

# بررسی قوانین لگاریتمی و کولز در تراکم‌های مختلف پوشش گیاهی غیرمستغرق

حسین افضلی‌مهر<sup>1\*</sup> و پریسا ستایش<sup>2</sup>

1- استاد دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران  
2- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد مهندسی کشاورزی-سازه‌های آبی، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان

\* hafzali@iust.ac.ir

**چکیده** - پوشش گیاهی موجود در رودخانه‌ها را می‌توان از نظر ارتفاع گیاه نسبت به عمق آب، در دو گروه گیاهان مستغرق و غیرمستغرق دسته‌بندی کرد. در این مقاله از پوشش گیاهی غیرمستغرق نی در تراکم‌های مختلف، روی بستر شنی کانال آزمایشگاهی استفاده گردید. در این مطالعه شکل و سایر ویژگی‌های گیاه نی در تمام عمق آب ثابت است و تأثیر حضور و تراکم آن روی نیم‌رخ سرعت جریان و اعتبار قانون‌های لگاریتمی و کولز بر نیم‌رخ سرعت بررسی شده است. نتایج نشان می‌دهد که در بخش داخلی لایه مرزی که در نزدیکی بستر واقع است، قانون لگاریتمی برای پوشش گیاهی با تراکم‌های گوناگون معتبر است؛ هرچند میزان انحراف داده‌ها از این قانون در لایه خارجی بسیار بیشتر از بستر شنی بدون حضور پوشش گیاهی است. کاربرد قانون کولز در ناحیه خارجی بر خلاف بستر شنی در حالت پوشش گیاهی به دلیل توزیع نامتعارف نیم‌رخ سرعت جریان و تشدید آشفتگی با افزایش تراکم پوشش گیاهی نامعتبر است.

**کلید واژگان:** پوشش گیاهی غیرمستغرق، بستر شنی، نیم‌رخ سرعت، قانون لگاریتمی، قانون کولز.

## 1- مقدمه

تغییر ویژگی‌های زیست‌محیطی و تعامل آن با جریان در رودخانه‌ها در طول مسیر، زیستگاه‌هایی متنوع، منحصر به فرد و پیچیده‌ای را به وجود آورده است که نیاز به تحقیق و درک اثر آن‌ها بر مدیریت، برنامه‌ریزی و سامان‌دهی دارد. برخی از عوامل مؤثر در شناخت تعامل رودخانه و محیط‌زیست مربوط به عوامل تشکیل‌دهنده بستر و جدار رودخانه، توپوگرافی و زمین‌شناسی محیط است. علاوه بر عوامل فوق، رودخانه‌ها تحت تأثیر فعالیت‌های انسانی در معرض دگرگونی قابل توجهی قرار دارند.

از دیدگاه زیست‌محیطی، می‌توان به اثر پوشش گیاهی در زیبایی یک حوضه‌ی آبریز، تغییر ریخت‌شناسی و کیفیت آب اشاره کرد. پوشش گیاهی می‌تواند بر تغییر الگوی جریان، انتقال رسوب و آلاینده‌ها اثر قابل توجهی بگذارد؛

به طوری که با ایجاد مناطق با سرعت کم برای جانداران زیستگاه مناسب فراهم کرده و با به تله انداختن آلاینده‌ها و تولید اکسیژن کیفیت آب را بهبود بخشد (Costanza et al., 1998 و Tang et al., 2008). در مطالعات گذشته، اغلب ساختار جریان آشفته در سطوح صاف و جریان‌های یکنواخت و غیریکنواخت بررسی شده‌اند (کوچک‌زاده و یوسفی، 1381؛ Afzalimehr and Nakagawa et al., 1991؛ Kironoto, 1992؛ Dey, 2009 و Nikora and Goring, 2000). تحقیقات متعددی در تعامل پوشش گیاهی و جریان بر توزیع نیم‌رخ سرعت صورت گرفته است (Cheng, 2011؛ Baptist et al., 2007؛ Huthoff et al., 2009؛ Huai et al., 2012؛ Huai et al., 2007؛ Stone, 2007؛ Nepf et al., 2007؛ Nikora et al., 2014؛ Stone and Shen, 2014, 2017, 2015؛ Afzalimehr et al., 2015, 2017, 2014).

توسط سایر محققان از جمله Cardoso et al. (1990) با نسبت ظرافت  $(4/6 < \frac{B}{H} < 7/3)$  Nezu and Nakagawa (1993)، Graf and Altinakar (1998)، Afzalimehr and Dey (2009)، Nepf (2012) و Liu et al. (2008) تأیید شده‌اند. (2009, 2010, 2011, 2012, 2014, 2015) این قوانین را برای جریان در رودخانه‌ها و بسترهای ماسه‌ای، شنی، قلوه‌سنگی و تخته‌سنگی با و بدون پوشش گیاهی بکار بردند. نتایج تحقیقات فوق نشان داده‌اند که قانون لگاریتمی مانند قانون کولز تجربی بوده و عوامل تشکیل دهنده آن بر خلاف تصور، ثابت‌های جهانی نیستند و لذا بر اساس شرایط جریان و بستر اعتبار آن‌ها می‌تواند نقض شود. قانون لگاریتمی به صورت رابطه (1) ارائه می‌شود (Graf and Altinakar, 1998):

$$\frac{U}{U_*} = \frac{1}{\kappa} \ln \left( \frac{Z}{K_s} \right) + Br \quad (1)$$

در این معادله،  $U$  مؤلفه سرعت متوسط طولی جریان در هر نقطه نظیر عمق  $Z$ ،  $U_*$  سرعت برشی،  $\kappa$  ثابت فن کارمن که مقدار آن  $0/4$  برای آب صاف بدون رسوب در بسترهای شنی در نظر گرفته می‌شود،  $k_s$  ارتفاع زبری است که انتخاب این معیار به شرایط آزمایش، اندازه ذرات رسوب و میزان برازش مطلوب قانون لگاریتمی بر داده‌های مورد مطالعه، بستگی دارد. برای مثال فن راین در بستر ماسه‌ای  $K_s = 3d_{90}$  و هی<sup>1</sup> آن را  $K_s = 3.5 d_{84}$  (Chanson 2001) و Graf and altinakar (1998) گزارش کردند. بر اساس مطالعات گوناگون نویسندگان این مقاله، انتخاب  $k_s = d_{50}$  در قانون لگاریتمی منجر به برازش بهتر داده‌ها و ضریب تعیین بالاتر می‌گردد.  $d_{50}$  یعنی قطر میانه‌ی ذرات رسوب،  $d_{90}$  و  $d_{84}$  به ترتیب قطری از ذرات رسوب هستند که 90% و 84% ذرات رسوب در منحنی دانه‌بندی از آن‌ها کوچک‌تر هستند.  $Br$  ثابت انتگرال است.

داده‌های سرعت در جریان لایه‌ی مرزی برای کانال‌های باز (Coles, 1956 و Monty et al., 2009) و جریان در لوله (Zagarola, 1996)، نشان دادند که قانون لگاریتمی ممکن است در توصیف توزیع سرعت همیشه درست نباشد. همچنین در جریان کانال باز و رودخانه‌ها ممکن است حداکثر سرعت در سطح آزاد آب ظاهر نشود و در زیر

(Fazel et al., 2015)، هرچند اندازه و توزیع ذرات بستر، حضور پوشش گیاهی مستغرق یا غیرمستغرق، برگ‌دار و بی‌برگ بودن، رویش ممتد در دیواره‌ها یا بستر جریان و سیلاب‌دشت رودخانه، حضور توده‌های گیاهی با ابعاد متفاوت در مسیر جریان، تراکم و نوع آن‌ها، هر یک تأثیرات متفاوت و پیچیده‌ای بر ساختار جریان و ایجاد آشفتگی دارند. همچنین هنگامی که نسبت ظرافت (نسبت عرض به عمق جریان)، از 5 کمتر شود، توزیع‌های نیم‌رخ سرعت و تنش برشی از حالت کلاسیک کاملاً متفاوت می‌شوند (Afzalimehr and Dey 2009). با بررسی منابع موجود در مهندسی رودخانه و هیدرولیک رسوب مشاهده می‌شود که این بخش از مبحث هیدرولیک زیست‌محیطی به‌ویژه چگونگی تعامل جریان در حضور بستر شنی و پوشش گیاهی غیرمستغرق به صورت توده‌های با تراکم مختلف کمتر مورد توجه قرار گرفته است.

محققان متعددی مانند Nezu and Rodi, Nezu (1997), Nezu and Nakagawa (1986), Cardoso et al. (1990), Song (1994), Kironoto and Graf (1994), Yang and Lee (2007) و (1994) بر روی جریان یکنواخت در کانال باز آزمایشگاهی مطالعه کرده‌اند. آن‌ها نیم‌رخ سرعت و ویژگی‌های آشفتگی در جریان یکنواخت بر روی بستر صاف و زبر را بررسی کردند. Nezu and Rodi (1986) و Nezu and Nakagawa (1993) سرعت طولی در کانال‌های مستطیلی با نسبت ظرافت  $(\frac{B}{H} > 6)$  که در آن  $B$  عرض و  $H$  عمق آب در کانال است را اندازه‌گیری کرده و نشان دادند که عمق جریان را بر اساس قانون لگاریتمی می‌توان به دو بخش لایه‌ی داخلی با عمق نسبی  $(\frac{Z}{H} < 0/2)$  و لایه‌ی خارجی  $(\frac{Z}{H} > 0/2)$  تقسیم کرد. Nezu and Nakagawa (1993) نشان دادند که قانون لگاریتمی فقط برای لایه‌ی داخلی نزدیک بستر اعتبار دارد، در حالی که قانون کولز برای لایه‌ی خارجی نزدیک سطح آب معتبر است. آن‌ها همچنین دریافتند که جریان در لایه‌ی داخلی با پارامترهای داخلی مانند سرعت برشی ( $U_*$ )، گرانروی سینماتیکی ( $\nu$ ) و زبری بستر ( $k_s$ ) کنترل می‌شود، در حالی که در لایه‌ی خارجی جریان به‌وسیله‌ی حداکثر سرعت و عمق آب معرفی می‌شود. این یافته‌ها

<sup>1</sup> Hey

Nezu and Sanju (2008) بر روی پوشش گیاهی مستغرق و انعطاف‌پذیر مطالعه کردند. تفاوت اساسی این تحقیق با مطالعه (Nezu and Sanju (2008) آن است که کار آن‌ها بر روی پوشش گیاهی مستغرق<sup>3</sup> بوده و این تحقیق در مورد پوشش گیاهی بیرون‌زده از آب<sup>4</sup> (غیرمستغرق) می‌باشد. در مقاله حاضر کف کانال از شن پوشیده است که به شرایط واقعی در رودخانه نزدیک است؛ در حالی که در مطالعه (Nezu and Sanju (2008) نوارهایی به صورت صفحات مقاوم و انعطاف‌پذیر، بدون هر نوع ذره رسوب روی بستر کانال نصب شدند. آن‌ها از LDA و PIV استفاده کردند که به دلیل قیمت بسیار زیاد قابل استفاده در رودخانه برای مقایسه با نتایج آزمایشگاهی نیست، ولی این تحقیق مبتنی بر ADV است که نویسندگان این مقاله از آن در رودخانه‌ها نیز استفاده کردند. در تحقیق Nezu and Sanju (2008)، تمام مقطع عرضی از اجسام با مقطع مستطیل که ابعاد آن‌ها به‌طور متوسط یک سوم عمق جریان است، استفاده شده است، ولی در مقاله حاضر جریان از کنار سیلندرها و نه از روی آن‌ها عبور می‌کند. در مقاله حاضر بخشی از مقطع عرضی از گیاه غیرمستغرق پوشیده است که نحوه‌ی چیدمان نی‌ها خود یک نوآوری است. هدف این پژوهش بررسی کاربرد و اعتبار قوانین لگاریتمی و کولز برای جریان در حضور پوشش غیر مستغرق نی طبیعی، در تراکم‌های مختلف به‌صورت توده گیاهی موجود روی بستر شنی است.

## 2- روش تحقیق

این پژوهش در یک فلوم آزمایشگاهی از جنس پلکسی گلس به طول 8 متر، عرض 40 سانتی‌متر و عمق 60 سانتی‌متر انجام گردید که دارای دو مخزن اصلی باحجم 2/5 مترمکعب و یک مخزن فرعی برای اطمینان در ذخیره‌ی آب برای دبی‌های بیشتر است. یک پمپ سانتریفیوژ با قابلیت حداکثر دبی 50 لیتر در ثانیه، برای انتقال آب به داخل فلوم استفاده می‌شود. جریان آب توسط لوله‌ای به فلوم وارد شده و پس از طی 8 متر طول کانال از دریچه‌ی انتهایی تنظیم آب وارد حوضچه‌ی

سطح آب رخ دهد که به آن پدیده‌ی فروافتادگی<sup>1</sup> گفته می‌شود (Francis, 1878). قانون لگاریتمی توسط Coles (1956) برای کاربرد نیم‌رخ سرعت در ناحیه‌ی خارجی لایه‌ی مرزی به صورت قانون کولز گسترش داده شد. وی برای اصلاح انحراف سرعت از قانون لگاریتمی در ناحیه‌ی خارجی نیم‌رخ سرعت، تابعی کسینوسی را تحت عنوان تابع برخاستگی، به قانون لگاریتمی بصورت رابطه (2) اضافه کرد (Coles, 1956):

$$\frac{U_c - U}{U_*} = -\frac{1}{\kappa} \ln\left(\frac{Z}{\delta}\right) + \frac{2\Pi}{\kappa} \left(\cos\frac{\pi Z}{2\delta}\right)^2 \quad (2)$$

که در آن  $U_c$  سرعت حداکثر جریان در عمق  $\delta$  و  $\Pi$  پارامتر برخاستگی<sup>2</sup> کولز است. از واژه برخاستگی به این دلیل استفاده شده است که جدایی جریان اطراف نی‌ها سبب ایجاد "خیابان فن کارمن" می‌شود که لزوماً در آن پیچک‌ها فرورفته نیستند، بلکه به‌صورت لایه‌های برشی موازی بستر شکل می‌گیرند.

برای برازش بهتر داده‌ها بر قانون لگاریتمی در لایه‌ی داخلی جریان، صورت کسر این قانون توسط یک فاکتور ( $Z_0$ ) بصورت رابطه (3) تعدیل می‌شود (Graf and Altinakar, 1998):

$$\frac{U}{U_*} = \frac{1}{\kappa} \ln\left(\frac{Z+Z_0}{K_s}\right) + Br \quad (3)$$

$Z_0$  ضریب تعدیل‌کننده سطح بستر مرجع است و در این پژوهش برابر با  $0/2 k_s$  زیر تاج ذرات شنی بستر در نظر گرفته می‌شود (Graf and Altinakar 1998).

کاربرد این دو قانون به‌طور گسترده طی بیست سال گذشته توسط نویسندگان این مقاله در آزمایشگاه و رودخانه‌ها مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج حاصل برای قانون لگاریتمی بسیار بهتر از نتایج حاصل از کاربرد قانون کولز بوده است که از عمده دلایل آن مستقل بودن لایه داخلی از اثرات گرادیان فشار می‌باشد، در حالی که لایه خارجی قویاً به گرادیان فشار وابسته است. به‌علاوه پوشش گیاهی از عوامل تولید جریان‌های ثانویه است؛ به‌طوری‌که برای یک عمق و سرعت ثابت، توزیع سرعت و تنش برشی از حالت کلاسیک خطی به حالت غیرخطی تبدیل می‌شود.

<sup>3</sup>. Submerged vegetation

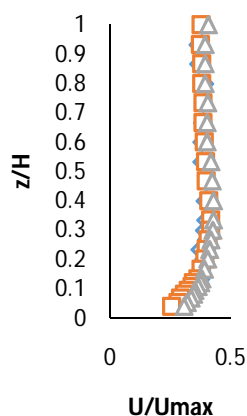
<sup>4</sup>. Emergent vegetation

<sup>1</sup>. Dip phenomenon

<sup>2</sup>. Wake

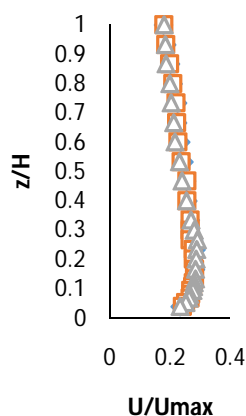
که در فاصله‌ی 5/5 تا 6/5 متری از ابتدای کانال جریان کاملاً توسعه‌یافته است. بنابراین برای برداشت داده‌ها از مقاطعی که حداقل 5/5 متر از ورودی فاصله داشتند، استفاده گردید. در بالای هر دو دیوار قائم فلوم، ریلی قرار گرفته است تا در حرکت تجهیزات اندازه‌گیری عمق و سرعت جریان آب مورد استفاده قرار گیرند.

رسوب‌گیر انتهایی می‌شود. برای بررسی توسعه‌یافتگی جریان در این پژوهش، در هر 6 سری آزمایشات، نیم‌رخ‌های بی‌بعد سرعت در فواصل 5/5 متر، 6 متر و 6/5 متری از ابتدای کانال در محور مرکزی داده‌برداری و ترسیم شدند (شکل 1). از انطباق قابل قبول این نیم‌رخ‌ها بر هم نتیجه‌گیری شد



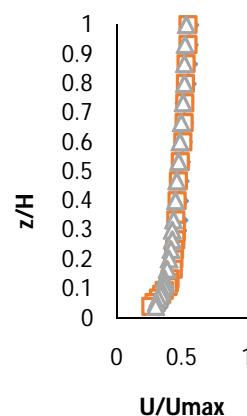
◆ فاصله 5.5 متر از ابتدای کانال  
 □ فاصله 6 متر از ابتدای کانال  
 ▲ فاصله 6.5 متر از ابتدای کانال

ج- 12 نی



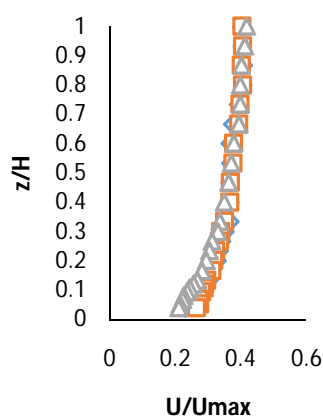
◆ فاصله 5.5 متر از ابتدای کانال  
 □ فاصله 6 متر از ابتدای کانال  
 ▲ فاصله 6.5 متر از ابتدای کانال

ب- 4 نی



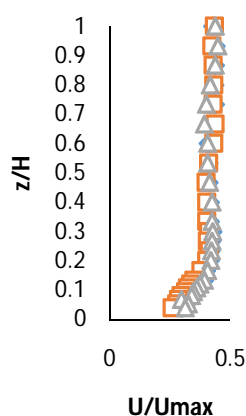
◆ فاصله 5.5 متر از ابتدای کانال  
 □ فاصله 6 متر از ابتدای کانال  
 ▲ فاصله 6.5 متر از ابتدای کانال

الف- بستر شاهد



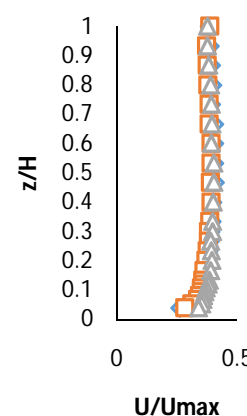
◆ فاصله 5.5 متر از ابتدای کانال  
 □ فاصله 6 متر از ابتدای کانال  
 ▲ فاصله 6.5 متر از ابتدای کانال

ی- 20 نی - متراکم



◆ فاصله 5.5 متر از ابتدای کانال  
 □ فاصله 6 متر از ابتدای کانال  
 ▲ فاصله 6.5 متر از ابتدای کانال

ه- 20 نی - پراکنده



◆ فاصله 5.5 متر از ابتدای کانال  
 □ فاصله 6 متر از ابتدای کانال  
 ▲ فاصله 6.5 متر از ابتدای کانال

د- 16 نی

شکل 1 توسعه یافتگی جریان در 6 سری آزمایشات

300 ثانیه داده برداری صورت گیرد، تا پس از حذف داده‌های پرت، داده‌های کافی برای محاسبه‌ی مؤلفه‌ی آشفتگی در دسترس باشند. در برآورد مقدار متوسط سرعت جریان، اندازه‌گیری‌های نویسندگان نشان می‌دهد که تفاوتی بین زمان برداشت 10، 100 یا 1000 ثانیه وجود ندارد. اندازه‌گیری سرعت توسط دستگاه‌های مکانیکی مانند مولینه نیز نشان می‌دهد که بین 50 ثانیه و 1000 ثانیه تفاوتی نیست. به این دلیل در مراجع مانند انجمن زمین‌شناسان آمریکا توصیه به کاربرد زمان 50 ثانیه شده است (Thibodeaux, 1994). هرچند در برآورد مؤلفه‌های آشفتگی نمی‌توان از 50 ثانیه استفاده کرد؛ زیرا انجام آنالیز توزیع طیف انرژی در محاسبه شدت‌های آشفتگی و تنش رینولدز به داده‌برداری طولانی مدت نیاز دارد. علاوه بر این فیلتر کردن داده‌ها با ADV اثری بر مقادیر متوسط نشان نمی‌دهد، اما بر پارامترهای آشفتگی مؤثر است (Graf and Altinkar, 1998 و Dey, 2014). در حال حاضر در بسیاری از منابع معتبر (MacVicar and Roy, 2007)، زمان 120 ثانیه به‌عنوان زمان مناسب اندازه‌گیری سرعت با ADV توصیه شده است. در نتیجه انتخاب زمان اندازه‌گیری بر مقادیر متوسط (مانند سرعت متوسط جریان) اثر ندارد، بلکه بر پارامترهای آشفتگی مانند شدت آشفتگی و تنش‌های رینولدز که رفتار نوسانی دارند؛ مؤثر می‌باشد.

برای تعیین سرعت متوسط نقطه‌ای از روابط (4) استفاده گردید (Graf and Altinkar, 1998):

$$\begin{cases} U = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N U_i \\ V = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N V_i \\ W = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N W_i \end{cases} \quad (4)$$

که در آن‌ها N برابر با تعداد داده‌ها در هر نقطه که در این پژوهش 24000 می‌باشد، و V و W به ترتیب مؤلفه‌ی سرعت جریان در راستای عرضی و قائم جریان هستند که توسط دستگاه ADV اندازه‌گیری می‌شوند. برای داشتن داده‌های با کیفیت مطلوب ADV، داده‌ها بر اساس الگوریتم (Goring and Nikora (2002) با استفاده از نرم‌افزار WinADV فیلتر شدند.

برای اندازه‌گیری سرعت جریان از یک دستگاه سرعت‌سنج صوتی داپلر (ADV) پایین‌نگر<sup>1</sup> با فرکانس 200 هرتز و زمان اندازه‌گیری 120 ثانیه استفاده گردید (GilMontero et al., 2014). بر این اساس در هر نقطه از نیم‌رخ سرعت، 24000 داده برداشت شد. انتخاب فرکانس بستگی به مدل دستگاه ADV دارد. برای Nortek Lab یا Vectrino Field کاربرد 200 هرتز توصیه شده است (GilMontero et al., 2014). هرچه فرکانس نمونه‌گیری بیشتر باشد، امکان ترسیم تابع توزیع طیف انرژی بهتر خواهد بود. فرکانس‌های کم قادر نیستند ناحیه‌ی با پیچک‌های کوچک را دربرگیرند. Graf and Altinkar (1998) در پلی تکنیک لوزان از فرکانس 1000 هرتز و دستگاه ADV استفاده کردند. حضور داده‌های پرت بخشی از طبیعت مطالعات آشفتگی را تشکیل می‌دهند که برای حذف آن‌ها در این مقاله از روش Goring and Nikora (2002) استفاده گردید. نویسندگان در ده سال گذشته همواره از حداکثر فرکانس دستگاه 200 هرتز برای برداشت داده در آزمایشگاه و رودخانه استفاده کردند. هرچند برای نسل اول ADV، Afzalimehr and Anctil (1999, 2000)، از حداکثر فرکانس 25 هرتز استفاده می‌کردند که طیف حاصل در آن‌ها اگر چه کامل نبود، اما برآزش قانون 5/3-کولموگروف بر داده‌ها را تأیید می‌کرد. همچنین در مطالعات (Nikora et al., 2014) و GilMontero et al. (2014) از فرکانس 200 هرتز استفاده شده است. برای کاهش خطای اندازه‌گیری و داشتن داده کافی پس از حذف داده‌های پرت، لازم است زمان اندازه‌گیری تا حد امکان طولانی باشد. بر اساس 120 ثانیه داده‌برداری با فرکانس 200 هرتز در هر نقطه از نیم‌رخ سرعت، 24000 داده برداشت می‌شود. نویسندگان بر اساس توصیه‌های محققان، آشفتگی را در نقاط نزدیک بستر که در آن شدت آشفتگی زیاد می‌باشد، در هر نقطه تا 300 ثانیه داده‌برداری کردند. هرچند به دلیل تفاوت نامحسوس با داده‌برداری 120 ثانیه در این مقاله، داده‌برداری 120 ثانیه صورت گرفت. در صورتی که حداکثر فرکانس دستگاه 25 هرتز باشد، بهتر است حداقل

<sup>1</sup>. Down looking

متر طول فلوم چیده شدند (شکل 1). برای تراکم 20 نی دو حالت بررسی شده است که با ثابت بودن تعداد نی، فواصل بین نی‌ها کاهش داده شد و تراکم 20 نی متراکم ایجاد شد. با توجه به ثابت بودن شکل، بی‌برگی، میزان صافی جدار گیاه و قطر نی‌ها در کل عمق آب، شکل گیاه در توزیع سرعت جریان بی‌تأثیر می‌باشد، بنابراین تمامی ویژگی‌های نی به جز تراکم، ثابت در نظر گرفته شدند. بر اساس معیار (Nepf (2012)، تمام تراکم‌ها، متراکم محسوب می‌شوند، زیرا در تمام حالت‌های مورد مطالعه  $aH_v > 0/1$  است که در آن  $a$  سطح عمودی مقابل جریان و  $H_v$  ارتفاع گیاه بر حسب متر می‌باشد  $a = d/\Delta S2$  است که در آن  $d$  قطر نی ( $m$ ) و  $\Delta S2$  میانگین فاصله بین نی‌ها ( $m^2$ ) است.

داده‌برداری روی بستر شنی فلوم تحت جریان یکنواخت صورت گرفت که در آن دبی جریان به‌طور متوسط 40 لیتر بر ثانیه و عمق آب در تمام آزمایش‌ها 20 سانتی‌متر در نظر گرفته شدند. عدد رینولدز و عدد فرود برای تمام تراکم‌ها محاسبه و در جدول 1 ارائه شدند. سرعت ارائه شده در جدول 1، بر اساس میانگین سرعت بدست آمده از داده‌های نیم‌رخ سرعت جریان است. با توجه به جدول 1 در تمام آزمایش‌ها جریان آشفته و زیر بحرانی بود. علت تغییرات سرعت، بخشی ناشی از طبیعت مطالعات در محیط‌های پیچیده مانند نی-شن و جریان است. آنچه که در کل اهمیت دارد، مقادیر عدد فرود و عدد رینولدز برای نشان دادن جریان زیر بحرانی و آشفته در مراحل آزمایش می‌باشد. همچنین نحوه‌ی چیدمان نی‌ها در بی‌نظمی سرعت مؤثر است.

قطر میانه شن بستر روخانه‌ی کاج واقع در استان چهارمحال و بختیاری  $d_{50} = 17/2$  mm می‌باشد که از آن در بستر فلوم آزمایشگاهی استفاده گردید. دانه‌بندی داده‌ها بر اساس روش کلاسیک (Wolman (1954 صورت گرفت. انحراف معیار داده‌ها  $1/3$  بود که مؤید یکنواختی توزیع ذرات رسوب می‌باشد.

پوشش گیاهی در حاشیه‌ی رودخانه‌ی کاج غالباً غیرمستغرق هستند و بخش عمده‌ای از قسمت برگ‌دار آن‌ها در خارج از آب قرار می‌گیرد؛ هر چند در برخی شرایط گیاه به‌صورت ساقه‌ای و بی‌برگ می‌باشد. بر این اساس برای انتخاب پوشش گیاهی از نی ساقه‌ای و بی‌برگ که در این رودخانه مشاهده شد، استفاده گردید. نی‌ها به‌طور متوسط دارای قطر 1 سانتی‌متر و ارتفاع 30 سانتی‌متر بودند که در پنج تراکم مختلف بر روی بستر شنی با فواصل مختلف در ردیف‌های منظم آرایش داده شدند.

چیدمان نی‌ها به‌صورت ردیف‌های چهارتایی هستند که در کنار دیواره کانال از یک ردیف برای اولین تراکم (4 نی) تا پنج ردیف برای تراکم 20 نی به موازات هم قرار گرفته‌اند. نی‌ها از کناره‌ی دیواره‌ی سمت راست کانال به فاصله‌ی 5 سانتی‌متری در 1 ردیف برای تراکم کمتر (4 عدد نی) و تا 5 ردیف برای تراکم بیشتر (20 عدد نی) در مقطع عرضی فلوم قرار داده شدند. در هر ردیف 4 عدد نی قرار داشت و فاصله‌ی آن‌ها در راستای طولی  $Lx = 20$  سانتی‌متر بود، هر چند فاصله‌ی نی‌ها در راستای عرضی کانال متغیر بود. از تطابق نیم‌رخ‌های سرعت پس از هر نی، ناحیه اثرگذاری هر نی در پایین دست خود حدود 35 سانتی‌متر برآورد شد. پنج تراکم به ترتیب شامل 4، 12، 16 و 20 عدد نی در یک

جدول 1 عدد رینولدز و عدد فرود برای 6 سری آزمایش

Re	Fr	U (m/s)	سری آزمایش
48000	0/26	0/32	بستر شاهد (فاقد نی)
43500	0/24	0/29	4 نی
60000	0/33	0/4	12 نی
60000	0/33	0/4	16 نی + بستر شنی
60000	0/33	0/4	20 نی-پراکنده
37500	0/21	0/25	20 نی-متراکم

نیستند. برای مثال در نزدیکی بستر کمترین سرعت متوسط و بیشترین آشفتگی و تنش دیده می‌شود. اعداد رینولدز و فرود بدست آمده با سرعت متوسط جریان، فقط برای نشان دادن آشفتگی و زیرجرانی بودن جریان می‌باشند. وقوع حداکثر سرعت زیر سطح جریان که معرف اثر جریان-های ثانویه است، به تراکم نی‌ها وابسته است؛ اما این وابستگی خطی نیست که به آسانی قابل تحلیل می‌باشد، در واقع این برهمکنش (نی-شن و جریان) بسیار پیچیده است.

### 3- تجزیه و تحلیل نتایج

#### 3-1- توزیع سرعت داخل توده گیاهی

محل قرارگیری دستگاه ADV، از سطح آب تا فاصله 5 سانتی‌متری از بستر بود که در نتیجه داده‌های 5 سانتی‌متر از سطح آب توسط ADV در دسترس نمی‌باشند. برای هر نیم‌رخ سرعت برداشتی توسط ADV، 25 نقطه سرعت اندازه‌گیری شد که 13 نقطه در لایه‌ی داخلی به فواصل 2 میلی‌متر و 5 میلی‌متر و 12 نقطه در لایه‌ی خارجی جریان آب با فواصل 10 میلی‌متر قرار دارند (شکل 2).

بر اساس اطلاعات نویسندگان، دستگاه سرعت‌سنج صوتی داپلر با دقت بالا توسط Graf and Altinakar (1998) در پلی‌تکنیک لوزان از نیمه دهه 80 میلادی مورد استفاده قرار گرفت. در نیم‌رخ‌های برداشتی آن‌ها، اولین نقطه در فاصله 2/5 میلی‌متر از بستر قرار دارد و نقاط بعدی در فواصل 4/5، 6/5 میلی‌متر و غیره قرار می‌گیرند. در اینجا نکته‌ی مهم در نظر گرفتن معیارهای سازنده شامل انتخاب دامنه‌ی مناسب اندازه‌گیری سرعت، ضریب همبستگی بالا و نسبت سیگنال به نویز مناسب است؛ که به‌طور کامل در این مقاله رعایت شده‌اند. درستی اندازه‌گیری با فاصله‌ی کم از بستر طی 20 سال گذشته در انتشارات نویسندگان تأیید شده است. سرعت در هر نقطه میانگین زمانی سرعت جریان در مدت 2 دقیقه در آن نقطه است. این نیم‌رخ‌های سرعت به صورت بی‌بعد با ترسیم Z/H در مقابل U/U<sub>max</sub> در شکل 3 ارائه شدند. در شکل 3 نیم‌رخ سرعت برای تراکم در وسط توده گیاهی به همراه نیم‌رخ سرعت برای بستر شاهد (شنی) ارائه شدند. شکل 3 نشان می‌دهد که یک تابع نمایی به‌خوبی به نیم‌رخ سرعت بستر شاهد با ضریب تعیین R<sup>2</sup> = 0/9924 برازش داده شده است.

در تراکم 4 نی که چیدمان آن نزدیک به دیواره کانال قرار دارد، تأثیر دیواره‌ها بر توزیع سرعت به‌دلیل اثر معنادار جریان‌های ثانویه، باعث کاهش سرعت جریان شده است. در حالت 20 نی متراکم، تولید ناحیه‌ی برخاستگی منسجم، سبب کاهش سرعت شده است.

#### 2-1- توزیع سرعت در لایه‌ی داخلی جریان

در این پژوهش، قانون لگاریتمی (رابطه 1) به‌صورت رابطه (5) استفاده می‌گردد (Graf and Altinakar, 1998):

$$\frac{U}{U_*} = \frac{1}{K} \ln \left( \frac{z}{d_{50}} \right) + Br \quad (5)$$

که در آن U متوسط سرعت جریان در هر یک از نقاط نیم‌رخ سرعت، U\* سرعت برشی جریان است که در این پژوهش از روش مشخصات لایه‌ی مرزی ارائه شده توسط Afzalimehr and Anctil (2000) محاسبه شده است، κ ثابت فن کارمن، z ارتفاع از بستر هر نقطه از نیم‌رخ سرعت، d<sub>50</sub> قطر میانه ذرات رسوب و Br یک ثابت عددی است.

#### 2-2- توزیع سرعت در لایه‌ی خارجی

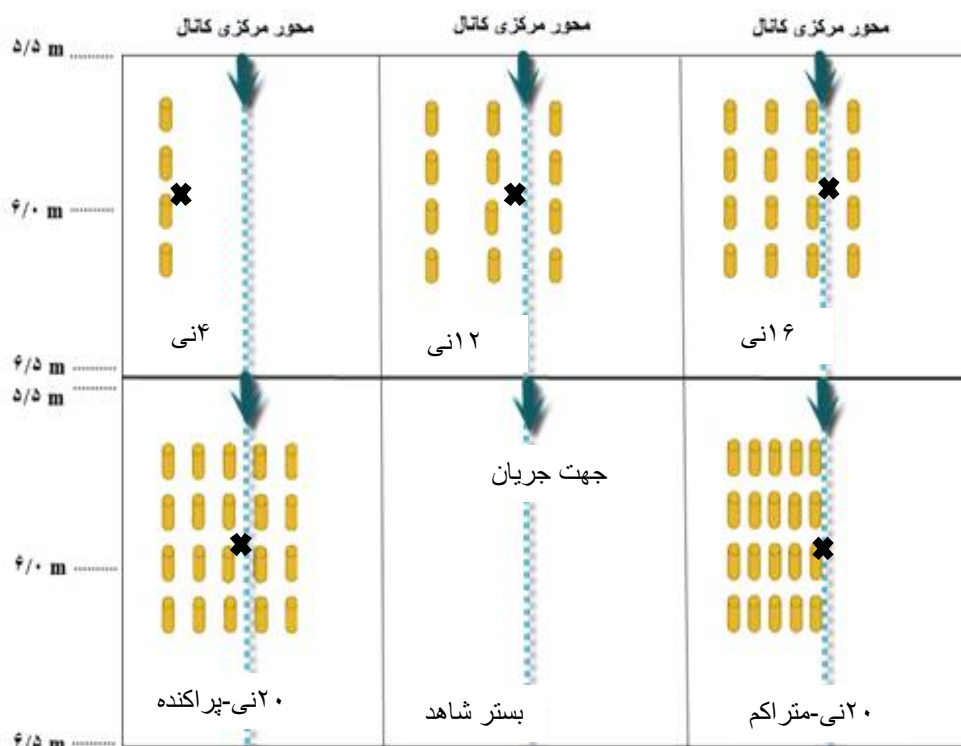
عدم اعتبار قانون لگاریتمی در لایه‌ی خارجی به‌دلیل انحراف داده‌ها از این قانون منجر به بررسی سایر قوانین در لایه‌ی خارجی شد. بر این اساس Coles (1956) تابع تجربی برخاستگی ω(z/δ) را پیشنهاد داد که معرف میزان انحراف از قانون لگاریتمی در لایه‌ی خارجی جریان است. قانون لگاریتمی با افزودن این تابع برخاستگی به صورت رابطه‌ی (7) ارائه می‌شود که برای لایه‌ی داخلی و خارجی جریان و بسترهای صاف و زبر معتبر است (Coles, 1956):

$$\omega \left( \frac{z}{\delta} \right) = \frac{2\Pi}{K} \left( \sin \frac{\pi z}{2\delta} \right)^2 \quad (6)$$

$$\left( \frac{U_c - U}{U_*} \right) = -\frac{1}{\kappa} \ln \frac{z}{\delta} + \frac{2\Pi}{\kappa} \left( \cos \frac{\pi z}{2\delta} \right)^2 \quad (7)$$

در این معادلات U<sub>c</sub> سرعت حداکثر در نیم‌رخ سرعت، z فاصله از بستر هر نقطه از نیم‌رخ سرعت، δ ضخامت لایه‌ی مرزی از بستر تا نقطه‌ای که حداکثر سرعت رخ می‌دهد، κ ثابت فن کارمن برابر با 0/4 و Π پارامتر کولز می‌باشند.

لازم به ذکر است که اعداد رینولدز و فرود بر اساس مقادیر متوسط محاسبه می‌شوند؛ بنابراین معرف ساختار آشفتگی



شکل 2 نمایش شماتیک چیدمان نی‌ها که محل نیم‌رخ‌های سرعت با علامت ضربدر مشخص شده است

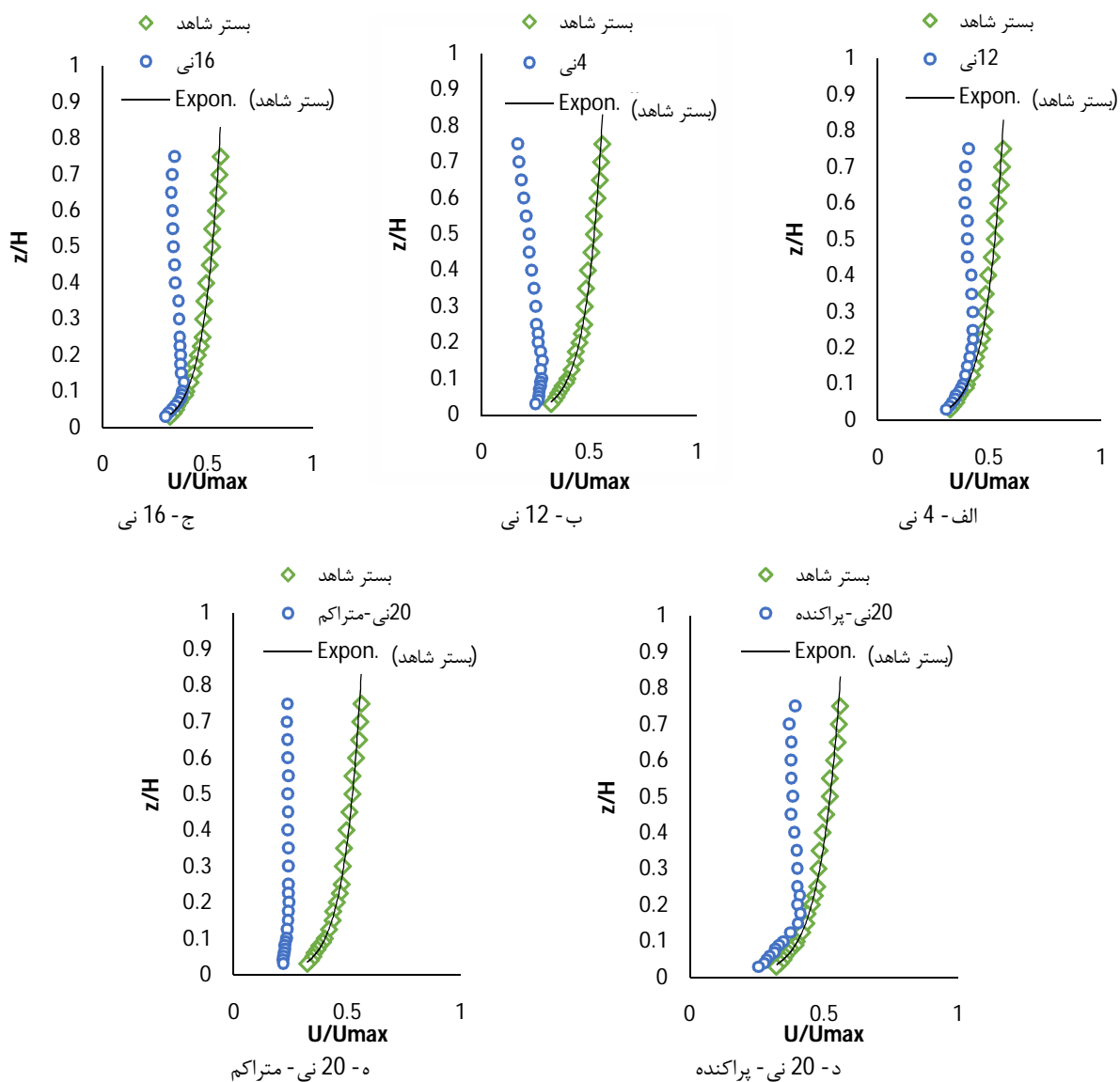
می‌شود. با افزایش تراکم (شکل 3-ب-ه)، یک توزیع سه لایه در نیم‌رخ سرعت قابل مشاهده است که این لایه‌ی میانی بخشی از لایه‌ی خارجی است که در آن اثر آشفستگی بر لزجت غالب است؛ هر چند Lopez (2011) توزیع مقادیر ثابت سرعت جریان را به صورت یک خط عمودی در حضور پوشش گیاهی نی غیرمستغرق گزارش کرده است. دلیل این تفاوت ناشی از آن است که Lopez (2011) در تمام مقطع عرضی پوشش گیاهی قرار داد؛ اما در پژوهش حاضر تنها بخشی از مقطع کانال پوشش گیاهی دارد. همچنین استفاده از تراکم‌های زیاد نی، سرعت جریان را به شدت کاهش داده است و در نتیجه تغییرات آن هم کمتر می‌شود. در توزیع سه‌لایه‌ی ایجاد شده، اولین لایه، لایه‌ی داخلی است و لایه‌های دوم و سوم زیر لایه‌های لایه‌ی خارجی هستند. مرز لایه‌ی دوم و سوم در  $Z/H=0/65$  واقع است. در بستر شاهد حداکثر سرعت در نزدیکی سطح آب رخ می‌دهد، اما در تراکم‌های مختلف پوشش گیاهی، حداکثر سرعت جریان به دلیل تولید جریان‌های ثانویه بیشتر و غیرخطی بودن توزیع مؤلفه‌های آشفستگی به بستر کانال نزدیک‌تر می‌شود.

مطالعات Graf and Altinakar (1998) به وضوح نشان می‌دهد که لایه‌ی مرزی از دو ناحیه‌ی داخلی (نزدیک بستر) و خارجی تشکیل می‌شود. قانون لگاریتمی در لایه‌ی داخلی معتبر بوده و در لایه‌ی خارجی، داده‌های سرعت از آن پیروی نمی‌کنند. لایه‌ی داخلی مستقل از گرادیان فشار است؛ در حالی که ناحیه‌ی خارجی به آن وابسته است. در واقع زیر لایه‌ی لزج و لایه‌ی انتقال (بافر)<sup>1</sup> زیر مجموعه‌ی لایه‌ی داخلی و لایه‌ی آشفته زیر مجموعه‌ی لایه‌ی خارجی می‌باشند (Dey 2014). در مورد ضخامت دقیق هر یک از لایه‌ها ی داخلی و خارجی اجماع وجود ندارد؛ به طوری که Graf and Altinakar (1998) همواره  $(Z/H=0/2)$  را نقطه‌ی انحراف لایه داخلی از لایه خارجی و Hinze (1975) مقدار  $(Z/H=0/15)$  را در این مورد گزارش کردند.

نویسندگان مقاله دامنه 0/13 تا 0/26 را در مقالات خود گزارش کردند (Afzalimehr, 2010). در مورد تراکم کم پوشش گیاهی (شکل 3- الف)، دو لایه، یعنی لایه‌ی داخلی  $(Z/H<0/2)$  و لایه‌ی خارجی  $(Z/H>0/2)$  مشاهده

<sup>1</sup>. Buffer layer





شکل 3 مقایسه‌ی نیم‌رخ‌های سرعت بر روی بستر شنی شاهد و توده‌های پوشش گیاهی با تراکم‌های گوناگون در بستر شنی با الف) 4 نی، ب) 12 نی، ج) 16 نی د) 20 نی پراکنده ه) 20 نی متراکم و برازش یک تابع نمایی بر نیم‌رخ سرعت بستر شاهد

سرعت با عمق، درستی بسط نتایج به سطح آب را تأیید می‌کند. بنابراین به‌طور خلاصه می‌توان گفت که در تراکم‌های مختلف پوشش گیاهی، لایه‌ی اول نیم‌رخ سرعت از بستر تا محل وقوع حداکثر سرعت ( $Z/H=0/15$ ) است که در این لایه روند افزایشی سرعت مشاهده می‌شود. پس از آن در لایه‌ی دوم ( $0/15 < Z/H < 0/65$ ) روند کاهش‌ی و در لایه‌ی سوم ( $Z/H > 0/65$ )، روند افزایشی سرعت مشاهده می‌شود که حاصل آن یک توزیع نامتعرف را نشان می‌دهد. دلیل توزیع نامتعرف سرعت جریان

مطالعات Afzalimehr and Dey (2009) مؤید این نتایج است. بر اساس تجارب گوناگون نویسندگان در آزمایشگاه و رودخانه، بسط نتایج نزدیکی سطح آب به ناحیه‌ی فروافتادگی صحیح می‌باشد. تقسیم لایه‌ی مرزی به ناحیه‌های داخلی و خارجی و محاسبه تنش برشی از هر یک از این نواحی نه تنها مؤید صحت این بسط می‌باشد؛ بلکه همخوانی مناسبی برای تنش برشی حاصل از دو ناحیه را نشان می‌دهد. همچنین ضریب تعیین  $R^2 = 0/9924$  برای داده‌های

جریان زمانی اهمیت دارد که هدف محاسبه یک پارامتر مشخص مانند ضریب زبری باشد که با تغییر دبی مقدار آن نیز تغییر خواهد کرد. هرچند هدف این مقاله بررسی اعتبار دو قانون لگاریتمی و کولز می‌باشد که صحت آن‌ها مستقل از تغییرات دبی جریان می‌باشد. در واقع این دو قانون بیش از شصت سال مستقل از تغییرات دبی مورد استفاده قرار گرفته‌اند (Graf and Altinakar, 1998).

### 3-2- توزیع سرعت بر اساس تئوری لایه مرزی

بر اساس تئوری لایه مرزی نیم‌رخ سرعت جریان را می‌توان به دو لایه عمده بر روی بسترهای زبر تقسیم کرد: لایه داخلی و لایه خارجی. در مورد حدود اعتبار یا ضخامتی که هر یک معتبر هستند، مطالعات گوناگونی صورت گرفته است که از جمله می‌توان به مطالعات Graf and Altinakar (1998) and Rennie (2009)، Afzalimehr and Dey (2010)، Afzalimehr (2010) و Afzalimehr et al. (2015) اشاره کرد. بر اساس این یافته‌ها، قانون لگاریتمی در لایه داخلی نزدیک بستر معتبر بوده و در لایه خارجی، داده‌ها از این قانون منحرف می‌شوند. در ادامه به تفکیک در مورد این لایه‌ها بحث می‌شود.

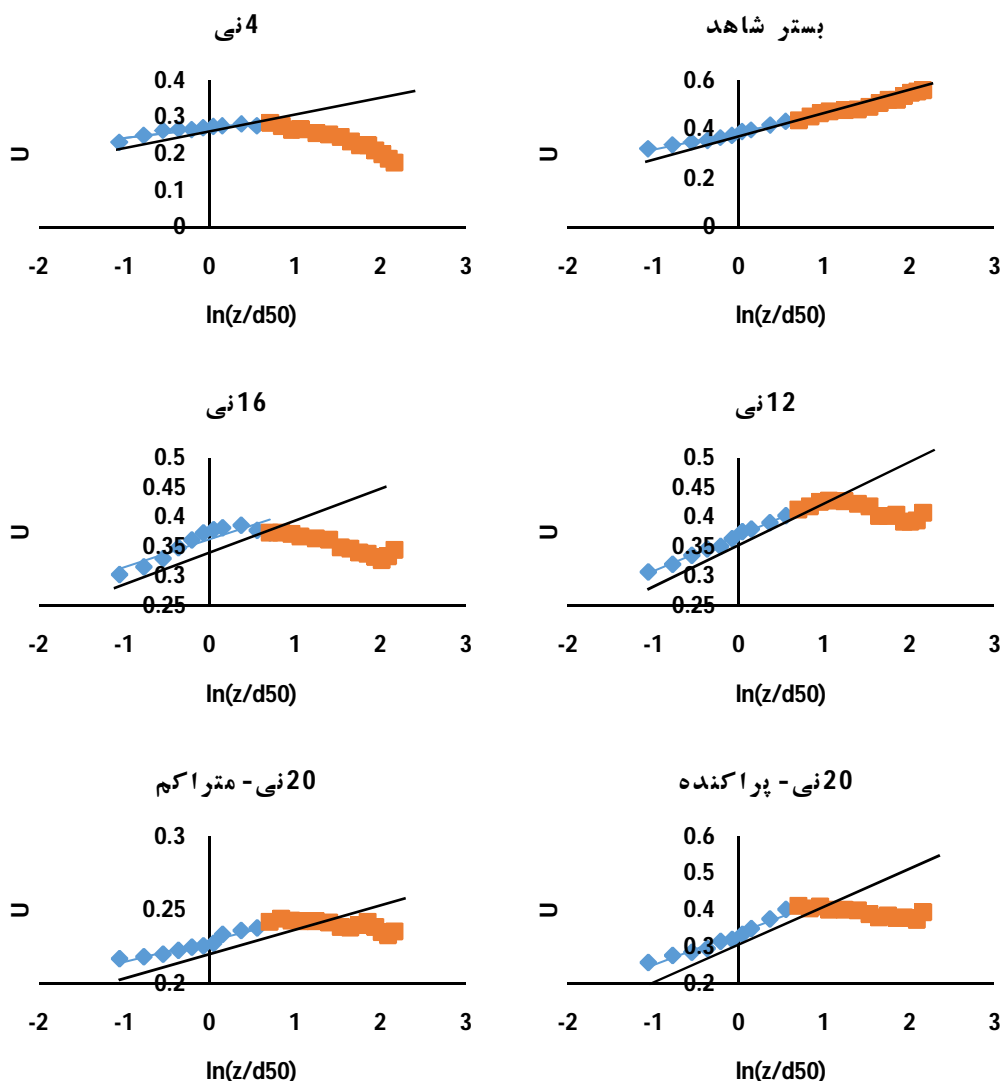
### 3-3- لایه داخلی

به‌طور تجربی ملاحظه شده است که داده‌های سرعت در ناحیه داخلی نزدیک بستر موسوم به لایه داخلی بر قانون لگاریتمی برازش مناسبی دارند (Graf and Altinakar, 1998 و Afzalimehr, 2010).

برای بررسی اعتبار این قانون از ترسیم داده‌های  $U$  در برابر  $\ln\left(\frac{z}{d_{50}}\right)$  برای  $(z/H < 0/25)$  استفاده می‌شود. شکل 4 نحوه برازش این داده‌ها را در لایه داخلی نشان می‌دهد. همچنین جدول 2 ضرایب آماری حاصل از برازش داده‌ها بر قانون لگاریتمی را ارائه می‌کند. ضرایب تعیین  $(R^2)$  برازش مناسب داده‌های این تحقیق را بر قانون لگاریتمی نشان می‌دهد. خطوط برازش‌یافته در شکل 4 معرف برازش قانون لگاریتمی بر داده‌های لایه داخلی می‌باشند.

ناحیه برخاستگی توسعه یافته ناشی از حضور پوشش گیاهی می‌باشد که موجب تضعیف لایه مرزی می‌شود. همچنین نامتعارف بودن نیم‌رخ سرعت می‌تواند حاصل تنش‌های ناشی از حضور پوشش گیاهی و انرژی آشفتگی حاصل از آن باشد که توسط Stoesser and Nikora (2008) در زمینه بسترهای زبر مورد توجه قرار گرفته است. به‌علاوه کوچک بودن شناوری نسبی  $(H/d_{50})$  اثر قابل توجهی بر شکل‌گیری نیم‌رخ نامتعارف دارد همچنان‌که (Afzalimehr et al. 2014) توزیع  $S$ -شکل را بر روی بستر قله‌سنگی در شناوری نسبی  $(H/d_{50}) < 4$  گزارش کردند. بر این اساس سه‌لایه شدن نیم‌رخ سرعت ناشی از برهم‌کنش ناحیه برخاستگی، زبری بستر، پوشش گیاهی و شناوری نسبی  $(H/d_{50})$  بر ساختار جریان است. افزایش تراکم پوشش گیاهی، ناحیه برخاستگی بیشتری ایجاد می‌کند و نیم‌رخ سرعت را از طریق تشدید آشفتگی در آن تحت تأثیر قرار می‌دهد. دلیل تشدید آشفتگی، جریان‌های ثانویه هستند. وجود نی مانند پایه‌ی پل (یا گروه پایه‌ها) در مسیر جریان، سبب انحراف خطوط جریان و شکل‌گیری پدیده جدایی جریان شده و به تبع آن ناحیه برخاستگی را توسعه می‌دهد. از ویژگی‌های مهم جدایی جریان افزایش آشفتگی می‌باشد. به‌علاوه وقوع ناحیه برخاستگی، چرخشی بودن جریان را تقویت می‌کند که پیامد آن لایه برشی حول نی می‌باشد؛ که موجب تغییر در شکل توزیع سرعت، محاسبه سرعت برشی  $(U^*)$  و ثابت قانون لگاریتمی (Br) می‌شود.

لازم به ذکر است که در نیم‌رخ‌های شکل 3، عمق جریان ثابت، ولی دبی جریان متفاوت است. آن‌چه که در شکل 3 اهمیت دارد، اثر پوشش گیاهی بر جریان‌های ثانویه است که موجب وقوع حداکثر سرعت جریان در عمق  $(z/H < 0/25)$  در تمام نیم‌رخ‌ها می‌شود. هرچند نیم‌رخ سرعت بر روی بستر شنی شاهد بدون حضور نی، روندی صعودی و یکنواخت را نشان می‌دهد. بنابراین اختلاف اساسی حضور و عدم حضور نی در مسیر جریان در الگوی کلی جریان است که همان یکنواختی سرعت برای حالت بدون نی و وقوع حداکثر سرعت در زیر سطح آب در حضور نی است. در نظر گرفتن مقدار مشخص برای دبی



◆ inner layer    ■ outer layer    The log law plot

شکل 4 قانون لگاریتمی بر روی بستر شاهد و پنج تراکم پوشش گیاهی

جدول 2 نتایج حاصل از قانون لگاریتمی

Br (-)	U* (m/s)	R <sup>2</sup> (-)	معادله‌ی خطی در ناحیه داخلی	سری	
13/85	0/028	0/97	$U=0/0702\ln(z/d_{50})+0/3891$	بدون نی (شاهد)	
24/97	0/011	0/85	$U=0/0272\ln(z/d_{50})+0/2717$	4 نی	بستر
15/11	0/024	0/99	$U=0/061\ln(z/d_{50})+0/3686$	12 نی	شنی
19/07	0/019	0/81	$U=0/0475\ln(z/d_{50})+0/622$	16 نی	بصورت
9/61	0/035	0/96	$U=0/0879\ln(z/d_{50})+0/3381$	20 نی - پراکنده	
40/33	0/01	0/94	$U=0/0142\ln(z/d_{50})+0/2291$	20 نی - تراکم	

افزایش آشفستگی در ناحیه‌ی جدایی می‌شود.

### 3-4- لایه‌ی خارجی

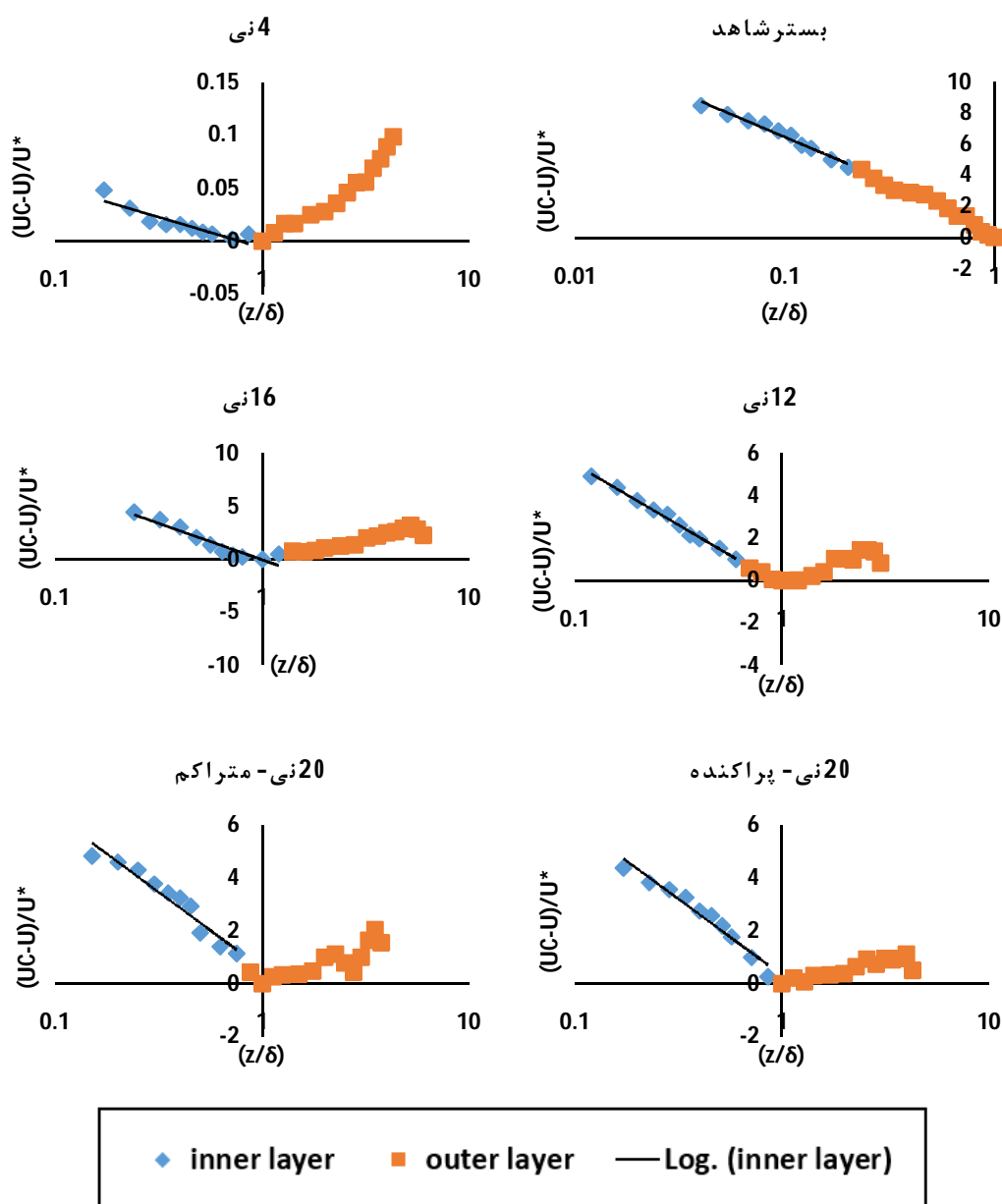
برای محاسبه‌ی تابع تجربی برخاستگی،  $\left(\frac{U_c-U}{U_*}\right)$  در برابر

$\frac{z}{\delta}$  ترسیم شده و خطی در مقیاس لگاریتمی به داده‌های لایه‌ی داخلی برازش داده شد. محل تقاطع امتداد این خط در لایه‌ی خارجی با محور عمودی در  $\frac{z}{\delta}=1$  برابر با  $\frac{2\Pi}{K}$  است که از طریق آن پارامتر برخاستگی  $\Pi$  محاسبه (Kironoto, 1992) و نتایج در جدول 3 و شکل 5 ارائه شدند. مقادیر پارامتر  $\Pi$  در مراجع برای بستر شنی تا 0/2 گزارش شده است (Afzalimehr et al., 2015). مقادیر کمتر ارائه شده برای پارامتر کولز در جدول 3 ناشی از پدیده‌ی فروافتادگی، یعنی وقوع حداکثر سرعت در زیر سطح آب است. افزایش زبری به دلیل قرارگرفتن پوشش گیاهی بر روی بستر شنی و همچنین افزایش تراکم سبب عدم اعتبار قانون کولز در حضور پوشش گیاهی می‌شود؛ هرچند این قانون در حالت بستر شاهد معتبر است. شکل 5، به خوبی نشان می‌دهد که استفاده از قانون کولز در حضور پوشش گیاهی مناسب نیست و عدم اعتبار این قانون با افزایش تراکم افزایش می‌یابد. عدم تعادل دینامیکی در تولید و تلفات آشفستگی در حضور گیاه و میزان تراکم آن مانع از کاربرد قانون کولز برای داده‌های ناحیه‌ی خارجی می‌شود.

با توجه به شکل 4 قانون لگاریتمی در بستر شنی (بستر شاهد بدون پوشش گیاهی) بهتر از تراکم‌های مختلف پوشش گیاهی بر داده‌های سرعت برازش می‌یابد. انحراف داده‌ها در ناحیه‌ی خارجی از قانون لگاریتمی در تراکم‌های مختلف بسیار بیشتر از بستر شاهد است. از دلایل اصلی انحراف داده‌ها از قانون لگاریتمی در لایه‌ی خارجی فرضیات نامعتبر، نظیر تنش برشی ثابت در تمام عمق جریان و عدم اعتبار طول اختلاط پرناتل  $l=kz$  در تمام عمق جریان می‌باشند (Julien, 2010). لازم به ذکر است که توسعه‌ی قانون لگاریتمی بر اساس فرضیه‌ی طول اختلاط پرناتل انجام شده است که در ناحیه‌ی خارجی اعتبار ندارد. در این پژوهش در حضور پوشش گیاهی غیرمستغرق تحت جریان یکنواخت بر روی بستر شنی، انحراف از قانون لگاریتمی به نزدیکی بستر منتقل شده است؛ به عبارت دیگر با وجود اعتبار این قانون در حضور نی در تراکم‌های گوناگون، ضخامت لایه‌ی داخلی کاهش یافته است که دلیل آن آشفته‌تر و پیچیده‌تر شدن جریان ناشی از حضور پوشش گیاهی است. حضور نی در مسیر جریان، موجب تغییر جریان از حالت شبه یکنواخت؛ که در آن عملاً گرادیان فشار صفر است، به جریان غیریکنواخت با گرادیان فشار نامطلوب می‌شود که شرط لازم برای جدایی جریان است. توسعه‌ی برخاستگی، سبب تغییر علامت و رتیبستی می‌شود که شرط تکمیلی برای جدایی جریان را فراهم می‌سازد. افزایش تراکم نه فقط سبب تشکیل چند ناحیه برخاستگی می‌گردد، بلکه موجب برهم‌کنش آن‌ها و

جدول 3 نتایج قانون کولز

$\Pi$ (-)	$U_{max}$ (m/s)	$\delta$ (m)	H (m)	$R^2$ (-)	معادله‌ی لگاریتمی در ناحیه داخلی	سری
0/16	0/56	0/15	0/15	0/974	$\frac{U_c-U}{U_*} = -2/5 \ln(z/\delta) + 0/7266$	بدون نی (شاهد)
-0/001	0/28	0/035	0/15	0/846	$\frac{U_c-U}{U_*} = -0/025 \ln(z/\delta) - 0/058$	4 نی
-0/04	0/43	0/05	0/15	0/993	$\frac{U_c-U}{U_*} = -2/5 \ln(z/\delta) - 0/2596$	12 نی
-1/4	0/39	0/025	0/15	0/897	$\frac{U_c-U}{U_*} = -2/98 \ln(z/\delta) - 6/8839$	16 نی
0/08	0/41	0/035	0/15	0/959	$\frac{U_c-U}{U_*} = -2/5 \ln(z/\delta) + 0/3191$	20 نی - پراکنده
0/12	0/24	0/04	0/15	0/937	$\frac{U_c-U}{U_*} = -2/5 \ln(z/\delta) + 0/5606$	20 نی - متراکم



شکل 5 قانون کولز بر روی بستر شاهد و پنج تراکم پوشش گیاهی

#### 4- نتیجه گیری

با توجه به حضور پوشش گیاهی به صورت مختلف در رودخانه‌ها و مجاری باز ضروری است اثر این عامل مهم در کاربرد قوانین لایه‌ی مرزی مشخص گردد. از آنجا که قانون لگاریتمی دارای مبانی تجربی است (Barenblatt, 1982)، کاربرد آن در این مطالعه نشان می‌دهد که قانون لگاریتمی علاوه بر برازش مناسب برای داده‌های سرعت روی بستر شنی، بر داده‌های سرعت در نزدیکی بستر

(لایه‌ی داخلی)، در تراکم‌های مختلف پوشش گیاهی نیز برازش مناسبی دارد. البته کاربرد قانون تجربی کولز برای داده‌های لایه‌ی خارجی در حضور پوشش گیاهی نامعتبر است. توزیع نامتعارف نیمرخ سرعت جریان و تشدید آشفستگی ناشی از افزایش تراکم پوشش گیاهی سبب انحراف بیشتر داده‌ها از قانون کولز شده و ضرورت توسعه و کاربرد سایر روش‌های لایه‌ی مرزی برای تشریح داده‌های سرعت در لایه‌ی خارجی را ایجاب می‌کند.

submerged vegetation strip”, J. Water Management, ICE. UK, in press.

Afzalimehr, H. Moradian, M. Sui, J. and Gallichand, J. (2015). “Effect of adverse pressure gradient and vegetated banks on flow structure”, J. River Research and Applications. 4(4), pp. 1-9.

Afzalimehr, H, Bagheri, E. Gallichand, J. and Dufresne, L. (2014). “Cobble-bed concentration and vegetated banks: effects on flow”, Proc. of the Institution of Civil Engineers- Water Management. 167, pp. 206-218.

Afzalimehr, H. Fazel, E. and Ghalichand, J. (2012). “Effects of accelerating and decelerating flows in a channel with vegetated banks and gravel bed”, International J. Sediment Research, 27 (2), pp. 188-200.

Afzalimehr, H. (2010). “Effect of flow non-uniformity on velocity and turbulence intensities in flow over a cobble bed”, J. Hydrol. Process, 24, pp. 331-341.

Afzalimehr, H. Fazel, E. and Singh, V. P. (2010). “Effect of vegetation on banks on distributions of velocity and Reynolds stress under accelerating flow”, J. Hyd. Eng., 15(9), pp. 708-713.

Afzalimehr, H. Gallichand, J. Sui, J. and Bagheri, E. (2011). “Field investigation on friction factor in mountainous cobble-bed and boulder-bed Rivers”, International J. Sediment Research. 26(2), pp. 210-221.

Afzalimehr, H. and Dey, S. (2009). “Influence of bank vegetation and gravel bed on velocity and Reynolds stress distributions”, International J. Sediment Research. 24(2), pp. 236-246.

Afzalimehr, H. and Rennie, C.D. (2009). “Determination of bed shear stress using boundary layer parameters in a gravel-bed river”, J. Hydrological Sciences, 54(1), pp.147-159.

Afzalimehr, H. and Anctil, F. (2000). “Accelerating shear velocity in gravel bed channels”, J. Hydrol. Sci, 45(1), pp. 143-155.

Afzalimehr, H. and Anctil, F. (1999). “Velocity distribution and shear velocity behavior of decelerating flow over a gravel- bed. Journal of Canadian Civil Engineering”, 26(4), pp. 468-475.

Barenblatt, G.I. (1982). “*Similarity, Self-Similarity and Intermediate Asymptotics*”, Consultants Bureau: New York, N. Y.

Baptist, M. J. Babovic, V. Uthurburu, J. R. Keijzer, M. Uittenbogaard, R. E. Mynett, A. and Verwey, A. (2007). “On inducing equations for vegetation

## 5- فهرست علائم

a	سطح عمودی جریان
B	عرض جریان آب
$d_{50}$	قطر میانه‌ی ذرات رسوب
Fr	عدد فرود
H	عمق جریان آب
Hv	ارتفاع گیاه
$H/d_{50}$	شناوری نسبی
$k_s$	زبری بستر
l	طول اختلاط
Lx	فاصله‌ی نی‌ها در راستای طولی
N	تعداد داده‌ها در هر نقطه از نیم‌رخ سرعت
$R^2$	ضریب تعیین
Re	عدد رینولدز
U	مؤلفه سرعت متوسط طولی جریان در هر نقطه نظیر عمق
$U^*$	سرعت برشی
$U_{bed}$	سرعت جریان در بستر
$U_c$	سرعت حداکثر جریان در عمق $\delta$
$U_{max}$	حداکثر سرعت جریان در هر نیم‌رخ سرعت
$U_{veg}$	سرعت متوسط جریان در هر نقطه از نیم‌رخ سرعت
V	مؤلفه سرعت متوسط عرضی جریان در هر نقطه نظیر عمق Z
W	مؤلفه سرعت متوسط عمودی جریان در هر نقطه نظیر عمق Z
Z	ارتفاع از بستر هر نقطه از نیم‌رخ سرعت
$Z_0$	ضریب تعدیل کننده سطح بستر مرجع
$\delta$	ضخامت لایه مرزی از بستر تا نقطه‌ی حداکثر سرعت جریان
$\kappa$	ثابت فن کارمن
$\Pi$	پارامتر برخاستگی کولز
$\nu$	گرانروی سینماتیکی

## 6- منابع

کوچک زاده، ص. و یوسفی، ک. (1381). *تئوری و کاربرد انتقال رسوب* (ترجمه)، انتشارات دانشگاه تهران.

Afzalimehr, H. Barahimi, M. and Sui, j. (2017). “Non-uniform flow over cobble bed with

- rigid vegetation”, *Adv. in Water Resour.*, 32(4), pp. 487–492.
- Huthoff, F. Augustijn, D. C. M. and Hulscher, S. J. M. H. (2007). “Analytical solution of the depth-averaged flow velocity in case of submerged rigid cylindrical vegetation”, *J. Water Resour. Res.*, 43(6), pp. 129-148.
- Julien, P. Y. (2010). “*Erosion and Sedimentation*”, Cambridge University Press, Cambridge United Kingdom, 390 p.
- Kironoto, B. A. (1992). “Turbulence characteristics of uniform and non-uniform, rough open channel flow”, Ph.D thesis. Ecole Polytechnique Federal de Lausanne, Switzerland.
- Kironoto, B. A. and Graf, W. H. (1994). “Turbulence characteristics in rough uniform open channel flow”, *Proceedings of the ICE-Water Maritime and Energy*, 106, pp. 333–344.
- Liu, D. Diplas, P. Fairbanks, J. and Hodges, C. (2008). “An experimental study of flow through rigid vegetation”, *J. Geophys. Res.: Earth Surf.* 113(F4).
- Lopez, R. O. T. (2011). “An experimental investigation of drag and the turbulent flow structure in simulated and real aquatic vegetation”, Ph.D. thsise, Cornell University, USA.
- MacVicar, B.J., and Roy, A.G. (2007). Hydrodynamics of a forced riffle pool in a gravel bed river: 1. Mean velocity and turbulence intensity. *Water Resource Research*, 43(12): W12401. doi:10.1029/2006WR005272.
- Monty, J. P. Hutchins, N. Ng, H. C. H. Marusic, I. and Chong, M. S. (2009). “A comparison of turbulent pipe, channel and boundary layer flows”, *J. Fluid Mech.* 632, pp. 431–442.
- Nakagawa, H. Tsunhimoto, T. and Shimizu, Y. (1991). “Turbulent flow whit small relative submergence. Fluvial hydraulics of mountain regions”, *J. Lect. Notes Earth Sci*, 37, pp. 33-44.
- Nepf, H. M. (2012). “Flow and transport in regions with aquatic vegetation”, *J. Annu. Rev. Fluid Mech*, 44, pp. 123-142.
- Nepf, H. M. White, B. Lightbody, A. and Ghisalberti, M. (2007). “Transport in aquatic canopies. In *Flow and Transport Processes with Complex Obstructions*”, Springer Netherlands. pp. 221-250.
- Nezu, I. (1977). “Turbulence structures in open channel flow”, Ph.D thesis. Civil Engineering, Kyoto University, Japan.
- resistance”, *J. Hydraul. Res.* 45(4), pp. 435–50.
- Cardoso, A. H. Graf, W. H. and Gust, G. (1990). “Uniform flow in a smooth open channel”, *J. Hydraul. Res.*, 27(5), pp. 603-616.
- Cheng, N. (2011). “Representative roughness height of submerged vegetation”, *J. Water Resour. Res.*, 47(8), pp. 427-438.
- Chanson, H. (2001). “*The Hydraulics of Open Channel Flow, An Introduction*”. Butterworth-Heinemann.
- Coles, D. (1956). “The law of the wake in turbulent boundary layer”, *J. Fluid Mech.* 1, pp. 191-226.
- Costanza, R. Arge, R. and Groot, R. (1998). “The value of the world’s ecosystem services and natural capital”, *J. Ecol. Econ*, 25(1), pp. 3–15.
- Dey, S. (2014). “*Fluvial hydrodynamics: Hydrodynamic and sediment transport phenomena*”. Springer-Verlag, Berlin.
- Fazel, E. Afzalimehr, H. and Sui, J. (2015). “Turbulence characteristics of favorable pressure gradient flows in gravel-bed channel with vegetated walls”, *J. Hydrology and Hydromechanics*, 63(2), pp. 154-163.
- Francis, J. B. (1878). “On the cause of the maximum velocity of water flowing in open channels being below the surface”, *Transactions of the American Society of Civil Engineers.* ASCE, 7(1), pp. 109-113.
- Goring, D. G. and Nikora, V. L. (2002). “Despiking acoustic doppler velocimeter data”. *J. Hydraulic Engineering*, ASCE. 128(1), pp. 117-126.
- Gil Montero, V.G. Romagnoli, M. García, C.M. Cantero, M. I. and Scacchi, G. (2014). “Optimization of ADV sampling strategies using DNS of turbulent flow”, *J. Hydraulic Research*, 52(6), pp. 862–869
- Graf, W. H. and Altinakar, M. S. (1998). *Fluvial hydraulics: Flow and transport processes in channels of simple geometry.* Willey, Chichester. ISBN 0-471-97714-4.
- Hinze, J. O. (1975). *Turbulence.* McGraw-Hill Book Co. New York.
- Huai, W. X. Chen, G. and Zeng, Y. H. (2012). “Predicting apparent shear stress in prismatic compound open channels using artificial neural networks”, *J. Hydroinform*, 15(1), pp. 138-146.
- Huai, W. X. Zeng, Y. H. Xu, Z. G. and Yang, Z. H. (2009). “Three-layer model for vertical velocity distribution in open channel flow with submerged

- submergence: Large Eddy Simulation study of bar spacing effect”, J. Acta Geophys. 56 (3), pp. 876-893.
- Stone, B. M. and Shen, H. T. (2014). “Hydraulic resistance of flow in channels with cylindrical roughness”, J. Hydraul. Eng. 128(5), pp. 500-506.
- Thibodeaux, K. G. (1994). “Review of Literature on the Testing of Point-Velocity Current Meters”, U.S. geological survey open-file report 94-123. 44 p.
- Wolman, M. G. (1954). “A method of sampling coarse river bed material”, EOS, Transactions American Geophysical Union, 35(6), pp. 951-956.
- Yang, S. Q. and Lee, J. W. (2007). “Reynolds shear stress distributions in a gradually varied flow”, J. Hydraul. Res, 45(4), pp. 462-471.
- Zagarola, M. (1996). “Mean flow scaling in turbulent pipe flow”, Ph.D. thesis, Princeton University, Princeton, USA.
- Nezu, I. and Rodi, W. (1986). “Open channel flow measurements with a laser Doppler anemometer”, J. Hydraul. Eng, 112(5), pp. 335-355.
- Nezu, I. and Nakagawa, H. (1993). “*Turbulence in open channel flows*”, Monograph of IAHR, A.A. Balkema publishers, Brookfield, USA.
- Nikora, N. Nikora, V. and O'Donoghue, T. (2014). “Velocity profiles in vegetated open-channel flows: combined effects of multiple mechanisms”, J. Hydraul. Eng, 139(10), pp. 1021-1032.
- Nikora, Y. and Goring, D. (2000). “Flow turbulence over fixed and weakly mobile gravel beds”, J. Hydraul. Eng. ASCE. 126(9), pp. 679-690.
- Song, T.C. (1994). “Velocity and turbulence distribution in non-uniform and unsteady open - channel flow”, Ph.D. thesis, Ecole Polytechnique Federale de Lausanne, Switzerland.
- Stoesser, T. and Nikora, V.I. (2008), “Flow structure over square bars at intermediate