

ساختار جریان بر روی توده گیاهی مستغرق در فلوم آزمایشگاهی

مهسا جهادی¹، حسین افضلی مهر^{2*}

1- دانشجوی دکتری مهندسی آب، دانشگاه صنعتی اصفهان

2- استاد دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران

*hafzali4@gmail.com

چکیده- توده گیاهی مستغرق، ساختار جریان را به طور قابل ملاحظه‌ای تغییر می‌دهد. شناخت ساختار جریان متأثر از توده گیاهی مستغرق، امری ضروری برای مهندسان رودخانه است. تئوری‌های موجود فرایند اختلاط می‌توانند برای بررسی تعامل توده گیاهی و جریان کمک نمایند؛ هرچند یکی از ویژگی‌های اساسی توده گیاهی با طول محدود، تشکیل جریان‌های در حال توسعه بر روی آن است که در تئوری لایه اختلاط لحاظ نشده است. از این‌رو ضروری است مفهوم دینامیک مکانی جریان، با تئوری لایه اختلاط برای مطالعه ساختار جریان بر روی توده گیاهی با یکدیگر ادغام شوند. در این پژوهش، برای کاربرد تئوری لایه اختلاط در جریان‌های در حال توسعه، به مطالعه آزمایشگاهی بر روی یک توده گیاهی مصنوعی مستغرق در دو دبی 29 و 21 لیتر بر ثانیه پرداخته می‌شود. نتایج نشان می‌دهند که ضخامت لایه اختلاط بر روی توده گیاهی با دو ناحیه در حال توسعه و کاملاً توسعه‌یافته، روند لگاریتمی داشته و ضریب پخشیدگی بر روی توده گیاهی مورد مطالعه به دلیل ارتفاع کم پوشش و عدم رشد آزادانه ضخامت لایه اختلاط، کمتر از دامنه پیشنهادی توسط سایر پژوهشگران است. همچنین تطابق قابل قبولی بین داده‌های اندازه‌گیری شده و برآورد شده لایه اختلاط روی توده گیاهی مشاهده گردید. توزیع محدب تنش رینولدز بر روی توده گیاهی در جریان در حال توسعه، ضرورت توجه بیشتر در برآورد ضریب زبری و انتقال رسوب را ایجاب می‌کند.

کلید واژگان: تئوری اختلاط، جریان‌های در حال توسعه، توده گیاهی مستغرق، توزیع محدب تنش رینولدز.

1- مقدمه

ضریب اصلاحی مومنتم، انرژی جنبشی آشفتنگی و ضریب اختلاط عرضی در جریان با حضور پوشش گیاهی است. Aberle and Jarvela (2015) بیان کردند که اگرچه توده‌های گیاهی، موضوع پژوهش‌های زیست محیطی گوناگونی بوده‌اند، اما تأثیر آن‌ها بر ساختار جریان به ندرت بررسی شده است. Marjoribanks et al. (2016) گزارش کردند که تعامل جریان و توده گیاهی نیازمند تحقیق بر روی تأثیر پوشش گیاهی بر دینامیک زمانی و مکانی جریان است. مطالعه کمی تعامل پوشش گیاهی و جریان از میانه قرن بیستم مورد توجه پژوهشگران زیادی قرار گرفته است. در این راستا برخی محققان بر اساس بررسی‌های آزمایشگاهی

پوشش گیاهی در رودخانه‌ها که عمدتاً به صورت توده گیاهی با طول و عرض محدود مشاهده می‌شود، بر سیستم رودخانه‌ای تأثیر قابل ملاحظه‌ای دارد. به طوری که حضور آن در مسیر، مانع از انتقال نرمال جریان شده و در نتیجه هیدرودینامیک جریان و توزیع مؤلفه‌های تانسور تنش را تغییر می‌دهد. علاوه بر این توده گیاهی در حفظ و در برخی موارد بهبود کیفیت آب رودخانه‌ها، ضریب زبری و انتقال رسوب مؤثر است. حمیدی فر و همکاران (1394) و Hamidifar et al. (2016) پوشش گیاهی را عاملی تأثیرگذار بر هیدرولیک جریان و انتقال آلاینده در آبراهه‌ها دانستند. مطالعه آزمایشگاهی آن‌ها نشان‌دهنده افزایش

می‌گردد، h عمق کانال و S_c حد بحرانی S است که به توازن بین تولید و اتلاف آشفتگی وابسته است. مطالعه‌های آزمایشگاهی نشان می‌دهد که مقدار این ضریب از 0/06 تا 0/12 متغیر است (Chu and Babarutsi, 1988).

علاوه بر میانگین سرعت، تنش رینولدز که یکی از خصوصیت‌های مهم جریان آشفته است، نیز به صورت یک تابع کسینوس‌هایپربولیک برای لایه اختلاط ارائه می‌گردد (Sukhodolov and Sukhodolova, 2012):

$$\frac{u'w'}{\Delta u^2} = \frac{\vartheta_t}{\delta \Delta u} \frac{1}{\cosh^2 \eta}, \quad \eta = \frac{2(z-z_c)}{\delta} \quad (5)$$

در معادله فوق، ϑ_t لزجت گردابی است که به صورت رابطه (6) تعریف می‌شود:

$$\vartheta_t = \gamma \delta \Delta u \quad (6)$$

γ یک ضریب تجربی برابر 0/01 می‌باشد (Pope, 2000; Sukhodolov et al., 2010; Sukhodolov and Sukhodolova, 2010).

لازم به ذکر است که در معادله‌های فوق، جریان در حال توسعه بر روی توده گیاهی در نظر گرفته نشده است، به طوری که (Sukhodolov and Sukhodolova, 2006).

(Sukhodolova and Sukhodolov, 2012) با بررسی دینامیک جریان بر روی توده گیاهی مستغرق در رودخانه گزارش کردند که یکی از ویژگی‌های اصلی توده گیاهی، عدم برقراری شرایط جریان یکنواخت به دلیل توسعه لایه مرزی جدید و لایه برشی بر روی آن است که در تئوری لایه اختلاط در نظر گرفته نشده است. به طور مشابه (Sinsicalchi et al., 2012) با مطالعه آزمایشگاهی بر روی توده گیاهی استنتاج کردند که تأثیر تبدیل انرژی از میانگین سرعت به جریان آشفته در ابتدای توده گیاهی، در تئوری لایه اختلاط متعارف لحاظ نشده است. بنابراین (Sukhodolov, Sukhodolova and Sukhodolov, 2012)

(Sukhodolova and Sukhodolov, 2012) با در نظر گرفتن جریان‌های در حال توسعه بر روی توده گیاهی، تئوری لایه اختلاط را بسط دادند. این پژوهشگران با در نظر گرفتن جریان‌های در حال توسعه بر روی توده گیاهی، معادله‌های (7) و (9) را به ترتیب برای جریان داخل پوشش گیاهی در مجاورت بستر و در نزدیکی سطح آب از معادله رینولدز استخراج نمودند. به منظور در نظر گرفتن تأثیر جریان‌های در حال توسعه بر روی توده گیاهی در تئوری لایه اختلاط،

نشان دادند که جریان در داخل و روی پوشش گیاهی، به لایه اختلاط شباهت بیشتری نسبت به جریان لایه مرزی دارد؛ به طوری که پروفیل سرعت در لایه اختلاط مشابه پروفیل سرعت بر روی پوشش گیاهی مستغرق از دو سرعت مختلف و یک نقطه انحنا معرف ناپایداری کلوین هلمهولتز تشکیل شده است (Aberle and Jarvela, 2015; Carollo et al., 2002; Ghisalberti and Nepf, 2002; Marjoribanks et al., 2016; Michalke, 1965).

میانگین پروفیل سرعت در لایه اختلاط به صورت تابع تانژانت‌هایپربولیک (1) بیان می‌گردد (Michalke, 1965).

$$\frac{u - u_c}{\Delta u} = 0.5 \tanh \frac{2(z - z_c)}{\delta} \quad (1)$$

در این معادله u_c سرعت جابه‌جایی و برابر $(u_1 + u_2)/2$ و Δu اختلاف سرعت برابر $(u_1 - u_2)$ ، u_1 و u_2 سرعت جریان در ناحیه با سرعت کمتر و بیشتر به ترتیب در داخل پوشش گیاهی و روی آن، δ ضخامت لایه اختلاط، z_c موقعیت مرکز لایه اختلاط، z فاصله عمودی از بستر کانال و u سرعت در هر عمق از بستر (z) می‌باشد. در تئوری لایه اختلاط، سرعت و مقیاس طول به صورت رابطه (2) به یکدیگر مرتبط می‌گردند (Pope, 2000; Sukhodolova and Sukhodolov, 2012):

$$\frac{u_c \cdot d\delta}{\Delta u \cdot dx} = \alpha \quad (2)$$

در این رابطه α ضریب پراکنش است. برخی پژوهشگران بر اساس مطالعه آزمایشگاهی دامنه 0/06 تا 0/12 را برای این ضریب پیشنهاد نمودند (Pope, 2000; Sukhodolova and Sukhodolov, 2012) در حالی که (Chu and Babarutsi, 1988) رابطه زیر را برای برآورد این ضریب در جریان‌های کم عمق ارائه کردند:

$$\alpha = \alpha_0 \left(1 - \frac{S}{S_c}\right) \quad \text{اگر } S < S_c$$

$$\alpha = 0 \quad \text{اگر } S > S_c \quad (3)$$

در این رابطه، α_0 حدود 0/09 است و S تأثیر زبری بستر بر توسعه لایه اختلاط را منعکس می‌کند و به صورت رابطه (4) تعریف می‌گردد:

$$S = \frac{\overline{C_D} \delta U_c}{2h \Delta U} \quad (4)$$

در این معادله، $\overline{C_D}$ میانگین ضریب دراگ جریان با سرعت کم داخل پوشش گیاهی و ضریب دراگ جریان با سرعت بیشتر در روی پوشش گیاهی است که از رابطه $\frac{2\tau}{\rho U^2}$ برآورد

بستری از جنس پلاکسی گلاس در دو دبی 21 و 29 لیتر بر ثانیه صورت گرفت. آب در مدار بسته‌ای از منبع اصلی به مخزن کوچک ابتدای فلوم پمپاژ شده و در آنجا با عبور از یک آرام‌کننده وارد فلوم می‌شود. دبی جریان توسط یک دبی‌سنج دیجیتال اندازه‌گیری می‌گردد. عمق مناسب برای کلیه آزمایش‌ها 17 سانتی‌متر انتخاب گردید که برای ثابت نگه‌داشتن آن از یک دریچه متحرک در انتهای فلوم آزمایشگاهی استفاده شد. (Graf and Altinkar (1998 نشان دادند که هر گاه نسبت عرض کانال (W) به عمق جریان (h) کمتر از 5 باشد، جریان‌های ثانویه نقش فعالی در ساختار جریان کانال‌های باز، ایفا خواهند کرد. بر این اساس برای کاهش تأثیر جریان‌های ثانویه در تمام آزمایش‌ها از نسبت $W/h = 5/3$ استفاده گردید. ویژگی‌های هیدرولیکی آزمایش‌های صورت گرفته مطابق جدول 1 است.

در جدول 1، Q دبی، u سرعت متوسط، R شعاع هیدرولیکی، Fr عدد فرود و Re عدد رینولدز می‌باشد. از چمن مصنوعی به عنوان توده گیاهی به صورت مستطیلی به طول 4/6 متر و عرض 0/26 متر در فاصله 8/95 متر از ابتدای فلوم استفاده گردید. توده گیاهی در محور مرکزی منطبق بر محور مرکزی فلوم قرار داده شد (شکل 1). بستر فلوم افقی و ارتفاع توده گیاهی 3 سانتی-متر می‌باشد. به منظور اندازه‌گیری تراکم پوشش گیاهی قطر متوسط ساقه منفرد (d) و متوسط فاصله بین دو ساقه (ΔS) در واحد سطح مشخص به صورت دستی محاسبه گردید، به طوری که تراکم توده گیاهی بر اساس شاخص سطح پیشانی توده گیاهی در واحد سطح که توسط رابطه (11) ارایه می‌شود، برابر 1/3 است، که براساس طبقه‌بندی (Nepf (2012)، پوشش گیاهی مورد استفاده متراکم محسوب می‌شود.

$$ah_p = \frac{d \cdot h_p}{\Delta S^2} \quad (11)$$

جدول 1 ویژگی‌های هیدرولیکی آزمایش‌های انجام شده

Q (lit/s)	h (cm)	W (cm)	u (cm/s)	R (cm)	Fr	Re
29	17	90	18/95	12/3	0/15	23387
21	17	90	13/73	12/3	0/11	16935

معادله‌های (7) و (9) بایستی با معادله (2) ادغام گردند.

$$\bar{u}_{1e}^2 = \bar{u}_{1d}^2 + (\bar{u}_{o1} - \bar{u}_{1d}^2) \exp[-(C_D a)_1 x] \quad (7)$$

$$\bar{u}_{1d} = \sqrt{\frac{2g i_0}{(C_D a)_1}} \quad (8)$$

$$u_{2e}^2 = u_{o2}^2 + 2g i_0 x \quad (9)$$

\bar{u}_{1e} میانگین سرعت در داخل پوشش گیاهی و مجاور بستر در ناحیه در حال توسعه \bar{u}_{o1} سرعت نزدیک‌شونده به توده گیاهی در مجاورت بستر، x فاصله از ابتدای توده گیاهی، a سطح پیشانی پوشش گیاهی، C_D ضریب دراگ، $(C_D a)_1$ میانگین این ضریب در لایه مجاور بستر و داخل پوشش گیاهی و \bar{u}_{1d} میانگین سرعت در داخل پوشش گیاهی، نزدیک بستر در ناحیه کاملاً توسعه یافته است (Sukhodolova and Sukhodolov, 2012). نتیجه‌های بدست آمده توسط مدل ارائه شده توسط این محققان، دارای تطابق خوبی با داده‌های آزمایشگاهی می‌باشد. علاوه بر این، این پژوهشگران به منظور تخمین ضخامت لایه اختلاط با استفاده از آنالیز ابعادی رابطه تجربی (10) را به جای رابطه (2) بر روی توده گیاهی پیشنهاد کردند (Sukhodolova and Sukhodolov, 2012):

$$\frac{\delta}{h} = A_1 \cdot \ln(C_D \cdot a \cdot x) + A_2 \quad (10)$$

در این معادله A_1 و A_2 ضرایب تجربی هستند (Sukhodolova and Sukhodolov, 2012).

پوشش گیاهی به دو صورت پوشش گیاهی نیمه مستغرق (تنها بخشی از پوشش گیاهی زیر آب قرار دارد) و پوشش گیاهی مستغرق (کاملاً زیر سطح آب قرار دارد) تقسیم-بندی می‌گردد. در این مقاله فقط حالت مستغرق برای درک ساختار جریان بر روی یک توده گیاهی منفرد مورد بررسی قرار خواهد گرفت. بر این اساس هدف این پژوهش، شناخت عمیق‌تر از دینامیک مکانی لایه اختلاط بر روی توده گیاهی مستغرق و درک کاربرد مدل لایه اختلاط با در نظر گرفتن معادله‌های جریان‌های در حال توسعه بر روی توده گیاهی می‌باشد.

2- مواد و روش‌ها

دو آزمایش در یک فلوم مستطیلی به طول 15/5 متر، عرض 90 سانتی‌متر، ارتفاع 60 سانتی‌متر، با دیواره‌ها و

دستگاه سرعت‌سنج صوتی داپلر¹ ساخت شرکت نور تک² برای اندازه‌گیری مؤلفه‌های سه بعدی سرعت، استفاده گردید. این سرعت‌سنج بر روی یک چهار چوب محرک که به آسانی در راستای طولی و عرضی فلوم قابلیت حرکت دارد، نصب گردید. اندازه‌گیری سرعت در هر نقطه با فرکانس نمونه‌برداری 200 هرتز و زمان نمونه‌برداری 120 ثانیه (معادل 24000 داده اندازه‌گیری سرعت لحظه‌ای) در هر نقطه صورت پذیرفت تا بتوان پس از فیلتر کردن داده‌ها و حذف داده‌های نامناسب، تعداد کافی داده برای تحلیل ساختار جریان آشفته در دسترس داشت. نسبت سیگنال به نویز³ و ضریب همبستگی داده‌های سرعت در تمام آزمایش‌ها به ترتیب بیشتر از 15 و 70 درصد انتخاب گردید. اندازه‌گیری سرعت در سه مقطع در بالادست توده گیاهی، سیزده مقطع از ابتدا تا انتهای توده گیاهی و سه مقطع در پایین دست توده گیاهی انجام گردید، به گونه‌ای که هر مقطع شامل چهار پروفیل سرعت است. سه پروفیل بر روی توده و یک پروفیل به فاصله 17 سانتی‌متر از توده بر روی بستر شنی می‌باشند. جدول 2 موقعیت پروفیل اندازه‌گیری سرعت بر روی بستر شنی با حضور توده گیاهی را نشان می‌دهد. در این جدول X فاصله از ابتدای فلوم، x فاصله از ابتدای توده گیاهی و Y فاصله از دیوار فلوم می‌باشد. لازم به ذکر است که هر پروفیل سرعت حاوی 15 الی 20 نقطه است

3- بحث و نتیجه‌گیری

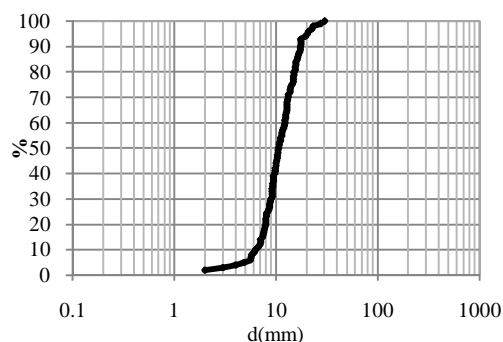
3-1- ساختار جریان

در این بخش برای مطالعه ساختار جریان از توزیع سرعت اصلی جریان (مؤلفه افقی در راستای جریان) و توزیع انرژی جنبشی جریان آشفته استفاده می‌گردد. بر این اساس شکل 3 از دو بخش تشکیل یافته است: شکل 3-الف، میانگین سرعت افقی در پیرامون توده گیاهی را نشان می‌دهد که بر اساس آن افزایش نیروی درآگ منجر به انحراف جریان و کاهش سرعت افقی در راستای توده گیاهی می‌گردد، بطوری که حداقل سرعت در پایین دست توده گیاهی رخ می‌دهد.

در این معادله، h_p ارتفاع متوسط پوشش گیاهی، d قطر متوسط هر ساقه گیاه منفرد و ΔS متوسط فضای بین ساقه‌ها می‌باشد (Nepf, 2012). شایان ذکر است تمام این پارامترها برای کل توده گیاهی ثابت است. بسیاری از رودخانه‌های ایران دارای بستر شنی می‌باشند که در آنها پوشش گیاهی بصورت پراکنده دیده می‌شود؛ لذا در این پژوهش بستر فلوم در اطراف توده گیاهی آزمایشگاهی از شن با قطر میانه d_{50} برابر 11/3 میلی‌متر پوشیده گردید. قطر میانه دانه‌های شن بر اساس روش Wolman (1954) تعیین شد که در آن انحراف معیار هندسی ذرات شن کمتر از 1/3 بود که معرف یکنواختی آن‌هاست. اختلاف ارتفاع تاج پوشش گیاهی (با ارتفاع 3 سانتی‌متر) تا بستر شنی (با ضخامت 1/1 سانتی‌متر) حدود 2 سانتی‌متر است. شکل 2 دانه‌بندی شن پیرامون توده گیاهی در فلوم آزمایشگاهی را نشان می‌دهد.



شکل 1 نمایی از توده گیاهی مورد مطالعه در فلوم آزمایشگاهی



شکل 2 دانه‌بندی شن پیرامون توده گیاهی در فلوم آزمایشگاهی

¹ Acoustic Doppler Velocimetry (ADV)

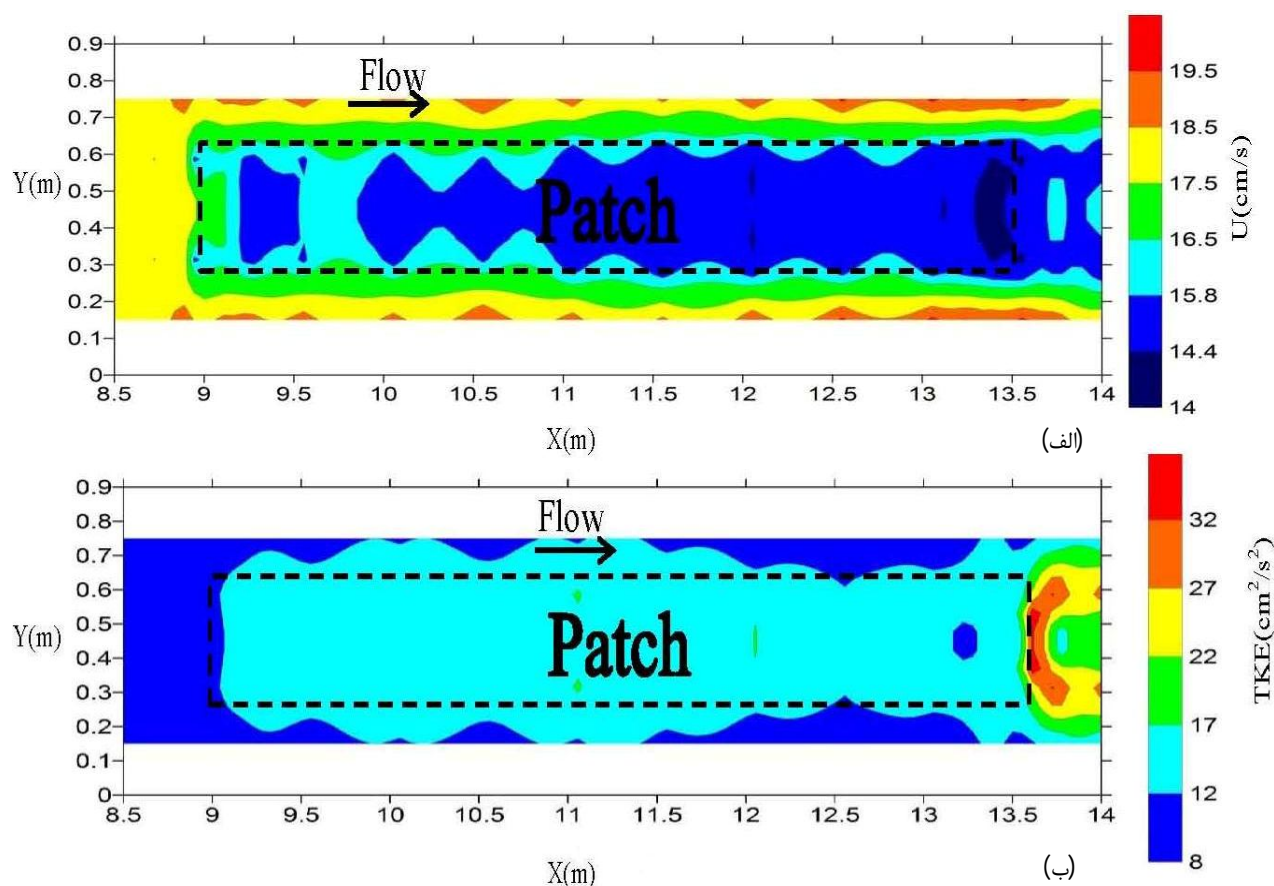
² Nortek

³ SNR

جدول 2 موقعیت پروفیل اندازه‌گیری شده در فلوم آزمایشگاهی با حضور توده گیاهی در دو دبی 29 و 21 لیتر بر ثانیه

توضیحات	بالادست توده گیاهی			شروع توده گیاهی		روی توده گیاهی				
	$x(m)$	$-0/2$	$-0/05$	0	0/15	0/3	0/6	1/1	1/6	2/1
$X(m)$	8/5	8/75	8/9	8/95	9/1	9/25	9/55	10/05	10/55	11/05
مرکز توده گیاهی	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45
روی توده گیاهی	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40
مرز توده گیاهی	32	32	32	32	32	32	32	32	32	32
روی بستر شنی	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15

توضیحات	روی توده گیاهی					انتهای توده		پایین دست توده گیاهی		
	$x(m)$	3/1	3/6	4/1	4/3	4/45	4/6	4/65	4/8	4/95
$X(m)$	12/05	12/55	13/05	13/25	13/4	13/55	13/6	13/75	14	
مرکز توده گیاهی	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45
روی توده گیاهی	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40
مرز توده گیاهی	32	32	32	32	32	32	32	32	32	32
روی بستر شنی	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15



شکل 3 دید فوقانی از توزیع الف) میانگین سرعت در عمق کانال و ب) انرژی جنبشی جریان آشفته در تاج پوشش گیاهی ناشی از تأثیر توده گیاهی در دبی 29 لیتر بر ثانیه

لبه حمله در بالادست توده گیاهی (جریان در حال توسعه تشکیل شده روی توده گیاهی) در نظر گرفته نشده است. در مطالعه حاضر به دلیل محدودیت سرعت سنج صوتی داپلر، سرعت در تمام موقعیت‌ها داخل پوشش گیاهی قابل اندازه‌گیری نمی‌باشد. به این دلیل در برخی مکان‌ها به دلیل خصوصیت پوشش گیاهی، نقطه انحنا در پروفیل سرعت قابل رویت است و در دیگر حالت‌ها این نقطه قابل مشاهده نیست، هرچند افزایش انرژی جنبشی جریان آشفته ناشی از کاهش گرادیان سرعت در تمام نقاط قابل مشاهده است.

3-2- مقایسه تئوری لایه اختلاط در حال توسعه با داده‌های آزمایشگاهی

به منظور مطالعه و بررسی شباهت‌ها و تفاوت‌های تئوری متعارف لایه اختلاط و لایه اختلاط تشکیل شده بر روی توده گیاهی، مقایسه ضخامت آن‌ها ضروری است. با مقایسه مقادیر برآورد شده بر اساس تئوری لایه اختلاط متعارف (معادله 2) (خط چین) با داده‌های اندازه‌گیری شده (سیمبل) در شکل 5 ملاحظه می‌گردد که مقادیر برآورد شده از معادله 2 (خط چین) تنها در لبه حمله توده گیاهی که ضخامت لایه اختلاط در حال رشد است، تطابق خوبی با داده‌های اندازه‌گیری شده (سیمبل) دارد، در حالی که با ثابت شدن ضخامت لایه اختلاط در ناحیه کاملاً توسعه یافته، داده‌های اندازه‌گیری شده از داده‌های برآورد شده به مقدار قابل توجهی فاصله می‌گیرند. در این راستا ضریب پخشیدگی α در معادله (2) برابر $0/023$ منجر به بهترین تطابق مابین ضخامت لایه اختلاط اندازه‌گیری شده و برآورد شده، می‌گردد. این مقدار، از دامنه پیشنهادی توسط سایر محققان و میزان برآورد شده از معادله 3 (حدود $0/08$) کمتر است. علت این اختلاف و انحراف ضخامت لایه اختلاط اندازه‌گیری شده و برآورد شده از معادله (2) مربوط به ارتفاع کم پوشش گیاهی است. زیرا ارتفاع کم منجر به عدم حرکت آزادانه لایه اختلاط و جلوگیری از رشد آن به دلیل برخورد با بستر کانال می‌گردد. هرچه ارتفاع پوشش گیاهی کمتر باشد، رشد این لایه زودتر متوقف و ضخامت لایه اختلاط در فاصله کمتری از لبه حمله ثابت می‌گردد.

این کاهش سرعت در پایین دست توده گیاهی در مطالعه-های سایر پژوهشگران برای پوشش گیاهی مستغرق و غیر مستغرق نیز رویت گردیده است (Folkard, 2005; Folkard, 2011; Ortiz et al., 2013; Zong and Nepf, 2011).

شکل 3-ب، افزایش نرخ انرژی جنبشی جریان آشفته⁴ به سمت پایین دست توده گیاهی را به دلیل جریان‌های بازگردش⁵ عمودی قوی بلافاصله بعد از توده گیاهی نشان می‌دهد. انرژی جنبشی جریان آشفته با استفاده از رابطه $0.5(u'^2+v'^2+w'^2)$ محاسبه می‌شود که معرف انرژی در واحد جرم وابسته به پیچک‌های آشفته است.

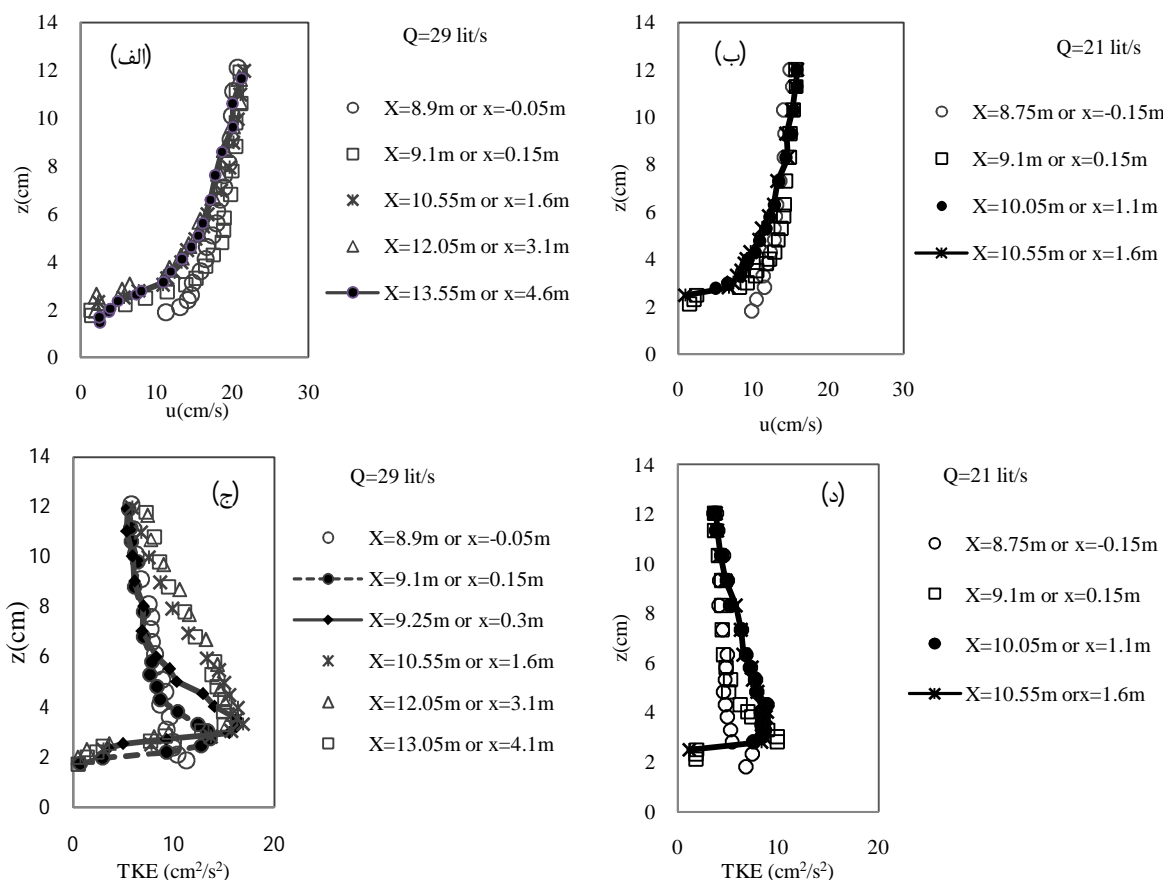
لازم به ذکر است که نرخ کاهش سرعت در بالادست توده گیاهی به دلیل جریان‌های کند شونده بیشتر است (شکل 3-الف و شکل‌های 4-الف و ب). لذا انرژی، از متوسط جریان به انرژی جنبشی تبدیل می‌گردد و نرخ افزایش انرژی جنبشی جریان آشفته در بالادست توده گیاهی افزایش می‌یابد (مطابق شکل‌های 4-ج و د). Sinsicalchi et al. (2012) نیز مشابه این روند را در مطالعات آزمایشگاهی خود مشاهده نمودند.

مشابه این رفتار (تبدیل انرژی از متوسط جریان به انرژی جنبشی در بالادست توده گیاهی)، در تاج پوشش گیاهی نیز رخ می‌دهد. به طوری که کاهش گرادیان سرعت بین بالا و داخل پوشش گیاهی منجر به تولید لایه برشی و متعاقباً افزایش انرژی جنبشی جریان آشفته می‌گردد (شکل 4).

این ناحیه که توسط Carollo et al. (2002); Ghisalberti and Nepf (2002); Michalke (1965); Nepf (2012); Nepf and Vivoni (2000); Sinsicalchi et al. (2012); Sukhodolov and Sukhodolova (2012); Sukhodolova and Sukhodolov (2012) نیز مشاهده گردیده است، به لایه اختلاط شبیه است، به طوری که در آن پروفیل سرعت بر روی پوشش گیاهی همانند جریان لایه اختلاط متعارف، شامل جریان با دو سرعت متفاوت و یک نقطه انحناست که معرف ناپایداری کلونین-هلمهولتز می‌باشد. در نقطه انحنا، پروفیل انرژی جنبشی جریان آشفته نیز به حداکثر خود می‌رسد و سپس در دو جهت بستر و سطح آب کاهش می‌یابد. همچنین در لایه اختلاط متعارف تأثیر

⁴ Turbulence Kinetic Energy (TKE)

⁵ Recirculation



شکل 4 الف) و ب) پروفیل سرعت، ج) و د) پروفیل انرژی جنبشی جریان اشفته براساس میانگین‌گیری دوگانه در راستای عرضی روی توده گیاهی در دبی‌های 29 و 21 لیتر بر ثانیه

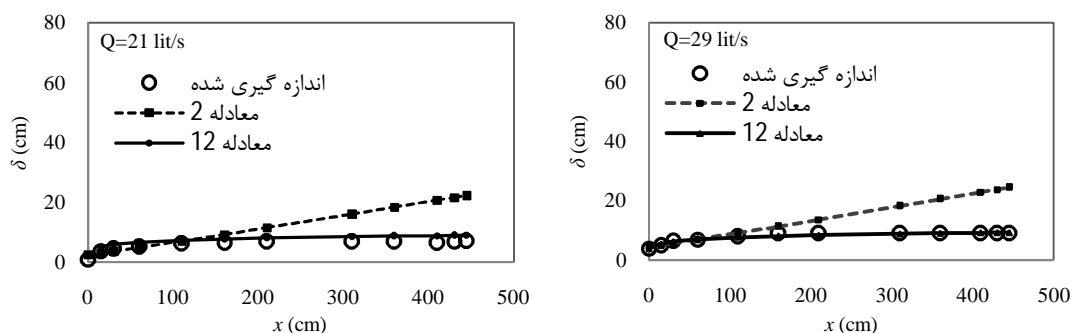
های آزمایشگاهی، رابطه (12) استخراج گردید:

$$\frac{\delta}{h} = 0.0657 \ln(C_D \cdot a \cdot x) + 0.372 \quad R^2=0.92 \quad (12)$$

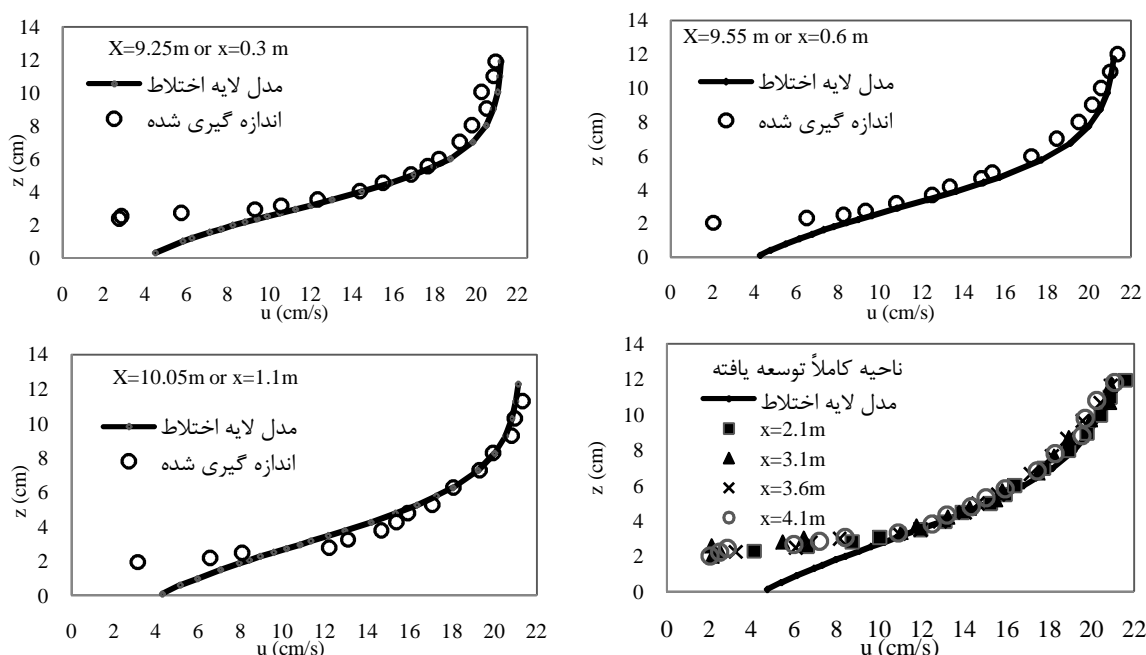
با مقایسه ضخامت لایه اختلاط برآورد شده از رابطه (12) (خط پر) با داده‌های آزمایشگاهی (سیمبل) در شکل 5 ملاحظه می‌گردد که معادله (12) تطابق بهتری با داده‌های آزمایشگاهی نسبت به رابطه (2) (خط چین) نشان می‌دهد. بنابراین در ادامه از معادله (12) به جای معادله (2) برای تخمین ضخامت اختلاط در معادله‌های (1) و (5) استفاده می‌گردد.

شکل‌های 6 و 7 به مقایسه پروفیل سرعت و شکل‌های 8 و 9 به مقایسه تنش رینولدز برآورد شده به ترتیب در دو دبی 29 و 21 لیتر بر ثانیه بر اساس تئوری لایه اختلاط در حال توسعه و رابطه لگاریتمی (12) می‌پردازند. نتایج حاصل نشان می‌دهند که ترکیب تئوری لایه اختلاط در حال توسعه با مدل لگاریتمی تطابق قابل قبولی با داده‌های اندازه‌گیری شده سرعت و تنش رینولدز دارد.

به بیان دیگر در معادله لایه اختلاط (2) تأثیر محدود شدن ضخامت لایه اختلاط، ناشی از ارتفاع کم پوشش گیاهی، به دلیل برخورد با بستر کانال در نظر گرفته نشده است. به همین دلیل برخلاف معادله (2) که رشد ضخامت لایه اختلاط روند خطی دارد، رشد ضخامت لایه اختلاط بر روی توده گیاهی که شامل دو ناحیه در حال توسعه و کاملاً توسعه یافته است، به صورت لگاریتمی می‌باشد. به طور مشابه Sukhodolova and Sukhodolov (2012) ضخامت لایه اختلاط را به صورت یک تابع لگاریتمی (معادله 10) ارائه نمودند. نتیجه مطالعه این پژوهشگران نشان می‌دهد که داده‌های اندازه‌گیری شده تطابق بهتری با تابع لگاریتمی نسبت به معادله اختلاط 2 از خود نشان می‌دهد و با ثابت شدن ضخامت لایه اختلاط، نتایج برآورد شده توسط تئوری اختلاط از مقادیر حاصل از اندازه‌گیری در آزمایشگاه فاصله می‌گیرد. در این مطالعه نیز با کاربرد روش حداقل ریشه مربعات خطا بین معادله (10) با داده-



شکل 5 مقایسه ضخامت لایه اختلاط اندازه گیری شده (سیمبل) با مقادیر برآورد شده بر اساس معادله (2) و معادله (12) (به ترتیب به صورت خط چین و خط پر)



شکل 6 مقایسه پروفیل سرعت برآورد شده از مدل لایه اختلاط با در نظر گرفتن جریان در حال توسعه با داده‌های اندازه‌گیری شده بر روی توده گیاهی در دبی 29 لیتر بر ثانیه

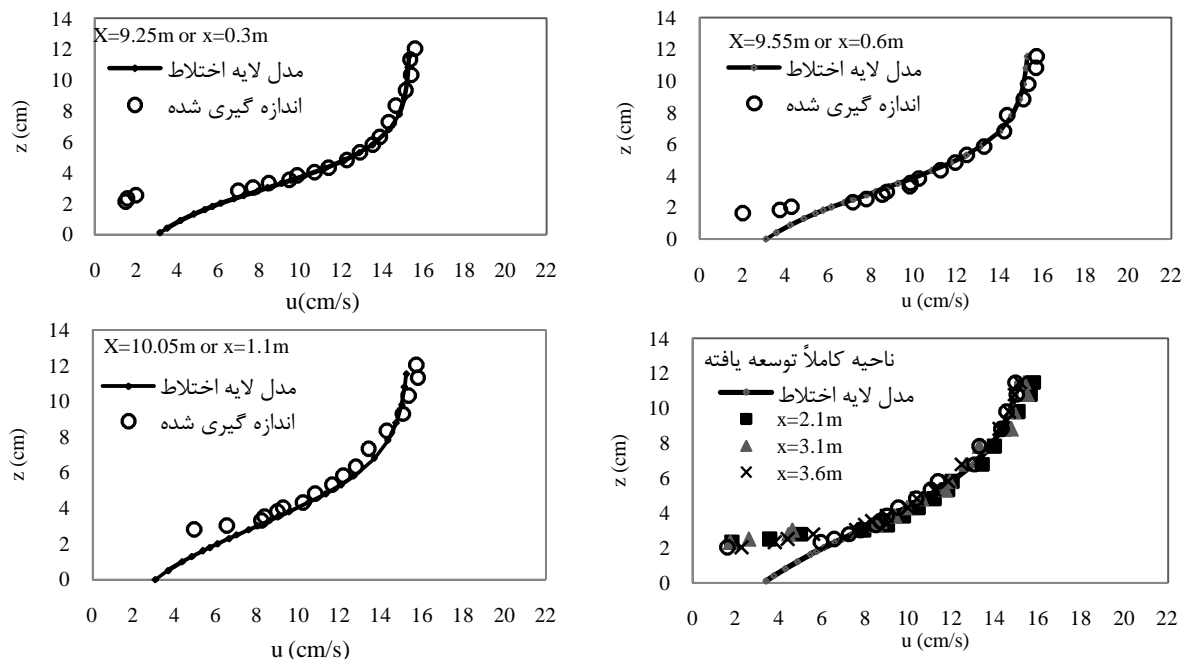
شده مشاهده می‌شود، به طوری که در شکل‌های 8 و 9 توزیع محدب تنش‌های رینولدز در مدل اختلاط نیز دیده می‌شود.

حضور پوشش گیاهی سبب کندی جریان و ایجاد گرادیان فشار نامطلوب شده و در پی آن توزیع غیرخطی تنش رینولدز (توزیع محدب) مشاهده می‌شود. بر اساس معادله رینولدز و شرط عدم لغزش نزدیک بستر، با افزایش گرادیان طولی فشار نامطلوب (یعنی افزایش فشار در راستای توده گیاهی) لازم است که گرادیان قائم تنش رینولدز نیز افزایش یابد؛ که حاصل آن توزیع محدب تنش

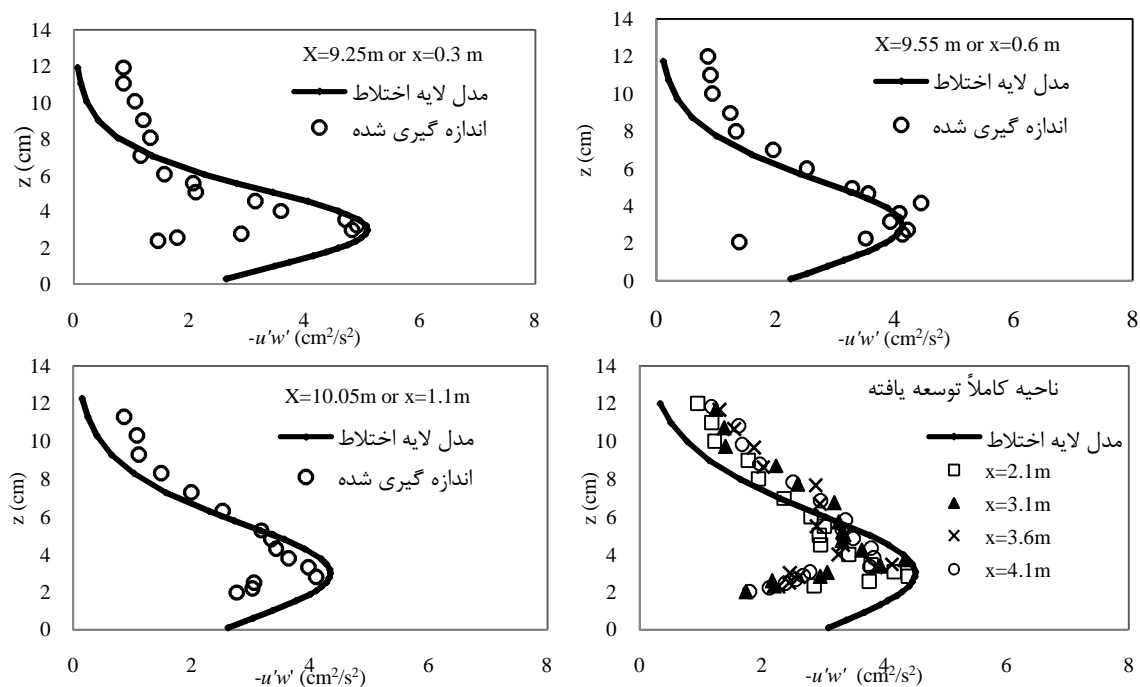
اگرچه در برخی موارد بین داده‌های اندازه‌گیری شده و برآورد شده اختلافی وجود دارد، به طوری که بر اساس شکل‌های 6 تا 9 داده‌های سرعت و تنش رینولدز در نزدیکی بستر از مدل اختلاط منحرف می‌شوند. علل این اختلاف، عدم قابلیت معادله‌های (7) و (8) در نشان دادن جدایش جریان و سرعت‌های منفی ناشی از فرایند گردابه‌های برخاستگی، بلافاصله پشت هر ساقه منفرد مشابه پایه پل و همچنین پیچیدگی تعامل بستر شنی و پوشش گیاهی است. هر چند در قسمت عمده از عمق جریان تطابق مناسبی بین مدل و داده‌های اندازه‌گیری

آزمایشگاهی و مدل لایه اختلاط (شکل‌های 8 و 9) تأیید می‌شوند.

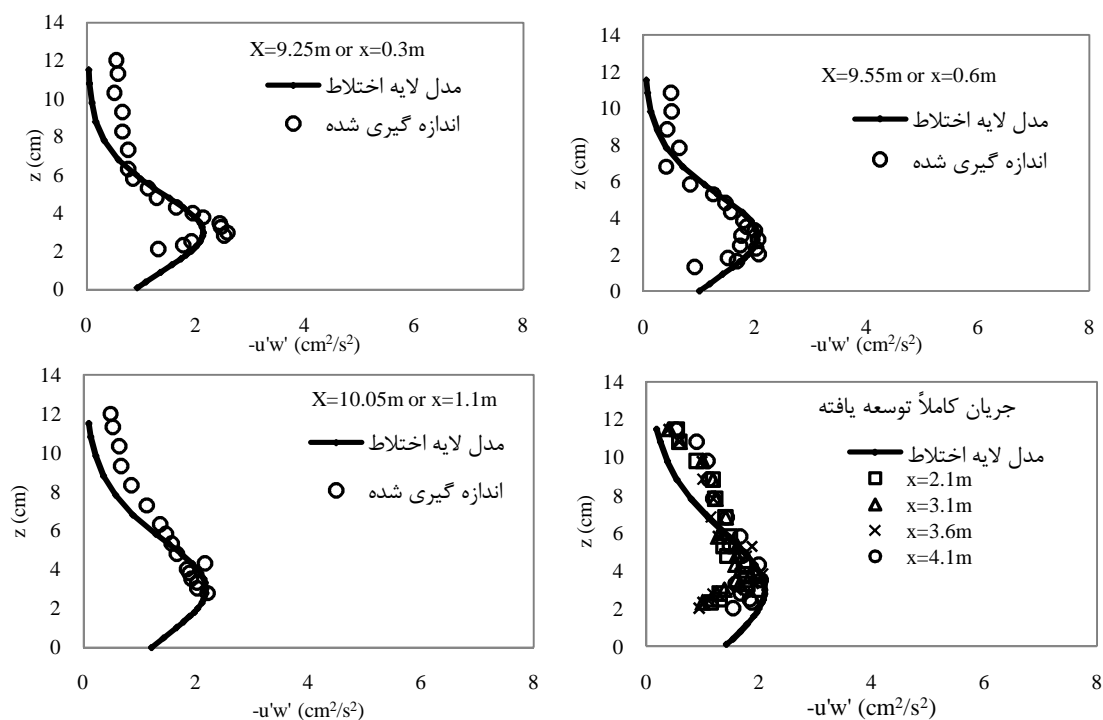
رینولدز است (Afzalimehr and Dey, 2009; Afzalimehr et al., 2015). این نتایج توسط داده‌های



شکل 7 مقایسه پروفیل سرعت برآورد شده از مدل لایه اختلاط با در نظر گرفتن جریان در حال توسعه با داده‌های اندازه‌گیری شده بر روی توده گیاهی در دبی 21 لیتر بر ثانیه



شکل 8 مقایسه پروفیل تنش رینولدز برآورد شده از مدل لایه اختلاط با در نظر گرفتن جریان در حال توسعه با داده‌های اندازه‌گیری شده بر روی توده گیاهی در دبی 29 لیتر بر ثانیه



شکل 9 مقایسه پروفیل تنش رینولدز برآورد شده از مدل لایه اختلاط با در نظر گرفتن جریان در حال توسعه با داده‌های اندازه‌گیری شده بر روی توده گیاهی در دبی 21 لیتر بر ثانیه

4- نتیجه‌گیری

در این مقاله تلاش گردید تا شناخت بهتری از لایه اختلاط بر روی توده گیاهی مستغرق با در نظر گرفتن جریان‌های در حال توسعه بر روی توده گیاهی حاصل شود. داده‌برداری با دقت زیاد در آزمایشگاه هیدرولیک بر روی توده گیاهی مصنوعی صورت گرفت. داده‌های برداشت شده با حداکثر فرکانس سرعت‌سنج (یعنی 200 هرتز) و زمان 120 ثانیه، امکان فیلتر کردن داده‌ها و ارایه نتایج بر اساس تحلیل‌های آماری را فراهم نمود. از آنجا که تئوری لایه اختلاط متعارف برای جریان‌های کاملاً توسعه یافته ارائه شده است و حضور توده گیاهی روی بستر سبب تشکیل لایه مرزی جدید و شکل‌گیری ناحیه در حال توسعه می‌شود، ضروری است تحقیق در این بخش از هیدرولیک زیست محیطی گسترش یابد.

با مقایسه و ارزیابی تئوری لایه اختلاط متعارف با لایه اختلاط اندازه‌گیری شده روی توده گیاهی تفاوت‌هایی به شرح زیر مشاهده گردید:

1- دقت تئوری لایه اختلاط به برآورد صحیح

ضخامت آن (δ) بستگی دارد. ضخامت لایه اختلاط بر روی توده گیاهی از توزیع لگاریتمی (معادله 12) که دارای تطابق بهتری با داده‌های آزمایشگاهی در هر دو دبی مورد بررسی است، پیروی می‌کند، هرچند معادله (2) که برای لایه اختلاط متعارف ارائه شده است، فقط در ابتدای توده گیاهی که جریان در حال توسعه است، اعتبار دارد.

2- محدود شدن ضخامت لایه اختلاط ناشی از ارتفاع کم پوشش گیاهی، به دلیل برخورد با بستر کانال، منجر به کاهش ضریب پخشیدگی در هر دو دبی مورد بررسی در مقایسه با مقادیر پیشنهادی توسط سایر محققان و میزان برآورد شده از رابطه (3) گردید.

3- ترکیب معادله‌های جریان‌های در حال توسعه و کاربرد معادله لگاریتمی به جای معادله (2) سبب کاهش تفاوت بین لایه اختلاط متعارف و لایه اختلاط بر روی توده گیاهی در هر دو دبی مورد بررسی گردید که پیامد آن تطابق قابل قبول میان داده‌های اندازه‌گیری شده و برآورد شده می‌باشد.

4- اختلاف داده‌های سرعت و تنش رینولدز

u_1	سرعت جریان در داخل پوشش گیاهی
	میانگین سرعت در داخل پوشش گیاهی، نزدیک بستر در ناحیه کاملاً توسعه یافته
\bar{u}_{1d}	
	میانگین سرعت در داخل پوشش گیاهی و مجاور بستر در ناحیه در حال توسعه
\bar{u}_{1e}	
u_2	سرعت جریان در بالای پوشش گیاهی
	میانگین سرعت در بالای پوشش گیاهی و مجاور سطح آب در ناحیه در حال توسعه
u_{2e}	
u_c	سرعت جابه جایی
u'	مؤلفه طولی نوسان سرعت
v'	مؤلفه عرضی نوسان سرعت
W	عرض کانال
w'	مؤلفه قائم نوسان سرعت
X	فاصله از ابتدای فلوم
x	فاصله از ابتدای توده گیاهی
Y	فاصله از دیواره فلوم
z	فاصله عمودی از بستر کانال
z_c	موقعیت مرکز لایه اختلاط
α	ضریب پراکنش
α_0	ضریب تجربی
ΔS	متوسط فاصله بین ساقه‌ها
Δu	اختلاف سرعت جریان در بالا و داخل پوشش گیاهی
δ	ضخامت لایه اختلاط
γ	ضریب تجربی
$-\rho u'w'$	تنش رینولدز
ρ	چگالی سیال
θ_t	لزجت گردابی
τ	تنش برشی موضعی بستر
TKE	انرژی جنبشی آشفتگی

6- منابع

حمیدی، فرح؛ امید، م. ح. و کشاورزی، ر. (1394). "بررسی اثر پوشش گیاهی مستغرق و غیرمستغرق پهنه سیلابی بر ضریب اختلاط عرضی آلاینده‌ها". مجله هیدرولیک، دوره 10، شماره 1، صص. 13-23.

Afzalimehr, H. and Dey, S. (2009). "Influence of bank vegetation and gravel bed on velocity and

آزمایشگاهی و برآورد شده بر اساس تئوری اختلاط اصلاح شده در نزدیک بستر ناشی از عدم نظر گرفتن جدایش جریان و سرعت‌های منفی ناشی از فرایند گردابه‌های برخاستگی بلافاصله پشت هر ساقه منفرد در معادله‌های (7) و (8) و پیچیدگی تعامل پوشش گیاهی و ساختار جریان آشفته است. شایان ذکر است مقادیر اندازه‌گیری شده و برآورد شده در دبی بیشتر به دلیل افزایش قدرت گردابه‌های برخاستگی در پشت هر ساقه منفرد تطابق کمتری با یکدیگر دارند.

5- توزیع محدب شکل تنش رینولدز در حضور توده گیاهی و شکل‌گیری جریان در حال توسعه روی آن از دیدگاه کاربردی اهمیت قابل توجهی در برآورد ضریب زبری و انتقال رسوب در مجاری باز دارد، بنابراین لازم است در محاسبات و بکارگیری مدل‌ها توسط مهندسان هیدرولیک به آنها توجه شود.

5- فهرست علائم

a	سطح پیشانی پوشش گیاهی در واحد سطح
A_1	ضریب تجربی
A_2	ضریب تجربی
C_D	ضریب دراگ
d	قطر هر ساقه گیاه منفرد
d_{50}	قطر میانه ذرات
g	شتاب ثقل
h	عمق جریان
h_p	ارتفاع پوشش گیاهی
i_0	شیب متوسط
Fr	عدد فرود
R	شعاع هیدرولیکی
Re	عدد رینولدز
S	تأثیر زبری بستر بر توسعه لایه اختلاط
S_C	حد بحرانی S
u	سرعت در هر عمق از بستر کانال
U	سرعت متوسط در عمق جریان
\bar{u}_{o1}	سرعت نزدیک شونده به توده گیاهی در مجاور بستر
u_{o2}	سرعت نزدیک شونده به توده گیاهی در مجاور سطح آب

- Mech. 23, pp. 521-544.
- Nepf, H. (2012). "Hydrodynamic of vegetated channels". J. Hydraul. Res. 50(3), pp. 262-279.
- Nepf, H. and Vivoni, E. (2000). "Flow structure in depth-limited, vegetated flow". J. Geophys. Res. 105(C12), pp. 28547-28557. doi:10.1029/2000JC900145.
- Ortiz, A.C.; Ashton, A. and Nepf, H. (2013). "Mean and turbulent velocity field near rigid and flexible plants and the implication for deposition". J. Geophys. Res. Earth. Surf. 118, pp. 2585-2599.
- Pope, S. B. (2000). *Turbulent Flows*. Cambridge University Press.
- Sinsicalchi, F.; Niora, V. and Albera, J. (2012). "Plant patch hydrodynamics in streams: Mean flow, turbulence and drag forces". Water. Resour. Res. 48, W01513.
- Sukhodolov, A. and Sukhodolova, T. (2006). "Evolution of mixing layers in turbulent flow over submerged vegetation: Field experiments and measurement study". In: *River Flow*. Edited by Ferreira, R.M. L. et. al. proc. of 3rd International Conference on Fluvial Hydraulics, 6-8 September, Lisbon, Portugal, pp. 525-534.
- Sukhodolov, A.N. and Sukhodolova, T.A. (2010). "Case study: Effect of submerged aquatic plants on turbulence structure in Lowland River". J. Hydraul. Eng. ASCE. 136(7), pp. 434-446.
- Sukhodolov, A. N.; Schnauder, I. and Uijtewaal, W. S. J. (2010). "Dynamics of shallow lateral shear layers: Experimental study in a river with a sandy bed". Water Resour. Res. 46, W11519. doi:10.1029/2010WR009245
- Sukhodolova, T. A. and Sukhodolov, A. N. (2012). "Vegetated mixing layer around a finite-size patch of submerged plants: 1. Theory and field experiments". Water. Resour. Res. 48, W10533.
- Sukhodolov, A. and Sukhodolova, T. (2012). "Vegetated mixing layer around a finite-size patch of submerged plants: 2. Turbulence and coherent structures". Water Resour. Res. 48, W12506. doi:10.1029/2011WR011805
- Wolman, M. G. (1954). "A method of sampling coarse river bed material". Trans. AGU., 35(6), pp. 951-956.
- Zong, L. and Nepf, H. (2011). "Spatial distribution of deposition within a patch of vegetation". Water. Resour. Res. 47, W03516. doi:10.1029/2010WR009516.
- Reynolds stress distributions". Int. J. Sediment Res. 24(2), pp. 236-246.
- Afzalimehr, H.; Moradian, M.; Sui, J. and Gallichand, J. (2015). "Effect of adverse pressure gradient and vegetated banks on flow structure". J. River Res. Appl. 4(4), pp. 1-9.
- Aberle, J. and Järvelä, J. (2015). Hydrodynamics of vegetated channels, In *Rivers – physical, fluvial and environmental processes*. In: Rowiński, P., Radecki-Pawlik, A. (Eds.): *GeoPlanet: Earth and Planetary Sciences*, Springer International Publishing, pp. 519-541. doi: 10.1007/978-3-319-17719-9.
- Carollo, F. G.; Ferro, V. and Termini, D. (2002). "Flow velocity measurement in vegetated Channels". J. Hydraul. Eng. 128(7), pp. 664-673.
- Chu, V. H. and Babarutsi, S. (1988). "Confinement and bed friction effects in shallow turbulent mixing layers". J. Hydraul. Eng. 114, pp. 1257-1274.
- Folkard, A. (2005). "Hydrodynamics of model *Posidonia oceanica* patch in shallow water". Limnol. Oceanogr. 50(5), pp. 1592-1600.
- Folkard, A.M. (2011). "Flow regimes in gaps within stands of flexible vegetation: laboratory flume simulations". Environ. Fluid Mech. 11, pp. 289-306.
- Ghisalberti, M. and Nepf, H. (2002). "Mixing layers and coherent structures in vegetated aquatic flows". J. Geophys. Res. 107 (C2). doi: 10.1029/2001JC000871.
- Graf, W.H. and Altinkar, M.S. (1998). *Fluvial hydraulics: flow and transport processes in channels of simple geometry*. John Wiley and Sons, Chichester. England.
- Hamidifar, H.; Omid, M. H. and Keshavarzi, A. (2016). "Kinetic energy and momentum correction coefficients in straight compound channels with vegetated floodplain", J. Hydrol. 537, pp. 10-17.
- Marjoribanks, T. I.; Hardy, R. J.; Lane, S. N. and Tancock, M. J. (2016). "Patch-scale representation of vegetation within hydraulic models". Earth. Surf. Proc. Land. 42, pp. 699-710. doi: 10.1002/esp.4015.
- Marjoribanks, T.; Parson, D.R. and Lane, S. (2016). "Does the canopy mixing layer model apply to highly flexible aquatic vegetation? Insights from numerical modeling". Environ. Fluid. Mech. 17 (2), pp. 277-301. doi:10.1007/s10652-016-9482-z.
- Michalke, A. (1965). "Spatially growing disturbances in an inviscid shear layer". J. Fluid.