

مطالعه‌ای بر روش‌های تعیین زبری یک بستر شنی

سید حسین مهاجری

محقق، دانشکده مهندسی مکانیک، عمران و محیط زیست، دانشگاه ترنتو، ایتالیا

seyed.mohajeri@unitn.it

چکیده - تعیین کمی زبری یک بستر شنی از اهمیت به‌سزایی در مطالعات هیدرولیکی برخوردار است. رویکرد سنتی در تعیین زبری بستر بر اساس منحنی توزیع اندازه سنگ‌دانه‌ها استوار است. این در حالی است که در رویکرد نوین، تعیین زبری بر اساس ارتفاع نقطه به نقطه بستر استوار می‌باشد. در این رویکرد، خصوصیات آماری بستر مانند ممان‌های مراتب گوناگون، ارتفاع نقطه به نقطه، توابع ساختار و خاصیت خودمتمشابهی در تعیین زبری مورد استفاده قرار می‌گیرد. در مطالعه آزمایشگاهی حاضر، در ابتدا روش‌های موجود در تعیین زبری بستر بر اساس منحنی توزیع اندازه سنگ‌دانه‌ها با یکدیگر مقایسه می‌شوند. سپس در ادامه، رویکرد ارتفاع نقطه به نقطه در تعیین زبری بستر به تفصیل مورد بحث قرار می‌گیرد. مشاهدات نشان داد که در بین روش‌های موجود بر اساس رویکرد اندازه سنگ‌دانه‌ها، نتایج به دست آمده از اندازه‌گیری سنگ‌دانه‌ها با کولیس کامل‌تر و دقیق‌تر از سایر روش‌ها است. به علاوه قیاس بستر آزمایشگاهی مطالعه حاضر و بستر طبیعی رودخانه‌ها نشان داد، که با وجود تطابق برخی از خواص آماری این دو بستر (مانند ضریب همبستگی و زبری معادل در راستای طولی)، بسیاری از خواص آماری این دو بستر مانند عدم وجود ساختار خاص در تابع ساختار مرتبه سوم و ضریب چولگی منفی توزیع ارتفاع بستر با یکدیگر متفاوت است. این مشاهده بیان‌گر این واقعیت است که بستر زیر بسیاری از مطالعات آزمایشگاهی که بر اساس تنها قطر معادل سنگ‌دانه شبیه‌سازی می‌شوند، در عمل می‌توانند خواص آماری بسیار متفاوتی با بسترهای طبیعی رودخانه‌ها داشته باشند. لذا توصیه می‌شود در این نوع مطالعات، بستر شنی به با روش‌های آماری به‌طور دقیق تعریف شود، تا حداقل میزان اختلاف با شرایط طبیعی رودخانه مشخص شود.

کلیدواژگان: خاصیت خودمتمشابهی، سنگ‌دانه‌های شنی، خصوصیات آماری، تابع ساختار، زبری بستر.

رودخانه‌ها تأثیر می‌پذیرد (بافین بلانژه و روی، 1998؛ نیکورا و همکاران، 2001؛ نیکورا و همکاران، 2004؛ لاماره و روی، 2005؛ نیکورا و همکاران، 2007؛ مهاجری و همکاران؛ 2015). به علاوه ساختار و شکل بستر در نوع زیستی ارگانسیم‌های زنده‌ای که در بستر رودخانه‌ها زندگی می‌کنند (ارگانسیم‌های بنتوز¹) مهم می‌باشد

1- مقدمه

توصیف کمی و دقیق بسترهای شنی از اهمیت اساسی در هیدرولیک جریان رودخانه‌ها و ژئومورفولوژی رودخانه‌های رسوبی برخوردار است. این اهمیت به این علت است که بسیاری از خصوصیات جریان مانند سرعت متوسط، انتقال رسوب و خصوصیات آشفستگی از ساختار و شکل بستر

1. Benthos Organism

(برونکه و گاسنر، 1997؛ وب و لیک، 2006).

در مطالعه جریان بستر زبر، باید به تفاوت سه مفهوم رایج، ولی متفاوت، توجه کرد که در شکل 1 نمایش داده شده- اند. زبری عبارت از خصوصیات کلی بستر زبر می‌باشد (نیکورا و همکاران، 1998). این خصوصیات می‌تواند طیف وسیعی از اطلاعات مانند قطر سنگ‌دانه‌ها تا خصوصیات آماری بستر زبر را شامل شود. در علم هیدرولیک این خصوصیات به صورت یک ضریب کلی تحت عنوان ضریب زبری¹ مانند ضریب زبری مانینگ یا سزی ارایه می‌شود (گراف و آلتیناگار، 1998). از طرف دیگر در بسیاری از معادلات مانند مقیاس زبری هیدرودینامیکی² در معادله لگاریتمی سرعت، زبری به صورت ضریبی ظاهر می‌شود که با شرایط هیدرولیکی جریان تغییر می‌کند (گراف و آلتیناکار، 1998). این ضریب نیز مشهور به ضریب زبری معادل می‌باشد. هدف اصلی در مطالعه حاضر تعیین خصوصیات ارتفاع زبری بستر می‌باشد.

همان‌طور که در شکل 1 نمایش داده شده است، ضریب زبری از طریق خصوصیات سنگ‌دانه‌ها و یا خصوصیات آماری بستر تعیین می‌شود. به طور سنتی، مهندسان هیدرولیک و رودخانه ضریب زبری بستر را به خصوصیات فیزیکی سنگ‌دانه‌ها، مانند منحنی توزیع اندازه سنگ‌دانه‌ها که به درصد بیان می‌شود، نسبت داده‌اند (باتورست، 1985؛ فهر، 1986). بر اساس این رویکرد، ضریب زبری معادل بستر (k_s) به صورت ضریبی از قطر معادلی که درصد خاصی از سنگ‌دانه‌ها از آن قطر معادل کوچکتر می‌باشد (مانند d_{50} ، d_{84} ، d_{15} که عدد نوشته شده در اندیس درصد سنگ‌دانه‌های کوچکتر از قطر معادل را نشان می‌دهد) بیان می‌شود. به عنوان نمونه پارکر و پترسون (1980) مقدار $2d_{90}$ را پیشنهاد نموده‌اند. هی (1988) زبری معادل را برابر با $3.5d_{84}$ در نظر گرفته است. این مقدار در بسیاری دیگر از مطالعات به عنوان ضریب زبری پیشنهاد شده است (ویبرگ و اسمیت، 1991؛ نیکورا و همکاران، 1998). به منظور اندازه‌گیری و تعیین منحنی توزیع اندازه سنگ‌دانه‌ها، روش‌های گوناگونی توسعه پیدا کرده است. در این بین، رایج‌ترین روش، آزمایش الک است که در آن با استفاده از وزن تجمعی سنگ‌دانه‌های عبوری

از الک، منحنی توزیع اندازه ذرات ساخته می‌شود (انجمن مواد و آزمون آمریکا³، 2006). از طرف دیگر، پیشرفت‌های نوین در علم آنالیز تصویر، امکان محاسبه منحنی توزیع اندازه سنگ‌دانه‌ها را از طریق عکس‌برداری فراهم نموده است. گراهام و همکاران (2005) یک الگوریتم برای تشخیص و تعیین اندازه سنگ‌دانه‌ها بر اساس روش آنالیز تصویر ارایه نموده‌اند. در مطالعه‌ای دیگر، دترت و ویپترخت (2012) به منظور تعیین اندازه سنگ‌دانه‌ها بر اساس آنالیز تصویر یک نرم افزار به نام بیس‌گرین⁴ توسعه داده‌اند. با وجود توسعه روش آنالیز تصویر، تاکنون قابلیت این روش‌ها در تعیین اندازه سنگ‌دانه‌های شنی و ماسه‌ای با سایر روش‌های موجود مقایسه نشده‌اند.

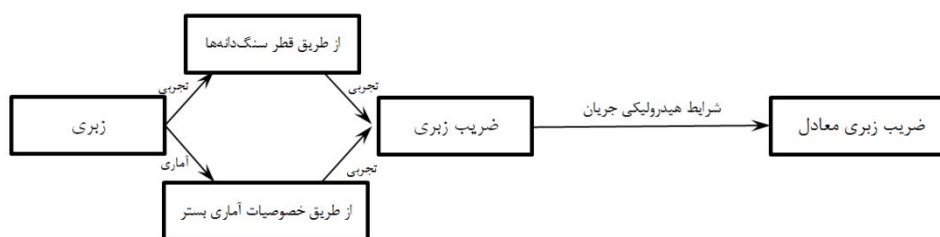
همان‌طور که اشاره شد، تعیین زبری بستر بر اساس منحنی توزیع اندازه ذرات، به جهت سادگی، تا مدت‌ها به طور گسترده مورد استفاده قرار گرفت. اما در واقعیت توصیف بستر رودخانه تنها با یک عدد که نسبتی از صدک خوانده شده از منحنی توزیع اندازه ذرات می‌باشد (قطر معادل)، کافی نمی‌باشد. در حقیقت در این روش هیچ گونه اثری از نحوه قرار گیری ذرات نسبت به یکدیگر، شکل سنگ‌دانه‌ها و جهت‌گیری آنها در راستای جریان و فاصله بین سنگ‌دانه‌ها در مقدار به دست آمده یافت نمی‌شود (نیکورا و همکاران، 1998؛ ابرله و نیکورا، 2006). روش جایگزین، در نظر گرفتن یک بستر شنی به صورت مجموعه‌ای از ارتفاعات نقطه به نقطه، که به صورت تصادفی در مکان تغییر می‌کند، می‌باشد (نیکورا و همکاران، 1998). در حقیقت بستر زبر مجموعه‌ای از ارتفاعات (Z) است که در راستای طولی (x) و عرضی (y) به صورت تصادفی تغییر می‌کند ($Z(x,y)$). در این رویکرد، که در سال‌های اخیر بیشتر مورد توجه قرار گرفته است، فرض می‌شود که توابع گشتاور (مانند ضرایب همبستگی، تحلیل طیفی، توابع ساختار با مراتب گوناگون) محاسبه شده برای $Z(x,y)$ می‌تواند اطلاعات کاملی از بستر را فراهم کند (دیویس و همکاران، 1994؛ نیکورا و همکاران، 1998؛ نیکورا و والش، 2004؛ ابرله و نیکورا، 2006؛ کوپر و تیت، 2009).

3. American Standard and Testing of Materials (ASTM)

4 BaseGrain

1. Roughness Coefficient

2. Hydrodynamics Roughness Length Scale



شکل 1 ارتباط بین زبری، ضریب زبری و زبری معادل

والش، 2004). باید توجه داشت که علاوه بر شکل فوق برای تابع ساختار، استفاده از معادله (1) و بدون قدر مطلق نیز رایج می‌باشد. تابع ساختار بدون قدرمطلق اصطلاحاً تابع ساختار کولموگروف، نامیده می‌شود (نیکورا و گورینگ، 1999).

رویکرد اندازه‌گیری نقطه به نقطه در تعیین خصوصیات بسترهای شنی قابلیت‌های بسیار بالایی در قیاس با رویکرد سنتی دارا می‌باشد. اما استفاده از این رویکرد مانند رویکرد سنتی منحنی توزیع اندازه سنگ‌دانه‌ها رایج نیست. به علاوه بسیاری از ویژگی‌های این روش به خصوص در مقیاس آزمایشگاهی به خوبی بررسی نشده است. در تحقیق حاضر به بررسی و مقایسه روش‌های موجود در تعیین خصوصیات بسترهای شنی پرداخته می‌شود. به بیان دقیق‌تر، اهداف اصلی در تحقیق حاضر عبارتند از: (1) بررسی و مقایسه قابلیت روش‌های موجود در تعیین منحنی توزیع اندازه سنگ‌دانه‌ها (2) بررسی کاربرد تابع ساختار و سایر خصوصیات آماری یک بستر شنی در تعیین زبری بستر.

2- مواد و روش‌ها

اطلاعات آزمایشگاهی تحقیق حاضر، در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه ترنتو ایتالیا جمع‌آوری شده است. آزمایش‌ها در یک کانال مستقیم روباز با مقطع مستطیلی به طول 6/00 متر، عرض 0/4 متر و ارتفاع 0/4 متر، با قابلیت تغییر شیب طولی انجام پذیرفت. جداره کانال فوق از پلی متیل متاکریلات، که از یکی از سخت‌ترین و محکم‌ترین پلیمرها با شفافیتی بالاتر از شیشه می‌باشد، ساخته شده است. به منظور ایجاد بستر شنی، در حدود نیمی از عمق کانال با سنگدانه‌های رودخانه‌ای پر گردید. در ابتدا

بررسی خواص فراکتال بستر، توابع ساختار یک بعدی و دوبعدی مراتب گوناگون از جمله روش‌های رایج در این رویکرد نوین می‌باشند (دیویس و همکاران، 1994؛ نیکورا و همکاران، 1998).

در بین توابع گشتاور، یکی از مهم‌ترین این توابع که در مطالعات پیشین مورد استفاده قرار گرفته است، تابع ساختار¹ می‌باشد (نیکورا و همکاران، 1998؛ نیکورا و والش، 2004). به طور کلی تابع ساختار به صورت رابطه (1) تعریف می‌شود (نیکورا و والش، 2004):

$$D_p(\Delta x, \Delta y) = \left[\left| Z(x + n\delta x, y + m\delta y) - Z(x, y) \right|^p \right] \quad (1)$$

که در این رابطه D_p تابع ساختار مرتبه p ، Δx و Δy اختلاف موقعیت دو نقطه‌ای است که تابع ساختار در این فاصله محاسبه می‌شود، $\delta x, \delta y$ فواصل نمونه‌گیری در راستای طولی و عرضی است که در حقیقت $\Delta x = n\delta x, \Delta y = m\delta y$ بیان‌گر تعداد نمونه‌هایی است که در فاصله $\delta x, \delta y$ وجود دارد (نیکورا و والش، 2004؛ ابرله و نیکورا، 2006). به علاوه نماد [] نشان‌گر متوسط‌گیری روی تعداد قابل توجهی نقطه می‌باشد و | | نماد قدرمطلق می‌باشد.

توابع ساختار برای نخستین بار توسط کولموگروف در مطالعه جریان آشفته استفاده شد. مطالعات پیشین بر اساس رویکرد نوین نشان داده است که تابع ساختار مرتبه 2 ارتفاع نقطه به نقطه بستر، موسوم به واریوگرام²، اطلاعات مهمی در زمینه شکل سنگدانه‌ها، توزیع اندازه سنگ‌دانه‌ها و سایر موارد را در برمی‌گیرد (دیویس و همکاران، 1994؛ نیکورا و همکاران، 1998؛ نیکورا و

1. Structure Function
2. Variogram

به منظور تغییر مکان لیزر نقطه‌ای در طول و عرض کانال از یک سیستم جابه‌جایی اتوماتیک استفاده گردید. لیزر نقطه‌ای دارای خطای خطی 600 میکرومتر و دقت اندازه‌گیری 60 میکرومتر و سیستم جابه‌جایی دارای دقت اندازه‌گیری در راستای طولی و عرضی معادل با $1/5$ میلی‌متر می‌باشد. توپوگرافی بستر در فاصله حدوداً 7 متری از ورودی کانال در یک محدوده 500 میلی‌متری در طول کانال و در تمامی عرض کانال برداشت شده است.

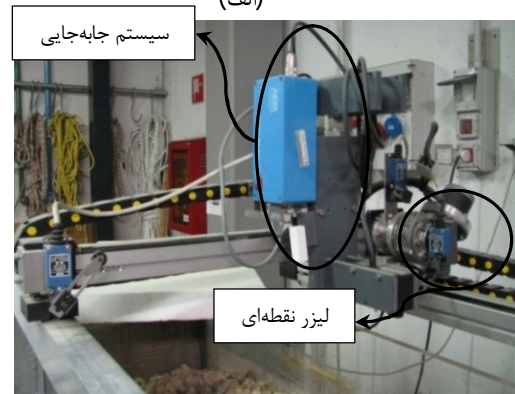
در سری دوم اندازه‌گیری، خصوصیات فیزیکی و هندسه سنگ‌دانه‌های شنی اندازه‌گیری شده‌اند. در این سری اندازه‌گیری 3 روش مورد استفاده قرار گرفت. در ابتدا آزمایش دانه‌بندی الک بر اساس روش انجمن مواد و آزمون آمریکا (2006) انجام پذیرفت. بر اساس این روش، نمونه‌ای از مصالح بستر کانال به وزن 10 کیلوگرم انتخاب شده و آزمایش الک برای آن انجام می‌شود. در روش دوم 3 قطر اصلی سنگ‌دانه‌ها در نمونه انتخابی برای آزمایش دانه‌بندی توسط یک کولیس دیجیتالی با دقت اسمی 0/01 میلی‌متر اندازه‌گیری گردید. در نمونه انتخابی برای آزمایش دانه‌بندی در حدود 7000 سنگ‌دانه وجود داشت و لذا از نقطه نظر آماری این نمونه نماینده مناسبی برای جامعه آماری (بستر شنی کف کانال) می‌باشد (نیکوکار و عرب‌زاده، 1387). در نهایت در روش سوم، از روش‌های آنالیز تصویر جهت تعیین خصوصیات سنگ‌دانه‌ها استفاده شد. در این روش سنگ‌دانه‌های شنی بر روی یک صفحه به رنگ کدر و با فاصله پخش شده و سپس از نمونه‌ها عکس-برداری شد. دوربین مورد استفاده از نوع Canon EOS 60D بود که در فاصله 1 متری از صفحه کدر رنگ نصب شده بود. در این شرایط هر عکس یک ناحیه مستطیلی به ابعاد 600 در 600 سانتی‌متر را پوشش داد. پس از عکس-برداری، خصوصیات فیزیکی و هندسی سنگ‌دانه‌ها با استفاده از توابع کتابخانه‌ای نرم‌افزار ماترکس² محاسبه گردید. نرم‌افزار ماترکس نرم‌افزار بسیار قوی برای تحلیل تصاویر است که در آن می‌توان ابعاد و مساحت را در یک صفحه دو بعدی تعیین نمود (ماترکس، 2015). علاقه-مندان به اطلاعات بیشتر در ارتباط با روش‌های مورد

سنگ‌دانه‌های شنی به طور تصادفی در بستر کانال پخش شدند. سپس به منظور ایجاد بستری شبیه به بسترهای شنی در رودخانه‌ها موسوم به بسترهای ساخته شده با جریان آب¹ و نیز جلوگیری از جمع شدن سنگ‌دانه‌ها در قسمتی از کانال، سنگ‌دانه‌ها توسط یک چنگک چوبی در راستای جریان منظم گردیدند و در ادامه آب با دبی‌های مختلف در داخل کانال به جریان انداخته شد تا نحوه قرارگیری سنگ‌دانه‌ها تحت تأثیر جریان آب مرتب شوند. بستر حاصل پس از این فرایند در شکل 2- الف نمایش داده شده است.

دو گروه از اطلاعات در ارتباط با خصوصیات بستر اندازه‌گیری شد. در سری اول اطلاعات، ارتفاع نقطه به نقطه بستر توسط یک لیزر نقطه‌ای از نوع Mitsubishi ML200 که در شکل 2- ب نمایش داده شده است، اندازه‌گیری شد.



(الف)



(ب)

شکل 2 الف) بستر زبر کانال در آزمایش‌ها (ب) لیزر مورد استفاده برای اندازه‌گیری ارتفاع نقطه به نقطه بستر

2. Matrox Imaging Library (MIL)

1. Water-worked beds

در این رابطه All تعداد کل سنگدانه‌ها و A_i مساحت هر یک از سنگدانه‌ها می‌باشد که از رابطه (4) محاسبه شده است (مهجری، 2014):

$$A_i = \pi a_i b_i / 4 \quad (4)$$

در این رابطه، a_i, b_i قطر بزرگ و متوسط هر یک از ذرات می‌باشد و π برابر با $3/14$ است. به بیان دیگر درصد سنگدانه‌های کوچکتر از x به این روش برابر است با نسبت مساحت کل ذرات کوچکتر از x به مساحت کل تمامی سنگدانه‌ها. باید توجه داشت که قطر معادل هر دسته از سنگدانه‌ها (محور افقی در شکل 3) برابر با میانگین حسابی قطر بزرگ و متوسط سنگدانه‌ها تعریف گردید.

نتایج اندازه‌گیری با کولیس نیز منحنی‌های نشان داده شده با خط شماره (2) و (4) در شکل 3 را تشکیل می‌دهد. در اندازه‌گیری با کولیس نیز درصد سنگدانه‌های کوچکتر از x (نمایش داده شده با P''_x)، از رابطه (5) محاسبه می‌شود (مهجری، 2014):

$$P''_x = \frac{\sum_{i=1}^{i=x} V_i}{\sum_{i=1}^{All} V_i} \times 100 \quad (5)$$

در این رابطه V_i حجم هر یک از سنگدانه‌ها می‌باشد که از رابطه زیر محاسبه شده است (مهجری، 2014):

$$V_i = \frac{4}{3} \pi a_i b_i c_i \quad (6)$$

c_i قطر کوچک هر یک از سنگدانه‌ها می‌باشد و سایر پارامترها در معادلات قبلی تعریف شده‌اند. لازم به ذکر است که قطر معادل هر دسته از سنگدانه‌ها (محور افقی در شکل 3) معادل با میانگین حسابی (خط شماره (2)) و میانگین هندسی (خط شماره (4)) تعریف شده است.

مقایسه توزیع اندازه سنگدانه‌ها نشان می‌دهد که منحنی به دست آمده از آنالیز تصویر، قطرهای معادل بزرگتری از سایر روش‌ها را نشان می‌دهد. به علاوه، با وجود تطابق قابل قبول مابین منحنی توزیع سنگدانه‌ها با اندازه‌گیری کولیس با قطر معادل میانگین هندسی و آزمایش الک، منحنی به دست آمده از اندازه‌گیری کولیس با قطر معادل میانگین حسابی مقادیر بزرگتری را نشان می‌دهند.

استفاده و تجهیزات آزمایشگاهی می‌تواند به مهجری (2014) مراجعه نمایند.

3- نتایج و بحث

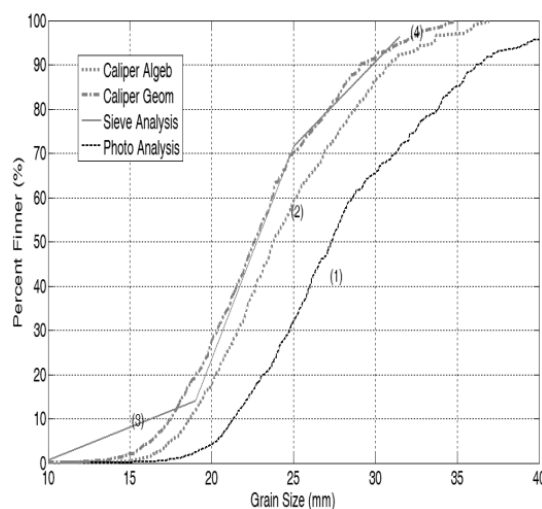
3-1- رویکرد اندازه ذرات یک بستر زبر

در شکل 3 منحنی توزیع اندازه سنگدانه‌ها نمایش داده شده است. در این شکل، خط شماره (3) بیان‌گر منحنی توزیع به دست آمده از آزمایش الک است. بر اساس آزمایش الک، درصد رد شده از الک x (محور قائم در شکل 3)، که با P_x نمایش داده می‌شود، با رابطه (2) محاسبه می‌شود (انجمن مواد و آزمون آمریکا، 2006):

$$P_x = \frac{\sum_{i=1}^{i=x} W_i}{\sum_{i=1}^{Tot} W_i} \times 100 \quad (2)$$

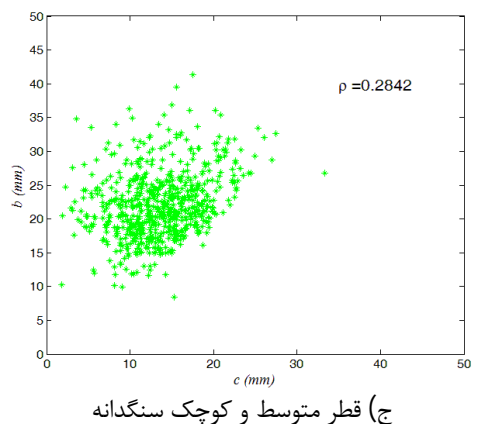
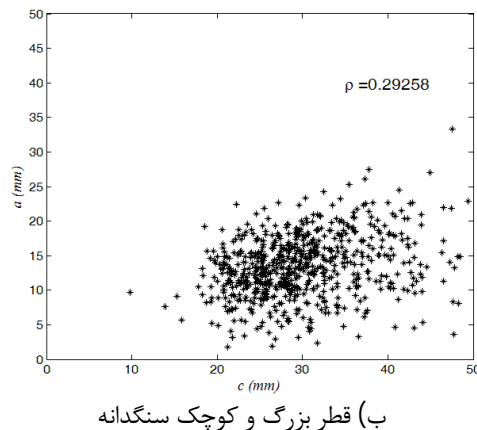
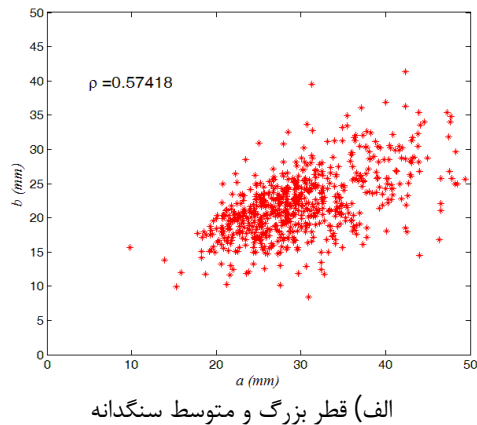
در این رابطه W_i وزن مانده سنگدانه‌ها روی الک i و Tot تعداد کل الک‌ها می‌باشد. در شکل 3 خط شماره (1) بیان‌گر منحنی توزیع سنگدانه‌ها از روش آنالیز تصاویر است. در این منحنی نیز درصد سنگدانه‌های کوچکتر از x (نمایش داده شده با P'_x)، از رابطه (3) محاسبه می‌شود (مهجری، 2014):

$$P'_x = \frac{\sum_{i=1}^{All} A_i}{\sum_{i=1}^{All} A_i} \times 100 \quad (3)$$



شکل 3 مقایسه روش‌های گوناگون تعیین توزیع اندازه سنگدانه‌ها

تحلیل همبستگی هر قطر نسبت به دو قطر دیگر نیز انجام گردید. مقدار ضریب همبستگی (ρ) در شکل 4 گزارش شده است. ضریب همبستگی قطر بزرگ و متوسط سنگدانه‌ها (a, b) بیشتر از سایر قطرها بوده و برابر با 0/5 می‌باشد.



شکل 4 رابطه بین 3 قطر اندازه‌گیری شده سنگدانه بستر شنی

قطر به دست آمده از آزمایش الک یک مقدار کلی از متوسط اندازه سنگدانه‌ها بدون در نظر گرفتن شکل سنگدانه‌های آنها است. این مورد در عمل بزرگ‌ترین نقطه ضعف این روش است. از طرف مقابل، نتایج بررسی آنالیز تصویر تنها شامل تصویر دوبعدی سنگدانه‌ها می‌شود. از آنجا که معمولاً سنگدانه‌ها با قطرهای متوسط و بزرگ خود روی زمین قرار می‌گیرند و قطر کوچک آن در راستای قائم قرار می‌گیرند. لذا قطر معادل به دست آمده از آنالیز تصویر تنها حاصل از میانگین قطرهای متوسط و بزرگ سنگدانه‌ها بوده و بنابراین منحنی توزیع اندازه سنگدانه‌های به دست آمده از منحنی‌های سایر روش‌ها بزرگتر می‌باشد. همچنین باید توجه داشت که آرایش قرار گرفتن سنگدانه‌ها در کنار یکدیگر، تأثیر بسیاری در منحنی دانه‌بندی حاصل خواهد داشت. منحنی دانه‌بندی بدست آمده از روش آنالیز تصویر در مطالعه حاضر، از پردازش تصاویر به دست آمده از سنگدانه‌های جدا از هم که بر روی یک سطح کدر قرار گرفته‌اند به دست آمده است و مسلماً می‌تواند با منحنی دانه‌بندی به دست آمده از مصالح داخل فلوم اصلی (پخش تصادفی ذرات) متفاوت باشد. متأسفانه در مطالعه حاضر امکان آنالیز تصاویر مصالح داخل فلوم آزمایش‌ها وجود نداشت و این موضوع که تا چه میزان شرایط عکس‌برداری و نیز پخش تصادفی ذرات، نتایج را تحت تأثیر قرار می‌دهد، باید در مطالعات آتی بررسی شود.

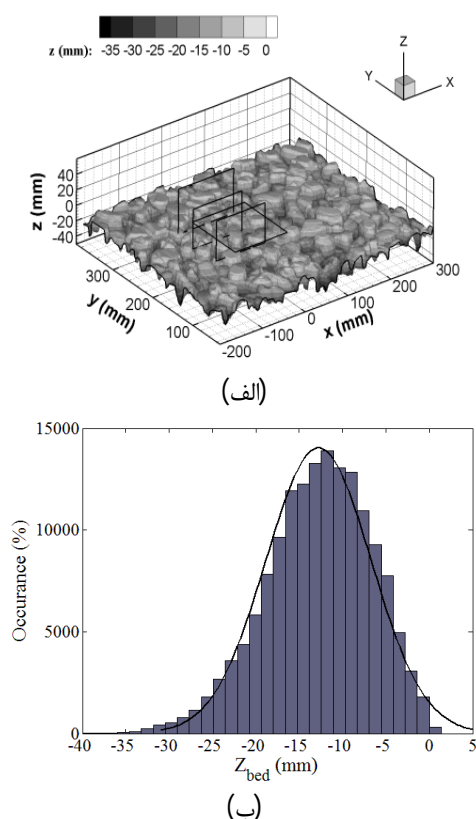
در نهایت، در اندازه‌گیری سنگدانه‌ها با کولیس، روش 3، قطر کلی هر یک از سنگدانه‌ها اندازه‌گیری شده‌اند و می‌توان اطلاعات کلی در ارتباط با شکل سنگدانه‌ها را نیز از این اندازه‌گیری استخراج کرد. در ارتباط با سنگدانه‌های آزمایش حاضر، مقایسه قطرهای سنگدانه‌ها به روش نمودار زگر¹ نشان داد که اغلب سنگدانه‌ها کروی شکل هستند (46%)، این در حالی است که برخی سنگدانه‌ها به شکل تیغه‌ای (25%)، صفحه‌ای (18%) و استوانه‌ای (11%) می‌باشند (تیگرک و آراس، 2011).

به منظور مقایسه بهتر قطر سنگدانه‌ها، در شکل 4 قطر هر یک از سنگدانه‌ها با یکدیگر مقایسه شده‌اند و در ادامه

¹Zagg's Diagram

$$S_Z^3 = \frac{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (Z_i - \bar{Z})^3}{\left(\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (Z_i - \bar{Z})^2} \right)^3} \quad (7)$$

$$S_Z^4 = \frac{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (Z_i - \bar{Z})^4}{\left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (Z_i - \bar{Z})^2 \right)^2} \quad (8)$$



شکل 5 الف) مدل رقومی ارتفاع بستر شنی ب) هیستوگرام ارتفاع نقطه به نقطه بستر شنی.

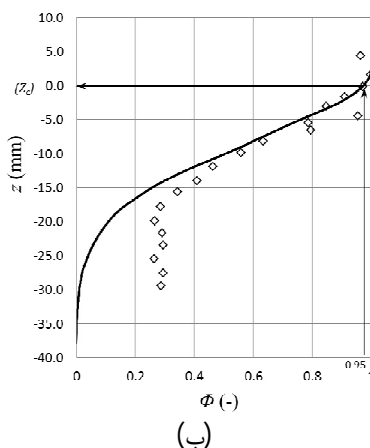
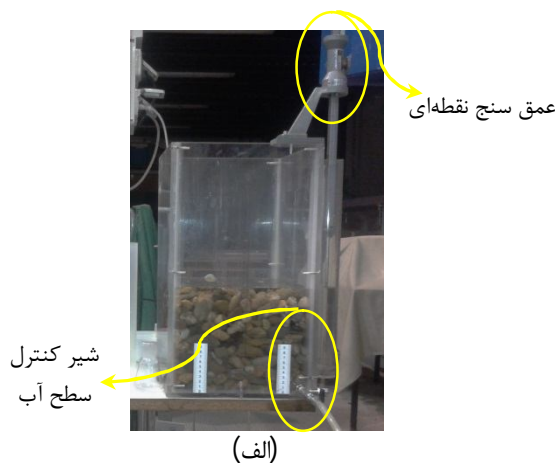
در این روابط S_Z^3 ضریب چولگی، S_Z^4 ضریب کشیدگی و N تعداد کل نقطه‌هایی است که ارتفاع آن اندازه‌گیری شده است. ضریب چولگی و همبستگی بستر مطالعه حاضر به ترتیب برابر با $0/4$ و $3/00$ می‌باشد. این بدان معنی است که توزیع فراوانی ارتفاع بستر به سمت مقادیر کوچک‌تر منحرف شده است، اما مقدار کشیدگی این توزیع مشابه توزیع نرمال می‌باشد (نیکوکار و عرب‌زاده، 1387). مطالعات پیشین نشان داده است که ضریب

مقدار بزرگتر این ضریب همبستگی نسبت به دو ضریب دیگر می‌تواند از نوع صیقل یافتن سنگ‌دانه‌های رودخانه‌ها تحت اثر جریان آب نشأت گرفته باشد. معمولاً سنگ‌دانه‌ها در حالت طبیعی روی قطر متوسط و بزرگ خود روی بستر قرار می‌گیرند و قطر کوچک در راستای قائم قرار می‌گیرد. از آنجا که میزان فرسایش سطح سنگ‌دانه‌ها ناشی از حرکت آب در راستای افقی (در راستای طولی و عرضی) تقریباً یکسان و در راستای قائم بیشتر است، می‌توان انتظار داشت که ضریب همبستگی قطر بزرگ و متوسط بیشتر باشد. در هر صورت مجدداً تأکید می‌گردد که این نوع اطلاعات در ارتباط با شکل سنگ‌دانه‌ها، از سایر روش‌ها قابل استخراج نیست. اما باید به یاد داشت این روش نسبت به سایر روش‌ها زمان‌گیر و سخت‌تر می‌باشد. با توجه به آن‌که نتایج به دست آمده از آزمایش الک چندان با نتایج این روش متفاوت نمی‌باشد (شکل 3)، بسته به نیاز و اهمیت موضوع مورد مطالعه، امکان استفاده از این روش در تعیین خصوصیات بسترهای شنی نیز وجود دارد. در نهایت در مطالعه حاضر از نتایج روش اندازه‌گیری با کولیس برای تعیین خصوصیات سنگ‌دانه‌ها استفاده شد.

3-2- رویکرد اندازه‌گیری نقطه به نقطه ارتفاع

در این رویکرد ارتفاع نقطه به نقطه بستر اندازه‌گیری می‌شود و مدل رقومی بستر تهیه می‌شود. مدل رقومی بستر سنگ‌دانه‌ای در مطالعه حاضر در شکل 5-الف نمایش داده شده است. به منظور بررسی مدل رقومی بستر، تحلیل‌های آماری بر روی بستر اعمال گردید. در شکل 5-ب، هیستوگرام مدل رقومی بستر نمایش داده شده است. میانگین ارتفاع نقطه به نقطه بستر $12/7$ میلی‌متر پایین‌تر از سطح معادل با حداکثر ارتفاع مدل رقومی بستر می‌باشد. از طرف دیگر، مقدار انحراف معیار ارتفاع نقطه به نقطه بستر برابر با $6/1$ میلی‌متر می‌باشد. مطالعات پیشین نشان داده است که انحراف معیار ارتفاع‌های نقطه به نقطه نماینده مناسبی از زبری بستر می‌باشد (نیکوکار و همکاران، 1998). به علاوه، ضریب چولگی و ضریب کشیدگی ارتفاع نقطه به نقطه بستر از روابط (7 و 8) محاسبه شد (نیکوکار و عرب‌زاده، 1387):

سنگدانه‌های شنی پرگردید. سپس فضای خالی مابین سنگدانه‌ها با آب پر گردید. بر اساس پیشنهاد ابرله (2007)، با تعیین تغییرات حجم پر شده با آب مابین سنگ دانه‌ها، می‌توان تابع هندسه بستر زبر را محاسبه کرد. نتایج این روش در شکل 6-ب نمایش داده شده است. از طرف مقابل تابع تغییرات هندسی می‌تواند از تابع توزیع تجمعی² ارتفاع نقطه به نقطه بستر به دست آید (ابرله، 2007). به بیان دیگر توزیع تجمعی، تابع توزیع نمایش داده شده در شکل 6-ب همان تابع تغییرات هندسی بستر است. خط پر رنگ در شکل 6-ب تابع تغییرات هندسی به دست آمده از روش تابع توزیع تجمعی می‌باشد.



شکل 6 الف) نمای منبع استفاده شده برای تعیین تابع تغییرات هندسی بستر به روش جابه‌جایی سطح آب (ب) تابع تغییرات هندسه بستر زبر به روش جابه‌جایی آب (\diamond) و مدل رقومی ارتفاع (خط مشکی پررنگ).

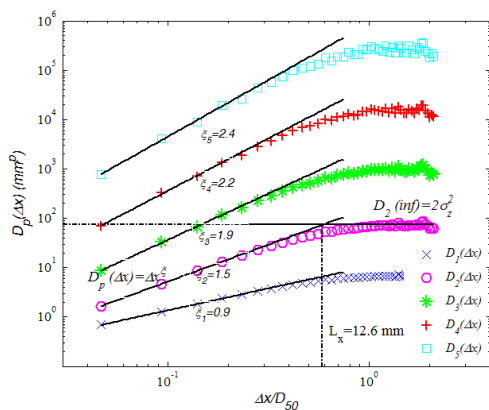
چولگی بسترهای شنی رودخانه‌ها، متفاوت با بستر شنی آزمایش حاضر، دارای کشیدگی مثبت است (نیکورا و همکاران، 1998؛ ابرله و نیکورا، 2006). به منظور مقایسه توزیع ارتفاع بستر با توزیع نرمال، آزمون کولموگروف-اسمیرنوف مورد استفاده قرار گرفت. این آزمون برای ارزیابی همقواری توزیع یک نمونه با توزیعی که برای جامعه فرض شده است (در مطالعه حاضر توزیع نرمال)، به کار می‌رود (نیکوکار و عربزاده، 1387). نتایج این آزمون حاکی از آن است که فرض توزیع نرمال برای ارتفاع بستر به خاطر ضریب چولگی منفی درست نمی‌باشد. ابرله و نیکورا (2006) در مطالعه آزمایشگاهی بستر شنی نیز مردود بودن فرض توزیع نرمال برای ارتفاع بستر را مشاهده نمودند. هر چند که مطالعه نیکورا و همکاران (1998) در بسترهای شنی رودخانه‌ها، به قبول شدن فرض توزیع نرمال انجامید.

یکی از مهم‌ترین خصوصیات آماری-فیزیکی بسترهای زبر، تابع تغییرات هندسه بستر¹ می‌باشد. تابع تغییرات هندسه بستر در بسیاری از فرایندهای طبیعی رایج در بستر رودخانه‌ها مانند تبادل جریان سطحی و زیرزمینی، ته نشینی و حرکت ماسه در بسترهای زبر و نحوه تغییر شرایط زیستگاه آبزیان در رودخانه‌ها موثر می‌باشد (ابرله، 2007). به علاوه این پارامتر به طور صریح در معادلات متوسط دوبل ناویر استوکس ظاهر می‌شود (نیکورا و همکاران، 2001؛ مهاجری و همکاران، 1394). تابع تغییرات هندسه بستر زبر (Φ) که در حقیقت همان ضریب تخلخل بستر می‌باشد، از رابطه (9) محاسبه می‌شود (نیکورا و همکاران، 2001):

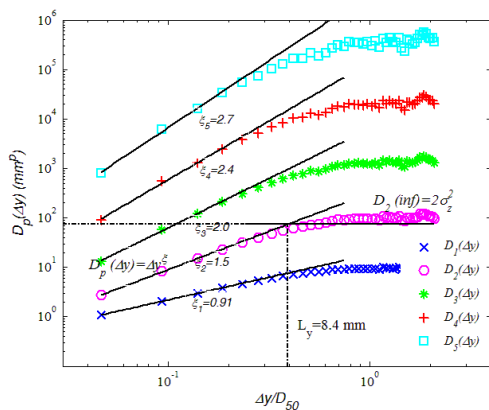
$$\Phi = \frac{V_F}{V_T} \quad (9)$$

به بیان دیگر، تابع تغییرات هندسه بستر عبارت از نسبت قسمتی از حجم بستر که با سیال پر شده است (V_F)، به حجم کل بستر (V_T) می‌باشد (نیکورا و همکاران، 2001؛ ابرله، 2007). بر اساس پیشنهاد ابرله (2007)، در این مطالعه تابع تغییرات هندسی بستر از دو روش به دست آمده است. در روش نخست، تابع تغییرات هندسی بستر در یک منبع مشابه شکل 6-الف، از روش جابه‌جایی سطح آب محاسبه شد. در این روش ابتدا منبع با

داده است که تابع ساختار مرتبه دوم به صورت تحلیلی به دو برابر انحراف معیار نقطه به نقطه بستر میل می کند (دیویس و همکاران، 1994؛ نیکورا و همکاران، 1998). تمامی توابع ساختار نمایش داده شده در شکل 7 از این خصوصیات تبعیت می کنند. وجود دو ناحیه مقیاسی و اشباع شدگی در کلیه توابع ساختار راستای طولی و عرضی به وضوح قابل شناسایی است.



الف) در راستای طولی کانال



ب) در راستای عرضی کانال

شکل 7 توابع ساختار یک بعدی با مراتب مختلف

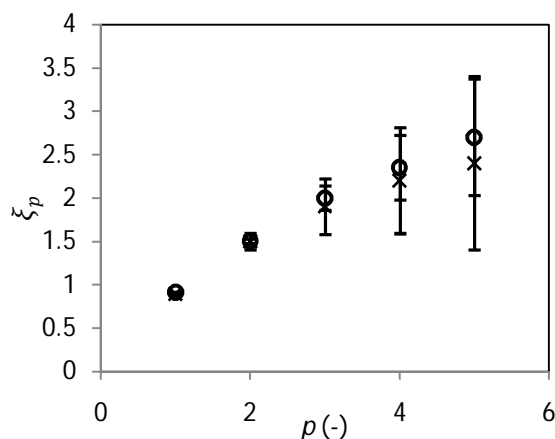
نیکورا و همکاران (1998) پیشنهاد نموده اند که محل تقاطع امتداد خط حاصل از برون یابی در محدوده مقیاسی و مقدار تابع ساختار در محدوده اشباع شدگی در راستای طولی و عرضی برابر با اندازه زبری معادل، به ترتیب در راستای طولی و عرضی، در نظر گرفته شود. در حقیقت یکی دیگر از امتیازات این رویکرد نوین این است که زبری معادل بستر دارای 3 مؤلفه متفاوت در 3 راستای قائم،

باید توجه داشت که مبدأ مختصات در راستای قائم نیز بر اساس سطحی از تابع تغییرات هندسی بستر برابر با 0/95 در نظر گرفته شد. این موقعیت با z_c نمایش داده می شود. مشاهده می شود که تا ارتفاع 10- میلی متر منحنی به دست آمده از دو روش منطبق با هم می باشد، اما در فاصله پایین تر این اختلاف قابل توجه می باشد. ابرله (2007) نیز این اختلاف را مشاهده نمود. ایشان این اختلاف را به عدم کارایی روش دوم (تابع توزیع تجمعی ارتفاع بستر) در نقاط عمیق و دور از سطح زبر مرتبط دانسته اند. در واقعیت تابع تغییرات هندسی یا تخلخل نباید به صفر برسد و تنها در نقاط عمیق، مقدار آن ثابت می شود (نیکورا و همکاران، 2001). اما منحنی به دست آمده از روش دوم در نهایت به صفر رسیده است. بنابراین توصیه می شود در نقاط عمیق از منحنی به دست آمده از روش نخست استفاده شود.

توابع ساختار یک بعدی (معادله 1) در شرایط $(D_p(\Delta x = 0, \Delta y))$ و $(D_p(\Delta x, \Delta y = 0))$ داده شده است. شکل توابع ساختار در هر دو راستای طولی و عرضی مشابه یکدیگر می باشد. نیکورا و والش (2004) بیان داشتند که شکل کلی توابع ساختار یک بعدی از دو ناحیه مختلف تشکیل شده است. ناحیه نخست موسوم به محدوده مقیاسی¹ می باشد که در آن $D_p(\Delta x) \propto \Delta x^{\xi_{px}}$ و $D_p(\Delta y) \propto \Delta y^{\xi_{py}}$ برقرار می باشد. در این روابط ξ_{px} ، ξ_{py} توانی برای نمایش نحوه تغییرات خواص در مقیاس های مختلف پدیده مورد مطالعه که در مطالعات خودمتشابهی به توان مقیاسی شهرت دارد، می باشند (دیویس و همکاران، 1994). منظور از مطالعه خاصیت خودمتشابهی یا فرکتال، مطالعه مجموعه خواص از طبیعت است که با بزرگ کردن هر جزء به نسبت معین، همان ساختار اولیه به دست آید (مندلبرات، 1984). در مطالعات خاصیت خودمتشابهی، توان مقیاسی بیان گر بعد فرکتال هندسه مورد مطالعه می باشد (مندلبرات، 1984). ناحیه دیگر نیز معروف به ناحیه اشباع شدگی² می باشد که در آن $D_p(\Delta x)$ و $D_p(\Delta y)$ به یک مقدار ثابت می رسند. نکته مهم این جاست که مطالعات پیشین نشان

1. Scaling Range
2. Saturation Range

(مندلبرات، 1984). نتایجی که در شکل 8 نمایش داده شده است، نشان می‌دهد که تغییرات توان مقیاسی با مرتبه تابع ساختار خطی نمی‌باشد و در نتیجه توان هرست نیز متغیر می‌باشد. این یافته در تطابق با نتایج مشاهده شده توسط نیکورا و والش (2004) و ابرله و نیکورا (2006) می‌باشد. این پدیده گویای آن است که شرایط خود متشابهی در سنگ‌دانه‌های یک بستر شنی، ساده نبوده و سایر انواع شرایط خودمتشابهی باید مدنظر قرار گیرد. در حقیقت رودیکرد نوین در مطالعه خصوصیات بستر شنی توسط برقراری شرایط خود متشابهی چند مقیاسی انجام می‌شود (کین و لیونگ، 2013).



شکل 8 توان مقیاسی به دست آمده از توابع ساختار یک بعدی مراتب مختلف (x: راستای طولی، o: راستای عرضی)

در شکل 9 توابع ساختار دوبعدی مرتبه دوم (شکل 9- الف) و مرتبه سوم (شکل 9- ب) نمایش داده شده‌اند. تابع ساختار مرتبه دوم دارای کشیدگی در راستای طولی می‌باشد. به علاوه شکل 9- الف نشان می‌دهد که با افزایش Δx و Δy ، کشیدگی خطوط هم‌تراز تابع ساختار دوبعدی مرتبه دوم نسبت به محور افقی به سمت بالا منحرف می‌شود. قیاس منحنی تراز تابع ساختار دوبعدی مرتبه دوم در مطالعه حاضر با منحنی هم‌تراز تابع ساختار در بسترهای ساخته شده ناشی از جریان آب در مطالعه گورینگ و همکاران (1999) و ابرله و نیکورا (2006) حاکی از آن است که در فواصل کوچک، خطوط هم‌تراز متقارن بوده و هیچ‌گونه کشیدگی‌ای در راستای طولی

طولی و عرضی می‌باشد که الزاماً مقدار آنها یکسان نیست (نیکورا و همکاران، 1998).

مقادیر اندازه زبری معادل آزمایش‌های حاضر در راستای طولی و عرضی در شکل 7 نمایش داده شده‌اند. بر اساس مطالعه ابرله و نیکورا (2006)، مقدار زبری معادل در راستاهای طولی برابر با نصف قطر میانگین سنگدانه‌ها می‌باشد ($L_x \approx 0.5D_{50}$). مقایسه خصوصیات ذرات با نتایج شکل 7 نشان داد که مقدار زبری معادل راستای طولی در مطالعه حاضر نیز در حدود نصف قطر میانگین ذرات است. به علاوه آزمایش‌های نیکورا و همکاران (1998) و ابرله و نیکورا (2006) نشان دادند که اندازه زبری معادل در راستای طولی و عرضی تقریباً با هم برابرند. اما در مطالعه حاضر مشاهده شد که مقدار زبری معادل در راستای طولی بزرگتر از زبری معادل در راستای عرضی است. این تفاوت از ماهیت و نحوه ساخت بستر زبر در مطالعه حاضر و مطالعات نیکورا و همکاران (1998) و ابرله و نیکورا (2006) نتیجه می‌شود. مطالعه نیکورا و همکاران (1998) بر روی بسترهای طبیعی رودخانه می‌باشد که در طی گذر زمان و تحت اثر حرکت آب این شکل را به خود گرفته‌اند. ابرله و نیکورا (2006) نیز به مطالعه فرایند مسلح شدن بستر تحت اثر حرکت آب در آزمایشگاه پرداخته‌اند. بنابراین بستر هر دو این مطالعات اصطلاحاً بسترهای ساخته شده با جریان آب می‌باشند. این در حالی است که بستر زبر در مطالعه حاضر به صورت مکانیکی و باچنگک منظم شده است و سپس آب با دبی‌های دلخواه بر روی آن جریان داده شده است.

در شکل 8 توان‌های مقیاسی به دست آمده از محدوده مقیاسی توابع ساختار (شکل 7) برای مراتب مختلف توابع ساختار نمایش داده شده است. باید توجه داشت که انواع مختلفی از خاصیت خودمتشابهی وجود دارد. در صورتی که رابطه $pH = \xi_p$ برقرار باشد، شرایط خودمتشابهی ساده نامیده می‌شود. این رابطه بیان می‌دارد که توان مقیاسی با توان تابع ساختار مورد مطالعه رابطه خطی دارد. ضریب این رابطه خطی در مطالعات خصوصیات خودمتشابهی اصطلاحاً توان هرست¹ نامیده می‌شود

1. Hurst Exponent

چنگک صاف شده بود، امکان تشکیل کلاستر و حفره در بستر شنی وجود نداشت. به همین خاطر هیچ‌گونه شکل و ارتباط خاصی در تابع مرتبه سوم کولموگروف قابل یافت شدن نمی‌باشد.

از مجموع این مشاهدات می‌توان نتیجه گرفت با وجود آن‌که روش مورد استفاده در مطالعه حاضر برای ساختن بستر زبر (استفاده از چنگک و جریان آب) روش ساده و مناسبی می‌باشد، برخی از خصوصیات بستر مانند ضریب چولگی منفی توزیع ارتفاع نقطه به نقطه، عدم یافتن هیچ‌گونه ساختار خاصی در تابع ساختار مرتبه سوم و نیز نحوه تغییر منحنی هم‌تراز با افزایش Δx و Δy متفاوت با بسترهای شنی رودخانه‌ها می‌باشد. هر چند که با این روش، بسیاری از خصوصیات بستر مانند توزیع نرمال ارتفاع بستر، زبری‌های معادل طولی و عرضی و رابطه آن با قطر سنگ‌دانه‌ها و نحوه تغییر جهت منحنی هم‌تراز در تابع ساختار دو بعدی مشابه با بسترهای شنی طبیعی رودخانه‌ها می‌باشد.

4- نتیجه‌گیری

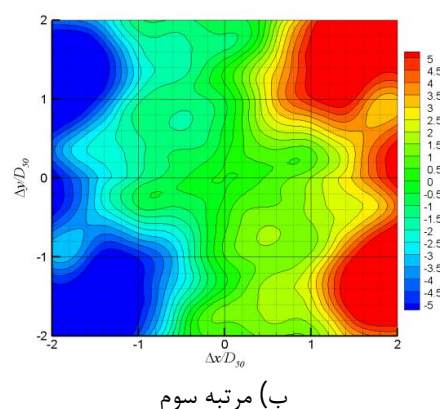
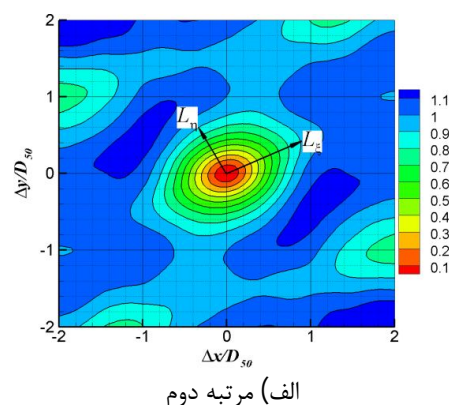
در مطالعه حاضر به بررسی کارایی روش‌های موجود در تعیین منحنی توزیع اندازه سنگ‌دانه‌های بستر و معرفی روش نوین اندازه‌گیری نقطه به نقطه ارتفاع برای تعیین زبری بستر پرداخته شد. به طور کلی نتایج زیر از مجموعه آزمایش‌ها به دست آمد:

1- در بین روش‌های موجود برای تعیین منحنی توزیع اندازه سنگ‌دانه، روش اندازه‌گیری 3 قطر سنگ‌دانه‌ها با کولیس، با وجود زمان‌بر بودن، به جهت فراهم آوردن اطلاعات در ارتباط با شکل کلی سنگ‌دانه‌ها برتر از روش تحلیل تصویر و آزمایش الک می‌باشد.

2- کاربرد روش اندازه‌گیری ارتفاع نقطه به نقطه بستر زبر نشان داد که اطلاعات بدست آمده کامل‌تر و مفیدتر از روش اندازه‌گیری سنگ‌دانه‌ها می‌باشد. بنابراین توصیه می‌شود که در مطالعات آتی برای تعیین زبری بستر از این رویکرد استفاده شود.

3- بررسی بستر شنی ساخته شده در آزمایشگاه مطالعه حاضر نشان داد که با وجودی که بسیاری از خصوصیات

ندارند. اما با افزایش Δx و Δy خطوط هم‌تراز در راستای طولی کشیده می‌شوند. به علاوه انحراف خطوط هم‌تراز از محور افقی در Δx و Δy بزرگ مشاهده می‌شود. این تفاوت در ساختار سنگ‌دانه‌های بستر نیز از نوع تشکیل این دو بستر ناشی می‌شود. در این شرایط شکل 9- الف نشان‌گر آن است که ساختار بستر هم در فواصل کوچک و هم در فواصل بزرگ در راستای جریان منظم شده‌اند.



شکل 9 تابع ساختار کولموگروف

به علاوه در تابع ساختار مرتبه سوم کولموگروف (رابطه 1) بدون قدر مطلق؛ رجوع شود به توضیحات در مقدمه) که در شکل 9- ب نمایش داده شده است، ساختار و نظم خاصی مشاهده نمی‌شود. نیکورا و والش (2004) در مطالعه بسترهای شنی رودخانه‌ها بیان داشتند که ساختارهای خاصی ناشی از جمع شدن سنگ‌دانه‌ها در کنار یکدیگر و یا ایجاد حفره تحت اثر جمع شدن سنگ‌دانه‌ها در کنار یکدیگر، در این تابع مشاهده نمودند. از آنجا که در مطالعه حاضر پیش از انجام آزمایش‌ها بستر توسط

S_Z^3	ضریب چولگی
S_Z^4	ضریب کشیدگی
V_i	حجم هر یک از سنگ‌دانه‌ها
V_F	قسمتی از حجم بستر که با سیال پر شده
V_T	حجم کل بستر
W_i	وزن مانده سنگ‌دانه‌ها روی الک i
x	راستای طولی
y	راستای عرضی
Z	ارتفاعات نقطه به نقطه
Δx و Δy	Δy اختلاف موقعیت دو نقطه‌ای است که تابع ساختار در این فاصله محاسبه می‌شود
$\delta x, \delta y$	فواصل نمونه‌گیری در راستای طولی و عرضی
ξ_{px}, ξ_{py}	توانی برای نمایش نحوه تغییرات خواص در مقیاس‌های مختلف
π	برابر با $3/14$
ρ	ضریب همبستگی
Φ	تغییرات هندسه بستر زبر

آماري بستر شبیه به بستر شنی رودخانه‌ها می‌باشد، برخی خصوصیات مانند ضریب چولگی منفی توزیع ارتفاع نقطه به نقطه و عدم یافتن هیچ‌گونه ساختار خاصی در تابع ساختار مرتبه سوم، متفاوت با شرایط طبیعی رودخانه‌ها می‌باشد.

4- یافته فوق بیان‌گر این واقعیت است که بستر زبر در بسیاری از مطالعات آزمایشگاهی جریان آب که بر اساس تنها قطر معادل سنگ‌دانه شبیه‌سازی می‌شوند، در عمل می‌توانند خواص آماری بسیار متفاوتی با بسترهای طبیعی رودخانه‌ها داشته باشند. لذا توصیه می‌شود در این نوع مطالعات بستر شنی به روش‌های آماری به طور دقیق تعریف شود تا حداقل میزان اختلاف با شرایط طبیعی رودخانه مشخص شود.

5- سپاسگزاری

مؤلف بر خود لازم می‌داند از دکتر ریگتی¹، پرفسور هارتون² و پرفسور نیکورا³ که در تحلیل نتایج ارایه شده در این مقاله همکاری بسیار زیادی داشتند، تشکر نمایند.

6- فهرست علائم

A_i	مساحت هر یک از سنگ‌دانه‌ها
a_i, b_i	قطر بزرگ و متوسط هر یک از ذرات
c_i	قطر کوچک هر یک از سنگ‌دانه‌ها
D_p	تابع ساختار مرتبه p
d_{50}, d_{84}, d_{15}	بیانگر قطری از مصالح که $x\%$ آن از الک عبور می‌کند
k_s	ضریب زبری معادل بستر
N	تعداد کل نقطه‌هایی است که ارتفاع آن اندازه‌گیری شده
P'_x	درصد سنگ‌دانه‌های کوچکتر از x در اندازه‌گیری با کولیس
P_x	درصدی از مصالح رد شده از الک x
P'_x	درصد سنگ‌دانه‌های کوچکتر از x در آنالیز تصویر

7- منابع

مهاجری س. ح.، صفرزاده ا. و صالحی نیشابوری س. ع. ا. (1394). تعیین پروفیل سرعت طولی جریان آشفتته در بسترهای زبر به روش متوسط‌گیری دوبل. پذیرفته شده توسط نشریه دانش آب و خاک ایران.

نیکوکار م. و عربزاده م. (1387). آمار و احتمالات مهندسی، نشر آزاده، تهران، ایران.

Aberle J. and Nikora V. (2006). "Statistical properties of armored gravel bed surfaces". *Water Resources Research*. 42: W11414.

Aberle J. (2007). "Measurements of armour layer roughness geometry function and porosity". *Acta Geophysica*. 55, pp. 23-32.

American Society for Testing and Materials (ASTM). (2006). Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates. C136 / C136M: 14.

Bathurst J. C. (1985). *Theoretical aspects of flow resistance in Gravel-Bed rivers*. Edited by R. D.

1. Dr. Righetti, University of Trento, Italy.

2. Prof. Wharton, Queen Mary University of London, UK.

3. Prof. Nikora, University of Aberdeen, UK.

- Matrox. (2015). revised from <http://www.matrox.com/imaging/en/products/software/mil/tools/measurement/>.
- Mohajeri H., Grizzi S., Righetti M., Romano G. P. and Nikora V. (2015). "The structure of gravel-bed flow with intermediate submergence: a laboratory study". *Journal of Water Resources Research* (Accepted Manuscript).
- Mohajeri S. H. (2014). "Hydrodynamics of gravel bed flows (Implications in colmation)". PhD Thesis, Department of Civil, Mechanics and Environmental Engineering, University of Trento and School of Geography, Queen Mary University of London.
- Nikora V. I., Goring D. G. and Biggs B. F. (1998). "On gravel-bed roughness characterization". *Water Resources Research*. 34, pp. 517-527.
- Nikora V. I. and Goring D. G. (1999). "On the relationship between Kolmogorov's and generalized structure functions in the inertial subrange of developed turbulence". *Journal of Physics A: Mathematical and General*. 32, pp. 4963-4969.
- Nikora V. I., Koll k., McEwan I. K., McLean S. R. and Dittrich A. (2004). "Velocity distribution in the roughness layer of rough-bed flows". *Journal of Hydraulic Engineering*. 130(7), pp. 1036-1042.
- Nikora V., Goring D., McEwan I. and Griffiths G. (2001). "Spatially averaged open-channel flow over rough bed". *Journal of Hydraulic Engineering*. 127, 2, pp. 123-133.
- Nikora V., McEwan I., Mclean S., Coleman S., Pokrajac D. and Walters R. (2007). "Double-averaging concept for rough-bed open-channel and overland flows: Theoretical background", *Journal of Hydraulic Engineering*. 133, 8, pp. 873-883.
- Nikora V. and Walsh J. (2004). "Water-worked gravel surfaces: High-order structure functions at the particle scale". *Water Resources Research*. 40: W12601.
- Parker G. and Peterson A. W. (1980). "Bar resistance of gravel bed streams". *Journal of the Hydraulics Division (ASCE)*. 106, 10, pp. 1559-1575.
- Qin J. and Leung S. (2013). "Multifractal characterization of water-worked gravel surfaces". *Journal of Hydraulic Research*. 49 (3), pp. 345-351.
- Tigrek S. and Aras T. (2011). *Reservoir Sediment Management*, Taylor & Francis.
- Hey, J. C. Bathurst, and C. R. Thorne, pp. 83-108. John Wiley, New York.
- Brunke M. and Gonser T. (1997). "The ecological significance of exchange processes between rivers and groundwater". *Freshwater Biology*. 37, pp. 1-33.
- Buffin-Bélanger T. and Roy A. G. (1998). "Effects of a pebble cluster on the turbulent structure of a depth-limited flow in a gravel-bed river". *Geomorphology*. 25, pp. 249-267.
- Cooper J. and Tait S. (2009). "Water-worked gravel beds in laboratory flumes – a natural analogue?". *Journal of Earth Surface Processes and Landforms*. 34, pp. 384-397.
- Davis A., Marshak A., Wiscombe W. and Cahalan R. (1994). "Multifractal characterizations of non-stationarity and intermittency in geophysical fields: Observed, retrieved or simulated". *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 99, pp. 8055-8072.
- Detert M. and Weitbrecht V. (2012). "Automatic object detection to analyze the geometry of gravel grains - a free stand-alone tool". *Proceeding of River Flow Conference, Costa-Rica*, pp. 595-600.
- Fehr R. (1986). "A method for sampling very coarse sediments in order to reduce scale effects in movable bed models". 86th IAHR Symposium on Scale Effects in Modelling Sediment Transport Phenomena, Toronto, Ontario, Canada.
- Goring D., Nikora V., and McEwan I. (1999). "Analysis of the texture of gravel beds using 2-D structure functions, in River, Coastal, and Estuarine Morphodynamics". *Proceedings of the IAHR Symposium, Vol. 2*, pp. 111-120, Genova, Italy.
- Graf W. and Altinakar M. (1998). *Fluvial hydraulics*, Wiley, New York.
- Graham D. J., Reid I. and Rice P. (2005). "Automated sizing of coarse-grained sediments: image-processing procedures". *Mathematical Geology*, 37(1): 28.
- Hey R. D. (1988). "Bar form resistance in gravel-bed rivers", *Journal of Hydraulic Engineering*. 114(12). pp. 1498-1508.
- Lamarre H. and Roy A. G. (2005). "Reach scale variability of turbulent flow characteristics in a gravel-bed river". *Geomorphology*. 68, pp. 95-113.
- Mandelbrot B. (1984). *The fractal geometry of nature*. W. H. Freeman and company, New York, United States.

Wiberg P. L. and Smith J. D. (1991). "Velocity distribution and bed roughness in high-gradient streams". *Water Resources Research*. 27(5), pp. 825-838.

Webb R. H. and Leake S. A. (2006). "Ground-water surface-water interactions and long-term change in riverine riparian vegetation in the southwestern United States". *Journal of Hydrology*. 320, pp. 302-323.