

## بررسی آزمایشگاهی مشخصه‌های پروفیل سرعت بدنه جریان غلیظ در شرایط بستر متحرک

اعظم شریف‌نژاد<sup>۱\*</sup>، سید محمود کاشفی پور<sup>۲</sup> و مهدی قمشی<sup>۳</sup>

## چکیده

با توجه به اهمیت و سهم عمده جریان‌های غلیظ در مدیریت پایدار منابع آب و محیط زیست، بررسی جنبه‌های مختلف آن امری ضروری است. پژوهش‌های انجام شده تاکنون در شرایط آزمایشگاهی و فلوهای با بستر صلب بوده است؛ اما در این پژوهش برای نزدیک کردن نتایج به شرایط طبیعی در رودخانه‌ها و مخازن و امکان بررسی فرسایش بستر، آزمایش‌ها روی بستر متحرک و فرسایش‌پذیر انجام شد. از آنجا که پروفیل بدنه سرعت سهم مهمی در تشکیل انواع فرم‌های بستر و فرسایش آن دارد، با تغییر شرایط هیدرولیکی جریان، به تحلیل مشخصه‌های پروفیل سرعت بدنه جریان غلیظ در دو شرایط بستر صلب و متحرک پرداخته شد. بدین ترتیب، نتایج نشان داد که بستر متحرک و به‌خصوص تشکیل فرم بستر، باعث کاهش سرعت بدنه جریان غلیظ تا حدود ۳۰٪ و کاهش روند افزایش سرعت به ازای افزایش غلظت جریان تا حدود ۵۰٪ خواهد شد. همچنین، در مقایسه پروفیل‌های بدون بعد سرعت جریان، مشخص شد مقادیر نسبی مرز بین آب زلال و جریان غلیظ در شرایط بستر متحرک حدود ۲۵٪ کاهش یافت و در شرایط تشکیل که فرم بستر این مقدار به ۴۰٪ هم می‌رسد.

**واژه‌های کلیدی:** بستر صلب، بستر متحرک، پروفیل سرعت، جریان غلیظ، فرم بستر.

ارجاع: شریف‌نژاد ا. کاشفی پور س. م. و قمشی م. ۱۳۹۷. بررسی آزمایشگاهی مشخصه‌های پروفیل سرعت بدنه جریان غلیظ در شرایط بستر متحرک. مجله پژوهش آب ایران. ۲۸: ۱۰۳-۱۱۲.

۱- دانشجوی دکتری سازه‌های آبی، دانشکده مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز.

۲- استاد گروه سازه‌های آبی، دانشکده مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز.

۳- استاد گروه سازه‌های آبی، دانشکده مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز.

\* نویسنده مسئول: [a.sharifnezhad@yahoo.com](mailto:a.sharifnezhad@yahoo.com)

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۰۶/۰۱

تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۱۱/۲۵

## مقدمه

(۲۰۱۰a) به مطالعه جریان غلیظ رسوبی و نمکی در دو رژیم زیربحرانی و فوق بحرانی پرداختند و اثر زبری و فرم‌های بستر بر پروفیل قائم سرعت و تغییرات چگالی جریان در بستر رسوبی را بررسی کردند. طبق نتایج، الگوی تغییرات پروفیل‌های سرعت و چگالی جریان، به پارامترهای عدد فرود جریان، اندازه ذرات بستر و تشکیل فرم بستر وابسته است.

سکویروس و همکاران (۲۰۱۰b) با مطالعه جریان غلیظ رسوبی و نمکی در هر دو رژیم زیربحرانی و فوق بحرانی، در چهار شرایط فرم بستر تشکیل‌شده روابطی برای انتقال بار بستر و مقاومت بستر جریان را ارائه دادند که تطابق خوبی با روابط جریان در کانال باز نشان داده است. سکویروس و همکاران (۲۰۱۲) با جمع‌آوری ۱۰۹۲ داده اندازه‌گیری شده سرعت و غلظت در جریان غلیظ، روش جدید (RANS)<sup>۱</sup> برای تخمین مشخصات جریان نرمال را ارائه دادند. این روش بر پایه معادلاتی است که عدد فرود را به شیب بستر، اصطکاک، مواد معلق و سایر پارامترهای جریان مرتبط می‌کند. ژو و همکاران (۲۰۱۴) به بررسی و اندازه‌گیری شرایط هیدرولیکی و رسوب‌گذاری جریان غلیظ رسوبی در شرایط طبیعی در پایین‌دست دو جریان غلیظ رسوبی در موتوری آمریکا<sup>۲</sup> پرداختند. همچنین در پژوهش‌های کویل و همکاران (۲۰۰۶)، عباد و همکاران (۲۰۱۱)، هانگ و همکاران (۲۰۱۲) و لو و همکاران (۲۰۱۳) در فلوم‌های قوسی شکل در بستر متحرک نشان داده شد که با حرکت جریان غلیظ روی بستر متحرک، الگوی جریان در قوس تغییر کرده و ممکن است سبب تغییر جریان اصلی و تنش برشی کل و الگوی فرسایش و رسوب‌گذاری جریان شود.

با توجه به پژوهش‌های انجام شده، تعامل رسوبات بستر با جریان غلیظ بر دینامیک جریان ورودی آن مؤثر خواهد بود. از طرف دیگر، در شرایط هیدرولیکی خاصی در بستر رودخانه فرم بستر تشکیل می‌شود و از آنجا که فرم بستر نیز تأثیر مستقیم بر زبری و حمل مواد رسوبی دارد (شفاعی بجزستان، ۱۳۷۸)، این مسأله در الگوی فرسایش و رسوب‌گذاری و مقاومت در برابر جریان اهمیت ویژه‌ای می‌یابد و تأثیر مستقیم بر پروفیل سرعت جریان غلیظ خواهد گذاشت. بدین ترتیب، با توجه به اهمیت نقش

امروزه، سدها نقش ارزنده‌ای در تولید انرژی و ذخیره آب دارند و به منزله سرمایه‌ای برای تأمین آب و انرژی در جهان مدرن امروزی، افزایش تولیدات کشاورزی، بهبود کشتیرانی، تولید انرژی پاک و تجدیدپذیر و تأمین آب آشامیدنی و در عین حال کاستن اثرهای فاجعه‌آمیز طغیان‌ها و سیلاب‌ها هستند (کمیته ملی سدها، ۱۳۹۴). از طرف دیگر، احداث سد در مسیر رودخانه به‌طور قابل توجهی شرایط طبیعی رودخانه در بالادست و پایین‌دست را تغییر می‌دهد؛ به گونه‌ای که، بار معلق در کف مخزن سد به شکل جریان غلیظ تشکیل می‌شود. اصولاً زمانی که سیالی با جرم مخصوص بیشتر به درون یک سیال دیگر با جرم مخصوص کمتر جریان یابد، پدیده جریان غلیظ اتفاق می‌افتد (گراف، ۱۹۷۱).

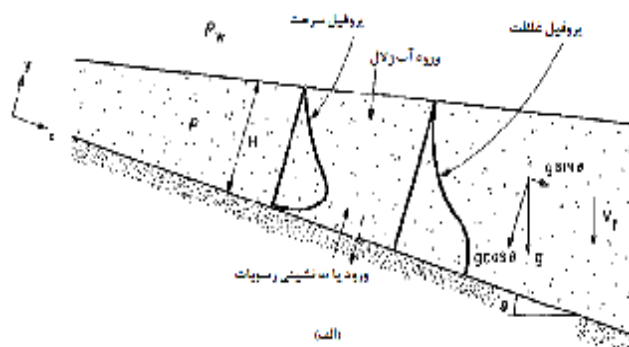
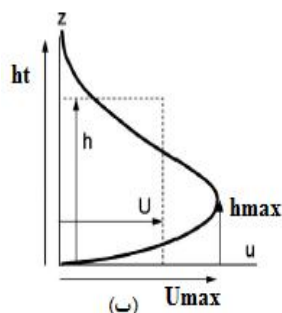
مشاهدات اولیه از جریان غلیظ را فارل (۱۸۹۲) یک پژوهشگر سوئسی انجام داد. پس از آن پژوهش‌های آزمایشگاهی و صحرایی زیادی روی جنبه‌های مختلف جریان‌های غلیظ انجام شده که اکثراً در خصوص حرکت جریان غلیظ روی بستر صاف و صلب بوده و مطالعات کمی در خصوص تأثیر زبری مصنوعی بستر بر مشخصات جریان غلیظ انجام شده است. از جمله این مطالعات می‌توان به پژوهش‌های پارکر و همکاران (۱۹۸۶)، فرناندز و ایمبرگر (۲۰۰۶)، کاهه (۱۳۹۱) و ورجاوند (۱۳۹۲) اشاره کرد. تغییرات زبری بستر روی خصوصیات جریان غلیظ مانند پروفیل سرعت و غلظت، سرعت پیشانی، ضریب ورود و میزان ته‌نشینی اثرگذار نشان داده شد. در مطالعات جریان غلیظ، بیشتر پژوهش‌ها روی رسوب‌گذاری و ته‌نشینی رسوبات بوده؛ اما به علت سختی در دقت و اندازه‌گیری عکس‌العمل فرسایش و رسوب‌گذاری در کف بستر در این بخش کار کمتری روی مشخصات فرسایش و شکل بستر انجام شده است (اوهی، ۲۰۰۲). طبق پژوهش نلر و همکاران (۱۹۹۹) در صورت حرکت جریان غلیظ روی بستر رسوبی، ممکن است رسوبات بستر از ناحیه‌ی زیر دماغه وارد پیشانی جریان غلیظ‌شده و منجر به فرسایش بستر شوند. پارکر و همکاران (۱۹۸۷) و گارسیا (۱۹۹۴)، فرم‌های بستر شکل گرفته با جریان غلیظ نمکی روی بستر رسوبی را مشاهده کردند. در این مطالعات، توجه خاصی به تأثیر آن‌ها بر مشخصات جریان تشکیل‌دهنده‌شان نشده است. سکویروس و همکاران

1- Reynolds-averaged Navier-Stokes (RANS)

2- Monterey Canyon, USA

### ساختار جریان غلیظ در شرایط بستر متحرک

جریان غلیظ در شرایط بستر متحرک از سه ناحیه تشکیل شده است: آب زلال پیرامون، آب کدر و رسوبات (ذرات بستر). اندرکنش پیچیده‌ی جریان کدر با دو ناحیه دیگر، بررسی و تحلیل این جریان‌ها را مشکل کرده است. از جمله دلایل آن می‌توان به مواردی مانند اثر نیروی شناوری، اندرکنش ذرات با جریان و آشفته‌گی‌های سطح مشترک سیال محیطی با جریان کدر اشاره کرد. این نوع جریان روی یک بستر رسوبی، می‌تواند عامل فرسایش یا رسوب‌گذاری باشد (شکل ۱- الف).



شکل ۱- الف) الگوی حرکت جریان غلیظ روی بستر متحرک (آکیاما و استفان، ۱۹۸۵) و ب) شماتیکی از پروفیل سرعت در بدنه جریان غلیظ (سکویروس و همکاران، ۲۰۱۰ a)

یافته است. بنابراین شتاب ثقل مؤثر بر جریان، به‌عنوان نیروی محرک در جریان غلیظ به صورت زیر بیان می‌شود (کولنبرگ، ۱۹۷۷):

$$g' = g \frac{(r_t - r_a)}{r_a} = g \frac{\Delta r}{r_a} = g C_s \frac{r_s - r_w}{r_w} \quad (1)$$

$C_s$  غلظت حجمی رسوبات غیرچسبنده،  $\rho_a$  دانسیته سیال پیرامون،  $\rho_t$  دانسیته سیال غلیظ،  $\rho_w$  دانسیته آب و  $\rho_s$  دانسیته ذرات رسوب. در بدنه جریان غلیظ به‌دلیل نامشخص بودن مرز مشترک دو سیال پیرامون و جریان غلیظ، از معادلات زیر برای محاسبه ارتفاع، سرعت متوسط در بدنه استفاده می‌شود (الیسون و ترنر، ۱۹۵۹).

$$Uh = \int_0^{\infty} u dz \approx \int_0^{h_t} u dz = q \quad (2)$$

$$U^2 h = \int_0^{\infty} u^2 dz = \int_0^{h_t} u^2 dz \quad (3)$$

پروفیل بدنه سرعت در تشکیل انواع فرم‌های بستر و فرسایش، نادیده گرفتن رسوبات بستر جریان و حرکت آنها، نتایج آزمایشگاهی را از شرایط واقعی دور و بررسی الگوی جریان در طبیعت را با خطا همراه کرد. از طرف دیگر، آزمایش‌های جریان غلیظ در شرایط بستر متحرک و فعال می‌تواند مسیر جدیدی در مطالعات و بررسی الگوی جریان در شرایط مختلف هیدرولیکی باشد؛ بنابراین در این پژوهش به‌دلیل اهمیت موضوع و کاربرد آن در طبیعت، به تحلیل مشخصه‌های پروفیل سرعت بدنه جریان غلیظ در شرایط بستر رسوبی و فرسایش‌پذیر پرداخته خواهد شد.

در این حالت، جریان غلیظ همزمان وارد آب زلال و ته‌نشین می‌شود، اما یک شار خالص به بستر (جریان رسوب‌گذار)<sup>۱</sup> یا از بستر (جریان فرسایشی)<sup>۲</sup> وجود دارد. جریان‌های غلیظ، جریان‌های خود تولیدکننده<sup>۳</sup> هستند؛ به گونه‌ای که با ته‌نشینی ذرات معلق ناپدید و با ورود رسوبات از کف، دوباره تولید می‌شوند (آکیاما و استفان، ۱۹۸۵). در این پژوهش، برای بررسی بهتر، جریان غلیظ نمکی روی بستر رسوبی (پوشیده از ذرات با دانه‌بندی و چگالی مشخص) در نظر گرفته و در اکثر آزمایش‌ها، انواع فرم بستر تشکیل و فرسایش بستر به خوبی مشاهده شده است.

جریان غلیظ یا جریان چگال<sup>۴</sup>، جریانی با چگالی  $\rho_t$  است که به‌دلیل اثر اختلاف چگالی دو سیال بر شتاب جاذبه به وجود می‌آید؛ یعنی نیروی ثقل به نسبت  $(\Delta\rho/\rho_a)$  کاهش

- 1- Depositing current
- 2- Entraining current
- 3- Self-generated
- 4- Gravity Current

$$\text{Re} = \frac{Uh}{n} > 4000, \text{Re}_* = \frac{u_* d_{50}}{n} > 200 \quad (۴)$$

در این رابطه،  $\text{Re}$  عدد رینولدز،  $\text{Re}_*$  عدد رینولدز برشی،  $u_*$  سرعت برشی و  $v$  لزوجت سینماتیکی جریان غلیظ است.

ب- با مشخص کردن دانه‌بندی رسوبات، باید محدوده‌ی انحراف استاندارد هندسی ( $\sigma_g$ ) به‌گونه‌ای باشد که دانه‌بندی تقریباً یکنواخت باشد تا از پدیده‌ی سپری شدن<sup>۱</sup>

نیز جلوگیری شود؛ بنابراین بهتر است مقدار  $\sigma_g$  ( $\sqrt{\frac{d_{84}}{d_{16}}}$ ) کمتر از ۱/۳۵ انتخاب شود (لیتل و مییر، ۱۹۷۶ و پارکر و سوترلند، ۱۹۹۰). در این رابطه،  $d_{16}$  و  $d_{84}$  مربوط به اندازه‌ی رسوباتی هستند که به ترتیب، ۸۴٪ و ۱۶٪ نمونه از آن ریزتر هستند.

با توجه به سرعت‌های بسیار پایین در آزمایش‌های جریان غلیظ و اهمیت تشکیل فرم‌های بستر و بررسی جریان غلیظ در این شرایط، از ذراتی با قطر میانگین ( $d_{50}$ ) برابر ۴۵۰ میکرومتر، چگالی مخصوص ( $\rho_s$ ) برابر ۱۰۷۰ کیلوگرم بر مترمکعب و انحراف استاندارد ( $\sigma_g$ ) برابر ۱/۴ استفاده شد.

### مراحل انجام آزمایش

برای شبیه‌سازی جریان غلیظ از یک مدل آزمایشگاهی شامل یک فلوم با بستر شیب‌دار به طول ۷۸۰، ارتفاع ۷۰ و عرض ۳۵ سانتی‌متر استفاده شد. شکل ۲، تجهیزات آزمایشگاهی متعلق به آزمایشگاه پژوهش‌هایی هیدرولیک دانشکده مهندسی علوم آب دانشگاه شهید چمران اهواز است. شیب فلوم در محدوده‌ی ۱- تا ۳/۸۶٪ قرار دارد.

برای ایجاد بستر متحرک، فضای مناسب به طول ۴/۵ متر از فاصله یک متری دریچه تا ۵/۵ متری آن، به ارتفاع ۸ سانتی‌متر برای قرارگیری مواد بستر تعبیه شد. ابتدای هر آزمایش، مواد بستر در فضای تعبیه شده جانمایی و سطح بستر کاملاً تسطیح می‌شد. سپس به کمک شیر انتهای فلوم، کل مخزن تا رقوم ثابتی از آب زلال پر و به طور هم‌زمان نیز مخزن اختلاط برای تهیه نمونه جریان غلیظ نمکی با غلظت مشخص در هر آزمایش آماده شد. سپس سطح آب زلال و جریان غلیظ برای جلوگیری از تلاطم جریان ورودی در یک ارتفاع قرار گرفته و با استفاده از یک

در این معادلات  $u$  سرعت در هر فاصله از کف ( $z$ ) است. شماتیکی از پروفیل سرعت نیز در شکل ۱- ب نمایش داده شده که  $U$  سرعت متوسط و  $h$  ارتفاع نظیر آن است. آلتیناکار و همکاران (۱۹۹۶) با توجه به پروفیل سرعت، جریان غلیظ را به دو بخش تقسیم کردند که نقطه ماکزیمم سرعت (مینیمم تنش برشی)، خط تقسیم این دو منطقه است (شکل ۱- ب). ورود جریان پیرامون سبب ایجاد تلاطم در بخش بالایی جریان می‌شود (لایه بیرونی یا ناحیه جت)؛ در حالی که ورود رسوبات، وابسته به تلاطم تولیدی در نزدیکی کف کانال است (لایه داخلی یا ناحیه دیواره) و تحت تأثیر تنش برشی بستر خواهد بود. بنابراین پروفیل بدنه سرعت، سهم مهمی در تشکیل انواع فرم‌های بستر و فرسایش آن خواهد داشت.

### مواد و روش‌ها

#### انتخاب مواد بستر فرسایش پذیر

در این پژوهش، ابتدا با توجه به شرایط ویژه‌ی جریان‌های غلیظ (سرعت‌های بسیار کم در فلوم‌های کوچک آزمایشگاهی)، پژوهش‌های جامعی در بخش مشخصات مواد و کاربری آنها به‌عنوان مواد بستر و همچنین پیش‌آزمایش‌هایی در زمینه این اهداف انجام شد. با توجه به امکانات و محدودیت مواد مناسب برای شرایط آزمایشگاهی، مهم‌ترین نکات در انتخاب این مواد، جنس، دانه‌بندی، چگالی مخصوص، سهولت به کارگیری آنها بود. در مرحله اول، آزمایش‌های اولیه برای تهیه مواد مناسب به‌عنوان رسوبات بستر به شرح زیر طراحی و اجرا شد:

الف- تعیین معیارهای مناسب برای تهیه مواد بستر با توجه به محدودیت‌های آزمایشگاهی جریان‌های غلیظ؛  
ب- مطالعات جامع در بخش مواد موجود که نزدیک به معیارهای تعیین شده باشد؛

ج- انجام آزمایش‌های لازم نظیر تعیین دانه‌بندی ذرات، تعیین چگالی مخصوص ذرات و پیش‌آزمایش‌ها برای امکان‌سنجی تشکیل فرم‌های بستر در شرایط متغیر هیدرولیکی جریان ورودی.

در مجموع، برای تعیین اندازه رسوبات مناسب بستر فرسایشی به نکات زیر توجه شده است:

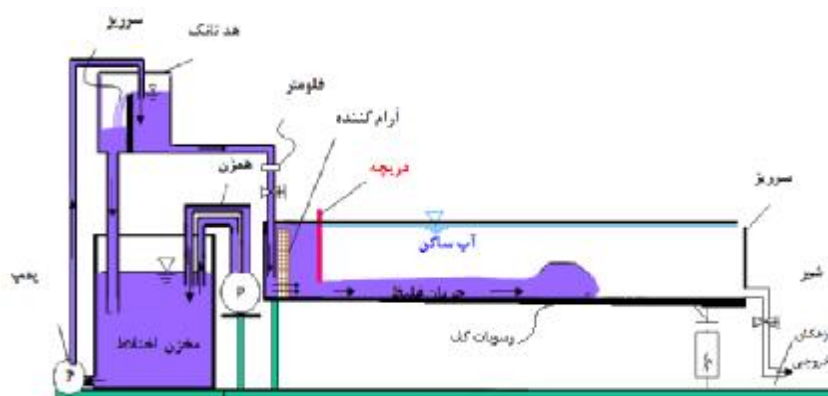
الف- ذرات کف باید به‌گونه‌ای انتخاب شوند که جریان غلیظ در کل آزمایش‌ها متلاطم و از نظر هیدرولیکی زبر باشد (گارسیا، ۲۰۰۸).

۱۲ آزمایش شاهد در شرایط بستر صلب برای دبی جریان (۱/۵ لیتر بر ثانیه) انجام و در جدول ۱، محدوده اعداد فرود دنسیمتریک ( $Fr_d$ ) و رینولدز ( $Re$ ) جریان غلیظ در آزمایش‌ها ارائه شده است.

جدول ۱- محدوده فرود دنسیمتریک و رینولدز جریان غلیظ

$Re$		$Fr_d$	
حداقل	حداکثر	حداقل	حداکثر
۲۸۶۰	۵۷۱۰	۰/۵۷	۱/۱۲

شیر و دبی‌سنج الکترومغناطیس میزان جریان ورودی به درون فلوم کنترل می‌شد. پروفیل‌های سرعت در چهار مقطع (۱/۵، ۲/۵، ۳/۵ و ۴/۵ متری از دریچه) با کمک دستگاه سرعت‌سنج Dop2000 به روش اکوستیک اندازه‌گیری شدند. به‌طور متوسط، با گذشت ۱۰ دقیقه از شروع آزمایش، نمونه‌گیری سرعت از بدنه جریان غلیظ انجام شد. در مجموع ۴۸ آزمایش شامل ۳۶ آزمایش اصلی در شرایط بستر متحرک و فرسایش‌پذیر با متغیرهای دبی جریان (۱، ۱/۵ و ۲ لیتر بر ثانیه)، شیب کانال (۰، ۱/۵، ۲/۵ و ۳/۵٪) و غلظت حجمی رسوبات (۱۵، ۲۰ و ۲۵٪) و



شکل ۲- طرح شماتیک مدل فیزیکی مورد استفاده برای آزمایش‌های جریان غلیظ

جدول ۲- درصد افزایش سرعت ماکزیمم در پروفیل بدنه سرعت به ازای تغییرات غلظت جریان

شیب فلوم (%)	شرایط بستر ثابت		شرایط بستر متحرک	
	از غلظت ۱۵ به ۲۰ گرم بر لیتر	از غلظت ۲۰ به ۲۵ گرم بر لیتر	از غلظت ۱۵ به ۲۰ گرم بر لیتر	از غلظت ۲۰ به ۲۵ گرم بر لیتر
صفر	۲۵	۲۴	۱۵	۱۲
۱/۵	۱۸	۲۰	۹	۱۰
۲/۵	۱۵	۱۲	۱۵	*۲۸
۳/۵	۱۲	۱۰	*۲۲	*۳۰

\* فرم بسترها شسته شده‌اند و اثر زبری فرم بسترها حذف شده است (شکل ۴- ج و ۴- د).

بستر<sup>۲</sup> است (شفاعی بجزستان، ۱۳۷۸) و این مسأله در شرایط بستر متحرک بروز می‌کند و سبب تغییر در پروفیل‌های سرعت جریان و مشخصه‌های آن می‌شود. شکل‌های ۳- الف تا ۳- ز، اثر تغییر پارامترهای غلظت جریان و شیب بستر را بر پروفیل سرعت بدنه در دو شرایط صلب و متحرک نشان می‌دهد. طبق نتایج، با افزایش غلظت جریان به‌دلیل افزایش مومنتم جریان در هر

## نتایج و بحث

### تحلیل پروفیل‌های سرعت بدنه در دو حالت بستر صلب و متحرک

در تجزیه و تحلیل پروفیل‌های سرعت، این مسأله دارای اهمیت که مقاومت در برابر جریان در یک بستر متحرک شامل دو بخش است: بخش اول زبری ناشی از اندازه ذرات<sup>۱</sup> و بخش دوم زبری به واسطه‌ی وجود شکل‌های

2- Form roughness

1- Skin roughness

و عموماً، درصد این کاهش با افزایش شیب، افزایش یافت (شکل‌های ۳-پ با ۳-چ، ۳-د و ۳-ز).

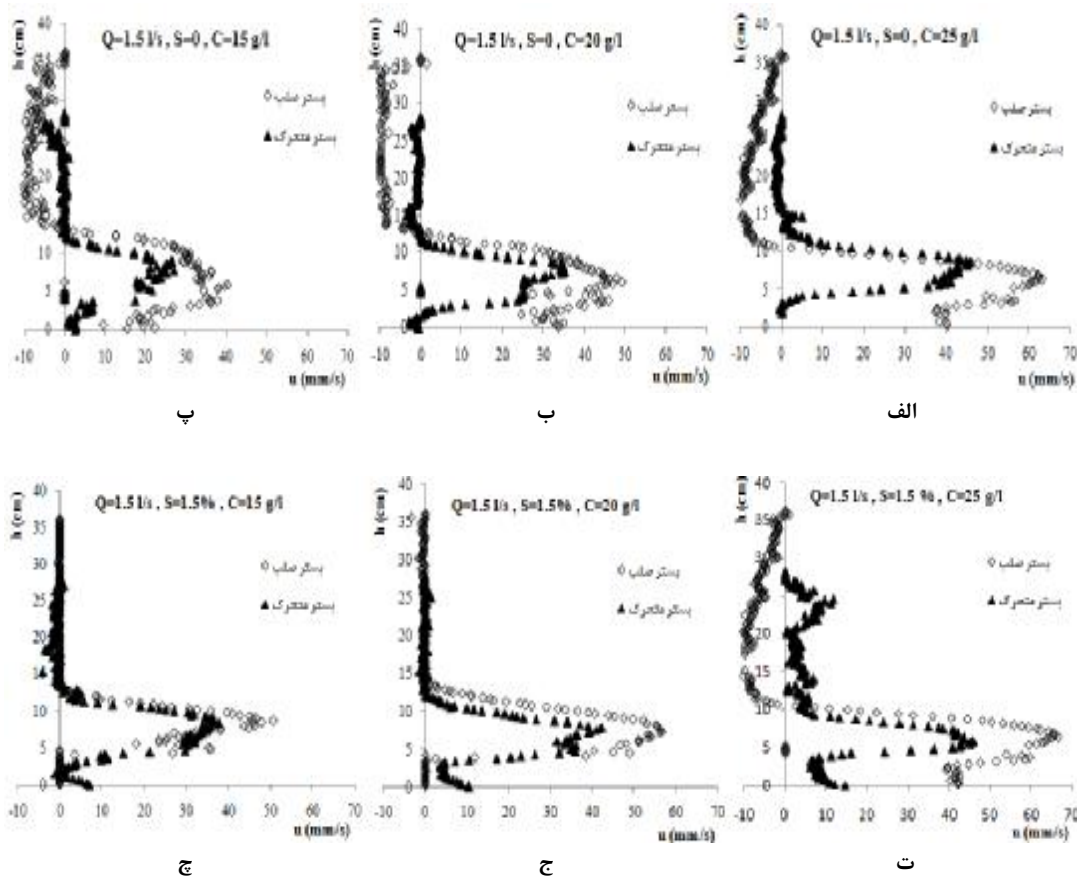
دو وضعیت، سرعت جریان نیز افزایش یافت. در حالیکه، این درصد افزایش سرعت به ازای تغییرات غلظت در شرایط بستر متحرک حدود ۵۰٪ کمتر بود؛ البته تا زمانی که فرم بستر تشکیل شده باشد (شکل‌های ۳-الف تا ۳-چ) که این مسأله به دلیل اثر مقاومتی ذرات بستر و به خصوص زبری فرم بستر در مقابل جریان است. درصد افزایش سرعت با تغییر غلظت در جدول ۲ نشان داده شده است که دقیقاً در شیب‌های ۲/۵ و ۳/۵ که فرم‌های بستر با افزایش تنش برشی بستر شسته شده‌اند و زبری فرم بستر حذف شده (شکل ۴-ج و ۴-د)، روند افزایشی پیدا کرده است.

جدول ۳- درصد کاهش سرعت ماکزیمم در شرایط بستر متحرک نسبت به شرایط بستر ثابت

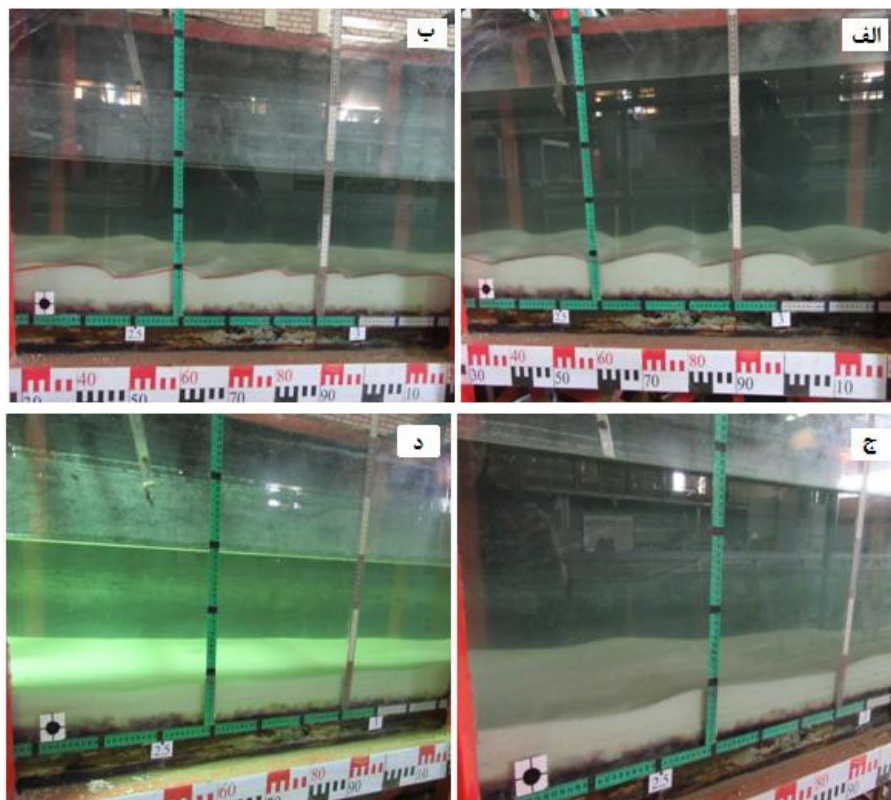
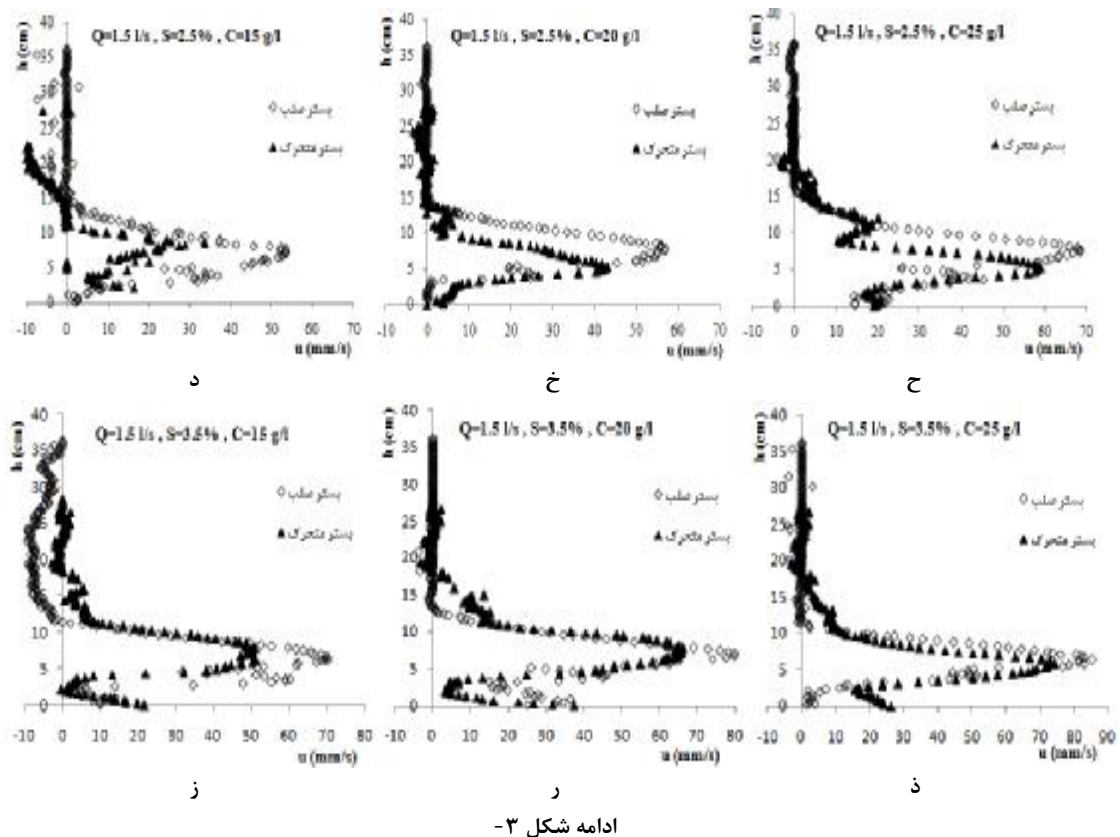
شیب	غلظت		
	۰	۱/۵ %	۲/۵ %
۱۵ گرم بر لیتر	۲۲	۲۴	۳۰
۲۰ گرم بر لیتر	۲۵	۲۶	۱۷*
۲۵ گرم بر لیتر	۳۰	۳۲	۱۵*

\* فرم بسترها شسته شده‌اند و اثر زبری فرم بستر حذف شده است (شکل ۴-ج و ۴-د).

با توجه به جدول ۳، در تمامی آزمایش‌ها، مقادیر سرعت ماکزیمم در شرایط بستر متحرک، به‌طور مشخص کاهش



شکل ۳- پروفیل‌های سرعت بدنه جریان غلیظ در شرایط بستر صلب و متحرک



شکل ۴- الف) دبی ۱/۵ لیتر بر ثانیه، شیب ۱۵٪ و غلظت ۲۰ گرم بر لیتر؛ ب) دبی ۱/۵ لیتر بر ثانیه، شیب صفر و غلظت ۱۵ گرم بر لیتر؛ ج) دبی ۱/۵ لیتر بر ثانیه، شیب ۲۵٪ و غلظت ۲۰ گرم بر لیتر و د) دبی ۱/۵ لیتر بر ثانیه، شیب ۳۰٪ و غلظت ۲۵ گرم بر لیتر



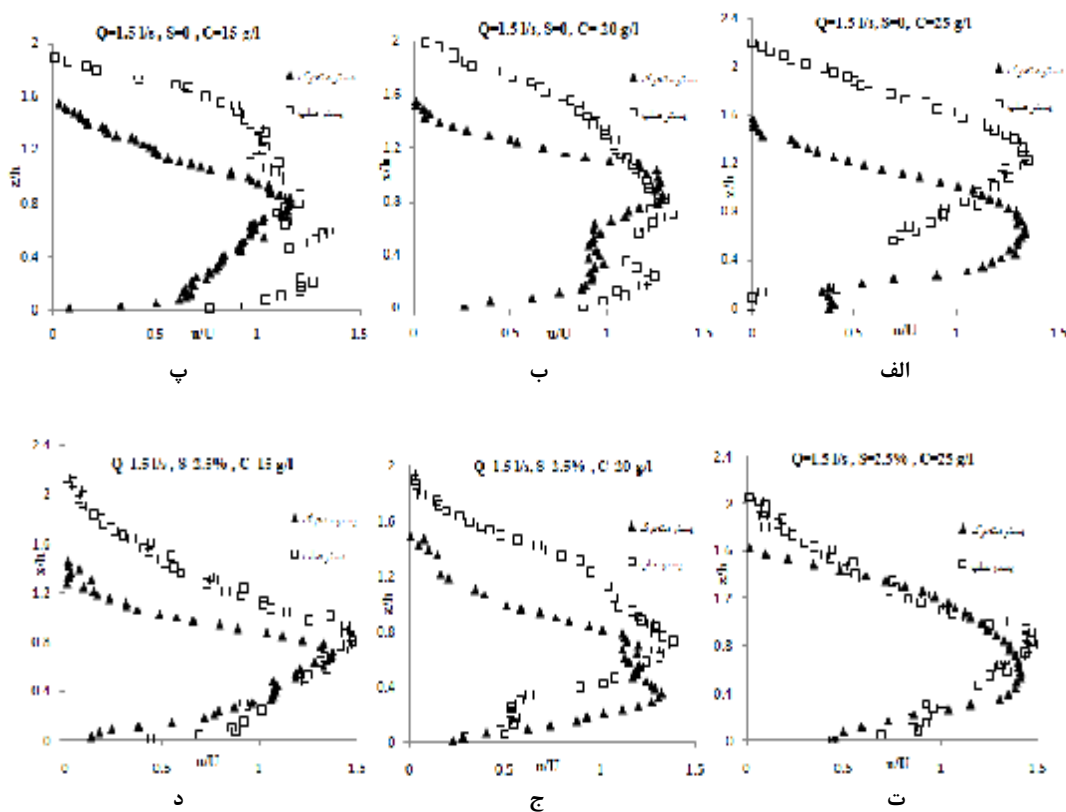
بستر متحرک دارد. به طور متوسط در شرایط صلب  $z/h \sim 2$  و در وضعیت متحرک حدود  $z/h \sim 1.5$  است. این کاهش ۲۵٪، در نتیجه‌ی کاهش سرعت متوسط بدنه جریان است که سبب می‌شود رقوم نظیر آن در ارتفاع بالاتری قرار گیرد. این نسبت در آزمایش‌هایی که فرم بستر در آنها دیده نشده است، مقدار بیشتری داشت (شکل ۵-ت). این تأثیر بیشتر فرم‌های بستر را نشان می‌دهد که با نتایج سکویروس و همکاران (۲۰۱۰a) نیز همخوانی دارد. همچنین مقدار ماکزیمم  $u/U$ ، نیز در وضعیت بستر متحرک مقدار کمتری داشت، که تأییدی بر کاهش سرعت بدنه جریان در وضعیت بستر متحرک است.

### تحلیل پروفیل‌های بدون بعد سرعت بدنه در وضعیت صلب و متحرک

به منظور مقایسه نتایج حاصل از پژوهش حاضر با سایر پژوهش‌های انجام شده، به کمک پارامترهای سرعت متوسط ( $U$ ) و ارتفاع نظیر آن ( $h$ )، پروفیل‌های سرعت بدنه جریان در هر آزمایش بی‌بعد شد. بدین ترتیب، نتایج در بخش‌های زیر ارائه شده است:

### الف- مقایسه پروفیل‌های بدون بعد در دو حالت بستر صلب و متحرک

با توجه به شکل‌های ۵-الف تا ۵-د، در تمامی آزمایش‌ها ماکزیمم نسبت بدون بعد  $z/h$  (مرز بین آب زلال و جریان غلیظ) در وضعیت صلب مقدار بیشتری نسبت به شرایط



شکل ۵- پروفیل‌های بدون بعد سرعت بدنه جریان غلیظ در دو وضعیت بستر صلب و متحرک

در جریان زیربحرانی، تشکیل فرم بستر تأثیر ناچیزی داشته است؛ ولی در وضعیت فوق بحرانی، سبب کاهش نسبت  $z/h$  و افزایش رقوم محل ماکزیمم  $u/U$  شده است. داده‌های پژوهش حاضر نیز همخوانی خوبی با نتایج این تحقیق به خصوص در وضعیت فوق بحرانی نشان دادند (به علت اینکه اکثر آزمایش‌ها در محدوده‌ی نزدیک به بحرانی

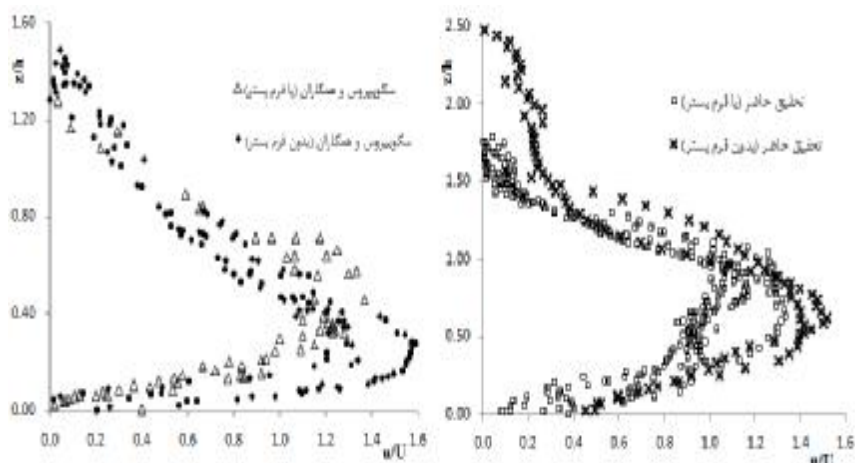
### تحلیل تشکیل فرم بستر بر پروفیل‌های بدون بعد سرعت بدنه

براساس نتایج پژوهش سکویروس و همکاران (۲۰۱۰a) پروفیل بی‌بعد سرعت بدنه در جریان زیربحرانی و جریان فوق بحرانی از روند مشخصی تبعیت می‌کنند و تشکیل فرم بستر بر روند این پروفیل‌ها تأثیرگذار است؛ به گونه‌ای که



متوسط بدنه جریان دارد. در پژوهش حاضر، تشکیل فرم بستر سبب کاهش حدود ۴۰٪ نسبت  $z/h$  و افزایش حدود ۱۵٪ رقوم محل ماکزیمم نسبت  $u/U$  شده است (شکل ۶).

بود) و علت تفاوت در نسبت  $z/h$ ، جنس و اندازه‌ی رسوبات مورد استفاده آن (چگالی مخصوص ۱/۵۳ و قطر متوسط ۱۴۴۷ میکرومتر) که در تشکیل و نوع فرم بسترها مؤثر بوده و تأثیر مستقیم بر میزان تغییرات سرعت و ارتفاع



شکل ۶- مقایسه پروفیل‌های بدون بعد سرعت پژوهش حاضر با پژوهش سکویروس و همکاران (۲۰۱۰a)

۲. کاهه م. ۱۳۹۱. بررسی آزمایشگاهی دینامیک جریان غلیظ روی سطح زبر. رساله دکتری، دانشکده مهندسی علوم آب دانشگاه شهید چمران اهواز. ۱۲۴ ص.

۳. کمیته ملی سدها. ۱۳۹۴. <http://ircold.ir>.

۴. ورجاوند پ. ۱۳۹۲. بررسی آزمایشگاهی جریان غلیظ روی بسترهای زبر. رساله دکتری، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز. ۱۴۲ ص.

5. Abad J. D. Sequeiros O. E. Spinewine B. Pirmez C. García M. H. and Parker G. 2011. Secondary current of saline underflow in a highly meandering channel: Experiments and theory. Journal of Sediment Research. 81: 787-813.
6. Akiyama J. and Stefan H. G. 1985. Plunging flow into a reservoir: Theory. Journal of Hydraulic Engineering. 110(4): 484-499.
7. Altinakar M. S. Graf W. H. and Hopfinger E. J. 1996. Flow structure in turbidity currents. Journal of Hydraulic Research. 34: 713-718.
8. Ellison T. H. and Turner J. S. 1959. Turbulent entrainment in stratified flows. Journal of Fluid Mechanics. 6: 423-448.
9. Fernandez R. L. and Imberger J. 2006. Bed roughness induced entrainment in a high Richardson number underflow. Journal of Hydraulic Research. 44(6): 725-738.

## نتیجه‌گیری

در این پژوهش، نشان داده شد که بستر متحرک و به خصوص تشکیل فرم بستر، با افزایش زبری و نیروی مقاوم بستر جریان باعث کاهش سرعت بدنه جریان غلیظ تا حدود ۳۰٪ و کاهش روند افزایش سرعت به ازای افزایش غلظت جریان تا حدود ۵۰٪ شد. همچنین، در مقایسه پروفیل‌های بدون بعد سرعت جریان در دو وضعیت بستر ثابت و متحرک، مشخص شد حدود ۲۵٪ مقادیر نسبی  $(z/h)$  در وضعیت بستر متحرک به دلیل کاهش سرعت بدنه و افزایش ارتفاع نظیر آن کاهش یافته و این مقدار در شرایط تشکیل فرم بستر تشکیل شده باشد، به ۴۰٪ هم خواهد رسید؛ بنابراین مطالعه جریان غلیظ در وضعیت بستر متحرک به‌طور قابل توجهی می‌تواند دقت نتایج را بهبود بخشد. همچنین نتایج آزمایشگاهی تطابق خوبی با نتایج آزمایشگاهی سکویروس و همکاران (۲۰۱۰a) داشته است.

## منابع

۱. شفاعی بجنستان م. ۱۳۷۸. هیدرولیک رسوب. چاپ دوم. انتشارات دانشگاه شهید چمران اهواز. ۱۴۱ ص.

- Journal of Geophysical Research 117.C04003.
25. Sequeiros O. Spinewine B. Beaubouef R. Sun T. García M. and Parker G. 2010a. Characteristics of Velocity and Excess Density Profiles of Saline Underflows and Turbidity Currents Flowing over a Mobile Bed. *Journal of Hydraulic Engineering*. 136(7): 412-433.
  26. Sequeiros O. Spinewine B. Beaubouef R. Sun T. García M. and Parker G. 2010b. Bedload transport and bed resistance associated with density and turbidity currents. *Sedimentology*. 57:1463-1490.
  27. Xu J. P. Sequeiros O. E. and Noble M. A. 2014. Sediment concentrations, flow condition and downstream evolution of two turbidity currents, Monterey canyon, USA. *Journal of science Direct. Deep-Sea Research I* 89: 11-34.
  10. Forel, F. A. 1892. *Theorie du ravin sous-lacustre*. Le leman, Vol. 1, F. Rouge, Lausanne, Switzerland, 381-386.
  11. Garcia M. H. 1994. Depositional turbidity currents laden with poorly sorted sediment. *Journal of Hydraulic Engineering*. 120(11): 1240-1263.
  12. Garcia M. H. 2008. *Sedimentation engineering*. ASCE manual 110. Chapter 2. Reston Va.
  13. Graf W. H. 1971. *Hydraulics of sediment transport*. Mc Graw-Hill. New York.
  14. Huang H. Imran J. and Pirmez C. 2012. The depositional characteristics of turbidity currents in submarine sinuous channels. *Journal of Marine Geology*. 329-331. 93-102.
  15. Keevil G. M. Peakall J. Best J. L. and Amos K. J. 2006. Flow structure in sinuous submarine channels: Velocity and turbulence structure of an experimental submarine channel. *Journal of Marine Geology*. 229(3-4): 241-257.
  16. Kneller B. C. Bennett S. J. and McCaffrey W. D. 1999. Velocity structure. turbulence and fluid stresses in experimental gravity currents. *Journal of Geophysical Research* 104(C3): 5381-5391.
  17. Kullenberg G. 1977. Entrainment velocity in natural stratified vertical shear flow. *Estuarine and Coastal Marine Science*. 5(3): 329-338.
  18. Little W. C. and Mayer P. G. 1976. Stability of channel beds by armoring. *Journal of the Hydraulics Division*. 102(11): 1647-1661.
  19. Lu J. Liao X. and Zhao G. 2013. Experimental study on effects of geometric distortion upon suspended sediments in bending channels. *Journal of Sedimentary Geology*. 294: 27-36.
  20. Oehy C. H. 2002. Effects of obstacles and jets on reservoir sedimentation due to turbidity currents. Communication No. 15 of the Laboratory of Hydraulic Structions. LCH, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne EPFL, Switzerland.
  21. Parker G. and Sutherland A. J. 1990. Fluvial armor, *Journal of Hydraulic Research*. 28(5): 529-544.
  22. Parker G. Fukushima Y. and Pantin H. M. 1986. Self-accelerating turbidity currents. *Journal of Fluid Mechanics*. 171: 145-181.
  23. Parker G. Garcia M. Fukushima Y. and Yu W. 1987. Experiments on turbidity currents over an erodible bed. *Journal of Hydraulic Research*. 25(1): 123-147.
  24. Sequeiros O. E. 2012. Estimating turbidity current conditions from channel morphology: A Froude number approach.