روش‌هایی را برای پیش بینی فرم بستر ارائه نمودند، که هر یک محدودیت‌های خاص خود را دارد و می‌توان نتیجه گرفت که در رودخانه‌های شنی دون تشکیل نمی‌شود (۲). با افزایش شدت جریان تغییر فرم بستر افزایش و ناهمواری‌های موضعی کاهش می‌یابد. حرکت بارکف تحت جریان سیلاب‌های ناگهانی که از وقایع موردی است، بدلیل شکل هیدروگراف اهمیت خاصی دارد. در این حالت جریان سیلاب بعلت شکل گیری سریع همانند یک موج به حرکت درآمده و اثرات متفاوتی نسبت به سیل‌های با زمان اوج گیری نسبتاً طولانی بر بستر برجا می‌گذارد. دی وریس (۳) مطالعه‌ای را در ده آبراهه با بستر شنی باهدف بررسی توزیع عمق بستر که لایه بالایی آن کوچکتر از  $d_{90}$  بود انجام داده، نشان داد نرخ انتقال بارکف در آبراهه‌های شنی ابتدا با حرکت ذرات و سطح بستر افزایش می‌یابد

جریان با سطح آزاد روی بستر متحرک غیرچسبنده از موضوعات تحقیقاتی برجسته‌ای است که رویکرد اغلب مقالات در زمینه انتقال رسوب در شرایط غیرماندگار در دو دهه اخیر به آن سو جلب شده است (۹). از طرفی مطالعات نشان می‌دهد تحقیقات در زمینه روند انتقال رسوب در شرایط ماندگار نسبتاً مشکل بوده، لیکن انجام کار در شرایط غیر ماندگار جریان از پیچیدگی و حساسیت به مراتب بیشتری برخوردار است. بطوریکه عمده منابع موجود در این زمینه مربوط به نتایج تحقیقات آزمایشگاهی می‌باشند. از جمله می‌توان به کارهای چین لین، گریفیس، سونگ، گرف، زیگشان، فرکالو و میروویچ و... اشاره کرد (۱). در روند انتقال رسوب در جریان غیرماندگار عوامل متعددی مؤثرند و آشنایی با آنها و تأثیرشان بر یکدیگر نقش مهمی در شناخت

۱- استادیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد

\* - نویسنده مسئول: (Email: kazem.esmaili@gmail.com)

۲ و ۳- دانشیار و استاد دانشکده مهندسی آب، دانشگاه شهید چمران اهواز

## مواد و روش‌ها

### کارهای آزمایشگاهی

آزمایشات در کانالی بادیواره‌های شیشه‌ای و کف فلزی صیقلی رنگ شده و شیب متغیر، با طول ۱۰ متر، عرض ۳۰ و ارتفاع ۵۰ سانتیمتر انجام گرفت (شکل ۱). سیستم ایجاد جریان غیرماندگار در ابتدای کانال نصب و جریان در فاصله ۱۲۰ سانتیمتری وارد بستر با دانه بندی متحرک می‌شود. یک گوه که لبه انتهایی آن برای جلوگیری از آبشستگی موضعی با چسباندن ذرات زبرگردید در ابتدای بستر قرار داده شد. قطر متوسط ذرات مورد استفاده ۱/۵، ۲/۱ و ۳ میلیمتر و دبی جریان بین ۳۰ تا ۴۵ لیتر بر ثانیه بر عرض واحد بوده است. شیب‌های انتخابی ۰/۰۰۶، ۰/۰۱۴ و ۰/۰۱۸ و هیدروگراف‌های تولیدی مثلی (شکل ۲) با زمان پایه آنها ۴۰، ۶۰ و ۸۰ ثانیه و در تعدادی از آزمایشات جریان پایه در نظر گرفته شد. این جریان‌ها بگونه‌ای انتخاب شدند که نسبت اعماق جریان پایه به قطر متوسط ذرات بستر برابر صفر، ۳/۵ و ۱۳/۳ گردد. مجموعه حالات مختلف آزمایشی انجام شده در این تحقیق حدود ۱۳۵ مورد بوده است که تعداد محدودی بطور نمونه جهت تجزیه و تحلیل در این مقاله انتخاب شد، که در جدول ۱ درج گردیده‌اند. آزمایشات در آزمایشگاه هیدرولیک دانشکده کشاورزی دانشگاه فردوسی مشهد انجام شده است.

### آماده سازی بستر

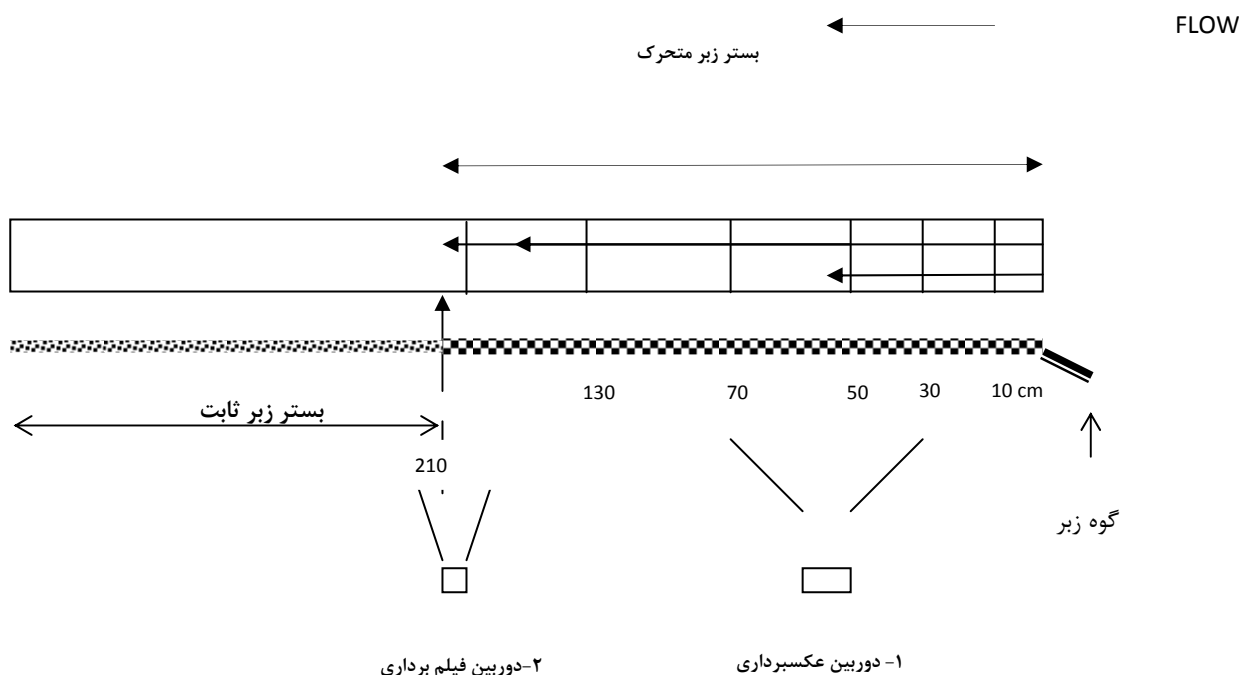
طول بستر متحرک براساس نتایج بدست آمده از آزمایشات مقدماتی با توجه به دبی حداکثر بزرگترین هیدروگراف و اندازه قطر ریزترین ذرات مواد بستر انتخابی برابر ۲ متر در نظر گرفته شد و با اضافه نمودن ۲ متر بستر صلب هم زبری بستر متحرک به منظور حذف تغییرات جریان در پایین دست به ۴ متر افزایش یافت. برای تولید هیدروگراف یک سیستم الکترومکانیک که شامل یک مخزن با یک روزنه دایره‌ای در کف و یک مخروط فلزی متصل به یک سیستم الکترومکانیکی که با باز و بسته نمودن تدریجی مجرا برای عبور جریان با هد ثابت از روزنه دبی متغیر بوجود می‌آورد، طراحی گردید. این سیستم قابلیت تولید انواع هیدروگراف با زمان پایه متفاوت، دبی نقطه اوج متفاوت و نیز متفاوت بودن زمان افزایش و کاهش جریان را فراهم می‌نمود. هیدروگراف‌های تولیدی از طریق اندازه گیری جریان ورودی به کانال از طریق سرریز لبه تیز اندازه گیری گردیدند (بدین صورت مقادیر دبی ورودی با توجه به فاصله زمانی از ابتدای شروع هیدروگراف از قبل مشخص شد). از آنجا که زمان پایه هیدروگراف‌ها کم و ابزار لازم برای ثبت تغییرات پارامترهای هیدرولیکی جریان در زمان کوتاه موجود نبود. لذا تغییرات عمق جریان در طول بستر در نقاط ۱ الی ۶ بترتیب به فواصل ۱۰، ۳۰، ۵۰، ۷۰، ۱۳۰ و ۲۰۰ سانتیمتر

و سپس با ضخامت لایه‌ها تغییر می‌کند. نیلسون (۱۰) مطالعاتی را در مورد آستانه حرکت ذرات بستر انجام داده نشان داد پارامتر بدون بعد شیلدز در جریان غیرماندگار باید اصلاح شده و مقدار  $2.5d_{50}$  برای برآورد ضریب مقاومت استفاده شود. هو و آبراهام (۷) نیز با انجام آزمایشاتی به تعریف مقاومت بستر پرداخته متذکر شدند مقاومت بستر در مورد بسترهای متحرک بطور کلی به دو قسمت قابل تفکیک است، بخشی مربوط به اصطکاک ذرات و بخش دیگر بر اثر تغییر شکل بستر ایجاد می‌شود. از سویی مقاومت مربوط به تغییر فرم بستر را مستقیماً نمی‌توان اندازه گیری کرد و باید ابتدا مقاومت کل را در مورد بسترهای متحرک برآورد کرده سپس با برآورد مقاومت مربوط به ذرات از اختلاف دو مقدار بدست آمده به مقاومت مربوط به تغییر فرم بستر رسید. اورلینو و همکاران (۸) مدل جدیدی بر مبنای روش اولر در شرایط غیرماندگار برای تعیین لایه‌ای از بستر که بصورت بارکف در حال حرکت است بدست آوردند. وو و همکاران (۱۲) مدل عددی یک بعدی در مورد انتقال بار رسوب غیریکنواخت در شرایط غیرماندگار پیشنهاد نمودند. در این مدل آنها به مقایسه برآورد رسوبات جابجا شده با چهار مدل معمولی مورد استفاده و مدل عددی خود پرداخته نشان دادند که مدل عددی ارائه شده بخوبی نتایج رضایت بخشی را ارائه می‌کند. یین و لی (۱۴) در مورد نحوه انتقال بارکف و چورشدگی (Sorting) ذرات بستر تحت جریان غیرماندگار آزمایشاتی را برای شرایط جریان در یک مجرا با انحنا مسیر به انجام رساندند. آنها نتیجه گرفتند که تغییر شکل کف و اندازه ذرات همبستگی خوبی با پارامتر غیر ماندگاری (نسبت سرعت افزایشی جریان و یا عبارتی سرعت شاخه بالارونده هیدروگراف به سرعت برشی جریان پایه) جریان نشان می‌دهد و این پارامتر نقش اصلی را در تغییرات ایجاد شده در بستر مانند تغییرات اندازه ذرات، کل مقدار دبی رسوب و جابجایی پروفیل بستر ایفا می‌نماید. داک و همکاران (۴) مدل عددی برای تغییر شکل بستر در یک فلوام آزمایشگاهی بر مبنای متوسط عمق از روش المان حجمی محدود ارائه نمودند. مطالعه آنها در حالت ماندگار و غیرماندگار انجام گرفت و اثر جریانهای ثانویه را نیز با بکارگیری مدل آشفتگی  $k-\epsilon$  مورد بررسی قرار دادند. همچنین شیب کف و جهت حرکت ذرات بستر نیز مورد توجه قرار گرفت. این مدل نهایتاً امکان پیش بینی فرم بستر در انحنا کانال را در شرایط ماندگار و غیرماندگار میسر ساخت. وو و همکاران (۱۳) یک مدل عددی در مورد انتقال رسوب در کانال ارائه نمودند.

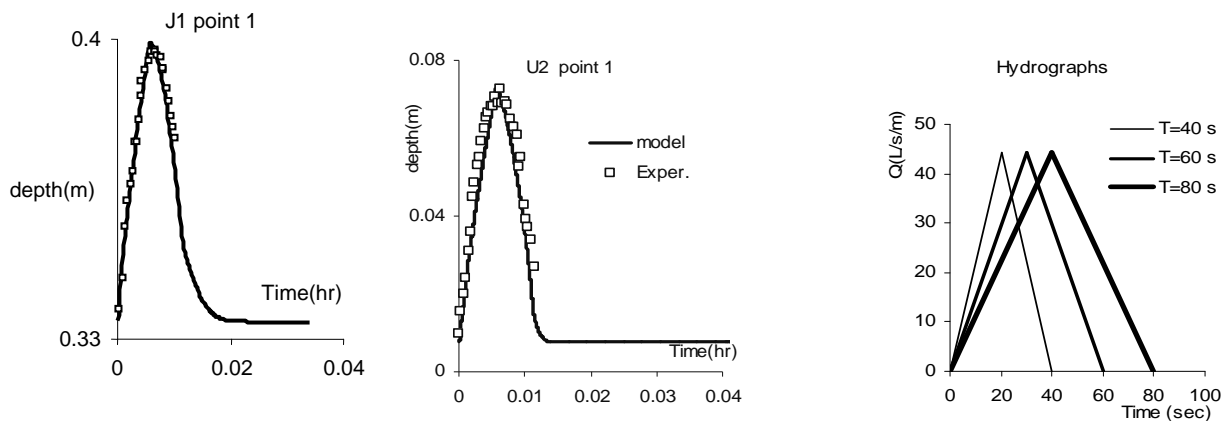
این تحقیق با هدف مطالعه اثر متقابل جریان غیرماندگار بر بستر متحرک و افزایش مقاومت ایجاد شده ناشی از تغییر فرم بستر می‌باشد. از اینرو با استفاده از نتایج آزمایشگاهی بدست آمده برای بستر متحرک و غیرمتحرک و نیز به کمک مدل سازی عددی بدست آمده و شبیه سازی شرایط آزمایشگاهی از طریق مدل عددی به بررسی اثر جریان بر بستر متحرک پرداخته شده است.

بودن دو عمق بدست آمده از مدل و اندازه گیری شده در آزمایشگاه،  $n$  بدست آمده بعنوان ضریب زبری در آن زمان شناخته می‌شد. روند فوق برای تمامی زمان‌هایی که در آزمایشگاه عمق آن برای نقطه مورد نظر ثبت گردیده بود تکرار گردید و نهایتاً تغییرات زبری بستر در نقطه مورد نظر در طول دوره عبور جریان بدست آمد. جهت تعیین تغییرات ضریب زبری بستر در هر نقطه در طول آن روش بیان شده برای تمامی نقاط انجام و از آن روند تغییرات زبری بستر برای سایر نقاط مشخص گردید. در این تحقیق مقدار  $n$  به ازاء بیشترین عمق جریان ایجاد شده در یک نقطه (نقطه ۱) مورد بررسی قرار گرفت. برای اندازه گیری  $n$  ضریب زبری ذرات در آزمایشگاه، جریانی با عمق کم (با توجه به اندازه ذرات) در کانال رها کرده بطوری که ذرات بستر هیچگونه حرکتی نداشته باشند. آنگاه با اندازه گیری مستقیم دبی و عمق جریان و معلوم بودن شیب کانال و بکار گیری رابطه مانینگ  $n$  ضریب زبری ذرات بطور مستقیم بدست آمد. همچنین برای مقایسه اثر تغییر فرم بستر بر میزان تغییر ضریب زبری آزمایشاتی بر روی یک بستر زبر شده غیر متحرک از نوع مواد بکار رفته در روی بستر متحرک انجام شد، که در این حال طول کل بستر زبر شده غیر متحرک ۴ متر در نظر گرفته شد.

از ابتدای ورودی بستر از طریق عکسبرداری (دوربین ۱) برای هر هیدروگراف ثبت شد. همچنین این تغییرات در فاصله کوتاهی (۱۰ سانتیمتر) بعد از بستر متحرک توسط دوربین ۲ ثبت می‌گردید. مقادیر زمانی تغییرات عمق آب و تراز بستر از تصاویر برداشت شده توسط نرم افزار Plot Digitizer (۱۱) استخراج می‌گردید. شکل ۱ شمایی ساده محل قرارگیری و ثبت تغییرات عمق را در طول بستر نشان می‌دهد. چنانکه اشاره شد در این آزمایشات تجهیزات لازم برای اندازه گیری بعضی از پارامترهای هیدرولیکی همچون سرعت بصورت زمانی در دسترس نبود، لذا برای تکمیل خلای موجود، معادلات هیدرودینامیکی جریان در شرایط غیرماندگار و یک بعدی بروش عددی (تفاضلات محدود) با بکارگیری شرایط اولیه و مرزی آزمایشات انجام شده در آزمایشگاه، حل گردید. آنگاه برای دستیابی به هماهنگی لازم بین شرایط واقعی (مقادیر اعماق حداکثر اندازه گیری شده بصورت زمانی در آزمایشگاه) با مقادیر شرایط مدل (خروجی مدل هیدرودینامیکی) در زمان‌های مشابه از تغییر مقدار  $n$  استفاده شد. این کار برای تمامی نقاط انتخابی در طول بستر انجام شد. بدین صورت که مرتباً با انتخاب مقدار  $n$  برنامه اجرا شده و خروجی آن با عمق مشابه آزمایشگاهی در همان زمان کنترل می‌گردید. در شرایط یکسان



(شکل ۱) - موقعیت قرار گیری دوربین ها و اشل ها



(شکل ۲) - نمونه هیدروگراف‌های تولیدی

(شکل ۳) - مقایسه نتایج مدل و مقادیر اندازه گیری شده

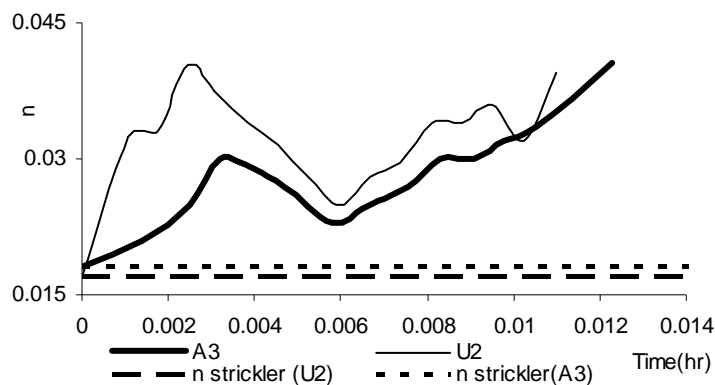
### انتخاب مقیاس

از مهمترین مواردی که در کارمدل سازی جریان رسوب باید در نظر گرفت، تعیین مقیاس زمانی انجام آزمایشات است. بر اساس نظر لی (۹) در مواردی که مطالعات رسوب بر روی شرایط تعادل بستر انجام می‌شود، لزوم در نظر گرفتن مقیاس زمانی محرز است. البته مقیاس زمانی در مطالعات رسوب به دو روش، زمان رسوب گذاری و قانون فرود انجام می‌شود. معمولاً مقیاس زمانی بدست آمده از روش فرود کمتر از مقدار بدست آمده از روش اول است. اما اگر مطالعات بر تغییرات زمانی شکل بستر و نه حالت تعادل تأکید داشته باشد، آنگاه لزومی برای انتخاب مقیاس زمانی وجود نخواهد داشت. در آزمایشات اخیر با توجه به متغیرهای انتخاب شده، شیب، دانه بندی تغییرات زمانی شکل بستر مد نظر بوده و از انتخاب مقیاس زمانی صرف نظر شده است. زمان پایه هیدروگرافها با در نظر گرفتن محدوده کار در آزمایشات گرف (۶) که در آن زمان پایه بین ۴۰ تا ۳۶۰ ثانیه بوده است، انتخاب گردید.

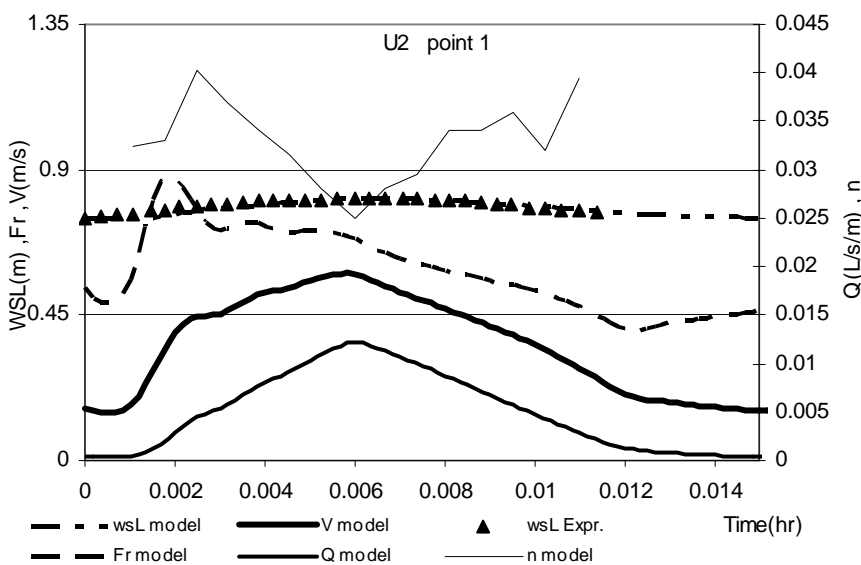
### نتایج و بحث

شکل ۳ نمونه‌ای از یکسان سازی نتایج حاصل از مدل عددی و مقادیر آزمایشگاهی را نشان می‌دهد. که در آن با تغییر مقدار  $n$ ، عمق (حداکثر) جریان بدست آمده از مدل معادل عمق (حداکثر) اندازه گیری شده در کانال و در نقطه ۱ می‌باشد. از اینرو می‌توان نتیجه گرفت تشابه هیدرولیکی بین شرایط جریان در کانال و مدل عددی بر اساس یکسان بودن ضریب زبری بوجود آمده است. بدینصورت به کمک مدل کامپیوتری مقدار  $n$  متوسط در طول کانال برای هر حالت از آزمایشات و در طول زمان با مقایسه مقادیر عمق جریان از مدل با مقادیر متناظر عمق اندازه گیری شده حاصل گردید (در واقع  $n$  بدست آمده از هر نوبت اجرای برنامه معرف زبری در زمان مورد نظر و بطور

متوسط برای تمامی سطح بستر است که در این جا بعنوان زبری نقطه مورد نظر خواهد بود. برای سایر نقاط چنانکه بیان شد مجدداً این روند تکرار می‌گردد). با محاسبه مقدار  $n$  از مدل برای تمام زمان‌های اندازه گیری شده در آزمایشات مختلف امکان بررسی و تفسیر تغییرات زمانی سطح بستر در اثر عبور هیدروگراف جریان فراهم می‌آید. در شکل ۴ نتایج برآورد  $n$  برای آزمایشات A3, U2 (جدول ۱) نشان داده شده است. در این شکل مقادیر  $n$  محاسبه شده از رابطه استریکلر (۲) نیز جهت مقایسه آورده شده تا تفاوت مقدار  $n$  در فواصل زمانی بهتر مشاهده شود. این نتایج برای نقطه‌ای از بستر ترسیم گردید که بیشترین فرسایش در آن ایجاد شده است. چنانکه پیش از این یادآوری شد فرم بستر در ابتدای ورود جریان بشدت تغییر کرده مقاومت ناشی از فرم بستر سریعاً افزایش می‌یابد و روند تغییرات زمانی آن بستگی به خصوصیات جریان در هر لحظه دارد و می‌تواند نقش فرم بستر را در جریان‌های کم عمق و اثر آنرا بر میزان رسوب انتقالی روشن تر نماید چنانکه دیده می‌شود ضریب زبری بستر افزایش شدیدی در ابتدای شروع جریان از خود نشان می‌دهد و سپس کاهش یافته و بعد از آن باروند افزایشی کم اضافه می‌شود. در شکل ۵ روند تغییرات زبری بستر برای آزمایش U2 به‌مراه مقادیر سرعت، عدد فرود بدست آمده از مدل و عمق جریان بدست آمده از مدل و اندازه گیری شده در آزمایشگاه آورده شده است همانگونه که ملاحظه می‌شود عدد فرود جریان ابتدا روند صعودی نشان می‌دهد و سپس کاهش می‌یابد. با افزایش عدد فرود و شروع حرکت ذرات زبری بستر بتدریج افزایش می‌یابد از طرفی زمان رسیدن به مقدار حداکثر عدد فرود قبل از رسیدن زبری به بیشترین مقدار خود می‌باشد. در این حالت ذرات هنگام برخورد جریان آب و وارد شدن جریان بدلیل اثر اصطکاک ناشی از تماس با سایر ذرات با تأخیر زمانی شروع به حرکت می‌نمایند و این امر موجب شده که تغییر شکلی که در بستر بوجود می‌آید بعد از به حداکثر رسیدن عدد فرود باشد.



(شکل ۴) - روند تغییرات زمانی ضریب زبری بستر



(شکل ۵) - روند تغییرات زمانی پارامترهای هیدرولیکی جریان و ضریب زبری بستر

مقدار  $n$  بدست آمده از ترکیب نتایج مدل و مقادیر اندازه گیری شده بعنوان ضریب زبری معادل بستر می باشد، و لذا با توجه به مقادیر جدول ۱ تعیین مقدار  $n$  مربوط به تغییر فرم بستر در اثر فرسایش امکان پذیر خواهد بود.

در شرایط (غیرماندگار و عدم تغذیه از بالا دست، مانند جریان در سرشاخه های رودخانه ها) اثرات متقابل جریان و بستر بر یکدیگر پیچیدگی زیادی داشته از یک سو با افزایش شدت جریان و سپس کاهش آن تنش برشی وارد بر کف نسبت به زمان تغییر می نماید شرایط تعادل در این حالت زمانی رخ خواهد داد که تنش برشی وارد بر کف از تنش برشی بحرانی کمتر شود. از سوی دیگر چنانکه ذکر شد اثر موج اولیه سیلاب در برخورد با بستر از قابلیت فرسایشی زیاد

حتی این شرایط (افزایش زبری) قبل از رخ دادن حداکثر عمق جریان صورت می گیرد. بنابراین می توان نتیجه گرفت که موج اولیه جریان های سریع بر روی بسترهای متحرک از اهمیت زیادی برخوردار بوده و بنظر می رسد در شرایط طبیعی چنین جریان هایی در لحظات اولیه قابلیت جابجایی مقادیر زیاد رسوب حتی ذرات با قطرهای نسبتاً بزرگ را داشته باشند. مقدار ضریب زبری مربوط به ذرات تشکیل دهنده بستر از رابطه استریکلر محاسبه و با مقادیر زبری بدست آمده از مدل در بیشترین مقدار عمق در شرایط آزمایشی در جدول ۱ مقایسه شده است. در این جدول ملاحظه می شود که ضریب زبری ناشی از تغییر فرم بستر بشدت افزایش می یابد و مقاومت در برابر جریان را افزایش می دهد.

کارهای تاک عمدتاً ناشی از زمان طولانی پایه هیدروگرافها در آزمایشات تاک و کوتاه بودن این زمان در آزمایشات این تحقیق بوده است که موجب شده متوسط سرعت فرسایش اختلاف قابل توجهی داشته باشند. تصاویر شکل ۶ مربوط به سه حالت از آزمایشات (U3-E3) انجام گرفته روی دو نوع بستر با دانه بندی متحرک و غیر متحرک است. چنانکه ملاحظه می شود تغییرات زمانی عمق جریان در مورد بسترهای متحرک همواره بیشتر از مقدار آن بر روی بستر صلب با همان دانه بندی می باشد. که این نیز نشان دهنده افزایش ضریب زبری در شرایط بستر متحرک نسبت به بستر ثابت می باشد. لازم به ذکر است که تمامی شرایط آزمایشی از نظر شیب، قطر ذرات دانه بندی دی هیدروگرافها در شرایط مقایسه با هم مشابه بوده است و این نکته بیانگر افزایش زبری بدلیل فرم بستر می باشد.

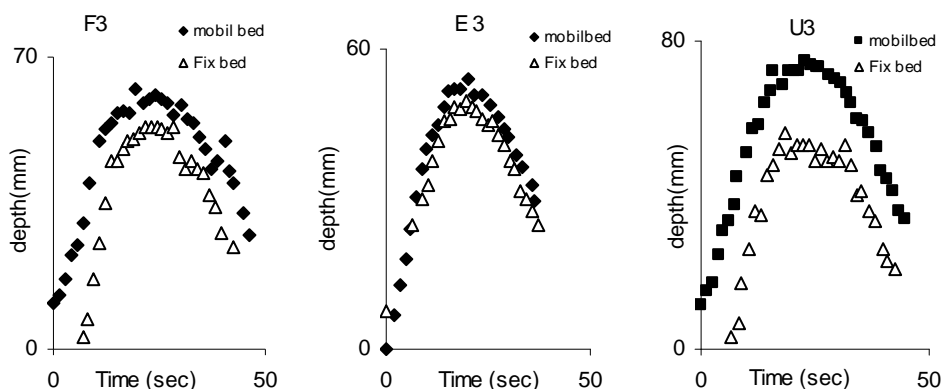
برخوردار بوده بطوری که علیرغم مدت زمان کوتاه عبور جریان در آزمایشات سرعت فرسایش بستر اختلاف زیادی نسبت به سرعت فرسایش در شرایط ماندگاررا نشان می دهد. مقایسه نتایج حاصل از آزمایشات اخیر با نتایج بدست آمده از کارهای تاک (۱۱) که در مورد فرسایش بستر با استفاده از آب تمیز و مدت زمان طولانی انجام گرفته (جدول ۲)، نشان می دهد موج سیلاب اولیه نقش مهمی بر فرسایش بستر در هنگام ورود جریان به بستر دارد، تغییرات بوجود آمده در حین عبور جریان متغیر با تبدیل شرایط جریان از رژیم پایینی به رژیم بالایی و مجدداً تبدیل به رژیم پایینی به شرایط تعادل نخواهد رسید از اینرو مولفه های جریان مانند عمق و سرعت هم بدلیل تغییر دبی و هم بعلاوه تغییر تراز بستر مرتباً در حال تغییر خواهند بود، به همین دلیل کمیت های بدون بعد تابع جریان نیز متغیر می باشند. اختلاف سرعت فرسایش در نتایج این تحقیق و

(جدول ۱) - مقادیر اندازه گیری شده و محاسبه شده n

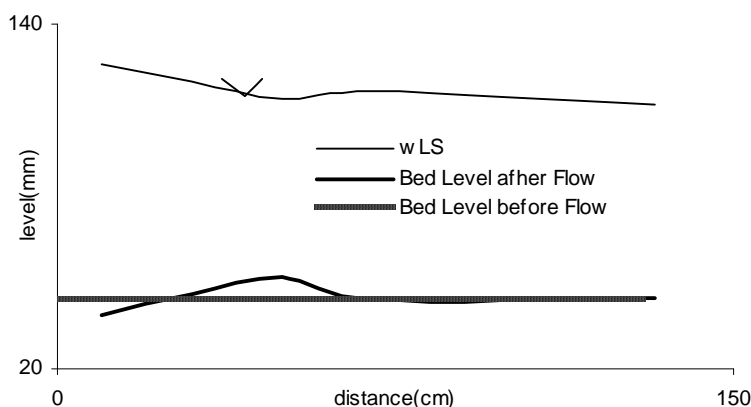
آزمایش	D <sub>50</sub> mm	slope	h <sub>0</sub> mm	Q <sub>0</sub> L/s	H net mm	T sec	Qs gr/s/m	n strickler	n particl Exp.	n Bed model	درصد افزایش ضریب زبری
J1	۱/۵	۰/۰۰۶	۵/۲۵	۰/۱۱	۷۵	۴۰	۳۰/۴	۰/۰۱۶	۰/۰۱۶۹	-	-
F1	۱/۵	۰/۰۰۶	۵/۲۵	۰/۱۱	۸۱	۴۰	۳۷/۵	۰/۰۱۶	۰/۰۱۶۹	۰/۰۲۶	۵۳/۸
K1	۱/۵	۰/۰۰۶	۵/۲۵	۰/۱۱	۸۱	۶۰	۲۹/۲	۰/۰۱۶	۰/۰۱۶۹	۰/۰۲۴۷	۴۶/۲
P1	۱/۵	۰/۰۰۶	۵/۲۵	۰/۱۱	۸۲	۸۰	۲۳/۴	۰/۰۱۶	۰/۰۱۶۹	۰/۰۲۴۱	۴۲/۵
U1	۱/۵	۰/۰۰۶	۲۰	۱/۴	۸۵	۴۰	۳۹/۸	۰/۰۱۶	۰/۰۱۶۹	۰/۰۲۸۵	۶۸/۶
F2	۲/۱	۰/۰۰۶	۷/۳۵	۰/۳۶	۷۷	۴۰	۱۰	۰/۰۱۷	۰/۰۱۷۴	۰/۰۲۴	۳۷/۹
K2	۲/۱	۰/۰۰۶	۷/۳۵	۰/۳۶	۸۱	۴۰	۱۲	۰/۰۱۷	۰/۰۱۷۴	۰/۰۲۱۹	۲۵/۹
P2	۲/۱	۰/۰۰۶	۷/۳۵	۰/۳۶	۸۱/۵	۴۰	۱۱/۸	۰/۰۱۷	۰/۰۱۷۴	۰/۰۲۰۹	۲۰/۱
U2	۲/۱	۰/۰۱۴	۷/۳۵	۰/۵۵	۷۲/۵	۴۰	۵۲	۰/۰۱۷	۰/۰۱۷۴	۰/۰۲۹۶	۷۰/۱
Z2-1	۲/۱	۰/۰۱۸	۷/۳۵	۰/۸۹	۸۲/۵	۴۰	۱۲۵	۰/۰۱۷	۰/۰۱۷۴	۰/۰۳۹۹	۱۲۹/۳
A3	۳	۰/۰۱۴	۱۰/۵	۰/۸۰	۶۳	۴۰	۴۴/۷	۰/۰۱۸	۰/۰۲۱	۰/۰۲۴۱	۱۴/۸
E3	۳	۰/۰۱۴	۱۰/۵	۰/۸۰	۵۴	۴۰	۲۰	۰/۰۱۸	۰/۰۲۱	-	-
F3	۳	۰/۰۱۸	۷/۳۵	۰/۸۹	۶۲/۵	۴۰	۱۱۱/۲	۰/۰۱۸	۰/۰۲۱	-	-
U3	۳	۰/۰۱۴	۱۰/۵	۰/۸۰	۷۵	۴۰	۳۹/۴	۰/۰۱۸	۰/۰۲۱	-	-

(جدول ۲) - مقایسه شرایط فرسایشی بستر

مرجع	سرعت فرسایش (mm/s)	زمان فرسایش (sec)	فاصله عمیق ترین نقطه از ابتدای بستر (cm)
Thuc(11)	۰/۰۳۳	۳۶۰۰	۹۸
Thuc(11)	۰/۰۲۱	۷۲۰۰	۱۱۰
Thuc(11)	۰/۰۱۲	۱۴۴۰۰	۱۲۰
نتایج این تحقیق	۰/۰۲۷۵	۴۰	۱۰
نتایج این تحقیق	۰/۱۶۷	۶۰	۹
نتایج این تحقیق	۰/۱۶۲	۸۰	۱۲



(شکل ۶) - تغییرات زمانی عمق جریان روی بستر متحرک و غیر متحرک در نقطه ۱



(شکل ۷) - تغییرات تراز سطح آب و بستر در آزمایش F1 قبل و بعد از جریان

بستر تقسیم می‌شود. در آزمایشات مشاهده شد ضریب مقاومت بستر در بسترهای غیر چسبنده و در شرایط غیر ماندگار متغیر نسبت به زمان بوده و همین مسئله موجب می‌شود تغییرات زمانی فرم بستر و تراز بستر روند ثابتی نداشته باشد. فرسایش قابل ملاحظه‌ای هنگام ورود جریان در ابتدای بستر بوجود می‌آید و پس از آن روند کاهش تراز کف کم و نیز سرعت فرسایش کاسته می‌گردد. شرایط فرسایشی در ابتدای بستر امکان جابجایی ذرات درشت تر را محتمل بنظر می‌رساند. در شرایط مناسب نتایج حاصل از مدل سازی عددی و مدل سازی آزمایشگاهی می‌توانند با هم تلفیق شده و خلاهای اطلاعاتی را برای تجزیه و تحلیل شرایط بوقوع پیوسته در آزمایش پر نمایند. مقدار ضریب زبری بدست آمده متوسط برای هر بستر مورد آزمایش بین ۵۰ تا ۸۰ در صد افزایش در مقدار ضریب زبری ایجاد شده در برابر جریان را نشان می‌دهد. این افزایش در زبری به واسطه فرم بستر می‌تواند در افزایش میزان مقاومت در برابر جریان نقش بسیار مهمی ایفاء نماید. یکی از مهمترین دلایل بالا بودن میزان رسوب کف انتقالی در

شکل ۷ تراز بستر متحرک و سطح آب را در یکی از آزمایشات در زمان وقوع بیشترین دبی نشان می‌دهد. چنانکه ملاحظه می‌شود موج حاصل از جابجایی ذرات تغییر فرمی در بستر ایجاد کرده که می‌تواند بر مقاومت بستر تأثیر بسزایی داشته باشد.

## نتیجه گیری

نتایج بدست آمده از مجموعه ی وسیعی از آزمایشات انجام گرفته در این تحقیق یک مدل ساخته شده از رودخانه فصلی با بستر آبرفتی در مورد انتقال رسوب (بار کف) تحت جریان سیلاب سریع در یک کانال آزمایشگاهی مستطیلی با عرض ۳۰ سانتیمتر و با طول بستر آزمایشی ۴ متر (۲متر با دانه بندی متحرک و بقیه غیر متحرک) بطور خلاصه ذیلاً جمع بندی می‌شود.

مقاومت در برابر جریان در بسترهای متحرک و غیر چسبنده به دو بخش، مقاومت مربوط به اندازه ذرات و مقاومت مربوط به تغییر شکل

### تشکر و قدردانی

بدینوسیله از سازمان آب و برق خوزستان که بخشی از هزینه‌های مربوط به انجام این تحقیق را برعهده گرفته است سپاسگزاری می‌شود.

آبراهه‌های فصلی (۱) در این مجاری تحت شرایط جریان غیر دائمی ناشی از همین افزایش ضریب مقاومت جریان می‌باشد، و در آبراهه‌های کوچک نقش مهمی را ایفا می‌نماید.

### منابع

- ۱- اسماعیلی ک. ۱۳۸۷. انتقال رسوب در رودخانه‌های فصلی تحت جریان سیلاب سریع. پایان نامه دکتری. دانشکده مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز.
- ۲- شفاعی بجستان م. ۱۳۸۴. هیدرولیک رسوب. انتشارات دانشگاه شهید چمران اهواز.
- 3- De vries P. 2002. Bed load layer thickness and disturbance depth in gravel bed stream. J. Hydra. Eng. Vol. 128. No. 11, pp. 983-991.
- 4- Duc M.B., Wolfgang T., and Rodi W. 2004. Numerical modeling of bed deformation in laboratory channels. J. Hydra. Eng, Vol. 130, No.9, pp. 894-904.
- 5- Digitizing programs for converting Hard copy graphs and plots back to data <http://www.ccp14.ac.uk>.
- 6- Graf W.H., and Qu Z. 2004. Flood hydrograph in open channels, Proceeding of the Institution of Civil Engineering. Water Management, Vol.157 pp. 45-57.
- 7- Hu S. and Abrahams A.D. 2005. The effect of mobility on resistance to overland flow. Earth surface Processes and landforms , 30, 1461-1470.
- 8- Iervolino M., Leopardi A., and M. Greco. 2004. Bed transport dynamic in unsteady conditions.
- 9- Lee K.T., Liu Y.L., and Cheng K.H. 2004. Experimental investigation of bed load transport processes under unsteady flow conditions. Hydrological processes, Vol.18. no.13. pp. 2439-2454.
- 10-Nielsen p. 2002. Shear stress and sediment transport calculations of swash zone modeling. Coastal Eng, No. 45, pp 53-60.
- 11-Thuc T. 1991. 2D morphological computations near hydraulic structures, Doctoral dissertation, Asian Institute of Technology, Bangkok, Thailand.
- 12-Wu W., Daimo A., Vieira S.S., and Wang T. 2004. One-dimensional numerical model for no uniform sediment transport under unsteady flows in channel networks. J. Hydra. Eng. vol. 130, No. 9, pp. 914-923.
- 13-Wu W., Rodi W. and Wenka T. 2000. 3D numerical modeling of flow and sediment transport in open Channels. J. of Hydra. Eng, Vol. 126, No.1, pp. 4-15.
- 14-Yen C.L., and Lee K.T. 1995. Bed topography and sediment sorting in channel bend with unsteady flow. J. Hydra. Eng, Vol. 121. No. 8, pp. 591-599.





## The Effect of Bed Form on Roughness Coefficient in Unsteady Flows Using a Combined Numerical and Laboratory Method

K. Esmaili<sup>1\*</sup> - S. M. Kashefipour<sup>2</sup>- M. Shafaie Bajestan<sup>3</sup>

### Abstract

For investigating the effect of bed form in alluvial channels on the amount of bed load transport, a set of experiments was carried out in a tilting flume under unsteady flow conditions (hydrograph). The produced hydrographs were in triangular form with a maximum discharge of 30 to 45 lit/s/m. Three size of sediment particles were used with  $d_{50}$  equal to 1.5, 2.1 and 3.0mm, clear water without any feeding was supplied from upstream. To analyze the time varying of bed resistance, a numerical model with initial and boundary conditions was used and its outputs were depth, velocity and discharge. The results showed that the inflow made considerable erosion at the starting time of flowing near the channel inlet, and this is a cause of producing bed form, increasing roughness and bed resistance. However, by the time the erosion trend was declined with increasing discharge. Despite of increasing flow turbulence, Froude number and bed erosion decreased gradually when the discharge approaching to its maximum value increasing flow depth. In this process, because of bed elevation changing along the flume, Froude number at any point is different from the other points and bed particles move toward downstream as a progressive wave. The bed resistance coefficient,  $n$ , was increased at the start of inflow time and after a proper time it was again increased, and this matter has very important role in sediment transport for non cohesive beds.

**Key words:** Movable bed, Bed form, Coefficient roughness, Unsteady flow

---

1- Assistant Professor, Ferdowsi University of Mashhad

(\* - Corresponding author Email: kazem.esmaili@gmail.com)

2- Associate Professor, University of Shahaid Chamran Ahvaz

3- Professor, University of Shahid Chamran Ahvaz