

بررسی سرعت جریان عبوری از روی پوشش گیاهی سخت مستغرق با توزیع ارتفاعی تصادفی در کانال‌های روباز

سیما صمدی قره‌ورن^۱، اکرم عباسپور^{۲*}، داود فرسادی‌زاده^۳ و علی حسین‌زاده دلیر^۴

چکیده

پوشش گیاهی از جمله زبری‌های طبیعی موجود در بستر رودخانه‌ها و کانال‌ها به‌شمار می‌روند که تأثیر زیادی روی مشخصات هیدرولیکی جریان دارند؛ بنابراین برای انجام بهتر اقدامات مدیریتی رودخانه‌ها باید این تأثیر شناخته شود. در تحقیق حاضر، تأثیر وجود پوشش گیاهی سخت مستغرق روی سرعت جریان، به‌صورت آزمایشگاهی بررسی شده است. در این مطالعه، برخلاف بسیاری از مطالعات پیشین، توزیع ارتفاعی گیاهان در بستر کانال یکنواخت نبوده و به‌صورت کاملاً تصادفی است. جریان در شرایط مورد مطالعه دارای سه لایه است: لایه فوقانی بدون پوشش گیاهی، لایه میانی دارای پوشش گیاهی و لایه پایین دارای پوشش گیاهی. لایه فوقانی که از تاج بلندترین گیاه شروع شده و تا سطح آزاد جریان امتداد می‌یابد دارای توزیع سرعت لگاریتمی است که رابطه مربوطه استخراج شده است. برای دو لایه میانی و پایینی که درون پوشش گیاهی هستند، با استفاده از معادله مومنتم، روابط سرعت ارائه شده است. پروفیل سرعت دارای دو نقطه عطف است که موقعیت آن‌ها به تراکم پوشش گیاهی بستگی دارد. بررسی تأثیر پارامترهای بی‌بعد مختلف بر سرعت جریان نشان می‌دهد افزایش دبی جریان که باعث افزایش عدد رینولدز و عدد فرود می‌گردد، تأثیری بر موقعیت نقاط عطف موجود در پروفیل‌های سرعت ندارد. با افزایش تراکم پوشش گیاهی، سرعت جریان در لایه‌های گیاهی و لایه بالایی به‌ترتیب کاهش و افزایش و در نتیجه انحنای منحنی افزایش می‌یابد و موقعیت نقاط عطف کمی به پایین جابجا شده است. پارامتر دیگر مورد مطالعه، استغراق پوشش گیاهی است که با رشد میزان استغراق گیاهان، سرعت در هر سه لایه جریان کاهش می‌یابد. افزایش ۳۰ درصدی میزان استغراق، سرعت جریان را در لایه پوشش گیاهی ۱۰ درصد و در لایه بدون پوشش ۲۵ درصد کاهش می‌دهد. برای تعیین ضریب درگ گیاهی (C_D)، عدد رینولدز گیاهی ویژه (Re^*) معرفی شده و یک رابطه تجربی با دقت قابل قبول پیشنهاد شده است.

واژه‌های کلیدی: استغراق، پروفیل سرعت، پوشش گیاهی، توزیع تصادفی، ضریب درگ، کانال روباز.

ارجاع: صمدی قره‌ورن س.، عباسپور ا.، فرسادی‌زاده د. و حسین‌زاده دلیر ع. ۱۴۰۲. بررسی سرعت جریان عبوری از روی پوشش گیاهی سخت مستغرق با توزیع ارتفاعی تصادفی در کانال‌های روباز. مجله پژوهش آب ایران. ۵۱: ۸۳-۹۲. <https://dx.doi.org/10.22034/IWRJ.2023.14516.2554>

۱- دانشجوی دکتری، گروه مهندسی آب، دانشگاه تبریز.

۲- دانشیار گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه تبریز.

۳- استاد گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه تبریز.

۴- استاد گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه تبریز.

* نویسنده مسئول: a-abbaspour@tabrizu.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۸/۱۵

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۶/۰۷

مقدمه

زبری‌های موجود در بستر و دیواره رودخانه‌ها و کانال‌ها تاثیر زیادی بر روی مشخصات هیدرولیکی جریان دارند و برای انجام امور مدیریتی و کنترلی تغییر رفتار و مشخصات جریان در حضور این زبری‌ها باید به خوبی شناخته شود. پوشش‌های گیاهی از جمله مهم‌ترین و رایج‌ترین این زبری‌ها هستند که خود گونه‌ها و مشخصات متنوعی دارند. یکی از مهم‌ترین این مشخصات میزان انعطاف‌پذیری آن‌ها است که از این نظر معمولا به دو دسته کلی سخت و انعطاف‌پذیر تقسیم می‌شوند. از گذشته تا کنون همواره محققان در تلاش هستند تا بتوانند بخوبی تاثیر وجود گیاهان در مسیر جریان را پیش‌بینی نمایند و روابط دقیق‌تری را برای پیش‌بینی مشخصات مختلف جریان از جمله سرعت ارائه دهند. تمپل (۱۹۸۶) با مطالعه پوشش گیاهی انعطاف‌پذیر، به این نتیجه رسید که جریان عبوری از روی پوشش گیاهی دارای دو لایه است. لایه اول از بستر کانال تا ارتفاع k_r که همان ارتفاع گیاه بعد از خم شدگی می‌باشد و لایه دوم از تاج گیاه خم شده تا سطح آزاد جریان. در لایه اول سرعت تقریباً ثابت بوده و وابسته به شیب کانال و مشخصات پوشش گیاهی است. در لایه دوم، سرعت بیشتر به انتقال مومنتم بستگی دارد. جارولا (۲۰۰۵) به بررسی آزمایشگاهی جریان عبوری از روی پوشش گیاهی انعطاف‌پذیر پرداخت. نتایج نشان‌دهنده توزیع لگاریتمی سرعت جریان عبوری از روی پوشش گیاهی است. ماکزیمم مقدار شدت تلاطم و تنش رینولدزی تقریباً در ناحیه ماکزیمم خم‌شدگی گیاه اتفاق می‌افتد. هوفت و همکاران (۲۰۰۷) یک مدل دو لایه‌ای برای تعیین متوسط سرعت در عمق جریان کانال‌های روباز در شرایط وجود پوشش گیاهی سخت مستغرق ارائه نمودند یعنی میدان جریان را به دو لایه سطحی و لایه مقاوم تقسیم کردند و برای هر لایه رابطه سرعت متوسط جداگانه تعیین نمودند. وو (۲۰۰۸) به تحلیل مشخصات مقاومتی جریان در شرایط پوشش گیاهی سخت غیرمستغرق پرداخت و بیان کرد افزایش تراکم گیاهان غیرمستغرق باعث کاهش ظرفیت دبی کانال و کاهش سرعت جریان می‌شود. یانگ (۲۰۰۹) در مطالعه خود که به‌صورت آزمایشگاهی بود، پوشش گیاهی انعطاف‌پذیر مستغرق را در نظر گرفت و برای شبیه‌سازی ساقه‌های انعطاف‌پذیر و سخت به‌ترتیب از

فیلم‌های پلی‌اتیلن و استوانه‌های چوبی استفاده کرد. هو و همکاران (۲۰۱۳) پروفیل‌های سرعت برای جریان عبوری از روی پوشش گیاهی سخت مستغرق را مطالعه کردند. مشاهدات آن‌ها نشان‌دهنده سه منطقه برای پروفیل سرعت است: لایه پایین پوشش گیاهی، لایه بالایی پوشش گیاهی و لایه بدون پوشش گیاهی که برای هر لایه رابطه سرعت استخراج شده است. برای لایه پایینی پوشش گیاهی، رابطه تعادل نیروها نوشته شد، با فرض اینکه نیروی موثر بر جریان نیروی وزن و درگ گیاهی است و سرعت در این منطقه در عمق کانال ثابت است. چنگ (۲۰۱۵) یک مدل تک‌لایه‌ای برای جریان‌های عبوری از روی پوشش گیاهی مستغرق معرفی کرد که به‌وسیله این مدل تعیین متوسط سرعت مقطع به‌راحتی انجام می‌گیرد. رابطه جدید ارائه شده به مدل‌های دو لایه‌ای قبلی ترجیح داده می‌شود چراکه پارامترهایی مانند ضریب درگ و ارتفاع هیدرودینامیکی زبری‌ها در رابطه وجود ندارند و در عوض مفهوم شعاع هیدرولیکی به‌عنوان مقیاس طولی تعیین‌کننده ضریب اصطکاک بوده و در تعیین سرعت متوسط مقطع استفاده شده است. فتیحی مقدم و همکاران (۲۰۱۸) از درختان مصنوعی منفرد با تراکم‌های مختلف برای بررسی تاثیر وجود کمربند سبز روی کاهش ارتفاع و نیروی موج منفرد استفاده کردند. نتایج آزمایش‌ها حاکی از تاثیر قابل توجه کمربند سبز بر کاهش نیروی موج و عمق طغیان می‌باشد. به‌گونه‌ای که به‌ترتیب به ازای تراکم پوشش گیاهی ساحلی ۳۰، ۵۰ و ۱۰۰ درصد، عمق طغیان به‌طور متوسط ۱۴، ۱۸ و ۲۹ درصد کاهش می‌یابد. دیپولیتو و همکاران (۲۰۱۹) یک مطالعه تجربی روی پوشش گیاهی سخت غیر مستغرق انجام دادند. در این مطالعه دبی جریان، تعداد و فاصله میله‌ها، قطر ساقه‌ها و شیب بستر متغیر بود و یک رابطه جدید برای ضریب درگ ارائه شده که تابعی از تراکم پوشش گیاهی است و وابستگی بسیار کمی به عدد رینولدز ساقه‌ای دارد که همین عامل باعث می‌شود تا این رابطه در مقیاس بزرگ نیز استفاده شود. شی و همکاران (۲۰۱۹) مدل دو لایه‌ای برای تعیین سرعت در شرایط پوشش گیاهی سخت مستغرق معرفی کردند. تانگ و همکاران (۲۰۲۱) سرعت، تنش رینولدزی و توزیع شدت آشفتگی جریان عبوری از پوشش گیاهی سخت را مطالعه کرده و روابط جدیدی برای شعاع هیدرولیکی و محاسبه ضریب مانینگ ارائه کردند.

تصویر جانبی از سه استوانه مختلف استفاده شده برای شبیه‌سازی پوشش گیاهی سخت را نشان می‌دهد.

دبی جریان بین ۵ تا ۶۰ لیتر در ثانیه متغیر بوده و برای اندازه‌گیری آن از یک فلومتر اولتراسونیک استفاده شد. نقاطی که سرعت جریان در آن‌ها اندازه‌گیری شده در شکل ۱-ب نشان داده شده است. اندازه‌گیری سرعت از ۴ متر پس از ورودی کانال و پس از پایداری کامل جریان آغاز شد. برای اندازه‌گیری سرعت نقطه‌ای از یک سرعت‌سنج اولتراسونیک سه بعدی (ADV) ساخته شده توسط SonTek با فرکانس ۲۵ هرتز استفاده شد. فرکانس ۲۵ هرتز به این معنی است که سرعت‌سنج برای هر نقطه ۲۵ نمونه را در ثانیه اندازه‌گیری و ثبت می‌کند. برای تمام داده‌های سرعت جمع‌آوری شده، $SNR > 15$ و همبستگی بیشتر از ۷۰ درصد در نظر گرفته شده است.

برای پردازش داده‌های اندازه‌گیری و جمع‌آوری شده توسط ADV از نرم افزار WinADV استفاده شد. اندازه‌گیری‌ها در ۵ نقطه شامل مرکز، سمت راست جریان، سمت راست جریان نزدیک دیوار، سمت چپ جریان و سمت چپ جریان نزدیک دیوار انجام شد. نقاط اندازه‌گیری در شکل ۱ نشان داده شده است. برای نامگذاری نقاط اندازه‌گیری از سه حرف لاتین استفاده شد. حرف اول موقعیت نقطه را در کانال و حرف دوم و سوم به ترتیب ارتفاع استوانه‌ها را قبل از نقطه و بعد از نقطه نشان می‌دهد. به عنوان مثال اگر نام نقطه اندازه‌گیری CTS باشد به این معنی است که این نقطه در مرکز کانال قرار دارد و ارتفاع سیلندر قبل از نقطه اندازه‌گیری بلند و استوانه بعد از آن کوتاه است.

برای تعیین زمان مورد نیاز برای نمونه‌برداری از انحراف سرعت طولی از مقدار واقعی استفاده شد. به این ترتیب که برای آزمایش‌هایی با دبی‌های مختلف و توزیع‌های استوانه‌ای متفاوت با فرکانس ۲۵ هرتز، سرعت در هر نقطه در بازه‌های زمانی متفاوت اندازه‌گیری و با هم مقایسه شدند. با مقایسه سرعت‌های به دست آمده در بازه‌های زمانی اندازه‌گیری شده، مشاهده شد که بعد از گذشت یک زمان مشخص سرعت در آن نقطه نسبت به بازه زمانی قبلی تغییر چندانی نمی‌کند و افزایش مدت زمان نمونه‌برداری تاثیری بر مقدار سرعت به دست آمده در آن نقطه ندارد؛ بنابراین آن مدت زمان به عنوان مدت کافی برای نمونه‌برداری تعیین شد و نمونه‌برداری به مدت

پوشش گیاهی مورد مطالعه در این تحقیق از نوع سخت و غیرقابل انعطاف است. برای اینکه شرایط پوشش گیاهی به حالت طبیعی خود نزدیک باشد توزیع ارتفاعی گیاهان غیریکنواخت و تصادفی در نظر گرفته شده است. در ادامه به توصیف شرایط آزمایشگاهی با جزئیات بیشتر پرداخته شده است و مشخصات پروفیل سرعت و همچنین روابط مربوط به توزیع سرعت استخراج شده است.

مواد و روش‌ها

آزمایش‌ها با استفاده از فلوم مستطیلی به طول ۱۰، عرض ۰/۵ و عمق ۰/۶ متر در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه تبریز انجام شد. دیواره‌های جانبی و کف فلوم به ترتیب شیشه و فولاد بود. در انتهای پایین دست فلوم، یک سرریز مستطیلی با زاویه قابل تنظیم برای تنظیم ارتفاع جریان داخل کانال نصب گردید. در تمام آزمایش‌ها، با استفاده از سرریز انتهایی عمق جریان روی مقادیر مشخص شده تنظیم شد تا عمق جریان در ابتدا و انتهای کانال یکسان باشد و جریان میزان استغراق پوشش‌های گیاهی در ابتدا و انتهای کانال تغییری نکند. مدل‌های پوشش گیاهی مورد استفاده در آزمایش‌ها شامل استوانه‌های فولادی ضد زنگ در سه ارتفاع (h_p)، ۳/۵، ۵ و ۷ سانتی‌متری می‌باشد که برای شبیه‌سازی ساقه‌های سخت گیاه استفاده شده است. شکل ۱-الف استوانه‌های توزیع شده روی بستر کانال در شرایط آزمایشگاهی را نشان می‌دهد. در طول آزمایش‌ها نسبت استغراق استوانه‌ها متغیر در نظر گرفته شد. قطر استوانه‌ها (d) ثابت و برابر با ۵ میلی‌متر است. توزیع استوانه‌ها به صورت پلکانی است که در آن فواصل طولی و جانبی یکسان اما توزیع ارتفاعی کاملاً تصادفی است و برای تولید اعداد تصادفی به منظور تعیین محل هر استوانه از نرم افزار Mathematica استفاده شده است. فاصله بین استوانه‌ها و در نتیجه تراکم پوشش گیاهی در واحد سطح با استفاده از معادله (۱) محاسبه شد:

$$\lambda = n(\pi d^2/4)/Bl \quad (1)$$

در این معادله، n تعداد استوانه‌ها و l و B به ترتیب طول و عرض ناحیه پوشیده از پوشش گیاهی (متر) متغیر است. در کل سه تراکم مختلف برای ساقه‌ها در نظر گرفته شد که برابرند با ۰/۷، ۱ و ۱/۵ درصد. شکل ۱-ب و شکل ۱-پ به ترتیب تصویر پلان نحوه توزیع استوانه‌ها در کانال و

جدول ۱- متغیرهای آزمایش‌های انجام شده و محدوده تغییرات آن‌ها

پارامتر	محدوده تغییرات
دبی (Q)	۱۰-۱۸-۲۵-۳۰-۴۰ (لیتر بر ثانیه)
عدد فرود (Fr)	۰-۱
ارتفاع استوانه‌ها (H_i)	۵-۷ (سانتی‌متر)
فاصله استوانه‌ها ($l=b$)	۷-۱۱ (سانتی‌متر)
عمق جریان (H)	۱۵-۱۸-۲۲-۳۰-۳۵ (سانتی‌متر)

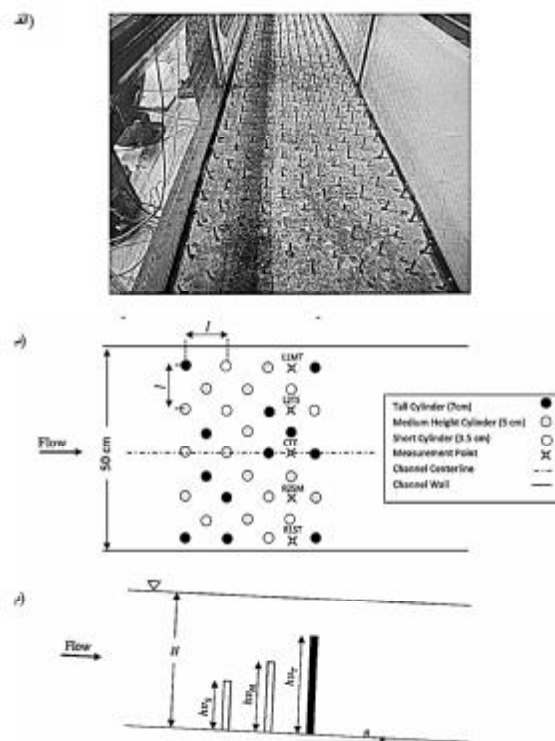
نتایج و بحث

بسیاری از محققان از جمله پوگی و همکاران (۲۰۰۴)، بر این باورند که در شرایطی که ارتفاع زبری یکنواخت باشد، سه ناحیه برای جریان وجود دارد: لایه سطحی که توزیع سرعت در این لایه در اکثر مطالعات به صورت لگاریتمی در نظر گرفته شده است، منطقه اختلاط یا لایه میانی و لایه پایینی که درون پوشش گیاهی است و معمولاً سرعت در آن یکنواخت در نظر گرفته می‌شود (شکل ۲-الف). اما همانطور که در شکل ۲-ب مشخص است، نواحی جریان در شرایط توزیع غیریکنواخت ارتفاع سیلندرها متفاوت است؛ به گونه‌ای که یک لایه سطحی، دو ناحیه یکنواخت و دو ناحیه اختلاط وجود دارد. سرعت طولی در مکان‌های مختلف برای شرایط جریان مختلف و تراکم مختلف استوانه‌ها اندازه‌گیری شد که در شکل ۱ نشان داده شده است و نحوه نامگذاری این نقاط اندازه‌گیری، در بخش قبل ذکر شد. شکل ۲-ب وضعیت کلی پروفیل سرعت طولی را در حضور پوشش گیاهی با توزیع ارتفاعی غیر یکنواخت نشان می‌دهد. همانطور که ملاحظه می‌گردد، این نمودار دارای دو نقطه عطف است که در نزدیکی بالای بالاترین و پایین‌ترین استوانه (q و o) رخ می‌دهد. همانطور که در شکل ۲-ب مشاهده می‌شود، پروفیل قائم سرعت دارای سه قسمت است که در ادامه به توضیح هر یک پرداخته شده است. برای به دست آوردن رابطه توزیع عمودی سرعت طولی، پروفیل سرعت به صورت شکل ۲-ب ساده‌سازی شد، اما تأثیر این ساده‌سازی بسیار ناچیز بوده و تأثیر چندانی بر دقت نتایج به دست آمده، ندارد.

۱- استخراج روابط

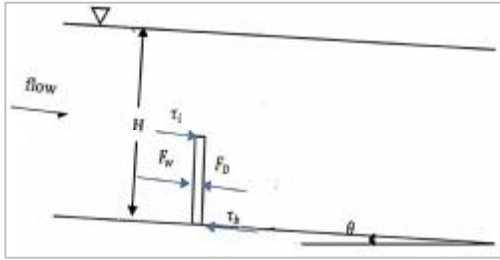
در این قسمت روابط سرعت در لایه‌های مختلف جریان در شرایط پوشش گیاهی سخت مستغرق با توزیع ارتفاعی تصادفی استخراج گردید.

طولانی‌تر مورد نیاز نبود. بر این اساس زمان مورد نیاز برای نمونه‌برداری بین ۳ تا ۵ دقیقه تعیین شد که کمترین آن برای نقطه اندازه‌گیری در سطح جریان و بیشترین زمان برای نقاط درون پوشش گیاهی و نزدیکی بستر است. دلیل بیشتر بودن زمان مورد نیاز برای نمونه‌برداری در درون لایه پوشش گیاهی و نزدیکی بستر، بالا بودن نوسانات سرعت در ناحیه وجود پوشش گیاهی در اثر بیشتر بودن اثر تلاطم جریان و نیز نزدیک بودن به دیواره و مشخصات خود سرعت‌سنج است که برای از بین رفتن خطا به مدت زمان بیشتری برای نمونه‌برداری نیاز دارد.



شکل ۱- طرح شماتیک توزیع استوانه‌ها و پارامترهای مورد استفاده، الف) استوانه‌های نصب شده روی بستر کانال، ب) تصویر پلان و آرایش استوانه‌ها و پ) تصویر جانبی

اندازه‌گیری‌ها نشان می‌دهد که میانگین سرعت در عمق جریان در طول کانال ثابت بوده و از آنجایی که عمق جریان در کانال روی مقادیر مشخص که در جدول ۱ آمده است، تنظیم می‌شود؛ بنابراین جریان را می‌توان برای کلیه آزمایش‌ها یکنواخت پایدار فرض کرد.



شکل ۳- نیروهای وارده بر استوانه‌های درون جریان

$$F_W + \tau_i = \tau_b + F_D \quad (2)$$

$$(F_W)_{(I)A} = \rho g H_{vs} S_0 (1 - \lambda) \quad (3)$$

در روابط فوق ρ چگالی جرمی جریان، g شتاب گرانشی زمین، λ تراکم پوشش گیاهی کل و S_0 شیب کف کانال است.

$$(\tau_i)_{(I)A} = \rho g (H - H_{vs}) S_0 \quad (4)$$

$$(F_D)_{(I)A} = 0.5 \rho u_{(I)A}^2 C_D a_s \quad (5)$$

H عمق جریان (m)، H_{vs} ارتفاع کوتاه‌ترین استوانه (m)، a_s سطح روبه‌روی پوشش گیاهی در واحد حجم برای استوانه‌های کوتاه $(\pi d H_{vs} / 2)$ (m²) و C_D ضریب درگ گیاهی (بی‌بعد) است. نحوه تعیین ضریب درگ در بخش بعدی توضیح داده شده است.

در مطالعه حاضر بستر فلوم صاف است و علاوه بر این برای جریان روی پوشش گیاهی، درگ ساقه در مقایسه با تنش برشی بستر غالب است (نف و گیسالبرتی، ۲۰۰۸). بنابراین، این عامل مقاومت ناچیز و قابل چشم‌پوشی است. با جایگزینی معادلات (۳) تا (۵) در معادله (۱)، سرعت ثابت در زیرلایه $VI_{(I)A}$ به‌دست می‌آید:

$$u_{(I)A} = \sqrt{\frac{2gS_0H_{vs}[(1-\lambda) + (\frac{H}{H_{vs}} - 1)]}{C_D a_s}} \quad (6)$$

• زیرلایه $VI_{(I)B}$: برای سادگی در محاسبات تغییرات سرعت در این زیرلایه به‌صورت خطی تقریب زده شده است و به‌راحتی قابل تعیین است اما برای محاسبه توزیع سرعت در این زیرلایه به سرعت زیرلایه $VI_{(II)A}$ نیاز است، به عبارت دیگر ابتدا باید سرعت در نقطه r به‌دست آید.

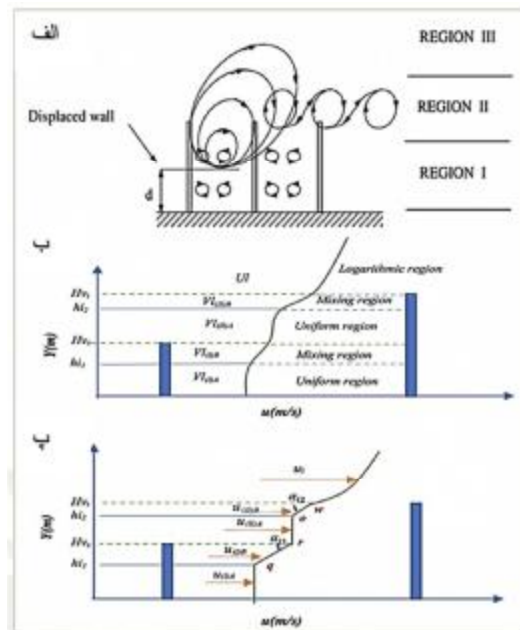
• زیرلایه $VI_{(II)A}$: برای تعیین سرعت در این زیرلایه، از رابطه مومنتم استفاده شده است. نیروهای مؤثر بر جریان در این ناحیه عبارت‌اند از:

$$(F_W)_{(II)B} = \rho g (H_{vt} - H_{vs}) S_0 (1 - (\lambda - \lambda_s)) \quad (7)$$

$$(\tau_i)_{(II)B} = \rho g (H - H_{vt}) S_0 \quad (8)$$

لایه پوشش گیاهی: همانطور که قبلاً گفته شد لایه پوشش گیاهی به دو لایه بالایی ($VI_{(II)}$) و لایه پایینی ($VI_{(I)}$) تقسیم می‌شود.

پروفیل سرعت در هر یک از این لایه‌ها دارای دو زیرلایه است که با اندیس‌های A و B مشخص شده‌اند (شکل ۲-ب). علاوه بر لایه‌های موجود در پوشش گیاهی، یک لایه نیز در بالای پوشش گیاهی وجود دارد که همان لایه بدون گیاه است. در ادامه به تعیین روابط سرعت طولی برای تمامی لایه‌ها و زیرلایه‌ها در میدان جریان پرداخته شده است. شکل ۳ نیروهای مؤثر بر استوانه قرار گرفته درون جریان را نشان می‌دهد.

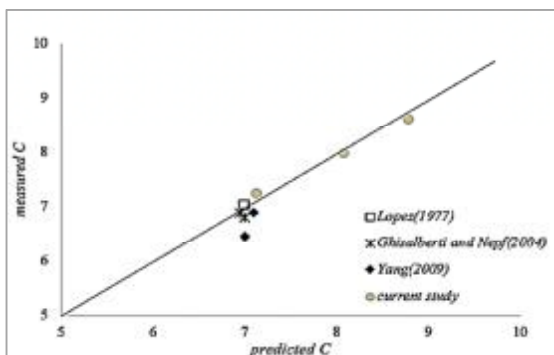


شکل ۲- توزیع قائم سرعت طولی، الف) ساختار جریان عبوری از روی پوشش گیاهی (پوگی و همکاران، ۲۰۰۹)، ب) پروفیل مشاهده شده در آزمایش‌های انجام شده و پ) تقریب خطی انجام شده روی پروفیل سرعت برای استخراج معادلات سرعت

• زیرلایه $VI_{(II)A}$: برای به‌دست آوردن سرعت در این زیرلایه از رابطه مومنتم استفاده شده است. نیروهای مؤثر بر واحد حجم جریان در ناحیه پوشش گیاهی مولفه نیروی گرانش در جهت جریان (F_W) ، تنش برشی مابین جریان و بالاترین نقطه (تاج) کوتاه‌ترین استوانه (τ_i) ، تنش برشی بستر کانال (τ_b) و نیروی درگ ناشی از پوشش گیاهی (F_D) :

انعطاف با ارتفاع یکنواخت، به تراکم پوشش گیاهی وابسته است و برای شرایطی که ضریب a' ($a' = n \cdot d$) کمتر از $5m^{-1}$ است، این ضرایب به ترتیب 0.39 و $6/1$ تا $7/2$ هستند، اما برای a' بیشتر از $5m^{-1}$ ، مقادیر این ضرایب به ترتیب 0.13 و $3/7$ تا $4/2$ است. برای تعیین C از شرایط مرزی استفاده شده است، به این معنی که سرعت در بالاترین نقطه بلندترین استوانه (تاج بلندترین استوانه) صفر است، سپس مقدار ضریب A برای نقاط دیگر تعیین شد. نتایج نشان می‌دهد که ضریب A برای شرایط آزمایشی مطالعه حاضر که در آن $a' < 5m^{-1}$ می‌باشد، برابر با 0.39 و مقدار C بین $7/24$ و $8/61$ است که به میزان تراکم گیاهی بستگی دارد.

با مقایسه مقادیر C تحقیق حاضر با مقادیر آن در مطالعه یانگ (۲۰۰۹)، می‌توان نتیجه گرفت که مقدار این ضریب تقریباً ۱۹ درصد افزایش یافته است، یعنی در مورد توزیع ارتفاع تصادفی، سرعت در لایه بدون پوشش گیاهی بیشتر از حالتی است که توزیع ارتفاع یکنواخت بوده است. شکل ۴ مقایسه مقادیر C به دست آمده از رابطه ۱۱ را با مقادیر C اندازه‌گیری شده برای مطالعه فعلی و کارهای قبلی نشان می‌دهد که شامل لوز (۱۹۹۷)، گیسالبرتی و نف (۲۰۰۴) و یانگ (۲۰۰۹) است که هر سه برای توزیع یکنواخت پوشش گیاهی هستند. همانطور که در شکل ۳ نشان داده شده است، تطابق بالایی بین مقادیر C از رابطه ۱۰ با مقادیر به دست آمده از داده‌های آزمایشگاهی وجود دارد.



شکل ۴- مقایسه مقادیر C آزمایشگاهی و پیش‌بینی شده از معادله (۱۱)

۲- ضریب درگ

ضریب درگ گیاهی یکی از مهم‌ترین پارامترهای مقاومت برای شناخت جریان و همچنین استفاده از معادلات

$$(F_D)_{(II)B} = 0.5\rho u_{(II)A}^2 C_D (a - a_s) \quad (9)$$

H_{vt} ارتفاع بلندترین استوانه λ_s ، (m) تراکم پوشش گیاهی کوتاه، a سطح روبه‌روی پوشش گیاهی در واحد حجم کل $(\pi n d H_{vt} / 2)$ است.

حال با جایگزینی معادلات (۷)، (۸) و (۹) در معادله (۱) و استخراج سرعت از این معادله، داریم:

$$u_{(II)A} = \sqrt{\frac{2gS_0 H_{vt} [1 - \frac{H_{vs}}{H_{vt}}] (1 - (\lambda - \lambda_s)) + (\frac{H}{H_{vt}} - 1)}{C_D (a - a_s)}} \quad (10)$$

• زیرلایه $VL_{(II)B}$: از آنجایی که حداکثر سرعت در این ناحیه شرط مرزی برای لایه U_L (نقطه w) و حداقل سرعت در این زیرلایه برابر سرعت ثابت در زیرلایه $VL_{(II)A}$ که در مرحله قبل تعیین شده است، توزیع سرعت با محاسبه مقدار سرعت در نقطه w مشخص می‌شود.

• لایه بدون پوشش گیاهی: این لایه در بالای لایه گیاهی قرار دارد و تعداد زیادی از مطالعات گذشته از جمله استفان و گوکنج (۲۰۰۲)، پوگی و همکاران (۲۰۰۴) و لاهور و همکاران (۲۰۰۸) نشان داده‌اند که توزیع سرعت در این لایه به دلیل تلاطم جریان از قانون توزیع لگاریتمی پیروی می‌کند. در این تحقیق، همانطور که داده‌های تجربی نشان می‌دهد، توزیع سرعت در لایه بالایی پوشش گیاهی لگاریتمی در نظر گرفته شده است، اما با توجه به شرایط خاص پوشش گیاهی و توزیع تصادفی ارتفاع استوانه‌ها، ضرایب رابطه لگاریتمی باید اصلاح شود:

$$\frac{u}{u_*} = \frac{1}{A} \ln\left(\frac{z}{H_{vt}}\right) + C \quad (11)$$

A و C ضرایب ثابتی هستند که با در نظر گرفتن شرایط مرزی محاسبه می‌شود. در انتهای لایه دوم یعنی نقطه‌ای که $H_{vt} = z$ است، ضریب C برابر با مقدار عددی سرعت در این نقطه است. u_* سرعت برشی در فصل مشترک جریان لایه بدون پوشش گیاهی و لایه پوشش گیاهی است:

$$u_* = \sqrt{-u'w'_{max}} \quad (12)$$

$-u'w'_{max}$ بیشترین مقدار تنش رینولدزی است. ضرایب A و C معمولاً به صورت تجربی بر اساس مشاهدات آزمایشگاهی تعیین می‌شوند. یانگ (۲۰۰۹) نشان داده است که این ضرایب، برای استوانه‌های سخت غیرقابل

۳- تحلیل ابعادی و تاثیر پارامترها روی توزیع

سرعت

پارامترهای موثر در بررسی مقاومت جریان در شرایط وجود پوشش گیاهی به شکل زیر است:

$$(H, h_v, C_D, \mu, g, S_0, d, n, l, b, B, U, U_*, \rho) = 0 \quad (15)$$

در معادله فوق U سرعت متوسط در عمق جریان (m/s), B عرض کانال (m), l فاصله طولی استوانه‌ها (m), b فاصله عرضی استوانه‌ها (m), d قطر استوانه‌ها (m), S_0 شیب کف کانال، g شتاب ثقل (m/s^2), μ ویسکوزیته سیال (kg/ms), ρ دانسیته (kg/m^3), n تعداد استوانه‌ها، H عمق جریان (m), h_v ارتفاع پوشش گیاهی (m), U_* سرعت برشی (m/s) و C_D ضریب درگ پوشش گیاهی است.

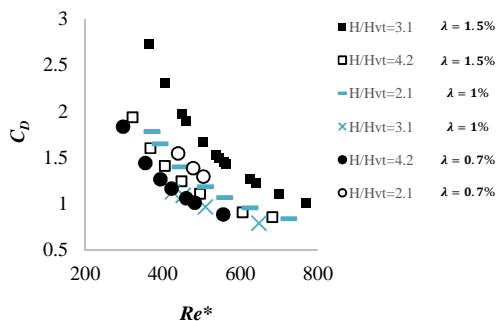
حال با استفاده از روش π باکینگهام و با انتخاب پارامترهای H , ρ و U به عنوان متغیرهای تکراری و محاسبه سرعت متوسط جریان معادله (۱۵) به صورت زیر به دست می‌آید:

$$f\left(\frac{U}{\sqrt{gH}}, \frac{\rho U H}{\mu}, \frac{H}{h_v}, \frac{U}{U_*}, \frac{l}{H}, \frac{d}{H}, \frac{b}{H}, \frac{B}{H}, C_D, n, S_0\right) = 0 \quad (16)$$

با حذف پارامترهای غیرموثر و ثابت از جمله شیب بستر و فاصله طولی و عرضی استوانه‌ها (فاصله طولی و عرضی یکسان هستند) و قطر زبری‌ها در مطالعه حاضر، معادله سرعت جریان برحسب پارامترهای بی‌بعد به صورت زیر به دست آمد:

$$\frac{U}{U_*} = f\left(Fr, Re, \lambda, C_D, \frac{H}{h_{vt}}\right) \quad (17)$$

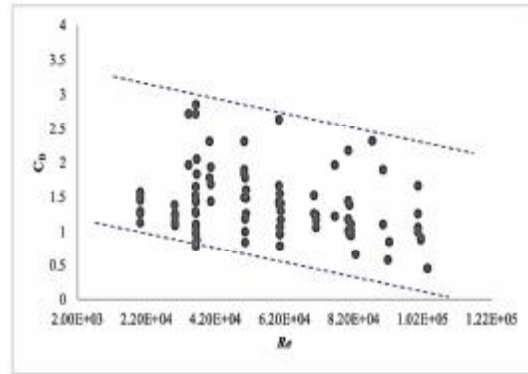
Fr عدد فرود جریان است.



شکل ۶- تغییرات C_D با Re^* برای مقادیر مختلف H/h_{vt} و λ

سرعت ارائه شده است. شکل ۵ تغییرات C_D را با عدد رینولدز جریان نشان می‌دهد که برابر است با $U'H/v$ و در آن U' متوسط سرعت جریان عبوری از روی پوشش گیاهی است:

$$U' = Q(1 - \lambda)/(BH) \quad (13)$$



شکل ۵- تغییرات ضریب درگ به ازای عدد رینولدز جریان

تراکم کل پوشش گیاهی است. همانطور که مشاهده می‌شود، روند کل تغییر ضریب درگ، به ازای عدد رینولدز، کاهشی است، یعنی با افزایش عدد رینولدز، ضریب درگ جریان کاهش می‌یابد.

برای تعیین ضریب درگ گیاهی، عدد رینولدز ویژه بر اساس سرعت در لایه پوشش گیاهی نزدیک بستر، معرفی می‌گردد که برابر است با $Re^* = u_{(l)A}d/v$. برای استفاده از این رابطه کافی است سرعت از بستر جریان تا زمانی که تقریباً یک مقدار ثابت شود، اندازه‌گیری و میانگین‌گیری شود، یعنی از نزدیک بستر تا بالای کوتاه‌ترین استوانه. شکل ۶ تغییر ضریب درگ گیاهی را با عدد رینولدز ویژه برای تراکم‌های مختلف پوشش گیاهی و عمق‌های مختلف جریان یا به عبارتی نسبت استغراق‌های مختلف نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود، روند تغییر C_D با افزایش عدد رینولدز ویژه، کاهشی است و همچنین ضریب درگ با افزایش میزان تراکم استوانه‌ها کاهش می‌یابد. یک رابطه تجربی بین پارامتر C_D و پارامترهای موثر که عبارتند از Re^* , λ_T و H/H_{vt} به صورت زیر استخراج شده است:

$$C_D = 0.552\lambda_T^{2.360} - 0.33Re^{*-0.421} 0.325\left(\frac{H}{H_{vt}}\right) 0.686 \quad (14)$$

H/H_{vt} نسبت استغراق برای بلندترین استوانه است.

سرعت در این ناحیه به یکدیگر نزدیکترند. در شکل‌های ۷-ب و ۷-پ، که به ترتیب مربوط به نقاطی هستند که استوانه دوم کوتاهتر و بلندتر از استوانه قبلی است هم این نتیجه قابل مشاهده است. نکته مهم دیگری که در شکل ۷ مشخص است، محل نقاط عطف است که برای دبی‌های مختلف تقریباً یکسان است؛ بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که تغییر در اعداد فرود و رینولدز تاثیری بر موقعیت نقاط عطف ندارد.

اثر تراکم پوشش گیاهی

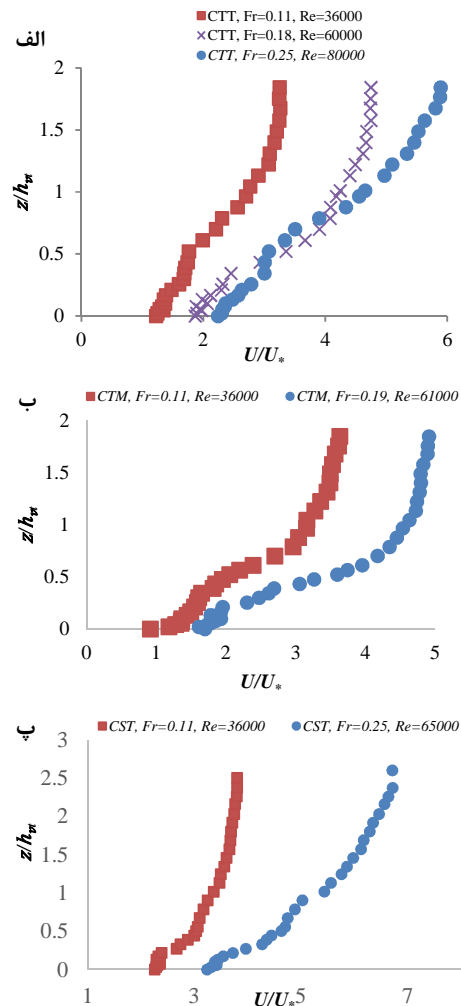
شکل ۸ تاثیر تراکم پوشش گیاهی را روی تغییرات سرعت برای نقاط مختلف و تراکم‌های متفاوت پوشش گیاهی نشان می‌دهد. افزایش تراکم ساقه‌ها سرعت جریان در لایه پوشش گیاهی را کاهش می‌دهد اما در لایه بدون گیاه این عامل سرعت جریان را افزایش می‌دهد. بنابراین در شکل ۸ می‌توان نتیجه گرفت که انحنای پروفیل سرعت با کاهش فاصله بین استوانه‌ها افزایش یافته و همچنین نقاط عطف نمودارها اندکی به سمت پایین (بستر) حرکت می‌کنند و در نتیجه شیب پروفایل سرعت در زیر لایه‌های A و B کاهش می‌یابد. دلیل کاهش سرعت در لایه پوشش گیاهی، کاهش فاصله بین ساقه‌ای است که مانع از عبور جریان شده و مقاومت در برابر جریان را افزایش می‌دهد. همچنین به دلیل کاهش سرعت در لایه پوشش گیاهی و در نتیجه کاهش دبی عبوری از این لایه، قسمت بیشتری از دبی جریان می‌بایست از لایه بالایی عبور کند و برای این منظور سرعت جریان در لایه فوقانی افزایش می‌یابد.

اثر نسبت استغراق پوشش گیاهی

شکل ۹ تاثیر پارامتر استغراق $\left(\frac{H}{h_{vt}}\right)$ را روی توزیع عمودی سرعت جریان نشان می‌دهد. به ازای یک دبی ثابت و مشخص، افزایش عمق جریان یا به عبارت دیگر افزایش میزان استغراق استوانه‌ها باعث کاهش سرعت جریان هم در لایه بالایی بدون گیاه و هم در لایه پوشش گیاهی می‌شود؛ اما میزان تاثیر افزایش استغراق روی کاهش سرعت در لایه‌های مختلف جریان متفاوت است. به طوری که افزایش ۳۰ درصدی نسبت استغراق باعث کاهش ۱۰ درصدی سرعت در لایه پوشش گیاهی و کاهش ۲۵ درصدی سرعت جریان در لایه بالای پوشش گیاهی می‌شود. نکته دیگری که در شکل ۹ مشاهده

اثر عدد فرود و عدد رینولدز جریان

توزیع عمودی سرعت طولی بی‌بعد شده برای اعداد فرود و رینولدز مختلف در مکان‌های مختلف اندازه‌گیری شد تا اثر این متغیر بر پروفیل‌های سرعت بررسی شود. شکل ۷ نمونه‌هایی از این پروفیل‌ها را نشان می‌دهد. شکل ۷-الف توزیع سرعت را برای ۴ عدد فرود و ۴ عدد رینولدز مختلف در شرایطی که نقطه اندازه‌گیری بین دو سیلندر با ارتفاع یکسان قرار دارد، نشان می‌دهد.

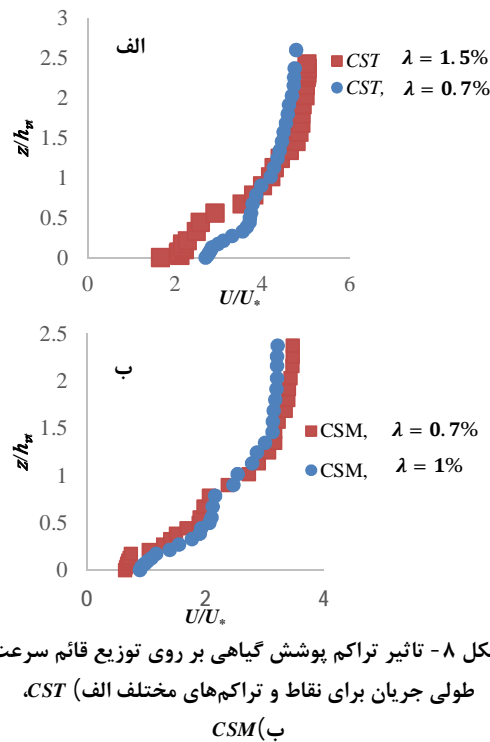


شکل ۷- توزیع قائم نسبت بدون بعد سرعت طولی برای فرودهای مختلف و نقاط مختلف، الف) CTT ، ب) CTM و پ) CST

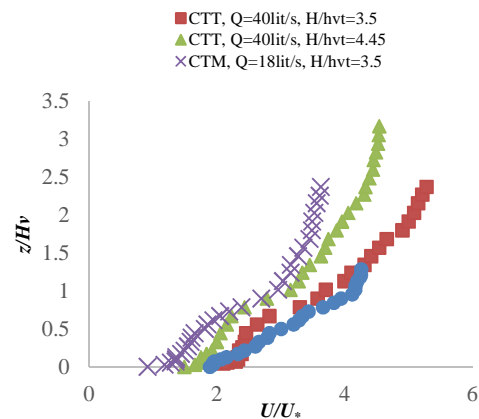
همانطور که مشاهده می‌شود افزایش عدد فرود و نیز افزایش رینولدز جریان باعث افزایش سرعت جریان می‌شود؛ چرا که هر دوی این اعداد به دلیل افزایش دبی جریان افزایش یافته‌اند. نکته قابل توجه دیگر این است که در اعداد رینولدز بالا این تاثیر کمتر بوده و پروفیل‌های

یا منظم است، در تحقیق حاضر پوشش گیاهی غیر یکنواخت و تصادفی در نظر گرفته شده است. میدان جریان به لایه بالایی (لایه بدون پوشش گیاهی، U_I)، لایه پوشش گیاهی بالایی (از بالای کوتاه‌ترین استوانه تا بالای بالاترین، $V_{I(II)}$)، لایه پوشش گیاهی پایین (از بستر تا بالای کوتاه‌ترین استوانه، $V_{I(I)}$) تقسیم می‌شوند و هر یک از لایه‌های گیاهی دارای دو زیرلایه، یکنواخت و منطقه اختلاط هستند. برای به‌دست آوردن معادلات توزیع سرعت طولی، ابتدا ساده‌سازی انجام شد و سپس روابط با استفاده از رابطه مومنوم در لایه‌های دارای پوشش گیاهی و قانون لگاریتمی در لایه‌های بدون پوشش به‌صورت تحلیلی به‌دست آمد. پروفیل سرعت استخراج شده در این تحقیق، برخلاف توزیع یکنواخت، دارای دو نقطه عطف است که موقعیت آن‌ها به تراکم پوشش گیاهی بستگی دارد. بررسی روند تغییرات ضریب درگ گیاهی در برابر عدد رینولدز نشان می‌دهد که افزایش عدد رینولدز جریان با کاهش C_D همراه است. برای تعیین C_D ، یک عدد رینولدز گیاهی ویژه (Re^*) معرفی شده است که با افزایش این عدد رینولدز، ضریب درگ کاهش می‌یابد. یک رابطه تجربی با دقت قابل قبول بین C_D و پارامترهای موثر روی آن ارائه شده است. تأثیر پارامترهای بی‌بعد مختلف که از طریق تحلیل ابعادی استخراج شدند، روی سرعت جریان بررسی شد که نتایج نشان می‌دهد با افزایش اعداد رینولدز و فرود جریان، سرعت در تمام لایه‌های دارای پوشش گیاهی و بدون گیاه افزایش می‌یابد، اما تغییر این اعداد تأثیری بر موقعیت نقاط عطف پروفیل سرعت ندارد. با افزایش تراکم پوشش گیاهی، سرعت جریان در لایه‌های گیاهی و لایه بالایی به ترتیب کاهش و افزایش می‌یابد و نقاط عطف به سمت پایین جابجا می‌شوند و در نتیجه انحنا منحنی افزایش می‌یابد. استغراق پوشش گیاهی پارامتر دیگری است که در این مطالعه بررسی شده است. با افزایش میزان استغراق استوانه‌ها به ازای دبی ثابت جریان، سرعت در هر سه لایه کاهش می‌یابد اما میزان تأثیر افزایش استغراق روی کاهش سرعت در لایه‌های جریان متفاوت است؛ به‌گونه‌ای که برای مثال با افزایش ۳۰ درصدی میزان استغراق، سرعت به‌طور متوسط در لایه پوشش گیاهی ۱۰ درصد اما در لایه بالایی ۲۵ درصد کاهش نشان می‌دهد.

می‌شود تأثیر ناچیز میزان استغراق روی موقعیت نقطه عطف نمودارهای سرعت است.



شکل ۸- تأثیر تراکم پوشش گیاهی بر روی توزیع قائم سرعت طولی جریان برای نقاط و تراکم‌های مختلف الف) CST ، ب) CSM



شکل ۹- تأثیر پارامتر استغراق پوشش گیاهی بر توزیع قائم سرعت طولی جریان

نتیجه‌گیری

مطالعه حاضر به بررسی ویژگی‌های جریان عبوری از روی پوشش گیاهی سخت غیرقابل انعطاف به‌صورت آزمایشگاهی می‌پردازد که توسط استوانه‌های ساخته شده از فولاد ضد زنگ شبیه‌سازی شده است. برخلاف مطالعات رایج که در آن‌ها توزیع ارتفاعی پوشش گیاهی یکنواخت و

منابع

- vegetation density on canopy sub-layer turbulence. *Bound-Layer Meteorol.* 111(3): 565-587.
15. Shi H. Liang X. Huai, W. and Wang Y. 2019. Predicting the bulk average velocity of open-channel flow with submerged rigid vegetation. *Journal of Hydrology.* 572: 213-225.
 16. Stephan U. Gutknecht D. 2002. Hydraulic resistance of submerged flexible vegetation. *J Hydrology.* 269(1): 27-43.
 17. Tang X. Rahimi H. Guan Y. and Wang Y. 2021. Hydraulic characteristics of open-channel flow with partially-placed double layer rigid vegetation. *Environmental Fluid Mechanics.* 21: 317-342.
 18. Temple D. M. 1986. Velocity distribution coefficients for grass-lined channels. *J. Hydraulic Engineering.* 112(3): 193-205.
 19. Yang W. 2009. Experimental study of turbulent open-channel flows with submerged vegetation. PhD Thesis. Yonsei University, Korea.
 20. Wu F. S. 2008. Characteristics of flow resistance in open channels with non-submerged rigid vegetation. *Journal of Hydrodynamics, Ser. B.* 20(2): 239-245.
1. عدیوی ا. و فتحی مقدم م. ۱۳۹۳. تاثیر پوشش گیاهی بر میزان ضریب کشش گروهی درختان و مقاومت پوشش در مقابل امواج ساحلی. *مجله علوم مهندسی و آبیاری (مجله علمی کشاورزی).* ۳۸(۲): ۱۰۳-۱۱۲.
 2. Carollo F. G. Ferro VITO. and Termini D. 2002. Flow velocity measurements in vegetated channels. *J Hydraulic Engineering.* 128(7): 664-673.
 3. Cheng N. S. 2015. Single-layer model for average flow velocity with submerged rigid cylinders. *Journal of Hydraulic Engineering.* 141(10): 06015012.
 4. D'Ippolito A. Lauria A. Alfonsi, G. and Calomino F. 2019. Investigation of flow resistance exerted by rigid emergent vegetation in open channel. *Acta Geophysica.* 67: 971-986.
 5. Fathi-Moghadam M. Davoudi L. and Motamedi-Nezhad A. 2018. Modeling of solitary breaking wave force absorption by coastal trees. *Ocean Engineering.* 169: 87-98.
 6. Ghisalberti M. and Nepf H. M. 2004. The limited growth of vegetated shear layers. *Water Resources Research.* 40(7).
 7. Hu Y, Huai W, Han J. 2013. Analytical solution for vertical profile of streamwise velocity in open-channel flow with submerged vegetation. *Environmental fluid mechanics.* 13(4): 389-402.
 8. Huthoff F. Augustijn D. C. and Hulscher S. J. 2007. Analytical solution of the depth-averaged flow velocity in case of submerged rigid cylindrical vegetation. *Water resources research.* 43(6).
 9. Järvelä J. 2005. Effect of submerged flexible vegetation on flow structure and resistance. *Journal of hydrology.* 307(1-4): 233-241.
 10. Luhar M, Rominger J, Nepf H. 2008. Interaction between flow, transport and vegetation spatial structure. *J Environmental Fluid Mechanics.* 8(5-6):423-439.
 11. Lopez F. 1997. Open channel flow with roughness elements of different spanwise aspect ratios: Turbulent structure and numerical modeling. *PhD Thesis*, University of Illinois, Urbana IL.
 12. Nepf H. and Ghisalberti M. 2008. Flow and transport in channels with submerged vegetation. *Acta Geophysica.* 56(3): 753-777.
 13. Nepf H. M. Mugnier C. G. and Zavistoski R. A. 1997. The effects of vegetation on longitudinal dispersion. *Estuarine Coastal and Shelf Science.* 44(6): 675-684.
 14. Poggi D. Porporato A. Ridolfi L. Albertson J. D. and Katul G. G. 2004. The effect of