

بررسی اعتبار روش میانگین گیری دوگانه سرعت برای کاربرد قانون دیوار بر روی شکل بستر مقعر

عاطفه فضل اللهی¹، حسین افضلی مهر^{2*}

1- کارشناس ارشد سازه های آبی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان

2- دانشیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان

* اصفهان، کد پستی 841568311

hafzali@cc.iut.ac.ir

چکیده - یکی از مهمترین مباحث در مهندسی رودخانه بررسی شکل های بستر رودخانه است. شکل بستر مقعر یکی از معمول ترین اشکال بستر است که در گستره وسیعی از رودخانه های شنی و قلوه سنگی مشاهده می شود. وجود گرادین های مطلوب و نامطلوب ناشی از تغییرات شکل بستر و غیریکنواختی جریان بر روی آن نقش قابل توجهی بر توزیع زمانی و مکانی سرعت و سرعت برشی در تعیین ضریب زبری و انتقال رسوب در رودخانه ها و کانال های با بستر شنی ایفا می کند. این مقاله روش میانگین گیری دوگانه را برای معرفی سرعت جریان و برآورد سرعت برشی بر روی اشکال بستر مقعر مورد استفاده قرار می دهد. با توجه به عدم سابقه استفاده از این روش در ایران، این روش در این مقاله معرفی شده و اعتبار آن با استفاده از کاربرد روش های قانون دیوار و روش مشخصات لایه مرزی مورد بررسی قرار می گیرد. کاهش سرعت برشی در جریان با گرادین فشار مطلوب در بخش انتهایی شکل بستر و افزایش آن در بخش ورودی شکل بستر در جهت جریان نشان می دهد که برآورد پارامترهای هیدرولیکی نظیر ضریب زبری و انتقال رسوب نمی تواند مبتنی بر یک پروفیل موضعی قرار گیرد. بنابراین ضروری است با بکارگیری میانگین گیری های زمانی و مکانی در امتداد شکل بستر برآورد بهتری از این پارامترها بدست آورد. نتایج نشان می دهد که روش میانگین گیری دوگانه از روند نیمرخ های موضعی سرعت جریان در نواحی داخلی و خارجی لایه مرزی پیروی می کند و قانون لگاریتمی می تواند برای زوایای مختلف تاج بستر 5، 10، 15 و 20 درجه بکار برده شود. در ناحیه خارجی لایه مرزی انحراف داده ها از قانون لگاریتمی برای زوایای مختلف تاج وجود داشته، هر چند ضخامت ناحیه داخلی با افزایش زاویه تاج کاهش می یابد. همچنین کاربرد روش مشخصات لایه مرزی برای تعیین سرعت برشی نیمرخ میانگین دوگانه نشان می دهد که با افزایش زاویه تاج شکل بستر، سرعت برشی نیز افزایش می یابد.

کلیدواژگان: شکل بستر مقعر، روش میانگین گیری دوگانه، قانون دیوار، سرعت برشی، ضریب فن کارمن.

1- مقدمه

مهمی در پیش بینی رفتار رودخانه دارد، مورفولوژی رودخانه است. این شاخه به شناخت ویژگی های هندسی

یکی از زیر شاخه های علم مهندسی رودخانه که نقش

و خصوصیات فیزیکی رودخانه نظیر توپوگرافی و شکل بستر و برهم‌کنش آنها با خصوصیات جریان نظیر سرعت و مقاومت جریان می‌پردازد. برهم‌کنش جریان آشفته و انتقال رسوب در سیستم رودخانه شکل‌های مختلفی از بستر را بوجود می‌آورد. تقریباً همزمان با شروع حرکت ذرات بستر در رودخانه‌ها، شکل‌های مختلف بستر شروع به شکل‌گیری می‌کنند. در مقیاس افقی یا پلان، یک رودخانه می‌تواند هر شکلی را بطور پیوسته به خود بگیرد. رودخانه‌های پیچان¹ و شریانی² از جمله این اشکال هستند. توسعه این اشکال به شرایط جریان، شیب کانال، مقاومت دیواره‌های کناری، ذخیره رسوب و ظرفیت حمل رسوب رودخانه بستگی دارد. در مقیاس عمودی، نوسانات بستر به شکلی دیگر به تبیین مورفولوژی رودخانه می‌پردازند. ایجاد و توسعه شکل‌های بستر در رودخانه‌ها همراه با پیچیدگی‌هایی است که مربوط به تعامل هیدرودینامیک و رسوب می‌شود و موجب شکل‌گیری اشکال متناوب بستر می‌گردد. اشکال عمده بستر رودخانه‌های شنی با توجه به رژیم جریان و میزان انتقال رسوب بصورت اشکال مقعر و محدب نمود می‌یابند. مطالعات اشکال بستر همواره با این سوالات مواجه هستند که چگونه می‌توان پارامترهایی نظیر عدد فرود، عدد رینولدز، سرعت متوسط، سرعت برشی، تنش برشی و ضریب اصطکاک را بصورت یک عدد واحد که معرف تمام شکل بستر باشد گزارش نمود؟ چگونه می‌توان اثر نامنظمی شکل بستر را بر این پارامترها نشان داد؟ محققانی همچون نیکورا و همکاران³ (2007)، اسمیت و مک‌لین⁴ (1977) و مک‌لین، نیکورا (2006) به این منظور مطالعاتی انجام داده و روشی به نام میانگین‌گیری دوگانه (میانگین‌گیری زمانی و مکانی) ارائه داده‌اند. این روش در ابتدا در مطالعات ژئوفیزیکی برای مطالعه

جریان‌های لایه مرزی اتمسفر بر روی پوشش گیاهی سطح زمین بکار رفت (رائوپاک و همکاران⁵ (1991)، فینینگان⁶ (2000)، فینینگان و شاو⁷ (2008)، هرچند بعدها توسط محققان و مهندسان رودخانه به مجاری روباز گسترش یافت. مطالعه روی بسترهای زیر در کانال‌های روباز با عمق کم و حضور شکل‌های بستر نشان می‌دهد که بسیاری از روش‌ها و برآوردها از دقت لازم برخوردار نیستند. عدم توافق در پیش‌بینی توسط مدل‌های هیدرولیکی بیشتر از هر عامل دیگر، مربوط به متدولوژی برآورد پارامترهای هیدرولیکی نظیر ضریب زبری و تنش برشی است. فرانکا و همکاران⁸ (2010) نشان دادند که با میانگین‌گیری دوگانه سرعت در معادلات ناویر استوکس عبارات تنش ناشی از شکل بستر ظاهر می‌شوند.

این محققان نشان دادند که تنش نرمال ناشی از شکل بستر در ناحیه $z/h < 0/4$ می‌تواند به بزرگی تنش‌های رینولدز یا حتی بزرگ‌تر از آن باشد. هدف روش میانگین‌گیری دوگانه محاسبه مقدار میانگین زمانی و مکانی از داده‌های سرعت می‌باشد. با کمک این روش می‌توان مقدار میانگین برای هر پارامتر که معرف آشفتگی (عدد رینولدز) و رژیم جریان (عدد فرود) باشد را گزارش نمود. در این مقاله سعی بر آن است که پس از روشن کردن جزئیات این روش، آن را بر روی شکل بستر مقعر با زوایای تاج متعدد بررسی کرده و اعتبار این روش را به عنوان روشی سودمند در کاربردهای مهندسی رودخانه بررسی کرد.

2- مواد و روش‌ها

این تحقیق در یک کانال آزمایشگاهی از جنس پلکسی-گلکس به طول 8 متر و عرض 40 سانتی‌متر انجام شد. به

1. Meander
2. Braided
3. Nikora et al
4. Smith and McLean

5. Raupach et al
6. Finnigan
7. Shaw
8. Franka et al

مقادیر ثبت شده توسط ADV به دلیل وجود نویز همواره دارای خطا می‌باشند، لذا بایستی داده‌های ناسالم فیلتر شوند. در این تحقیق عمل فیلتراسیون با کمک نرم-افزار Win ADV و از طریق فیلتر Phase Space که بر مبنای الگوریتم گورینگ¹ و نیکورا (2002) طراحی شده است، صورت گرفت. توضیحات بیشتر درباره عملکرد این فیلتر در مراجع گزارش شده است.

پس از استخراج مقادیر سرعت لازم است میانگین‌گیری زمانی و مکانی انجام شود. میانگین زمانی در واقع میانگین مقادیر سالم سرعت ثبت شده طی مدت زمان 2 دقیقه می‌باشد که توسط نرم‌افزار Win ADV انجام می‌شود. به این ترتیب برای هر نقطه مقدار متوسط‌گیری شده زمانی سرعت توسط نرم‌افزار ارائه می‌شود. برای تعیین میانگین مکانی، داده‌های سرعت که دارای فاصله یکسانی از بستر می‌باشند، در یک تراز در نظر گرفته شده و میانگین‌گیری می‌شوند. به این ترتیب برای هر تراز یک مقدار سرعت گزارش می‌شود. شکل 1 دو تراز از ترازهای میانگین‌گیری را برای شکل بستر مقعر 5 درجه نشان می‌دهد.

نیکورا و همکاران (2001) هر متغیر وابسته به زمان مانند θ را در قالب میانگین‌گیری دوگانه را بصورت زیر تعریف کردند:

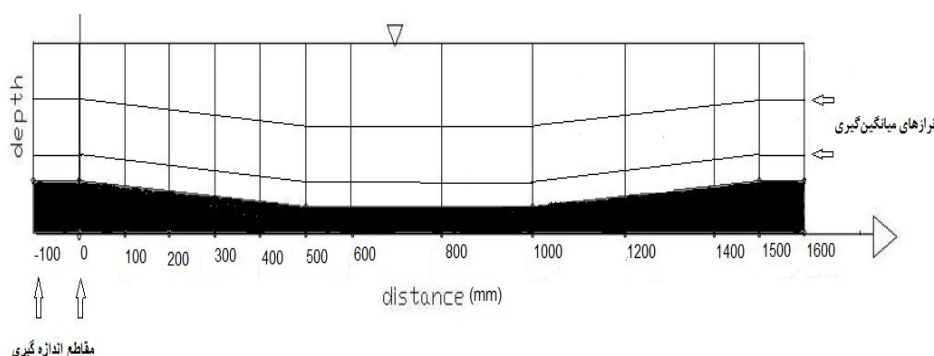
$$\theta = \langle \bar{\theta} \rangle + \bar{\theta} + \bar{\theta} \quad (1)$$

منظور بررسی اثر شکل بستر، آزمایش در چهار سری با زوایای تاج مختلف انجام شد. زوایای شکل بستر در این تحقیق 5، 10، 15 و 20 درجه در نظر گرفته شد. اشکال بستر مقعر با ذرات شن به قطر میانه 10 میلی‌متر و به طول 1/5 متر در فاصله 5 متری از کانال، جایی که جریان به توسعه‌یافتگی رسیده بود، احداث شدند. جدول 1 ویژگی‌های سری‌های آزمایشی را نشان می‌دهد.

جدول 1 ویژگی‌های آزمایش

20	عمق آب (سانتی‌متر)
18	دبی (لیتر بر ثانیه)
20، 15، 10، 5	زوایای شکل بستر (درجه)
0/076-0/13	دامنه عدد فرود
$(1/5-2/1) \times 10^4$	دامنه عدد رینولدز

سرعت جریان یکی از کلیدی‌ترین پارامترهایی است که اندازه‌گیری آن در اغلب مطالعات جریان آشفته اجتناب ناپذیر است. در این مطالعه از دستگاه سرعت‌سنج صوتی ADV با فرکانس 200 هرتز با مدت زمان اندازه‌گیری 2 دقیقه برای هر نقطه استفاده شد. بنابراین در هر نقطه 24000 داده سرعت اندازه‌گیری و در هر نیمرخ سرعت 20 تا 30 نقطه اندازه‌گیری شد. نیمرخ‌ها در 14 مقطع از ابتدا تا انتهای شکل بستر و در محور مرکزی کانال برداشت شدند.



شکل 1 ترازهای میانگین‌گیری مکانی بر روی شکل بستر مقعر

d_{50} در نظر گرفته شد، B_r ثابت انتگرال می‌باشد. d_{50} اندازه‌ای است که 50 درصد ذرات از آن ریزترند. محققان زیادی اعتبار این قانون را بررسی کرده‌اند. کیرونوتو و گراف¹ (1995) نشان دادند که این قانون به خوبی بر ناحیه داخلی نیمرخ سرعت در جریان‌های تندشونده و کندشونده برازش داده می‌شود. آنها محدوده $z/h < 0/2$ را به عنوان ناحیه اعتبار قانون دیوار گزارش کردند. محققان دیگری همچون افصلی‌مهر (2010) و افصلی‌مهر و رنی² (2009) اعتبار این قانون در بسترهای شنی و قلوه سنگی را مورد تأیید قرار دادند. همچنین ضریب ثابت فن‌کارمن در اغلب منابع برابر $0/4$ در نظر گرفته می‌شود.

به این منظور طبق شکل 3 خطی بر نمودار سرعت (u) در برابر لگاریتم عمق نسبی ($\ln(y/k_s)$) برازش داده شده و شیب خط بدست می‌آید. طبق رابطه (4) شیب خط برابر u^*/κ می‌باشد. در صورتی که بتوان تخمینی از u^* با کمک روش‌های دیگری همچون روش مشخصات لایه مرزی یا روش تنش رینولدز بدست آورد، می‌توان مقدار κ را بدست آورده و با مقدار $0/4$ مقایسه کرد. روش مشخصات لایه مرزی توسط افصلی‌مهر و آنکتیل³ (2000) به منظور تخمین سرعت برشی ارائه شد. در این روش سرعت برشی با استفاده از رابطه (5) حاصل می‌شود.

$$u^* = \frac{(\delta^* - \theta) u_c}{c \delta^*} \quad (5)$$

که در آن δ^* ضخامت جابه‌جایی لایه مرزی است و از رابطه (6) محاسبه می‌شود (افصلی‌مهر و آنکتیل 2000). θ ضخامت اندازه حرکت لایه مرزی است و از رابطه (7) محاسبه می‌شود (افصلی‌مهر و آنکتیل 2000).

u_c سرعت حداکثر در هر نیمرخ سرعت می‌باشد و C ضریب ثابت است که برای رودخانه‌های شنی برابر $4/4$ در نظر گرفته می‌شود.

که در آن $\langle \bar{\theta} \rangle$ میانگین دوگانه (زمانی و مکانی)، $\bar{\theta}$ اختلاف مقدار میانگین زمانی با مقدار میانگین دوگانه و θ' مقدار نوسانات زمانی پارامتر θ می‌باشد. نیکورا و همکاران (2001) عملگر میانگین‌گیری دوگانه برای پارامتر θ را بصورت زیر تعریف کردند:

$$\langle \bar{\theta} \rangle = \frac{1}{A_f(z)} \int_{\Omega} \bar{\theta}(\alpha, \beta, z) ds \quad (2)$$

که در آن $A_f(z)$ سطح اشغال شده توسط سیال در تراز z می‌باشد. Ω مساحت ناحیه افقی موازی با بستر در تراز z میانگین زمانی متغیر θ که در تراز z و امان سطح ds انتگرال‌گیری می‌شود. متغیرهای α و β بصورت زیر تعریف می‌شوند:

$$0 < \alpha < L_x, \quad 0 < \beta < L_y$$

که در آن L_x طول ناحیه Ω در راستای x و L_y عرض این ناحیه در راستای y می‌باشد.

به دلیل اندازه‌گیری گسسته سرعت به وسیله ADV عمل، میانگین‌گیری دوگانه بصورت زیر انجام می‌شود:

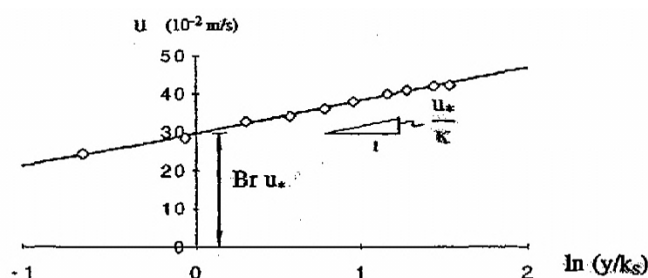
$$\langle \bar{u} \rangle = \frac{\sum_{k=1}^{N-N_0} \bar{u}_k(z) A_k(z)}{\sum_{k=1}^{N-N_0} A_k(z)} \approx \frac{1}{N - N_0} \sum_{k=1}^{N-N_0} \bar{u}_k(z) \quad (3)$$

که در آن $A_k(z)$ مساحت سطح تأثیر $\bar{u}_k(z)$ در تراز z و N تعداد سطوح در نظر گرفته در تراز z می‌باشد. پس از حصول میانگین زمانی - مکانی (دوگانه) برای هر نقطه، نیمرخ سرعت معادل کل شکل بستر حاصل می‌شود. برای بررسی میزان صحت نیمرخ حاصل شده، قانون دیوار بکار رفت. طبق این قانون نیمرخ سرعت در ناحیه نزدیک بستر که به عنوان ناحیه داخلی شناخته می‌شود، $z/h < 0/2$ که z فاصله از بستر و h عمق کل جریان می‌باشد) از تابع لگاریتمی پیروی می‌کند (افصلی‌مهر 2010).

$$\frac{u}{u^*} = \frac{1}{\kappa} \ln \left(\frac{z}{k_s} \right) + B_r \quad (4)$$

که در آن u سرعت متوسط در عمق z ، u^* سرعت برشی، κ ثابت فن‌کارمن، k_s زبری معادل که در این تحقیق برابر

1. Kironoto and Graf
2. Rennie
3. Anctil



شکل 3 برازش قانون دیوار بر داده‌های سرعت

میانگین‌گیری دوگانه تا حدی از این نامنظمی‌های تصادفی می‌کاهد. در تحقیق حاضر (شکل 4) چنین بی-نظمی‌هایی مشاهده نمی‌شود، زیرا دانه‌بندی ذرات بستر یکنواخت بوده و مطالعه بر روی یک شکل بستر واحد در آزمایشگاه صورت گرفته است و ناهمواری‌های بستر رودخانه در آن مشاهده نمی‌شود. خط توپر در شکل 4 نیمرخ میانگین دوگانه سرعت را نشان می‌دهد.

همان‌طور که مشخص است روش میانگین‌گیری دوگانه در ناحیه داخلی به خوبی عمل کرده است و نامنظمی‌های تصادفی را تعدیل کرده است، هرچند به دلیل اثر گرادیان فشار نامطلوب در ناحیه خارجی لایه مرزی تفاوت قابل ملاحظه‌ای در نیمرخ‌های زمانی سرعت با نیمرخ میانگین دوگانه مشاهده می‌شود. با توجه به شکل 4 می‌توان نیمرخ سرعت را به دو ناحیه نزدیک بستر که نیمرخ سرعت از تابع لگاریتمی پیروی می‌کند و ناحیه خارجی که از این قانون منحرف می‌شود، تقسیم کرد. شکل 4 نشان می‌دهد که با افزایش زاویه، نیمرخ میانگین دوگانه سرعت به حالت S شکل نزدیک شده است. شکل 5 نیمرخ میانگین دوگانه سرعت برای تمام زوایای تاج شکل بستر و قانون لگاریتمی (دیوار) برازش داده شده بر آنها را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل 5 مشاهده می‌شود ضرایب همبستگی برازش (R^2) مقادیر بیشتر از 94% را اختیار کرده‌اند که نشان می‌دهد قانون دیوار به خوبی بر ناحیه داخلی نیمرخ سرعت با عمق نسبی (z/d_{50}) متفاوت برازش داده شده است. دلیل انحراف از قانون لگاریتمی در ناحیه خارجی، به شدت آشفتگی و

$$\delta_* = \int_0^h \left(1 - \frac{u}{u_c}\right) dy \quad (6)$$

$$\theta = \int_0^h \frac{u}{u_c} \left(1 - \frac{u}{u_c}\right) dy \quad (7)$$

قانون دیوار بر نیمرخ‌های سرعت حاصل از روش میانگین‌گیری دوگانه برازش داده شد که در تمام آنها ضریب همبستگی (R^2) بیشتر از 94% بود.

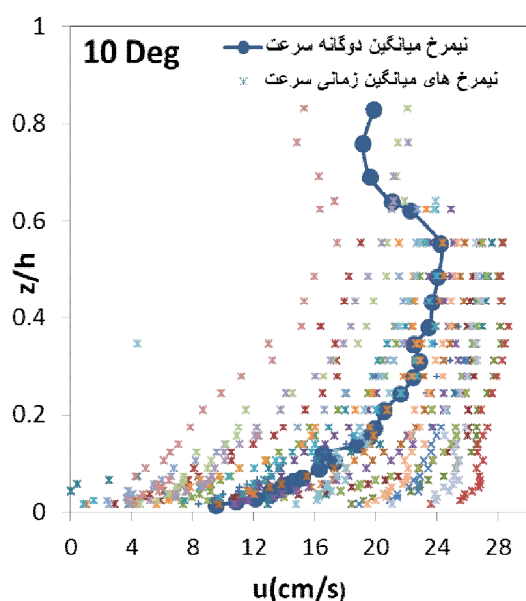
3- نتایج و بحث

به منظور بررسی نتایج حاصل، ابتدا نیمرخ‌های سرعت میانگین دوگانه به همراه نیمرخ‌های میانگین زمانی ترسیم شدند. شکل 4 نشان‌دهنده نیمرخ میانگین دوگانه و نیمرخ‌های زمانی برای شکل بستر با زوایای مختلف می‌باشد. لازم به ذکر است که هریک از نقاط در شکل 4 بیانگر میانگین 24000 داده سرعت لحظه‌ای است که در مدت دو دقیقه برداشت شده است.

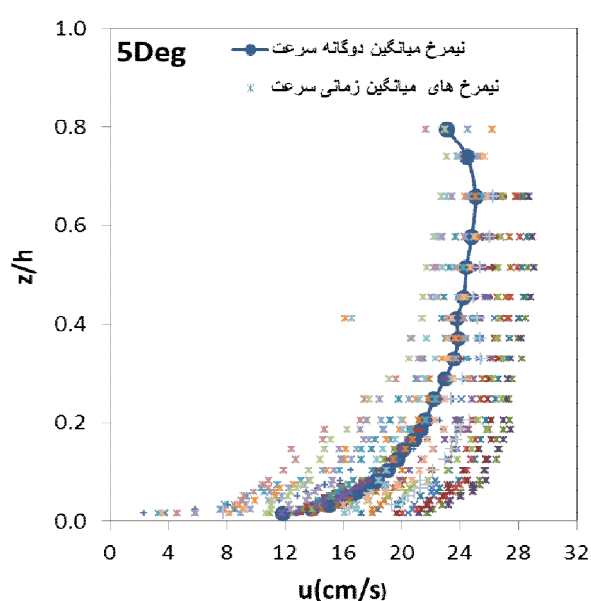
با توجه به شکل 4 جریان متعادل در هیچ یک از آزمایش‌ها برقرار نبوده است، زیرا نیمرخ‌های زمانی سرعت بر یکدیگر منطبق نشده‌اند. فرانکا و همکاران (2008 و 2010) بیان داشتند که نیمرخ میانگین دوگانه سرعت در بازه‌ای از رودخانه با ذرات بستر درشت در جهت جریان در فاصله $0/4 < z/h < 0/8$ از تابع لگاریتمی پیروی می‌کند؛ همچنین نیمرخ میانگین دوگانه سرعت در فاصله $0/3 < z/h < 0/4$ از تابع لگاریتمی منحرف شده و بصورت خطی تغییر می‌کند. در ناحیه زیر این محدوده و در نزدیکی بستر نیز نیمرخ سرعت دارای نامنظمی‌های نامشخصی می‌باشد. این محققان نشان دادند که

در پایین دست تاج شده که این امر به نوبه خود با تأثیر بر روی لایه مرزی آشفته نزدیک بستر باعث انحراف نیمرخ سرعت در ناحیه داخلی از قانون دیوار می‌شود. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت نیمرخ میانگین دوگانه سرعت، ویژگی‌های شکل بستر همچون زاویه تاج و طول ناحیه جدایی را حفظ کرده است.

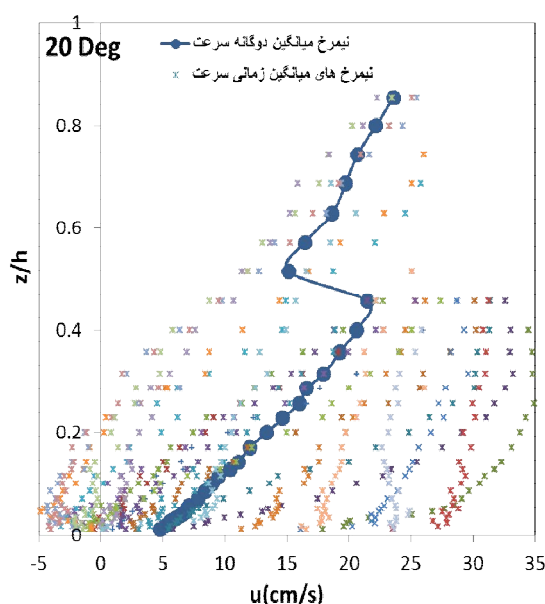
هندسه شکل بستر بستگی دارد، بطوری که با افزایش زاویه تاج بستر ضخامت و شیب ناحیه لگاریتمی کاهش می‌یابد. همچنین با افزایش زاویه شکل بستر (15 و 20 درجه) ضریب همبستگی تا حدودی کاهش یافته و روند نیمرخ سرعت تا حدودی تغییر کرده است. افزایش زاویه شکل بستر باعث تشدید ناحیه جدایی و آشفته‌گی جریان



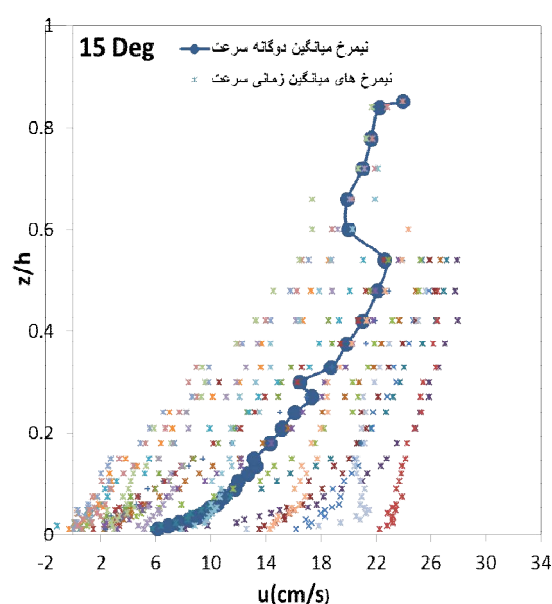
ب- 10 درجه



الف- 5 درجه

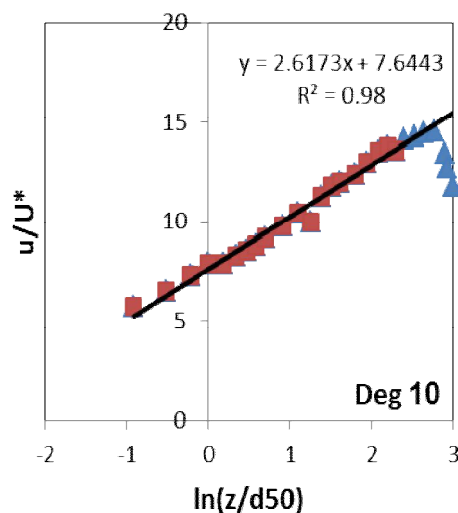


د- 20 درجه

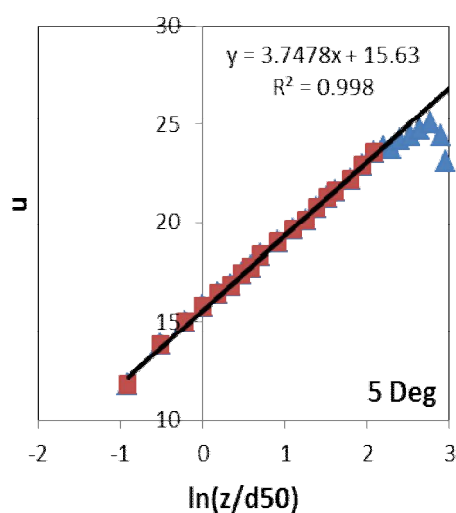


ج- 15 درجه

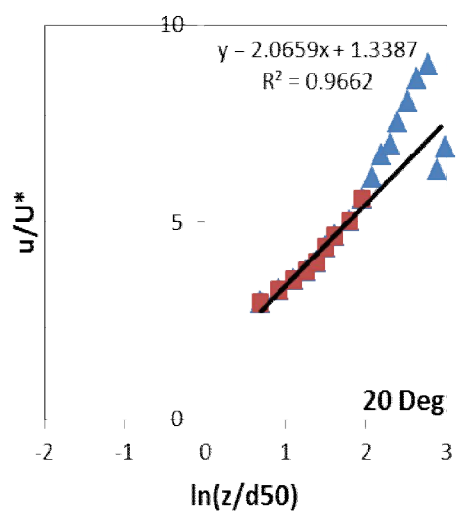
 شکل 4 نیمرخ میانگین دوگانه و نیمرخ های میانگین زمانی سرعت u برای زوایای مختلف شکل بستر



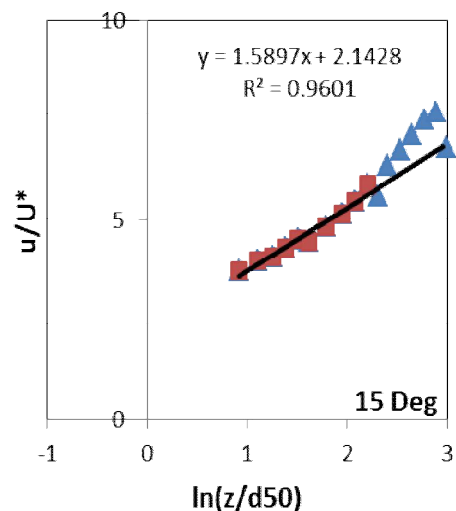
ب- 10 درجه



الف - 5 درجه



د- 20 درجه



ج- 15 درجه

شکل 5 برازش قانون دیوار بر نیمرخ‌های سرعت میانگین دوگانه برای شکل بستر با زوایای تاج مختلف

(▲ ناحیه خارجی، ■ ناحیه داخلی، — خط لگاریتمی (ناحیه داخلی))

بشود. این نوع حباب‌ها در جریان کندشونده با گرادیان فشار نامطلوب در پایین دست تاج به دلیل وقوع ناحیه جدایی جریان و کاهش قابل توجه اندازه حرکت در آن ایجاد می‌شوند.

نتایج محاسبه سرعت برشی با استفاده از روش مشخصات لایه مرزی و از طریق نیمرخ‌های سرعت میانگین دوگانه در جدول 2 ارائه شده اند.

لازم به ذکر است که برازش قانون دیوار بر نیمرخ سرعت در مورد زوایای 15 و 20 درجه با محدوده کوچک‌تر نقاط نزدیک بستر صورت گرفته است که این امر به علت اغتشاش شدید در ناحیه بسیار نزدیک به بستر بوده که بخاطر گرادیان شدید بستر رخ داده است. این گرادیان می‌تواند موجب ایجاد گردابه و حباب‌هایی نزدیک بستر شود که موجب انحراف نیمرخ سرعت از خط لگاریتمی

جدول 2 مقادیر سرعت برشی برای زوایای مختلف

زاویه شکل بستر (درجه)	سرعت برشی (سانتی‌متر بر ثانیه)
5	1/58
10	1/66
15	2/94
20	2/38

برای تعیین ثابت فن کارمن قانون دیوار بر نیمرخ سرعت مطابق شکل 5 برازش داده شد. به عنوان نمونه، برای زاویه 5 درجه معادله (8) بدست آمد.

$$\frac{u}{u^*} = 2.34 \ln\left(\frac{z}{k_s}\right) + 9.8 \quad (8)$$

با مقایسه این معادله با معادله (2) می‌توان ضریب فن کارمن را بصورت زیر بدست آورد:

$$1/\kappa = 2.34 \rightarrow \kappa = 0.42$$

مقادیر ضریب فن کارمن برای چهار زاویه در جدول 3 ارائه شده است.

جدول 3 مقادیر ثابت فن کارمن

زاویه شکل بستر (درجه)	ثابت فن کارمن
5	0/42
10	0/38
15	0/62
20	0/57

جدول 3 نشان می‌دهد که ثابت فن کارمن به ازای زوایای شکل بستر 5 و 10 درجه به مقدار گزارش شده 0/4 بسیار نزدیک است، اما در شکل بستر با زاویه 15 و 20 درجه هندسه بستر به شدت بر ساختار جریان مؤثر است و باعث افزایش نوسانات سرعت و آشفتگی جریان می‌شود. با افزایش شدت آشفتگی و همچنین توسعه ناحیه جدایی جریان، فرضیات مربوط به روش مشخصات لایه مرزی، بخصوص پارامتر c در معادله 5 برقرار نیستند و این امر منجر به تخمین ثابت فن کارمن متفاوت با 0/4 شده است.

پیش از این محققان دیگری در مطالعات خود نشان داده‌اند که ثابت فن کارمن به شدت تحت اثر هندسه بستر و ویژگی‌های جریان می‌باشد، هرچند قانون لگاریتمی برای هر چهار زاویه شکل بستر 5، 10، 15 و 20 درجه در ناحیه داخلی جریان برقرار است. لازم به ذکر است که مقدار $\kappa=0/62$ در این مطالعه در یک کرانه فوقانی برای این ضریب قرار داشته، همچنان که عمادزاده و همکاران (2010) روی ذرات ماسه مقدار κ را برابر 0/56، افضل‌ی مهر و آنکتیل (2001) روی ذرات قلوه سنگ مقدار κ را برابر 0/49، گئو و جولین¹ (2001) در محیط رسوبی مقدار κ را 0/47 برآورد کردند. افضل‌ی مهر و دی (2009) در مطالعات خود مقدار $\kappa=0/16$ را برآورد کردند که این مقدار در کرانه تحتانی تغییرات ثابت فن کارمن قرار دارد. مقادیر متفاوت از 0/4 ثابت فن کارمن قبلاً توسط یالین² (1972) با مقدار $\kappa=0/16$ و وانونی³ (1975) با مقدار $\kappa=0/21$ گزارش شده بودند. دلیل عمده تغییرات κ ناشی از عدم تعادل لایه مرزی است که در آن تولید تنش و ایجاد تلفات در حال تعادل نبوده و حساسیت κ به شرایط مرزی، اندازه ذرات رسوب، حضور شکل بستر و نوع جریان که بر شیب خط توزیع لگاریتمی اثر گذاشته و سبب انحراف قابل توجه ثابت فن کارمن از عدد 0/4 می‌شود. همچنین محدودیت در ابزارهای اندازه‌گیری سرعت جریان نزدیک بسترهای زبر، به ویژه در شیب‌های تاج بستر بزرگ (15 و 20 درجه) که در آنها تشدید شدت آشفتگی ناشی از جدایی جریان موجب تغییر قابل ملاحظه ثابت فن کارمن می‌شود.

4- نتیجه‌گیری

در این تحقیق روش میانگین‌گیری دوگانه (میانگین مکانی و زمانی) برای تعیین سرعت برشی که یکی از

1. Guo and Julien

2. Yalin

3. Vanoni

d_{50}	قطر میانه ذرات
h	عمق جریان
k_s	زبری معادل
κ	ثابت فن کارمن
u^-	سرعت متوسط زمانی
$\langle u \rangle$	سرعت میانگین دوگانه
u_*	سرعت برشی
u_c	سرعت حداکثر در هر نیمرخ سرعت
θ	ضخامت اندازه حرکت لایه مرزی
δ^*	ضخامت جابه جایی لایه مرزی

6- منابع

- Afzalimehr, H. (2010). "Effect of non-uniformity of flow on velocity and turbulence intensities over a cobble-bed", J. Hydrological Processes, 24, pp. 331-341.
- Afzalimehr, H. and Anctil, H. (2000). "Accelerating shear velocity in gravel bed channels", Journal of Hydrological Science, IAHS, 45(1), pp. 143-155.
- Afzalimehr H. and Anctil F. (2001). "Vitesse de frottement associée à un écoulement non uniforme et une rugosité relative intermédiaire", Journal of Hydraulic Research, IAHR, 39(2), pp. 181-186.
- Afzalimehr H. and Rennie, C.D. (2009). "Determination of bed shear stress using boundary layer parameters in a gravel-bed river", Hydrological Sciences Journal, 54(1), pp. 147-159.
- Afzalimehr H. and Dey S. (2009). "Influence of Bank Vegetation and Gravel Bed on velocity and Reynolds stress distributions", International Journal of Sediment Research, Vol. 24, 2, pp. 236-246.
- Emadzadeh, A. Chiew Y. M. and Afzalimehr H. (2010). "Effect of accelerating flow on incipient motion in a gravel-bed stream", Journal of Advances in Water Resources, 33, pp. 1094-1104.
- Finnigan, J.J. and Shaw, R.H. (2008). "Double-averaging methodology and its application to turbulent flow in and above vegetation canopies", Acta Geophysica 56, pp. 534-561.
- Finnigan, J.J. (2000). "Turbulence in plant canopies", Annual Review of Fluid Mechanics 32, pp. 519-571.
- Franca, M.J., Ferreira, R.M.L. and Lemmin, U. (2008). "Parameterization of the logarithmic layer

مهم ترین پارامترهای هیدرولیکی است بر روی شکل بستر مقعر شنی با چهار زاویه تاج 5 10 15 و 20 درجه مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصل نشان دادند که این روش می تواند علاوه بر پیروی از توزیع سرعت جریان در نواحی داخلی و خارجی لایه مرزی، بی نظمی های موضعی در نیمرخ های زمانی را تعدیل کرده و با ارائه یک پروفیل واحد در امتداد شکل بستر پیش بینی بهتری از پارامترهای هیدرولیکی مبتنی بر کاربرد سرعت برشی بدست آورد. قانون لگاریتمی یا قانون جهانی دیوار در ناحیه داخلی نیمرخ میانگین گیری دوگانه سرعت جریان برقرار بوده و ضخامت آن با افزایش زاویه تاج بستر به دلیل تشدید آشفتگی و توسعه ناحیه جدایی جریان کاهش می یابد. کاربرد روش مشخصات لایه مرزی برای تعیین سرعت برشی و ترکیب آن با روش قانون لگاریتمی منتهی به تأیید متوسط ثابت جهانی فن کارمن $\kappa = 0.4$ برای شکل بستر با زاویه 5 و 10 درجه گردید. این نتیجه نشان داد که این دو روش به خوبی می توانند در برآورد پارامترهای کلیدی مهندسی رودخانه برای بسترهایی با شیب کم مبتنی بر کاربرد سرعت برشی نظیر ضریب زبری و انتقال رسوب مورد استفاده مهندسان هیدرولیک قرار گیرند. در مورد اشکال بستر با زاویه تاج زیاد که باعث تشدید پدیده جدایی جریان و آشفتگی می شوند ثابت فن کارمن تغییرات قابل توجهی نشان می دهد. این تغییرات قویاً به ثابت تجربی c در روش مشخصات لایه مرزی وابسته است. از آنجا که مقدار c در معادله (5) برای بسترهای شنی نسبتاً تخت یا زاویه تاج کم بدست آمده است، کاربرد آن در زوایای بزرگ تاج بستر منتهی به مقادیر بیشتر از مقدار جهانی می شود.

5- فهرست علائم

B_r	ثابت انتگرال
C	ضریب ثابت که برای رودخانه های شنی برابر 4/4 در نظر گرفته می شود.

- Nikora, V.I., Goring, D.G., McEwan, I.K. and Griffiths, G. (2001). "Spatially averaged open-channel flow over rough bed", J Hydr. Eng., 127(2), pp. 123-133.
- Nikora, V., McEwan, I., McLean, S., Coleman, S., Pokrajac, D. and Walters, R. (2007). "Double-averaging concepts for rough-bed open-channel and overland flows: Theoretical background", J Hydr. Eng. 133(8), pp. 873-883.
- Raupach, M.R., Antonia, R.A. and Rajagopalan, S. (1991). "Rough-wall turbulent boundary layers", Appl. Mech. Rev. 44(1), pp. 1-25.
- Smith, J. D. and Mclean S. R. (1977). "Spatially averaged flow over a wavy surface", Geoph. Res. Vol. 82, No. 12. pp. 1735-1746.
- Vanoni V.A. (1975). "Sedimentation Engineering", ASCE Manual and Reports on Engineering Practice, No. 54, p. 745.
- Yalin S. M (1972). "*Mechanics of sediment transport*", Pergamon Press, Oxford; New York: p. 290.
- of double-averaged streamwise velocity profiles in gravel-bed river flows", Advances in Water Resources 31, pp. 915-925.
- Franca, M.J., Ferreira, R.M.L., Cardoso, A.H. and Lemmin U. (2010). "Double-average methodology applied to turbulent gravel-bed river flows", J. River Flow 2010, pp. 59-65.
- Goring, D.G. and Nikora, V.I. (2002). "Despiking acoustic Doppler velocimeter data", Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 128(1), pp. 117-126.
- Guo G and Julien P.Y. (2001). "Turbulent velocity profiles in sediment-laden flows", Journal of Hydraulic Research, 39(1), pp. 11-23.
- Kironoto, B. A. and Graf, W. H. (1995). "Turbulence characteristics in rough non-uniform open channel flow", Proc. Institution of Civil Engineers-Water Maritime and Energy, United Kingdom. 112, pp. 316-348.
- McLean, S. R. and Nikora, V. I. (2006). "Characteristics of turbulent unidirectional flow over rough beds: Double-averaging perspective with particular focus on sand dunes and gravel beds", Water Resources Research, AGU, 2006, 42, W10409, doi:10.1029/2005WR004708.