

## مطالعه آزمایشگاهی مشخصات سه‌بعدی جریان بر روی کلاسترها

مسعود کرباسی<sup>۱</sup>، محمد حسین امید<sup>۲</sup>، جواد فرهودی<sup>۳</sup>

برگرفته از رساله دکتری با عنوان بررسی آزمایشگاهی شرایط و چگونگی تشکیل فرم‌های بستر کلاستری در آبراه‌های با بستر شنی.

تاریخ دریافت: ۸۹/۴/۲۵

تاریخ پذیرش: ۹۰/۲/۲۶

### چکیده

کلاسترها یکی از انواع فرم‌های بستر در رودخانه‌های با بستر شنی هستند. این فرم‌های بستر به دلیل این‌که شرایط جریان و انتقال رسوب را تحت تاثیر قرار می‌دهند، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار هستند. در این تحقیق، برای بررسی دقیق‌تر تاثیر این فرم‌های بستر بر روی شرایط متوسط و تلاطمی جریان، از یک مدل آزمایشگاهی استفاده شد. در این رابطه، از یک دستگاه سرعت سنج صوتی (ADV) که امروزه در مطالعات جریان متلاطم مورد استفاده قرار می‌گیرند، برای اندازه‌گیری سرعت و نوسانات آن استفاده شد. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که کلاسترها تاثیر قابل توجهی بر خصوصیات جریان در مقایسه با جریان بدون کلاستر داشته و موجب انتقال مقادیر حداکثر RMS و تنش برشی رینولدزی به اعماق بالاتر می‌شود. همچنین، کلاستر موجب ایجاد یک لایه برشی در پایین دست خود می‌شود که در آن مناطق مختلفی از جمله شتاب یافتن جریان بر روی کلاستر، جدایی جریان در دنباله کلاستر، پخش گردابه (Vortex shedding) از تاج کلاستر، اتصال دوباره جریان (reattachment) در پایین دست کلاستر و بازگشت جریان به حالت اولیه قابل شناسایی هستند.

واژه‌های کلیدی: تلاطم، رودخانه‌های با بستر شنی، ساختار جریان، کلاستر.

massoud\_karbassi@yahoo.com.

<sup>۱</sup> مسعود کرباسی استادیار گروه مهندسی آب دانشگاه زنجان.

<sup>۲</sup> استاد گروه آبیاری و آبادانی دانشگاه تهران

<sup>۳</sup> استاد گروه مهندسی آبیاری دانشگاه تهران

## مقدمه

یکی از مهمترین خصوصیات رودخانه‌های با بستر شنی، متغیر بودن توپوگرافی بستر آن‌ها می‌باشد. این توپوگرافی از فرم‌های بستر کوچک مقیاس که به‌عنوان کلاستر شناخته می‌شوند (Brayshaw et al, 1983) تا فرم‌های بستر متوسط و بزرگ مقیاس مانند استخر-ریفل، پله استخری و آنتی دیون‌ها متغیر است (Wohl, 2000). در واقع، کلاسترها گروه‌هایی از ذرات جدا از هم که به‌صورت سازمان یافته‌ای در بالای تراز متوسط سطح بستر اطراف قرار گرفته‌اند.

تشکیل کلاسترها به فرونشست سریع سیل‌ها نسبت داده شده است (Whittaker, 1987). برای تشکیل کلاسترها، لازم است که دو یا چند قطعه به‌صورت یک گروه درآیند. یک کلاستر معمولاً شامل یک مانع<sup>۱</sup> می‌باشد که اندازه آن در بیشتر موارد بزرگتر از  $D_{84}$  مواد بستری است. در سمت بالادست این مانع تجمعی از ذرات روی هم قرار گرفته به‌وجود می‌آید و در پایین‌دست آن نیز دنباله<sup>۲</sup> تشکیل می‌شود (Papanicolaou et al., 2003).

ساختمان‌های کلاستری که شکل‌هایی نزدیک به دایره‌ای و بیضوی دارند، به‌عنوان کلاسترهای حلقوی شناخته می‌شوند (Kozlowski and rgenzinger, 2000). هنگامی که تعداد زیادی ذرات به‌صورت یک توده در می‌آیند، به نظر می‌آید که کلاسترها لایه‌های سنگفرشی مجزا از همی را تشکیل می‌دهند (Chang, 1998). Storm (۲۲۰۶) کلاسترها را به پنج دسته سنگریزه‌ای<sup>۳</sup>، توده‌ای یا کپه‌ای<sup>۴</sup>، دنباله دار<sup>۵</sup>، خطی<sup>۶</sup> و حلقه‌ای<sup>۷</sup> طبقه‌بندی کرد. کلاسترها ضریب زبری را افزایش می‌دهند و در نتیجه روابط دبی-اشل را تحت تاثیر قرار می‌دهند (Millar, 1999).

به‌طور معمول، کلاسترها در آبراهه‌های با بستر شنی با انتقال مواد بستری کم و محدوده شیب‌های ۰/۰۲ تا ۰/۰۷ وجود دارند و عقیده بر این است که این فرم‌های

بستر به‌عنوان سازه‌های هدر دهنده انرژی عمل می‌کنند (Gustavson, 1974).

مطالعات اخیر تاکید بر ارتباط مهم بین حضور کلاسترهای و توسعه ساختار جریان متلاطم دارد (Robert et al., 1996, Buffin- Kirkbride, 1993). Belanger & Roy, 1998, Lawless & Robert, 2001 در کانال‌های با بستر صاف پیشرفت‌های مهمی در ارتباط دادن بین مورفولوژی بستر و ساختار جریان صورت پذیرفته است. محققین مختلفی نشان داده‌اند که مهمترین عاملی که موجب تفاوت مکانیسم انتقال مومنوم در رودخانه‌های با بستر شنی با رودخانه‌های با زبری کم شده است، پخش گردابه‌ها (Vortex Shedding) در حول عناصر زبری و توسعه ناحیه‌های جدایی جریان است (Buffin-Belangerand and Roy, 1998).

دو پرسش در زمینه تاثیرات کلاسترها بر مشخصات جریان وجود دارد: چگونه یک کلاستر تشکیل شده مشخصات جریان را به نسبت یک بستر بدون کلاستر تغییر می‌دهد؟ و آیا این تاثیر به اندازه‌ای است که حذف یا اضافه کردن آن موجب تغییرات زیادی در خروجی شود؟

هدف این مقاله بررسی دقیق و سه بعدی جریان و مشخصات تلاطمی آن حول یک کلاستر است که در آن بتوان فرآیندها و تحولات را در بالادست و پایین‌دست یک کلاستر مشاهده نمود.

## مواد و روش‌ها

## وسایل و تجهیزات آزمایشگاهی

## کانال آزمایشگاهی

مطالعات آزمایشگاهی این تحقیق در مرکز تحقیقات آب گروه مهندسی آبیاری و آبادانی پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران، بر روی فلومی از جنس پلکسی گلاس، با طول ۱۸ متر عرض ۰/۹ متر و ارتفاع ۰/۶ متر با سطح مقطع مستطیلی انجام گرفت.

## نحوه و شرایط انجام آزمایش‌ها

به منظور مشاهده نحوه تاثیر کلاسترها بر خصوصیات جریان دو نوع آزمایش طرح‌ریزی شد: ۱- اندازه‌گیری

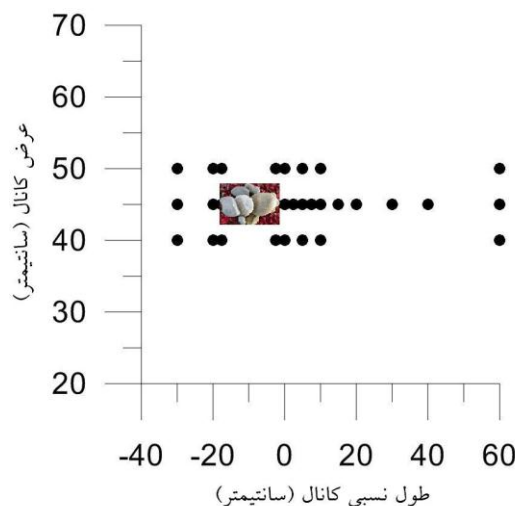
1. Obstacle  
2. Wake  
3. Pebble  
4. Heap  
5. Comet  
6. Line  
7. Ring

پروفیل برداری سرعت در محور مرکزی کلاستر، پنج سانتی متری سمت چپ و پنج سانتی متری سمت راست کلاستر انجام گرفت. شکل (۱) محل و موقعیت پلان پروفیل برداریها را نشان می‌دهد. در عمق نیز در پنج سانتی متری کف در بازه‌های ۰/۵ سانتی متری و در مناطق بالاتر در بازه‌های یک سانتی متری پروفیل برداری انجام گرفته است. در مجموع سی پروفیل برداشت شد. به علت محدودیت وسیله اندازه‌گیری سرعت، سرعت جریان را نمی‌توان بالاتر از پنج سانتی متر زیر سطح آب اندازه‌گیری کرد.

مشخصات جریان در بستر بدون کلاستر و ۲- اندازه‌گیری مشخصات جریان بر روی یک کلاستر شبیه‌سازی شده براساس داده‌های Storm و Papanicolaou (2007) هر دو آزمایش در شرایط مشابه جریان از لحاظ دبی، شیب، زبری کف و عمق جریان انجام گرفته‌اند تا مقایسه بین این دو بهتر انجام شود. در جدول (۱) خلاصه‌ای از خصوصیات جریان و کلاستر بستر ارائه شده است. در شکل (۲) نیز تصویری از کلاستر مورد آزمایش قابل مشاهده است.

جدول (۱): مشخصات جریان و کلاستر

مقدار	متغیر
۰/۰۶۹	دبی جریان ( $m^3/sec$ )
۰/۱۶	عمق ( $m$ )
۰/۴۸	سرعت متوسط ( $m/sec$ )
۰/۱۸	طول کلاستر ( $m$ )
۰/۱۱	عرض کلاستر ( $m$ )
۰/۰۷	ارتفاع کلاستر ( $m$ )
۰/۳۸	عدد فرود



شکل (۱): موقعیت پلان محل‌های اندازه‌گیری پروفیل‌های سرعت

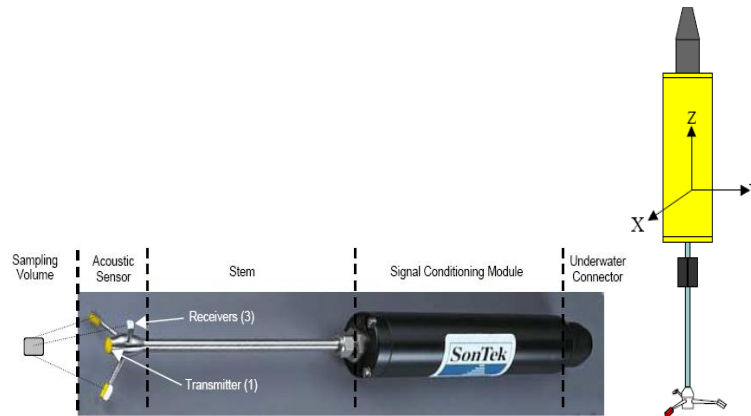


شکل (۲): نمای کناری از کلاستر تحقیق

شد که در زیر به طور خلاصه در مورد آن بحث شده است.

### تجهیزات اندازه گیری سرعت

به منظور اندازه گیری سرعت از یک دستگاه سرعت سنج صوتی ADV با سنجنده دید رو به پایین، استفاده



شکل (۳): تصویری از یک دستگاه بخش اندازه گیرنده سرعت سنج صوتی انعکاسی ۱۶ مگا هرتز داده برداری است که قسمت‌های مختلف آن به تفکیک قابل ملاحظه می‌باشد. (Sontek Inc (2001))

مطالعه (Goring and Nikora, 2002) نشان داد که تعدادی از داده‌های ADV در مناطق نزدیک کف آبراهه‌های با بستر شنی دارای مشکل هستند و در نتیجه موجب حذف ۱۷ درصد از سری‌های زمانی اندازه‌گیری شده، می‌شود.

مشکلات مرتبط با اندازه‌گیری‌های ADV را می‌توان به موارد زیر نسبت داد:

- ۱- تداخل نمونه حجم (Volume sample) با مرزها
- ۲- شدت تلاطم بالا
- ۳- گرادیان بالای برش متوسط
- ۴- تداخل بین سیگنال‌های صوتی انعکاسات مرزها و

#### نمونه حجم

تمامی موارد بالا در جریان بر روی مرزهای بدون زبری نیز می‌توانند اتفاق بیافتند، ولی در مرزهای زبر تشدید می‌شوند (Martin et al., 2002). در این تحقیق نمونه برداری با فرکانس ۵۰ هرتز و طول مدت هر نمونه برداری یک دقیقه بود. بنابراین، در هر نقطه ۳۰۰۰ نمونه برداشت شد. مطالعه صورت گرفته در این تحقیق میدان جریان را حول یک کلاستر بر روی یک بستر زبر بررسی می‌کند.

ویژگی‌های دستگاه‌های ۱۶ مگا هرتزی عبارتند از:

۱. تعداد قرائت در ثانیه (Hz): ۵۰ - ۰/۱
۲. حجم نمونه برداری (CC): ۰/۰۹
۳. فاصله فرستنده پالس تا موقعیت حجم نمونه برداری (Cm): ۵
۴. محدوده سرعت قابل برنامه‌ریزی (Cm/Sec): ۳ - ۱۰ - ۳۰ - ۱۰۰ - ۲۵۰
۵. دقت اندازه‌گیری سرعت ۰/۱٪ محدوده سرعت انتخاب شده و حداقل (Cm/Sec) ۰/۲۵

پیکربندی بخش اندازه گیرنده صوتی شامل یک فرستنده<sup>۱</sup> و سه دریافت کننده صوتی است. بخش سنجنده دستگاه بر روی یک ساقه از جنس استیل با طول ۲۵ سانتی‌متر تا ۴۰ سانتی‌متر نصب می‌شود.

اگرچه استفاده از ADV به‌طور وسیعی گسترش پیدا کرده و کاملاً موثر است، ولی مشاهده شده است که در شرایط خاص دارای مشکلاتی نیز می‌باشد. برای مثال اندازه‌گیری سرعت در سه سانتی‌متری کف جریان‌های هوادهی شده و مناطق کاملاً متلاطم مدل‌های هیدرولیکی (Liu et al., 2002, Cea et al., 2007).

<sup>۱</sup> Transmitter

## فیلتر کردن داده‌ها

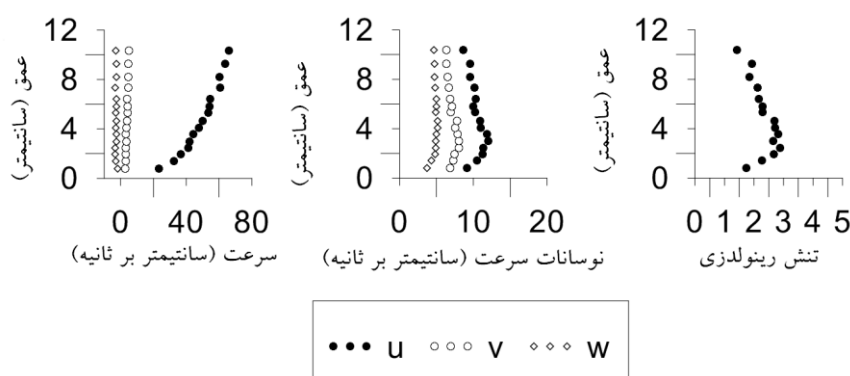
مرحله اول در پردازش داده‌های ADV فیلتر کردن سری‌های زمانی از داده‌های با کیفیت پایین است. فیلتر کردن داده‌ها معمولاً با استفاده از همبستگی سیگنال ADV (COR)، نسبت سیگنال به پارازیت (SNR) و نقاط نوک تیز (Spike) انجام می‌شود (Sontek, Wahl, 2000, Goring & Nikora, 2002, Inc, 2001). فیلتر کردن برحسب COR و SNR موجب حذف نقاطی از سری زمانی می‌شود که مقادیر COR و SNR آنها کمتر از یک مقدار بحرانی باشد. این مقادیر بحرانی معمولاً برای COR عدد ۷۰ و برای SNR برای مشخصات متوسط جریان پنج و برای مشخصات تلاطمی جریان عدد ۱۵ می‌باشد. این پارامترها تا حد زیادی ذهنی هستند. به دلیل این که پارامتر COR تابعی از شرایط جریان است (Cea et al., 2007, Wahl, 2000, Martin et al., 2002). بنابراین، مقادیر COR کمتر از ۷۰ نتیجه نمونه برداری در جریان با انرژی زیاد می‌باشد و ضرورتاً نشان دهنده داده با کیفیت پایین نیست. در این تحقیق برای پردازش و فیلتر کردن داده‌ها از نرم افزار Winadv استفاده شده است. این نرم افزار به وسیله USBR ایجاد و توسعه یافته است.

## نتایج و بحث

نتایج به صورت پروفیل‌های قائم سرعت متوسط، نوسانات سرعت در سه جهت (جذر مجذور مربعات (RMS))، تنش رینولدزی ( $-\rho u'w'$ ) که  $u'$  و  $w'$  به ترتیب نوسانات سرعت در جهت‌های افقی و قائم می‌باشند، مقادیر انرژی جنبشی تلاطمی و ضرایب چولگی و کشیدگی نوسانات ارائه خواهند شد. مقادیر RMS شدت تلاطم را به دست می‌دهند که به ویژه در مسائل انتقال رسوب مهم هستند. تنش‌های رینولدزی نیروهای مرتبط با گردابه‌ها و انتقال مومنوم را ارائه می‌دهند. بنابراین، اهمیت آنها بیشتر در مطالعه جریانهای متلاطم می‌باشد.

## بررسی مشخصات جریان در حالت بدون کلاستر

شکل (۴) توزیع‌های سرعت، جذر مجذور مربعات و همچنین تنش رینولدزی  $-\rho u'w'$  را در جریان بدون کلاستر نشان می‌دهد. در اینجا توزیع سرعت  $u$  از قانون لگاریتمی تبعیت می‌کند. مقادیر RMS نیز دارای یک حداکثر در سه سانتی متر کف می‌باشد که بر اثر زبری مربوط به ذرات می‌باشد. در تنش رینولدزی هم این حداکثر قابل مشاهده است. از نتایج حاصله از این آزمایش برای مقایسه دو حالت بدون کلاستر و با کلاستر استفاده شده است.



شکل (۴): مشخصات جریان در حالت بدون کلاستر

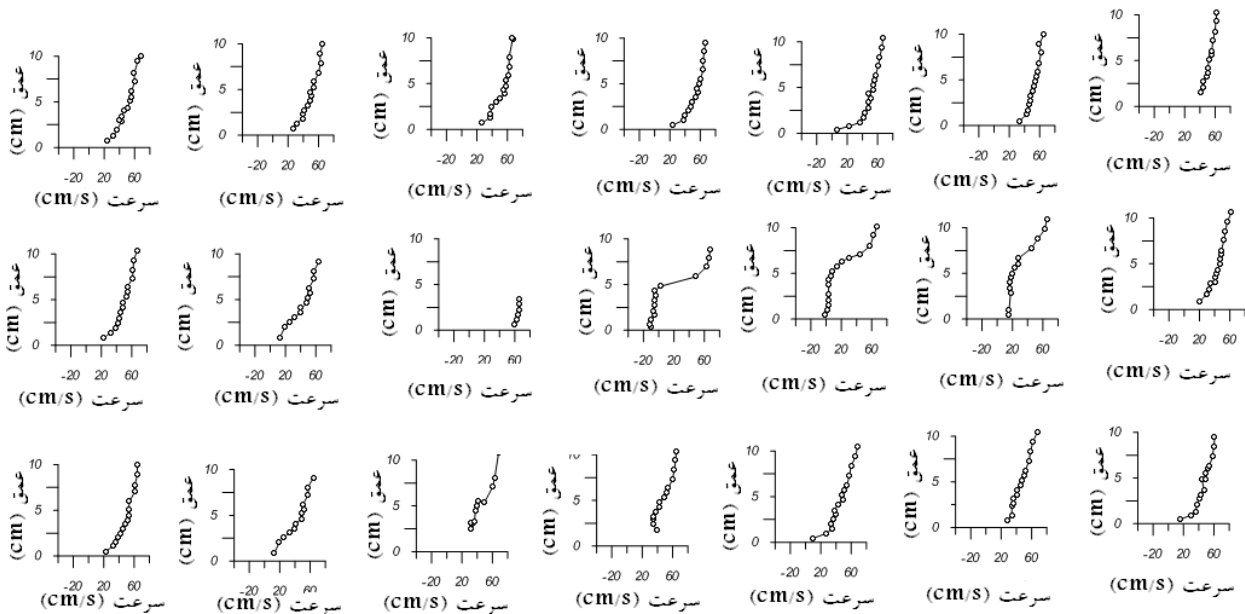
نقاط مختلف را تسهیل می‌کنند. در نقطه ۳۰- سانتی متر هر سه پروفیل دارای شکل یکسانی هستند و این مساله نشان می‌دهد که کلاستر در این نقطه تاثیر زیادی بر

پروفیل‌های سرعت  $u$ 

شکل (۵) پروفیل‌های سرعت  $u$  را در نقاط مختلف نشان می‌دهد. این پروفیل‌ها شناسایی رفتار جریان در

اثر کمی مشاهده می‌شود. در ناحیه وسط سرعت در نزدیکی کف تقریباً یکنواخت است. در نقطه صفر که در واقع مکان اتمام کلاستر می‌باشد، سرعت به شدت کاهش یافته و حتی منفی می‌شود. در این منطقه به علت افزایش عمق و افزایش فشار، سرعت کاهش می‌یابد و جدایی جریان کاملاً قابل مشاهده است.

جریان نگذاشته است. در نقطه  $17/5$  - سانتی‌متر که نقطه شروع کلاستر می‌باشد. در این نقطه مشاهده می‌شود که سرعت در نزدیکی کف به علت برخورد به کلاستر، نسبت به نقطه  $30$  - کاهش می‌یابد، ولی در طرفین کلاستر تغییر چندانی مشاهده نمی‌شود. در نقطه  $2/5$  - که بر روی کلاستر می‌باشد، در محور وسط افزایش شدید سرعت مشاهده می‌شود، در حالی که در کناره‌ها تقریباً



شکل (۵): پروفیل‌های سرعت  $u$  در نقاط مختلف نوسانات سرعت در سه جهت

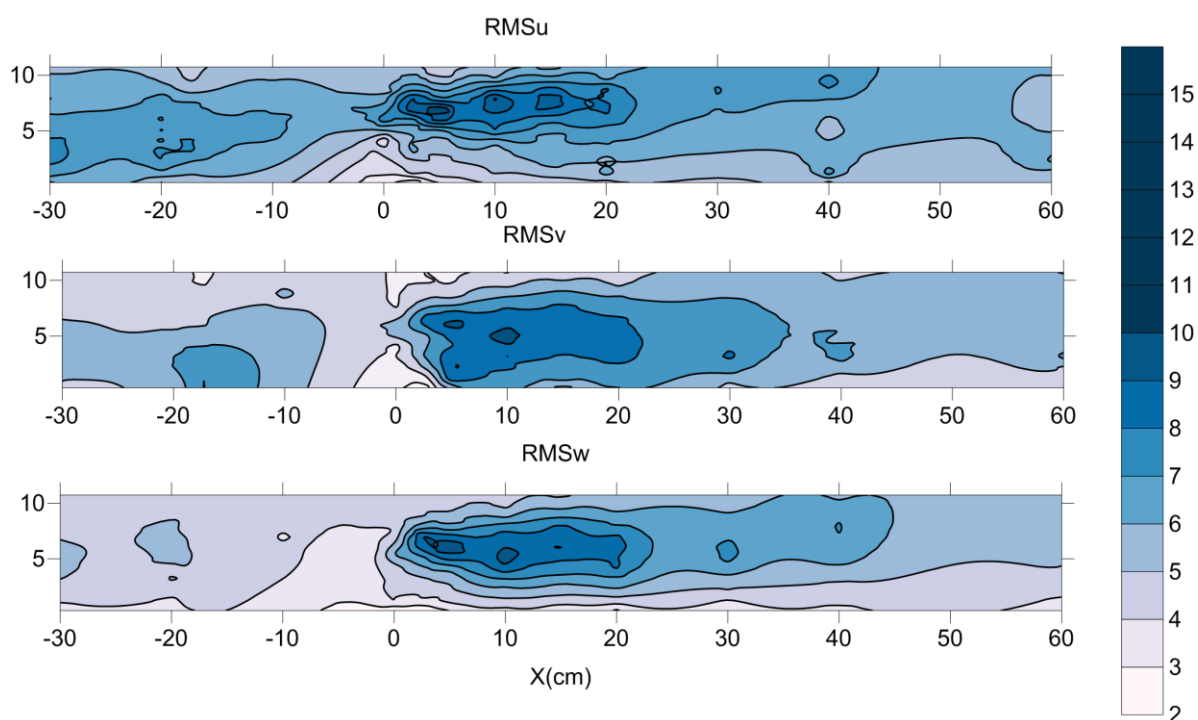
### نوسانات سرعت

شکل (۶) مقادیر نوسانات سرعت را که با استفاده از جذر مجذور مربعات نوسانات سرعت مشخص می‌شوند، نشان می‌دهد. هرچه مقدار عددی RMS بالا باشد، نشان دهنده بیشتر بودن نوسانات سرعت است. به علت تحت تاثیر قرار نگرفتن کناره‌ها، فقط مقطع مرکزی نمایش داده شده است. در گراف مربوط به  $RMS_u$  قبل از کلاستر دارای یک حداکثر در سه تا پنج سانتی‌متر کف است و تقریباً یکنواخت است. در نقطه‌ای که کلاستر آغاز می‌شود ( $17/5$  - سانتی‌متر) مشاهده می‌شود که مقادیر RMS در نزدیکی کف افزایش یافته است. بر روی کلاستر توزیع تقریباً یکنواختی مشاهده می‌شود. در نقطه صفر که نقطه انتهایی کلاستر است، مشاهده می‌شود که نقطه حداکثر به هفت سانتی‌متر کف منتقل می‌شود. این عدد دقیقاً ارتفاع کلاستر می‌باشد.

این مساله نشان می‌دهد که در این ناحیه جریان برگشتی وجود دارد. در نقاط کناری نیز این اثر قابل مشاهده است ولی شدت آن کمتر است. در این دو ناحیه سرعت منفی وجود ندارد، ولی پروفیل سرعت از حالت طبیعی خود خارج شده و شکل S به خود گرفته است. در نقطه  $5$  + سانتی‌متر در محور وسط جریان برگشتی همچنان وجود دارد، ولی از اندازه آن کاسته شده است. در کناره‌ها نیز اگرچه شکل طبیعی توزیع سرعت برگشته است، ولی سرعت در نزدیکی کف نسبت به حالت عادی کاهش یافته است. در نقطه  $10$  + سانتی‌متر، در محور وسط پروفیل همچنان S شکل است، ولی سرعت در نزدیکی کف مثبت شده است. این اثر در کناره‌ها دیگر قابل مشاهده نیست. در نقطه  $60$  + سانتی‌متر اثر کلاستر از بین رفته و شکل معمول توزیع سرعت حاکم می‌باشد.

در  $RMS_v$  مشاهده می‌شود که در نقطه  $۱۷/۵-$  سانتی‌متر که در واقع نقطه ورود به کلاستر است، تلاطم افزایش پیدا کرده است. بر روی کلاستر نیز مقادیر  $RMS_v$  کاملاً یکنواخت هستند. در نقطه صفر به مانند دو نمودار قبل افزایش شدید تلاطم در پنج الی هفت سانتی‌متر کف مشاهده می‌شود. در ادامه برخلاف دو حالت قبل نقطه حداکثر رو به بالا حرکت نمی‌کند و تقریباً مکان آن ثابت است.

از نقطه صفر تا نقطه  $۲۰+$  این حداکثر همچنان وجود دارد و در مکان آن نیز تغییری مشاهده نمی‌شود. بعد از نقطه  $۲۰+$  این نقطه حداکثر رو به بالا حرکت می‌کند و از مقدار آن نیز کاسته می‌شود. روند تغییر  $RMS_w$  تا حدود زیادی شبیه به  $RMS_u$  می‌باشد، با این تفاوت که مقادیر عددی آن کمتر است و مکان نقطه حداکثر پایین تر است.



شکل (۶): مقادیر RMS در محور مرکزی کلاسترها (مقادیر به  $cm/sec$  می‌باشند)

در شرایط ایده آل شدت تلاطم صفر می‌باشد. بسته به چگونگی محاسبه شدت تلاطم، مقادیر آن می‌تواند بالای صد درصد نیز باشد. این شرایط زمانی اتفاق می‌افتد که سرعت متوسط کم ولی نوسانات سرعت بالا باشد. در شکل (۷) مقادیر شدت تلاطم برای محور مرکزی کلاستر نشان داده شده است. در نقطه  $۱۷/۵-$  که شروع کلاستر می‌باشد، یک منطقه با شدت تلاطم بالا (تقریباً ۱۸ درصد) مشاهده می‌شود. در منطقه پایین دست کلاستر تلاطم بسیار بالاست و مقادیر آن تا ۲۰۰ درصد می‌رسد. بعد از نقطه  $۱۰+$  مقادیر شدت تلاطم کاهش پیدا می‌کند.

### شدت تلاطم

شدت تلاطم به شکل زیر تعریف می‌شود:

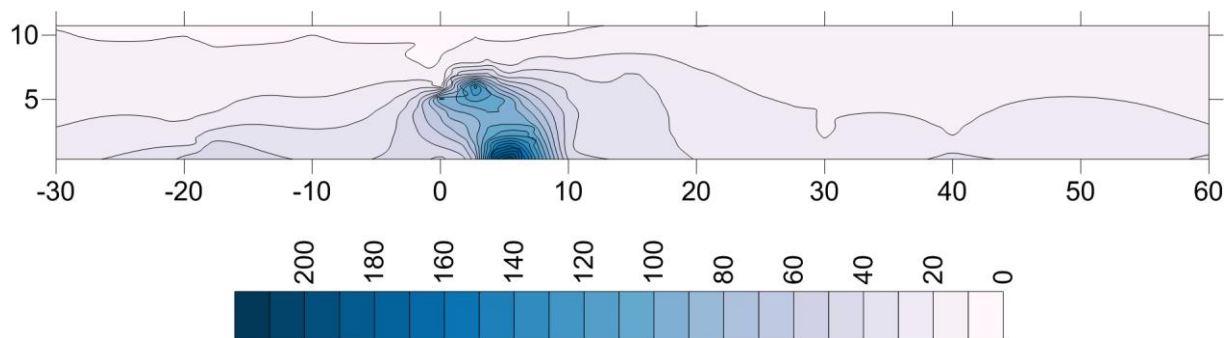
$$I = \frac{u_{fl}}{U_{avg}} \quad (1)$$

$$u_{fl} = \sqrt{\frac{1}{3}(u'^2 + v'^2 + w'^2)} \quad (2)$$

$$U_{avg} = \sqrt{(u^2 + v^2 + w^2)} \quad (3)$$

$u'$ ،  $v'$  و  $w'$  نوسانات سرعت به ترتیب در جهات

$x$ ،  $y$  و  $z$  می‌باشند.

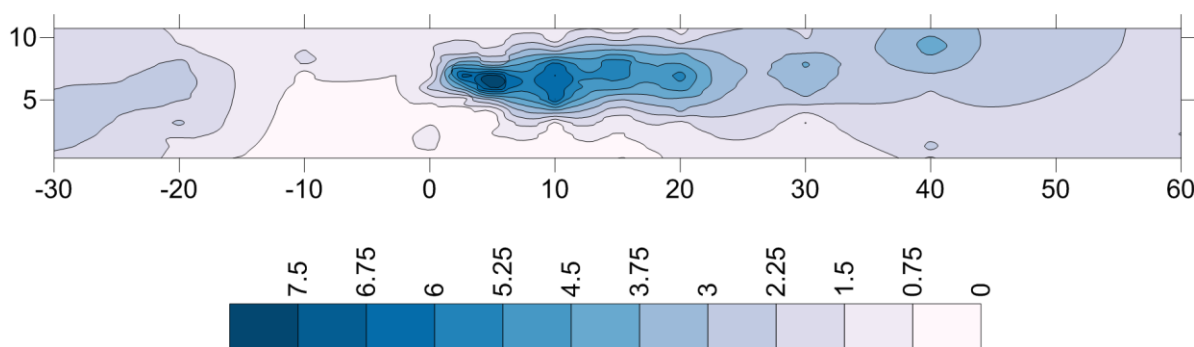


شکل (۷): مقادیر شدت تلاطم

دچار تغییر می‌شود. حداکثر مقدار تنش برشی رینولدزی در نقطه  $+5$  و  $6$  سانتی‌متری از کف صورت می‌گیرد. هرچه به طرف پایین دست حرکت شود، از اندازه مقدار حداکثر تنش برشی رینولدزی کاسته شده و بیشتر در عمق پخش می‌شود.

### تنش‌های رینولدزی

شکل (۸) تنش‌های رینولدزی را در محور مرکزی نشان می‌دهد. در نقاط بالادست کلاستر، تغییرات کمی در مقادیر تنش رینولدزی مشاهده می‌شود و دارای یک مقدار حداکثری در سه سانتی‌متری کف می‌باشد. در ناحیه پایین دست کلاستر تنش برشی رینولدزی به شدت



شکل (۸): توزیع تنش رینولدزی  $-\rho u'w'$  در محور مرکزی کلاستر

شکل (۹) توزیع انرژی جنبشی تلاطمی را در محور مرکزی کلاستر نشان می‌دهد. همان‌طور که از شکل مشخص است، حداکثر مقدار  $k$  در فاصله  $+5$  و تقریباً شش سانتی‌متر از کف اتفاق می‌افتد.

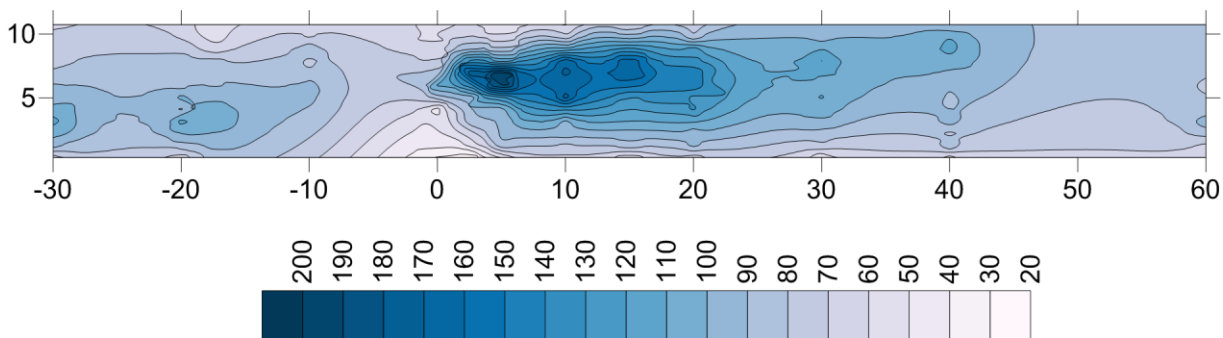
### انرژی جنبشی تلاطمی

#### (Turbulent kinetic Energy)

انرژی جنبشی تلاطمی به شکل زیر تعریف می‌شود:

$$k = \frac{1}{2}(u'^2 + v'^2 + w'^2) \quad (۴)$$



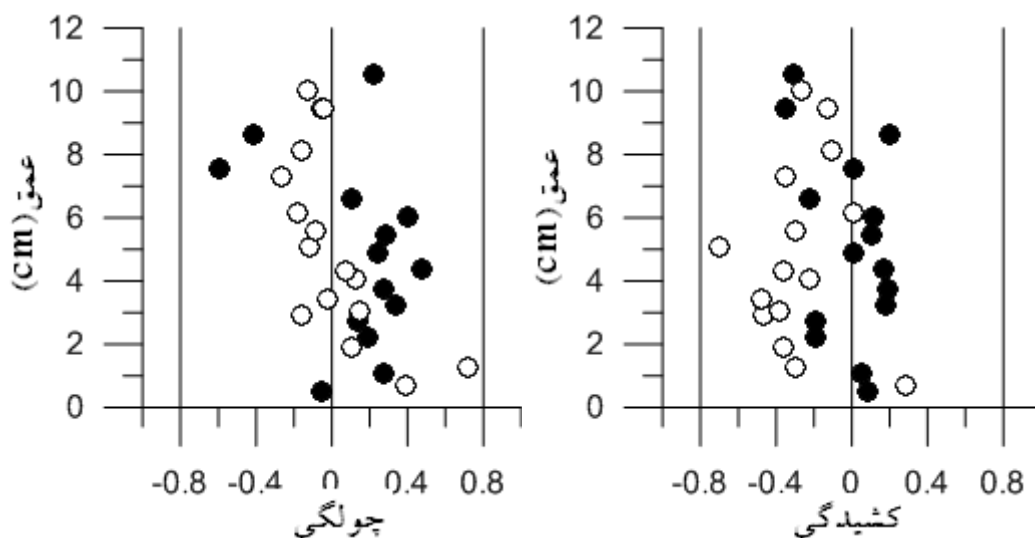


شکل (۹): مقادیر انرژی جنبشی تلاطمی در محور مرکزی کانال

چولگی در نزدیکی کف مثبت و با حرکت به سمت سطح آب این مقادیر منفی می‌شوند. در حالت با حضور کلاستر نیز مقادیر چولگی در نزدیکی کف مثبت است و با حرکت به سمت سطح آب منفی می‌شود، ولی تفاوت در اینجاست که مقادیر ضریب چولگی بزرگتر از حالت قبل هستند و در عمق بیشتری نسبت به حالت قبل از حالت مثبت خارج و منفی می‌شوند.

### ضرایب کشیدگی (Kurtosis) و چولگی (Skewness) نوسانات سرعت

ضرایب چولگی و کشیدگی به ترتیب از گشتاورهای سوم و چهارم سری‌های زمانی به دست می‌آیند. در شکل (۱۰) توزیع‌های قائم مقادیر  $S_{ii}$  و  $K_{ii}$  برای حالت‌های بدون کلاستر (a) و با حضور کلاستر (b) در فاصله ۲/۵ سانتی‌متری پایین دست کلاستر رسم شده‌اند. مشاهده می‌شود که در حالت بدون کلاستر مقادیر



شکل (۱۰): تغییرات ضرایب چولگی و کشیدگی در عمق (نقاط توخالی حالت بدون کلاستر و نقاط توبر حالت با کلاستر را نشان می‌دهند).

### نتیجه‌گیری

در این تحقیق خصوصیات تلاطمی جریان حول یک کلاستر شبیه سازی شده در یک کانال آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفت. نتایجی که از این تحقیق حاصل شد به شرح زیر می‌باشد:

۱. کلاستر موجب تغییر پروفیل‌های سرعت و نوسانات آن می‌شود. کلاستر موجب S شکل شدن پروفیل سرعت در

ضریب کشیدگی در حالت بدون کلاستر منفی می‌باشد و در حالت با کلاستر تغییرات چندانی ندارد و حول صفر تغییر می‌کند. از نقطه نظر فیزیکی، مقادیر منفی ضریب چولگی در منطقه دور از بستر و سطح نشان دهنده انتقال انرژی تلاطمی از کف به سمت بالادست است، در حالی که ضریب کشیدگی درجه نوسان انرژی تلاطمی را نشان می‌دهد (Nikora & Smart 1997).

- جدایی جریان در دنباله کلاستر: این منطقه از روی پروفیل‌های سرعت و نوسانات سرعت قابل مشاهده است.
- پخش گردابه (Vortex Shedding) از تاج کلاستر: منحنی‌های خطوط تراز  $RMS_v$  و تنش رینولدزی نشان می‌دهد که منطقه‌ای با تلاطم بالا و انتقال مومنتوم بالا وجود دارد که از تاج کلاستر به صورت قائم به سمت پایین دست گسترش پیدا می‌کند و هرچه به پایین تر می‌رود، شدت آن کاهش می‌یابد.
- اتصال دوباره جریان در پایین دست کلاستر: پروفیل‌های سرعت نشان می‌دهد که نقطه اتصال جریان در فاصله ۲۰ سانتی‌متری کلاستر سرعت می‌پذیرد.
- بازگشت به حالت اولیه جریان: بعد از عبور جریان از مراحل بالا، جریان به شرایطی باز می‌گردد که کلاستر وجود ندارد.

منطقه دنباله آن می‌شود و کلاستر نوسانات سرعت را به نسبت به یک بستر بدون کلاستر به شدت تغییر می‌دهد و مقادیر حداکثر آن‌ها را از کف به سمت بالاتر انتقال می‌دهد.

۲. کلاسترها طبیعت تولید انرژی تلاطمی را از حالت استاندارد آن با انتقال ناحیه تولید حداکثر انرژی جنبشی تلاطمی از کف به لایه برشی جدا شده از روی کلاستر، تغییر می‌دهند. این مساله نشان می‌دهد که تلاطم ایجاد شده به وسیله دنباله ذرات تکی مهمترین مکانیسم در تولید تلاطم در رودخانه‌های با بستر شنی است.

۳. بر روی یک کلاستر پنج منطقه را می‌توان شناسایی کرد:
 

- شتاب یافتن جریان بر روی کلاستر: این افزایش سرعت به علت کاهش عمق بر روی کلاستر و در نتیجه کاهش فشار است.

## منابع

1. ADV Field Operation Manual. 2001. SonTek Company.
2. Brayshaw, A.C., L.E. Frostick and I. Reid. 1983. Hydrodynamics of particle clusters and sediment entrainment in coarse alluvial channels. *Sedimentology*, 30:137-143.
3. Buffin-Bélanger, T. and A.-G. Roy. 1998. Effects of a pebble cluster on the turbulent structure of a depth-limited flow in a gravel-bed river. *Geomorphology*, 25:249-267.
4. Cea, L., J. Puertas and L. Pena. 2007. Velocity measurements on highly turbulent free surface flow using ADV. *Exp. Fluids*, 42:333-348.
5. Chang, H.H. 1998. *Fluvial processes in river engineering*, Reprint Ed. Wiley, New York.
6. Finelli, C.M., D.D. Hart and D.M. Fonseca. 1999. Evaluating the spatial resolution of an acoustic Doppler velocimeter and the consequences for measuring near-bed flows, *Limnol. Oceanogr.*
7. Ge, L., S.O. Lee, F. Sotiropoulos and T. Sturm. 2005. 3D unsteady RANS modeling of complex hydraulic engineering flows. II: Model validation and flow physics. *J. Hyd. Eng.*, 131(9):809-820.
8. Goring, D.G. and V.I. Nikora. 2002. Despiking acoustic Doppler velocimeter data. *J. Hydraul. Eng.*, 128(1):117-126.
9. Gustavson, T.C. 1974. Sedimentation on gravel outwash fans, Malaspina glacier foreland. Alaska. *Journal of Sedimentary Research*, 44:374-389.
10. Kirkbride, A. 1993. Observations of the influence of bed roughness on turbulence structure in depth limited flows over gravel beds. *Turbulence: Perspectives on flow and sediment transport*, N., J. Clifford, J. R. French, and J. Hardisty, eds., Wiley, New York, 185-196.
11. Kozlowski, B. and P. Ergenzinger. 2000. Ring structures-A specific new cluster type in steep mountain torrents. *Proc., Int. Association of Hydraulic Research Conf. Graz, Austria, August 28.*
12. Lawless, M. and A. Robert. 2001. Three-dimensional flow structure around small-scale bedforms in a simulated gravel-bed environment. *Earth Surf. Processes Landforms*, 26: 507-522.
13. Liu, M., D.Z. Zhu and N. Rajaratnam. 2002. Evaluation of ADV measurements in bubbly two-phase flows. *Proc., ASCE/EWRI and IAHR Int. Conf. on Hydraulic Measurements and Experimental Methods.*
14. Martin, V., T. Fisher, R. Millar and M. Quick. 2002. ADV data analysis for turbulent flows: Low correlation problem. *Proc., ASCE/ EWRI and IAHR Int. Conf. on Hydraulic Measurements and Experimental Methods, Vol. 113, p. 101.*
15. Millar, R.G. 1999. Grain and form resistance in gravel-bed rivers. *J. Hydraul. Res.*, 37(3): 303-312.

16. Nikora, V.I. and G.M. Smart. 1997. Turbulence characteristics of New Zealand gravel-bed rivers. *J. Hyd. Eng., ASCE*, 123(9):764–773.
17. Papanicolaou, A.N., K. Strom, A. Schuyler and N. Talebbeydokhti. 2003. The role of sediment specific gravity and availability on cluster evolution. *Earth Surf. Processes Landforms*, 28:69–86.
18. Storm, K. 2006. Cluster bedforms in mountain rivers. PhD Thesis, Iowa University.
19. Storm, K. B. and A.N. Papanicolaou. 2007. Morphological characterization of cluster microforms, *Sedimentology*, 5(1):137–153.
20. Wahl, T.L. 2000. Analyzing ADV data using WinADV. Proc., 2000 Joint Conf. on Water Resources Engineering and Water Resources Planning & Management, Minneapolis, 1–10.
21. Whittaker, J.G. 1987. Sediment transport in step-pool streams. in Thorne, C. R., Bathurst, J. C., and Hey, R.D., eds., *Sediment transport in gravel-bed rivers*: Chichester, United Kingdom, John Wiley and Sons, p. 545–579.
22. Wohl, E.E. 2000. *Mountain Rivers*, American Geophysical Union, Washington, D.C.

## Experimental investigation of 3D flow over cluster microforms

### Abstract

Cluster microforms are a type of small scale bedform found in the surface layer of some gravel bed rivers. These bedforms are comprised of discrete, organized groupings of particles that sit above the average elevation of the surrounding bed. As part of the structural organization of the bed, clusters are believed to impact the local dynamics of the fluvial system through the feedback process involving the flow field, entrainable sediment, and stable bed morphology. To investigate the effects of the cluster on average and turbulent characteristics a laboratory model has been used. An acoustic Doppler velocimeter (ADV) has been used to measure average velocities and fluctuations. Results of this study show that compared with nonclustered bed, clusters have significant effects on flow characteristics. Clusters cause to change the location of maximum RMS (root mean square) and Reynolds shear stress and move it upward. Clusters create a shear layer downstream of it. The results of analysis show that one can distinguish five different areas over a cluster: flow acceleration up the stoss-side of the cluster; recirculation behind the cluster in the wake region; vortex shedding from the pebble crest and shear layer; flow reattachment downstream of the cluster; upwelling of flow downstream of the point of reattachment; and recovery of flow.

**Key words:** Cluster, Flow Structure, Gravel Bed Rivers, Turbulence.