

# بررسی ساختار جریان متاثر از توده گیاهی با سه تراکم مختلف در رودخانه قلوه سنگی

مهسا جهادی<sup>۱</sup> و حسین افضلی مهر<sup>۲\*</sup>

۱- دکتری مهندسی آب، دانشگاه صنعتی اصفهان

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

\* hafzali@iust.ac.ir

(دریافت مقاله: ۹۷/۰۷/۰۱؛ پذیرش مقاله: ۹۸/۰۲/۲۱)

**چکیده-** اثر توده گیاهی به صورت مستغرق در رودخانه‌ها برای مطالعه فرایند های هیدرولیکی مانند مقاومت جریان و انتقال رسوب قابل ملاحظه است. هرچند تحقیق در این زمینه بصورت محدود گزارش شده است. با توجه به شباهت بیشتر ساختار جریان متاثر از پوشش گیاهی به لایه اختلاط، نسبت به لایه مرزی، تئوری اختلاط جهت کمی کردن تعامل جریان و توده گیاهی در این پژوهش ارزیابی خواهد شد. هر چند یکی از ویژگی‌های اساسی توده گیاهی تشکیل جریان‌های درحال توسعه است که در تئوری اختلاط لحاظ نشده است. از اینرو ضروری است روابط دینامیک مکانی جریان، با تئوری لایه اختلاط ادغام شوند. در این پژوهش جهت ارزیابی کاربرد این تئوری از مطالعه میدانی کمک گرفته شد. در این مطالعه میدانی، از اندازه‌گیری‌های بعمل آمده در رودخانه قلوه سنگی بهشت‌آباد در استان چهارمحال بختیاری بر روی توده گیاهی با سه تراکم مختلف استفاده می‌شود. نتایج نشان می‌دهد که تطابق قابل قبولی بین مقادیر اندازه‌گیری شده سرعت و تنش رینولدز با مقادیر برآورد شده بر اساس ادغام تئوری اختلاط و معادلات جریان درحال توسعه وجود دارد. اگرچه با افزایش تراکم پوشش گیاهی ضریب پخشیدگی به دلیل عدم گسترش و توسعه آزادانه پیچک‌ها نسبت به تئوری اختلاط استاندارد کوچکتر می‌شود. با انجام آنالیز کوادرنانت متاثر از توده گیاهی مشاهده شد که پیشامد غالب در زیر تاج توده گیاهی، "پرتاب" و در بالای تاج توده گیاهی، "جاروب" می‌باشد. همچنین سهم رویداد جاروب در پایین-دست توده گیاهی نسبت به روی آن به طور ملایم افزایش یافته است.

**کلید واژگان:** توده گیاهی، رودخانه بهشت‌آباد، لایه اختلاط، آنالیز کوادرنانت، تنش رینولدز.

## ۱- مقدمه

پوشش گیاهی اهمیت زیادی در حفظ کیفیت آب رودخانه‌ها دارد. به دلیل آنکه جذب عناصر نامطلوب در آب، کاهش انتقال رسوب و تولید اکسیژن را بر عهده دارد. همچنین پوشش گیاهی به منظور جایگزین روش‌های سازه‌ای در حفظ و حراست رودخانه‌ها و پایداری آن دارای اهمیت هست. پوشش گیاهی در رودخانه‌ها عمدتاً به صورت توده گیاهی مشاهده می‌شوند. حضور توده گیاهی در مسیر جریان موجب تغییر ساختار جریان در رودخانه‌ها می‌شود.

Aberle and Jarvela (2015) گزارش کردند اگرچه توده گیاهی موضوع تحقیقات گسترده زیست محیطی بوده است؛ تاثیر آن بر ساختار جریان بندرت بررسی شده است. بعلاوه به دلیل نفوذپذیری توده گیاهی، تاثیر آن بر ساختار جریان با دیگر موانع (مانند پایه پل) متفاوت است (Wang et al., 2015). مطالعات پوشش گیاهی در هیدرولیک زیست محیطی به دو صورت گزارش شده‌اند: ۱- پوشش

پوشش گیاهی اهمیت زیادی در حفظ کیفیت آب رودخانه‌ها دارد. به دلیل آنکه جذب عناصر نامطلوب در آب، کاهش انتقال رسوب و تولید اکسیژن را بر عهده دارد. همچنین پوشش گیاهی به منظور جایگزین روش‌های سازه‌ای در حفظ و حراست رودخانه‌ها و پایداری آن دارای اهمیت هست. پوشش گیاهی در رودخانه‌ها عمدتاً به صورت توده گیاهی مشاهده می‌شوند. حضور توده گیاهی در مسیر جریان موجب تغییر ساختار جریان در رودخانه‌ها می‌شود.

(با دقت ۰.۱۰) می‌رسد، تعریف می‌شود. (Pope, 2000; Sukhodolova and Sukhodolov, 2012). در تئوری لایه اختلاط، سرعت و مقیاس طول به صورت رابطه (۲) به یکدیگر مرتبط می‌شوند (Pope, 2000; Sukhodolova and Sukhodolov, 2012):

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

در این رابطه،  $\alpha$  ضریب پراکنش است. برخی پژوهشگران بر اساس مطالعه آزمایشگاهی دامنه ۰.۰۶ تا ۰.۱۲ را برای این ضریب پیشنهاد کردند (Pope, 2000; Sukhodolova and Sukhodolov, 2012).

علاوه بر میانگین سرعت، تنش رینولدز که یکی از ویژگی‌های مهم جریان اشفته است نیز از تئوری لایه اختلاط به صورت تابع کوسینوس هایپربولیک (۳) ارائه می‌شود (Sukhodolov and Sukhodolova, 2012).

$$-\frac{u'w'}{\Delta u^2} = \frac{\vartheta_t}{\delta \Delta u \cosh^2 \eta}, \quad \eta = \frac{z(z-z_c)}{\delta} \quad (3)$$

در این رابطه،  $u'$  و  $w'$  نوسانات سرعت در مسیر جریان و عمود به جریان،  $\vartheta_t$  لزجت گردابی است که به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\vartheta_t = \gamma \delta \Delta u \quad (4)$$

$\gamma$ ، یک ضریب تجربی برابر ۰.۱ می‌باشد. کاربرد مدل لزجت گردابی با ثابت  $\vartheta_t$  در تئوری لایه اختلاط متعارف و کم‌عمق توسط مطالعات آزمایشگاهی و تئوری اثبات شده است (Pope, 2000; 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. در حالی 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 (Sukhodolova and Sukhodolov, 2012).

(Sinsicalchi et al., 2012) با مطالعه آزمایشگاهی بر روی توده گیاهی استنتاج کردند که تاثیر تبدیل انرژی از میانگین سرعت به توربولانس در ابتدای توده گیاهی، در تئوری لایه اختلاط استاندارد لحاظ نشده است.

گیاهی نیمه‌مستغرق که تنها بخشی از پوشش گیاهی زیر آب قرار می‌گیرد. ۲- پوشش گیاهی مستغرق که کل پوشش گیاهی زیر آب قرار می‌گیرد. در این پژوهش پوشش گیاهی مستغرق بررسی خواهد شد.

مطالعه تحلیلی تعامل پوشش گیاهی و جریان از میانه قرن بیستم مورد توجه پژوهشگران زیادی قرار گرفته است. اغلب تحقیقات پیرامون شناخت تعامل پوشش گیاهی و جریان تحت شرایط کنترل شده بر روی پوشش گیاهی مصنوعی و در فلوم آزمایشگاهی انجام شده‌اند (به‌طور مثال: Carollo et al., 2002; Ghisalberti and Nepf, 2002; Ghisalberti and Nepf, 2004; Ortiz et al., 2013) و مطالعات محدودی بر روی توده گیاهی طبیعی در رودخانه‌ها صورت گرفته است (به‌طور مثال: Sukhodolov and Sukhodolova, 2012). در این راستا برخی محققان بر اساس بررسی‌های آزمایشگاهی نشان دادند که جریان در داخل و روی پوشش گیاهی، به لایه اختلاط شباهت بیشتری نسبت به جریان لایه مرزی دارد؛ به‌طوری‌که پروفیل سرعت در لایه اختلاط مشابه پروفیل سرعت بر روی پوشش گیاهی مستغرق از دو سرعت مختلف و یک نقطه انحنا معرف ناپایداری کلون 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 تانژانت هایپربولیک زیر بیان می‌شود (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 برابر  $(u_1+u_2)/2$  و  $\Delta u$  اختلاف سرعت برابر  $(u_1-u_2)$  است.  $u_1$  و  $u_2$  سرعت جریان در ناحیه با سرعت کمتر و بیشتر است.  $Z_c$  موقعیت مرکز لایه اختلاط،  $Z$  فاصله عمودی از بستر کانال و  $u$  سرعت در هر عمق از بستر ( $z$ ) است. همچنین  $\delta$  ضخامت لایه اختلاط است که از رابطه  $\delta(x) = z_{0.9}(x) - z_{0.1}(x)$  برآورد می‌شود. در این رابطه  $z_{0.9}(x)$  و  $z_{0.1}(x)$  به ترتیب به صورت موقعیت عمودی که سرعت به  $u_1$  و  $u_2$  با دقت ۱۰٪ برسد، تعریف می‌شود. به بیان دیگر، ضخامت لایه اختلاط به صورت فاصله عمودی بین موقعیتی که در آن سرعت داخل لایه اختلاط به مقادیر پیرامون لایه اختلاط

رودخانه‌ها از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. در این پژوهش با تمرکز بر توده گیاهی مستغرق به شناخت ساختار جریان متاثر از توده گیاهی در یک رودخانه کوهستانی درشت دانه پرداخته می‌شود و طی آن تاثیر سه تراکم مختلف پوشش گیاهی بر ساختار جریان بررسی می‌شود. هدف از این تحقیق بررسی تاثیر تراکم توده گیاهی بر عملکرد تئوری اختلاط است. همچنین کاربرد مدل ترکیبی تئوری اختلاط و قانون لگاریتمی در پایین‌دست توده گیاهی با سه تراکم مختلف بررسی می‌شود.

## ۲- مواد و روش‌ها

انتخاب سایت مناسب برای اندازه‌گیری داده‌ها در رودخانه‌ها از اهمیت بسزایی برخوردار است. عمق مناسب جریان برای حفاظت از پژوهشگر و تجهیزات در یک رودخانه کوهستانی کمتر از ۰/۵ متر است. به‌علاوه داده-برداری در حاشیه رودخانه‌ها که در آنجا عمق کمتر از ۰/۱ متر به دلیل محدودیت سرعت‌سنج داپلر<sup>۱</sup> (اندازه‌گیری در ۵ سانتی‌متر زیر سطح آب و عدم امکان اندازه‌گیری پروفیل سرعت و تنش در نیمی از این عمق) مطلوب نیست. توده گیاهی مورد مطالعه از سایر توده‌های گیاهی، صخره و سازه‌های هیدرولیکی به اندازه کافی دور در نظر گرفته شد تا از تاثیر آنها بر نتایج جلوگیری شود. امکان دسترسی آسان به سایت انتخابی و حمل و نقل آسان وسایل اندازه‌گیری از دیگر مواردی بود که در انتخاب بازه مورد مطالعه مورد توجه قرار گرفت.

با در نظر گرفتن نکات فوق و کیلومترها پیمایش در رودخانه‌های متعدد استان چهار محال بختیاری، یک بازه مسقیم به طول ۹۵ متر در رودخانه بهشت‌آباد واقع در شهرستان اردل در مجاورت روستای بهشت‌آباد انتخاب شد. رودخانه بهشت‌آباد یکی از رودخانه‌های استان چهارمحال و بختیاری است و یکی از شاخه‌های مهم رودخانه کارون است. این رودخانه از چشمه‌ساران کوهستان‌های شمالی شهرستان اردل در جنوب شهرکرد منشأ گرفته و در نزدیکی شهرستان اردل با رودخانه کاج

بنابراین (Sukhodolova and Sukhodolov, 2012) و (Sukhodolov and Sukhodolova, 2012) به‌منظور در نظر گرفتن جریان‌های در حال توسعه بر روی توده گیاهی، تئوری لایه اختلاط را بسط دادند. آزمایشات آنها بر روی یک توده گیاهی در رودخانه مبین سودمند بودن تئوری پیشنهادی آنهاست. این پژوهشگران با در نظر گرفتن جریان‌های در حال توسعه بر روی توده گیاهی، معادله‌های (۵) و (۷) را به ترتیب برای جریان داخل پوشش گیاهی در مجاورت بستر و در نزدیکی سطح آب از معادله رینولدز استخراج کردند. به منظور در نظر گرفتن تاثیر جریان‌های در حال توسعه بر روی توده گیاهی در تئوری لایه اختلاط، معادله‌های (۵) و (۷) بایستی با معادله (۲) ادغام شوند.

$$\bar{u}_{1e}^2 = \bar{u}_{1d}^2 + (\bar{u}_{01}^2 - \bar{u}_{1d}^2) \exp[-(C_D a)_1 x] \quad (5)$$

$$\bar{u}_{1d} = \sqrt{\frac{2gS_0}{(C_D a)_1}} \quad (6)$$

$$u_{2e}^2 = u_{02}^2 + 2gS_0 x \quad (7)$$

$\bar{u}_{1e}$  میانگین سرعت در داخل پوشش گیاهی و مجاور بستر در ناحیه در حال توسعه  $\bar{u}_{01}$  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 توسعه‌یافته است (Sukhodolova and Sukhodolov, 2012).

درک ساختار جریان پیرامون توده گیاهی برای تخمین مقاومت هیدرولیکی و انتقال رسوب از اهمیت به‌سزایی برخوردار است. Sukhodolov and. Sukhodolova (2010) با انجام آزمایش در پایین‌دست توده گیاهی بیان کردند جریان در این ناحیه از ترکیب دو الگوی مختلف جریان حاصل می‌شود، به‌طوری‌که جریان در بالای پوشش گیاهی به‌صورت لایه اختلاط یا جت رفتار می‌کند و جریان نزدیک بستر دارای ساختار لایه مرزی می‌باشد.

شناخت تعامل توده گیاهی و جریان به دلیل نقش پوشش گیاهی در بهبود کیفیت آب رودخانه‌ها و پایداری حریم

1. Acoustic Doppler velocimetry (ADV)

رودخانه و بازه انتخابی را نشان می‌دهد. جمع‌آوری داده‌ها در نیمه دوم مرداد ماه سال ۱۳۹۶ صورت پذیرفت. پارامترهای هیدرولیکی این رودخانه مطابق جدول ۱ است.

یکی شده و در نهایت به شاخه اصلی رودخانه کارون منتهی می‌شود. بازه انتخابی در مختصات جغرافیایی با عرض ۳۲ درجه و ۱ دقیقه و ۴۸ ثانیه شمالی و طول ۵۰ درجه و ۳۷ دقیقه و ۴۳ ثانیه شرقی در ارتفاع ۱۸۶۱ متری از سطح دریا قرار دارد. شکل ۱ عکس هوایی از این

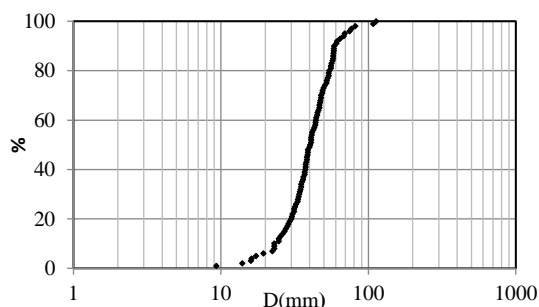


شکل ۱ موقعیت رودخانه بهشت‌آباد و بازه انتخابی

دبی در بازه مورد مطالعه در رودخانه بهشت‌آباد توسط رابطه  $Q = \sum A_i U_i$  برآورد شد. در این رابطه  $A_i$  مساحت هریک از اجزاء سطح مقطع و  $U_i$  سرعت در هریک از اجزاء سطح مقطع است. به‌منظور تخمین سرعت، مقطع رودخانه را به ۱۰ جزء مساوی تقسیم کرده و سرعت در هریک از اجزا با استفاده از یک مولینه در ۰/۲ و ۰/۸ عمق از سطح

در جدول فوق،  $Q$  دبی جریان،  $H$  عمق متوسط جریان در مقطع انتخابی،  $W$  عرض مقطع انتخابی رودخانه،  $U$  سرعت متوسط مقطع انتخابی،  $Fr$  عدد فرود،  $P$  محیط هیدرولیکی،  $A$  مساحت مقطع انتخابی رودخانه،  $R$  شعاع هیدرولیکی، و  $Re$  عدد رینولدز در یک مقطع انتخابی از رودخانه بهشت‌آباد است.

شکل ۳ توزیع دانه‌بندی ذرات بستر پیرامون توده گیاهی در بازه انتخابی رودخانه بهشت‌آباد را بر اساس روش (1954) Wolman نشان می‌دهد. بر اساس شکل ۳ میانه ( $d_{50}$ ) و انحراف معیار ( $\sigma_g = D_{84}/D_{16}$ ) اندازه ذرات بستر پیرامون توده گیاهی به ترتیب برابر  $40/3$  میلیمتر و  $2/0.8$  است.



شکل ۳ توزیع اندازه ذرات پیرامون توده گیاهی مورد بررسی در رودخانه بهشت‌آباد

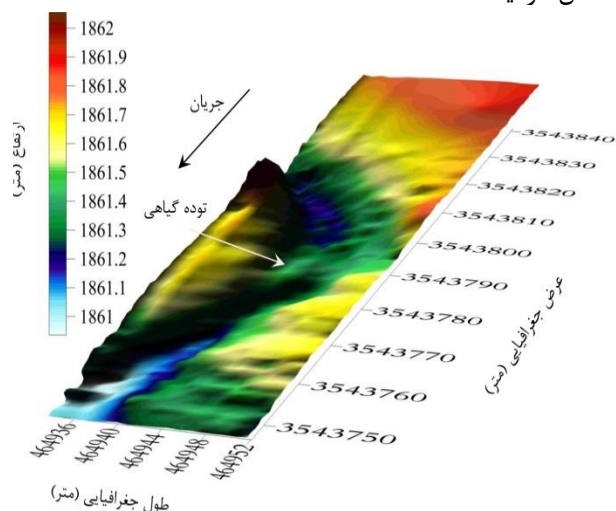
توده گیاهی انتخابی انعطاف‌پذیر بوده به طوری که میزان ارتفاع پوشش گیاهی خم شده (به طور متوسط ۱۰ سانتیمتر) به طول هر ساقه (به طور متوسط ۲۱ سانتیمتر) برابر  $0/48$  برآورد گردید. مطابق شکل ۴ این توده گیاهی، دارای حداکثر طول  $0/96$  متر، حداکثر عرض  $0/72$  متر و ارتفاع متوسط ۱۰ سانتی‌متر است. مطالعه و بررسی اثر تراکم توده گیاهی بر ساختار جریان در سه تراکم مختلف صورت پذیرفت. در ابتدا آزمایش بر روی توده گیاهی با قطر هر ساقه گیاه منفرد و متوسط فضای بین ساقه‌ها به ترتیب برابر  $0/9$  و  $4/45$  میلی‌متر صورت گرفت. تراکم توده گیاهی بر اساس شاخص سطح پیشانی  $Nepf$  (2012) توسط  $Nepf$  که توسط  $Nepf$  (2012) نشان داد در صورتی که شاخص سطح پیشانی توده گیاهی در واحد سطح ( $ah_p$ ) بزرگتر از  $0/23$  باشد پوشش گیاهی متراکم، در صورتی که کمتر از  $0/1$  باشد کم‌تراکم و زمانی که در دامنه  $0/1$  الی  $0/23$  نوسان کند در حالت بینابینی طبقه‌بندی می‌شود.

جدول ۱- پارامترهای هیدرولیکی برای یک مقطع انتخابی در

رودخانه بهشت‌آباد	
مقدار	نشانه
۰/۳۴	$h(m)$
۲۴	$W/H$
۰/۳۶	$U(m/s)$
۰/۲	$Fr$
۸/۴۵	$P(m)$
۲/۷۴	$A(m^2)$
۰/۳۲	$R(m)$
۱۱۶۷۸۸	$Re$
۰/۹۹	$Q (m^3/s)$

آب اندازه‌گیری شد. با میانگین‌گیری از این دو سرعت، سرعت متوسط در هر یک از اجزا برآورد شد. زمان اندازه‌گیری سرعت در هر نقطه ۵۰ ثانیه و دارای سه تکرار است. عمق آب در هر موقعیت توسط خط‌کش با دقت ۲ میلی‌متر اندازه‌گیری می‌شود.

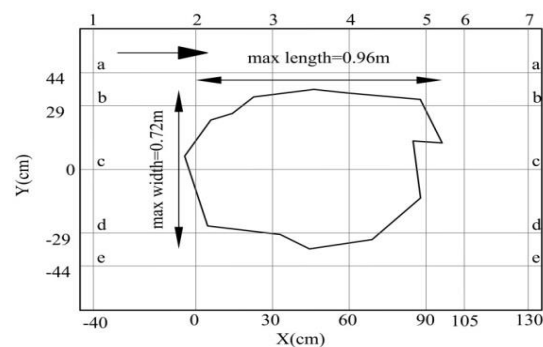
توپوگرافی محدوده انتخابی در رودخانه بهشت‌آباد با دوربین توتال استیشن نقشه‌برداری شد. جهت دستیابی به این هدف بازه مورد مطالعه در رودخانه به شبکه  $1 \times 1$  متر تقسیم‌بندی شد. با توجه به اهداف این پژوهش این شبکه‌بندی پیرامون توده گیاهی به ابعاد  $0/2 \times 0/2 \times 0/2$  ریزتر گردید. نقاط برداشت شده وارد نرم‌افزار سورفر شدند و نقشه توپوگرافی بازه مورد مطالعه رودخانه مطابق شکل ۲ حاصل گردید.



شکل ۲ توپوگرافی بازه انتخابی در رودخانه بهشت‌آباد

برداشت شد. به گونه‌ای که تراکم این نقاط در تاج پوشش گیاهی و به سمت بستر افزایش می‌یابد. اندازه‌گیری سرعت در هر نقطه با فرکانس نمونه‌برداری ۲۰۰ هرتز و زمان نمونه‌برداری ۱۲۰ ثانیه (معادل ۲۴۰۰۰ داده اندازه‌گیری سرعت لحظه‌ای) در هر نقطه انجام شد.

با توجه به اهداف پژوهش نیاز است بخشی از اندازه‌گیری‌ها داخل پوشش گیاهی باشد که این مسئله بر پدیده داپلر و عملکرد دستگاه سرعت‌سنج ADV اثر می‌گذارد به گونه‌ای که در برخی موارد به دلیل تراکم بسیار بالای پوشش گیاهی ( $ah_p=4/5$ ) دستگاه قادر به اندازه‌گیری سرعت داخل پوشش گیاهی نبود از آن نقطه در ارزیابی نتایج استفاده نشد. در حالی که در پوشش گیاهی با تراکم کمتر ( $ah_p=2/7$ ) دستگاه ADV قابلیت اندازه‌گیری سرعت داخل پوشش گیاهی را دارا می‌باشد. با این وجود انتظار می‌رود خطای اندازه‌گیری سرعت در داخل پوشش گیاهی افزایش یابد. با توجه به هدف پژوهش، اهمیت نتایج مبتنی بر سلامت داده‌ها و کاهش هرچه بیشتر خطا، نسبت سیگنال به نویز<sup>۲</sup> و ضریب همبستگی داده‌های سرعت در تمام آزمایش‌ها به ترتیب بیشتر از ۲۰ و ۸۰ درصد انتخاب شد. Ghisalberti and Nepf (2002); Ghisalberti and Nepf (2004) و Sukhodolova and Sukhodolov (2012) نیز با استفاده از دستگاه سرعت‌سنج ADV خصوصیات جریان داخل پوشش گیاهی را برداشت کردند. همچنین جهت اطمینان از صحت اندازه‌گیری‌ها داخل پوشش گیاهی از آنالیز اسپکترال و قانون کلموگراف بهره گرفته شد. در صورتی که قانون کلموگراف (خطی با شیب 5/3- در ناحیه زیر لایه لختی) برقرار نباشد، داده برداشت شده معتبر نیست و از آن در ارزیابی نتایج استفاده نخواهد شد. شکل ۵ انرژی اسپکترال در مقابل فرکانس در یک نقطه داخل پوشش گیاهی را نشان می‌دهد. بر اساس این شکل می‌توان بیان نمود شیب 5/3- در نقطه اندازه‌گیری شده داخل پوشش گیاهی برقرار است و داده برداشت شده داخل پوشش گیاهی معتبر می‌باشد.



شکل ۴ ابعاد توده گیاهی مورد بررسی در رودخانه بهشت‌آباد و مقاطع اندازه‌گیری

در ادامه، توده گیاهی به طور دستی و یکنواخت هرس گردید تا تراکم آن کاهش یافته و بر اساس شاخص  $ah_p$  به ۳/۳ برسد. در این شرایط متوسط فضای بین ساقه‌ها به ۵/۲۲ میلی‌متر افزایش یافت. به طور مشابه پوشش گیاهی دوباره هرس شد تا متوسط فضای بین ساقه‌ها به ۵/۷۷ میلی‌متر افزایش یافت. در این شرایط شاخص  $ah_p$  به میزان ۲/۷ رسید. بنابر تقسیم‌بندی (Nepf (2012)، هر سه تراکم اندازه‌گیری شده، متراکم محسوب می‌شوند. رابطه (Nepf (2012) برای طبقه‌بندی تراکم بصورت زیر می‌باشد:

$$ah_p = \frac{d \cdot h_p}{\Delta S^2} \quad (8)$$

در این معادله،  $h_p$  ارتفاع پوشش گیاهی،  $d$  قطر هر ساقه گیاه منفرد،  $\Delta S$  متوسط فضای بین ساقه‌ها است. اندازه‌گیری سرعت با استفاده از دستگاه سرعت‌سنج داپلر (ADV) ساخت شرکت نور تک<sup>۱</sup> با دقت اندازه‌گیری ۰/۵ درصد انجام گرفت. به این منظور دستگاه سرعت‌سنج داپلر بر روی یک چهارچوب فلزی با عرض و طول به ترتیب برابر ۱۴۰ و ۸۰ سانتی‌متر با قطر پایه برابر ۳/۵ سانتی‌متر نصب شد. به منظور حذف اثر ناحیه برخاستگی در پشت پایه‌ها بر عملیات داده‌برداری، دستگاه سرعت‌سنج داپلر در وسط و بالادست چهارچوب نصب شد. پس از قرارگیری سرعت‌سنج داپلر بر روی چهارچوب، در ابتدا تراز ماکرو چهارچوب، توسط پایه‌های متحرک و تراز میکرو آن بر اساس سه پیچ تراز واقع بر روی چهارچوب نصب شد. برای اندازه‌گیری هر پروفیل سرعت حدود ۱۵ الی ۲۰ نقطه

<sup>2</sup> SNR

<sup>1</sup> Nortek

شد. مشخصات مکان های اندازه گیری پروفیل سرعت بر روی توده گیاهی مطابق جدول ۲ ارائه می شوند.

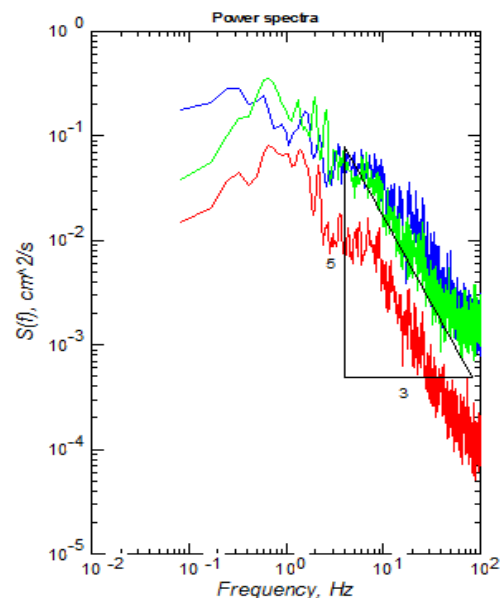
لازم به ذکر است برای مقایسه نتایج با حالت بدون پوشش گیاهی، یک پروفیل سرعت بر روی بستر شنی در رودخانه بدون حضور توده گیاهی به عنوان آزمایش شاهد برداشت

جدول ۲ مشخصات پروفیل های اندازه گیری بر روی توده گیاهی مورد مطالعه در رودخانه بهشت آباد

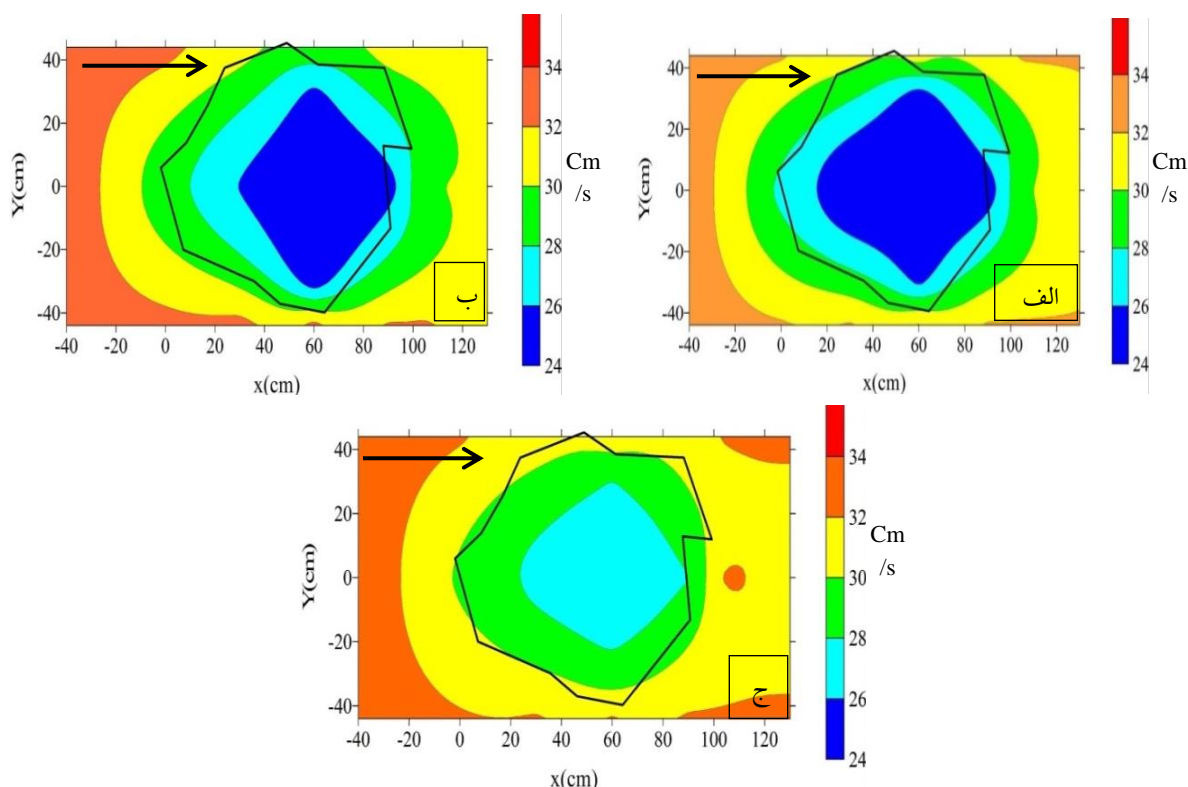
موقعیت	$ah_p=4.5$			$ah_p=3.3$			$ah_p=2.7$		
	$h$ (m)	$h_p$ (m)	$h/h_p$	$h$ (m)	$h_p$ (m)	$h/h_p$	$h$ (m)	$h_p$ (m)	$h/h_p$
$c_1$	۰/۳۸	----	---	۰/۳۸	----	---	۰/۳۸	----	---
$c_2$	۰/۳۵	۰/۰۶	۵/۸	۰/۳۵	۰/۰۷	۵	۰/۳۴	۰/۰۶	۵/۷
$c_3$	۰/۳۴	۰/۱	۳/۴	۰/۳۶	۰/۱	۳/۶	۰/۳۵	۰/۱	۳/۵
$c_4$	۰/۳۶	۰/۱	۳/۶	۰/۳۴	۰/۱	۳/۴	۰/۳۶۵	۰/۱	۳/۶۵
$c_5$	۰/۳۵	۰/۱	۳/۵	۰/۳۳	۰/۱	۳/۳	۰/۳۳	۰/۱	۳/۳
$c_6$	۰/۳۴	----	----	۰/۳۳	----	----	۰/۳۳	----	----
$c_7$	۰/۳۱	----	----	۰/۳۳	----	----	۰/۳۳	----	----
$b_4$	۰/۳۵	۰/۱۲	۲/۹	۰/۳۴۵	۰/۱	۳/۴۵	۰/۳۲۵	۰/۰۸	۴/۱
$a_4$	۰/۳۵	----	---	۰/۳۵	----	----	۰/۳۵	----	----
$d_4$	۰/۳۵	۰/۱	۳/۵	۰/۳۵	۰/۱	۳/۵	۰/۳۵	۰/۰۸	۴/۴
$e_4$	۰/۳۷	----	----	۰/۳۷	----	----	۰/۳۷	----	----

### ۳- بحث و نتیجه گیری

۳-۱- بررسی ساختار جریان متاثر از توده گیاهی  
توزیع سرعت متوسط افقی پیرامون و روی توده گیاهی مورد مطالعه در بازه انتخابی رودخانه بهشت آباد با سه تراکم مختلف در شکل ۶ نشان داده شده است. براساس این شکل به نظر می رسد که به دلیل افزایش مقاومت ناشی از حضور توده گیاهی در کلیه آزمایشات و انحراف جریان توسط آن، سرعت متوسط افقی در راستای توده گیاهی کاهش می یابد. این کاهش منجر به وقوع حداقل سرعت در پایین دست توده گیاهی می شود که موید دیگر مطالعات در این زمینه است (Folkard, 2005; Folkard, 2011; Ortiz et al., 2013; Zong and Nepf, 2011) همچنین مطابق این شکل، با افزایش تراکم سرعت متوسط افقی در راستای توده گیاهی کاهش می یابد.



شکل ۵ ارزیابی صحت داده برداشت شده در زیر تاج پوشش گیاهی توسط ADV از طریق آنالیز اسپکترال



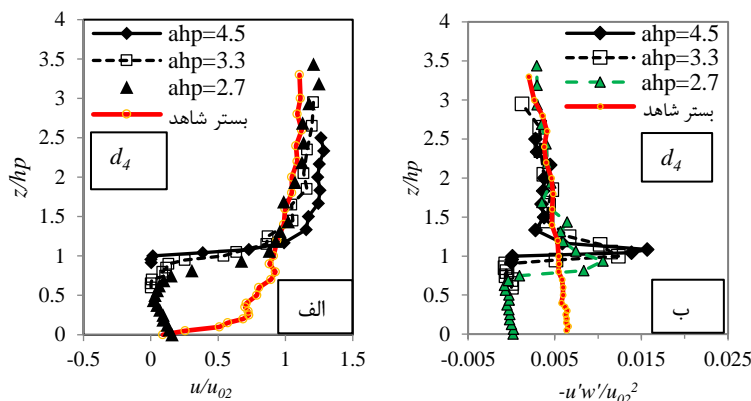
شکل ۶ دید فوقانی از توزیع سرعت متوسط افقی ناشی از تاثیر توده گیاهی مورد مطالعه باشاخص تراکم  $ah_p$  (الف) برابر ۴/۵، (ب) برابر ۳/۳ و (ج) برابر ۲/۷ در بازه انتخابی رودخانه بهشت آباد

اختلاط شبیه است. بر این اساس مشابه با لایه اختلاط پروفیل سرعت از دو سرعت مختلف و یک نقطه انحنا تشکیل شده است.

براساس شکل ۷ با افزایش تراکم توده گیاهی مورد مطالعه در بازه انتخابی رودخانه بهشت آباد، به دلیل افزایش مقاومت جریان داخل پوشش گیاهی، اختلاف سرعت بین جریان داخل و بالای پوشش گیاهی بیشتر شده است که در پی آن توربولانس و تنش رینولدز در تاج پوشش گیاهی در شکل ۷-ب افزایش می یابد، هرچند با افزایش تراکم، ضخامت لایه برشی (لایه اختلاط) کمتر می شود. Sukhodolova and Sukhodolov (2012) نیز مقادیر بزرگتر تنش ناشی از اختلاف سرعت بالاتر بر روی توده گیاهی با تراکم بیشتر را گزارش کردند.

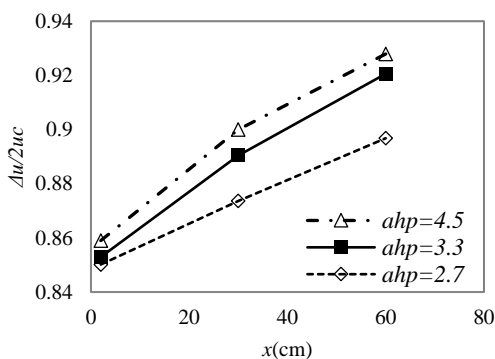
با مقایسه پروفیل سرعت افقی در شکل ۷-الف بر روی توده گیاهی با پروفیل سرعت بر روی بستر بدون حضور پوشش گیاهی (بستر شاهد) ملاحظه می شود که سرعت داخل پوشش گیاهی، به دلیل مقاومت توده گیاهی در برابر جریان کاهش یافته است، درحالی که جریان در بالای پوشش گیاهی دچار انقباض و براساس قانون پیوستگی سبب افزایش سرعت شده است. اختلاف سرعت در بالا و داخل پوشش گیاهی منجر به ایجاد ناپایداری کلونین هلمهوتز و در نتیجه تشکیل یک لایه برشی قوی در شکل ۷-ب و ایجاد نقطه عطف در شکل ۷-الف روی تاج پوشش گیاهی می شود. وجود این ناحیه که توسط Carollo et al. (2002); Ghisalberti and Nepf (2002); Nepf (2012); Nepf and Vivoni (2000); Sinsicalchi et al. (2012); Sukhodolov and Sukhodolova (2012); Sukhodolova and Sukhodolov (2012) گزارش شده است، به لایه





شکل ۷ الف) پروفیل سرعت افقی در موقعیت  $d_4$  با سه تراکم مختلف و ب) پروفیل تنش رینولدز در موقعیت  $d_4$  با سه تراکم مختلف

براساس شکل ۹-الف، تنش رینولدز بلافاصله بعد از توده گیاهی به دلیل جریان‌های بازگردش عمودی قوی افزایش می‌یابد. مطابق شکل ۹-ب، با افزایش تراکم گیاهی مورد مطالعه جریان‌های بازگردش عمودی در پایین‌دست توده گیاهی ( $c_6$ )، با فاصله ۱۵ سانتی‌متر از پوشش گیاهی) قوی‌تر و در پی آن تنش رینولدز در ارتفاعی هم‌تراز با تاج پوشش گیاهی بیشتر می‌شود. افزایش توربولانس بلافاصله بعد از توده گیاهی ناشی از جریان‌های بازگردش عمودی قوی توسط محققان بسیاری از جمله؛ Folkard (2005); Folkard (2011); Gurnell et al. (2012); Ortiz et al. (2013) نیز گزارش شده است.



شکل ۸ توزیع پارامتر نسبت اختلاف سرعت در بالا و داخل پوشش گیاهی به سرعت انتقال در راستای توده گیاهی

جریان در پایین‌دست توده گیاهی از دو الگوی مختلف تشکیل می‌شود: روی پوشش گیاهی دارای الگوی مشابه یک جت یا لایه اختلاط (جریان با دو سرعت مختلف و یک نقطه انحنا) است و در مجاور بستر الگویی شبیه لایه

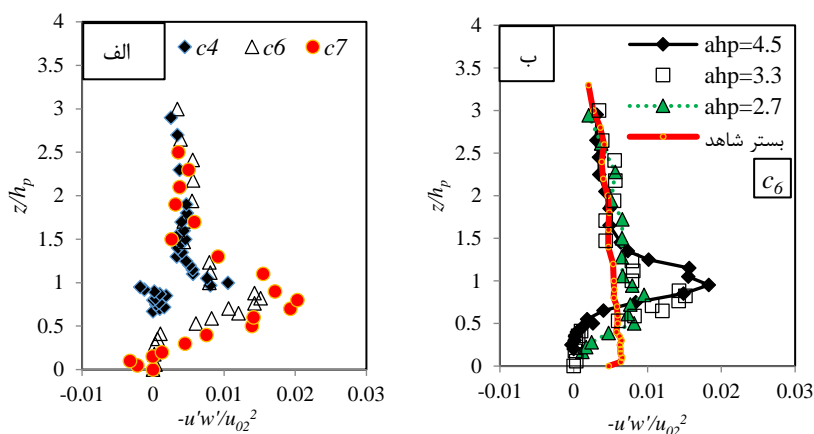
همان‌طور که بیان شد پروفیل سرعت روی پوشش گیاهی، مشابه با لایه اختلاط از دو سرعت مختلف و یک نقطه انحنا تشکیل شده است، هرچند یکی از تفاوت‌های اساسی لایه اختلاط متعارف با لایه اختلاط اندازه‌گیری شده روی پوشش گیاهی، مربوط به افزایش پارامتر بی‌بعد  $\frac{\Delta u}{2uc}$  در ناحیه درحال توسعه است. در این رابطه  $\Delta u$  اختلاف سرعت برابر  $(u_1 - u_2)$ ،  $u_c$  سرعت جابه‌جایی برابر  $(u_1 + u_2)/2$  است.  $u_1$  و  $u_2$ ، سرعت جریان در نواحی با سرعت کمتر و بیشتر از جایی است که سرعت تقریباً ثابت می‌شود. برخلاف لایه اختلاط متعارف که در آن پارامتر بی‌بعد  $\frac{\Delta u}{2uc}$  ثابت است؛ این پارامتر در جهت جریان روی توده گیاهی در ناحیه درحال توسعه افزایش می‌یابد (Sukhodolova, 2008; Sukhodolova and Sukhodolov, 2012).

شکل ۸ پارامتر بی‌بعد  $\frac{\Delta u}{2uc}$  را در راستای توده گیاهی مطالعه شده با سه تراکم مختلف را نشان می‌دهد. بر اساس شکل ۸ این پارامتر در ناحیه درحال توسعه در راستای توده گیاهی انتخابی افزایش می‌یابد. افزایش تراکم پوشش گیاهی در شکل ۸ منجر به افزایش اختلاف سرعت جریان در بالا و داخل پوشش گیاهی و افزایش پارامتر بی‌بعد  $\frac{\Delta u}{2uc}$  می‌شود.

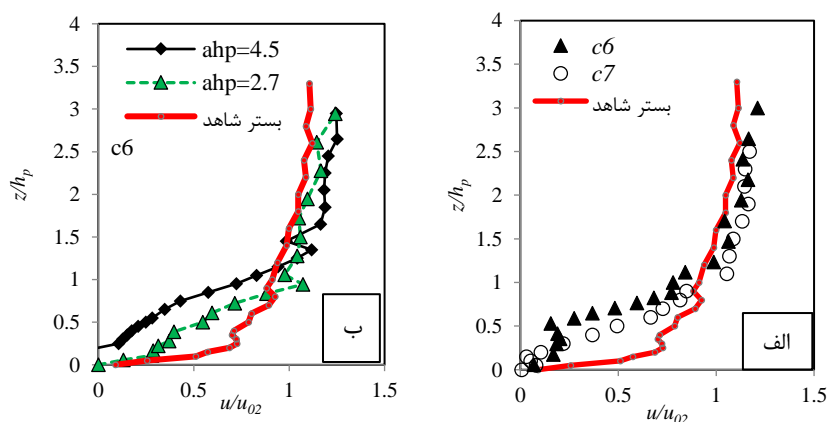
توده‌های گیاهی علاوه بر تاثیر بر ساختار جریان در لبه حمله و روی آن، جریان در پایین‌دست خود را نیز تحت تاثیر قرار می‌دهند. به منظور بررسی تاثیر توده گیاهی بر جریان پایین‌دست، شکل‌ها ۹ و ۱۰ به ترتیب پروفیل تنش رینولدز و سرعت در پایین‌دست توده گیاهی مورد مطالعه با سه تراکم مختلف را نشان می‌دهند.

تولید توربولانس به وسیله بررسی نوسانات سرعت بر اساس علامت دو مولفه  $u'$  و  $w'$  را فراهم می‌کند (Fazel, et al., 2015). نتایج حاصل از آنالیز کوادرنانت پیرامون توده گیاهی مورد مطالعه در بازه انتخابی رودخانه بهشت‌آباد در شکل ۱۱ بیانگر آن است که رویدادهای پرتاب و جاروب در مجاورت تاج پوشش گیاهی غالب هستند و با حرکت از تاج توده گیاهی به سمت سطح آب سهم رویدادهای پرتاب و جاروب کاهش و سهم رویدادهای برون‌رفت و درون‌رفت افزایش می‌یابد. این روند توسط محققین مختلفی از جمله Afzalimehr et al. (2011); Cui and Neary (2008); Finnigan (2000); Ghisalberti and Nepf (2002); Pang et al. (2014) نیز مشاهده شده است.

مرزی برقرار است (Sukhodolov and Sukhodolova, 2010). شکل ۱۰ همخوانی مناسب پروفیل سرعت با این الگوی جریان در پایین‌دست توده گیاهی مطالعه شده را نشان می‌دهد. جریان آشفته پیرامون توده گیاهی به صورت کاملاً نامنظم نیست بلکه به صورت دنباله‌های منظم با ساختار منسجم است. ساختار منسجم دارای یک طول عمر کوتاه است که شناخت آن توسط میانگین‌گیری در یک بازه زمانی امکان‌پذیر نیست. بنابراین شناخت ساختار منسجم که با زمان و مکان تغییر می‌کند توسط نمونه‌گیری شرطی و تکنیک‌های آماری امکان‌پذیر می‌باشد. آنالیز کوادرنانت تنش رینولدز یکی از روش‌های نمونه‌گیری شرطی است که به طور گسترده جهت شناخت ساختار منسجم استفاده می‌شود. نتایج آنالیز کوادرنانت اطلاعاتی پیرامون فرآیند



شکل ۹ پروفیل تنش رینولدز پایین‌دست توده گیاهی در الف) با تراکم  $ah_p$  برابر ۳/۳ و ب) در نقطه  $c_6$  با سه تراکم مختلف.

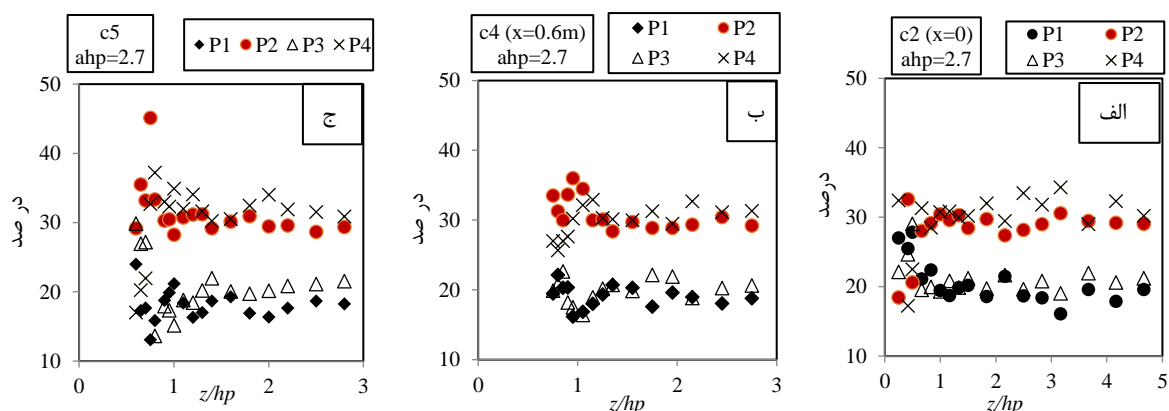


شکل ۱۰ پروفیل سرعت پایین‌دست توده گیاهی الف) با تراکم  $ah_p$  برابر ۳/۳ و ب) در نقطه  $c_6$  با تراکم مختلف.

گیاه و محاسبه نسبت هر پیشامد به مجموع چهار پیشامد (برون‌رفت، درون‌رفت، پرتاب و جاروب) به نتایج مشابهی دست یافتند. آنها پیشامد های پرتاب و جاروب را به ترتیب در داخل و بالای پوشش گیاهی غالب دانستند. علاوه بر این با مقایسه نتایج آنالیز کوادرنانت بر روی توده گیاهی در شکل ۱۱-ب با نتایج آنالیز کوادرنانت در پایین دست توده گیاهی مطابق شکل ۱۱-ج مشاهده می‌شود که به دلیل ناحیه برخاستگی ایجاد شده ناشی از توده گیاهی، تمایل به حرکت به سمت بستر (شبه رویداد جاروب) وجود دارد. به طوری که سهم رویداد جاروب در پایین دست توده گیاهی نسبت به روی آن به طور ملایم افزایش یافته است. این مسئله توسط سایر محققان از جمله Sinsicalchi et al. (2012) و Pang et al. (2014) نیز مشاهده شده است.

جدول ۳ مقایسه پیشامدهای غالب در بستر بدون پوشش گیاهی با پیشامدهای غالب روی توده گیاهی و پایین دست آن در عمق‌های مختلف را نشان می‌دهد. مطابق این جدول در زیر تاج پوشش گیاهی ( $z/h_p < 1$ ) به دلیل برخورد جریان با پوشش گیاهی تمایل به حرکت به سمت بالای پوشش گیاهی (مشابه پیشامد پرتاب) نسبت به بستر بدون پوشش گیاهی افزایش می‌یابد. همچنین در پایین دست توده گیاهی به دلیل ناحیه برخاستگی ایجاد شده تمایل به حرکت به سمت بستر (شبه پیشامد جاروب) افزایش می‌یابد.

مطابق شکل ۱۱-الف و ب در لبه حمله توده گیاهی و روی پوشش گیاهی ملاحظه می‌شود که جریان در ناحیه فوقانی پوشش گیاهی ( $z/h_p > 1$ ) تمایل به حرکت به سمت داخل پوشش گیاهی (مشابه رویداد جاروب) دارد و سهم جاروب بیش از پرتاب است، هرچند در زیر تاج پوشش گیاهی ( $z/h_p < 1$ ) به دلیل برخورد جریان با پوشش گیاهی تمایل به حرکت به سمت بالای پوشش گیاهی (مشابه رویداد پرتاب) دیده می‌شود. بنابراین زیر تاج پوشش گیاهی ( $z/h_p < 1$ ) سهم رویداد پرتاب افزایش می‌یابد، به طوری که در برخی موارد (نظیر شکل ۱۱-الف) رویداد پرتاب (ربع دوم) و جاروب (ربع چهارم) برابر و در برخی موارد (نظیر شکل ۱۱-ب) رویداد پرتاب غالب می‌گردد. لازم به ذکر است آنالیز کوادرنانت زیر تاج پوشش گیاهی و دستیابی به نتایج مناسب در این ناحیه نیازمند ادوات اندازه‌گیری دقیق‌تر از ADV است زیرا این سرعت‌سنج در اندازه‌گیری سرعت داخل پوشش به دلیل نویز بالا دارای محدودیت بوده و داده‌های برداشت شده نیاز به پالایش دارند که در این تحقیق از روش پیشنهادی Goring and Nikora (2002) برای این منظور استفاده شد. بر این اساس تعداد محدودی از نقاط زیر تاج پوشش گیاهی در این پژوهش مورد بررسی قرار گرفتند. سایر محققان از جمله Afzalimehr et al. (2011); Cui. and Neary (2008); Ghisalberti and Nepf (2002); Mohammadzadeh Miyab et al. (2015); Yan et al. (2017) با انجام آنالیز کوادرنانت بر روی بستر پوشیده از

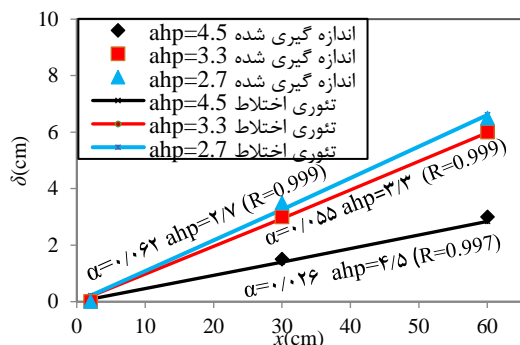


شکل ۱۱ آنالیز کوادرنانت الف) در لبه حمله توده گیاهی ب) در فاصله ۰/۶ متری از ابتدای توده گیاهی ج) انتهای توده گیاهی با تراکم  $ah_p=2/7$  در بازه انتخابی رودخانه بهشت آباد

جدول ۳ درصد رویداد غالب بر روی بستر بدون پوشش گیاهی، در راستا و پایین دست توده گیاهی با تراکم  $ah_p=2/7$

z/hp	z/h	بستر بدون پوشش گیاهی		روی توده گیاهی		پایین دست توده گیاهی	
		نوع رویداد	درصد	نوع رویداد	درصد	نوع رویداد	درصد
0/9	0/25	پرتاب	32/2	پرتاب	33/7	جاروب	37/2
1	0/29	جاروب	32/6	پرتاب	34/5	جاروب	32/3
1/5	0/43	جاروب	32/5	جاروب	30	جاروب	30/2
2/1	0/6	جاروب	32/3	جاروب	32/7	جاروب	34

معادلات اصلاحی برای جریان در حال توسعه ۵ و ۷ می‌پردازند. ضریب دراگ در این معادلات و در این پژوهش، توسط رابطه (۹) برآورد می‌شود.



شکل ۱۲ مقایسه ضخامت لایه اختلاط اندازه‌گیری شده (نقاط) با مقادیر برآورد شده بر اساس تئوری اختلاط در معادله ۲ (خط پر) در راستای توده گیاهی مورد مطالعه با سه تراکم مختلف در بازه انتخابی رودخانه بهشت‌آباد.

$$C_d = \frac{2u_*}{u^2} \quad (9)$$

در این معادله،  $u$  سرعت متوسط؛  $u_*$  سرعت برشی می‌باشد که با استفاده از روش مشخصات لایه مرزی<sup>۲</sup> (معادله ۱۰) قابل محاسبه است (Afzalimehr and Anctil, 2000). در روش مشخصات لایه مرزی از تمام داده‌های سرعت نقطه‌ای در پروفیل سرعت اندازه‌گیری شده استفاده می‌شود. با توجه به این که هر تغییری در بستر رودخانه و توده گیاهی در پروفیل سرعت منعکس می‌شود، روش مشخصات لایه مرزی تخمین مناسبی از سرعت برشی در جریان غیریکواخت فراهم می‌کند (Afzalimehr and Anctil, 2000; Afzalimehr and Rennie, 2009).

### ۲-۳- ارزیابی مدل لایه اختلاط در راستای توده گیاهی

به‌منظور مطالعه و بررسی شباهت‌ها و تفاوت‌ها میان تئوری لایه اختلاط متعارف (کلاسیک) و لایه اختلاط تشکیل شده بر روی توده گیاهی، مقایسه برآورد ضخامت لایه اختلاط ( $\delta$ ) ضروری است. ضخامت لایه اختلاط ( $\delta$ ) براساس فاصله عمودی بین موقعیتی که در آن سرعت داخل لایه اختلاط به مقادیر سرعت پیرامون لایه اختلاط (با دقت ۱۰٪) می‌رسد، اطلاق می‌شود (Sukhodolova and Sukhodolov, 2012). شکل ۱۲ ضخامت لایه اختلاط اندازه‌گیری شده (نقاط) و برآورد شده (خط) براساس تئوری لایه اختلاط در توده گیاهی مورد مطالعه در بازه انتخابی رودخانه بهشت‌آباد با سه تراکم مختلف را نشان می‌دهد. براساس شکل ۱۲ ملاحظه می‌گردد که ضرایب پخشیدگی ( $\alpha$ ) برابر ۰/۰۶۲، ۰/۰۵۵ و ۰/۰۲۶ منجر به بهترین تطابق با ضخامت لایه اختلاط اندازه‌گیری شده به ترتیب با تراکم‌های  $ah_p$  ۲/۷، ۳/۳ و ۴/۵ می‌شود. ضریب پخشیدگی با افزایش تراکم پوشش گیاهی از دامنه پیشنهادی توسط سایر محققان (۰/۰۶ الی ۰/۱۲) فاصله می‌گیرد زیرا با افزایش تراکم پوشش گیاهی ضخامت لایه برشی به دلیل عدم گسترش آزادانه پیچک‌ها<sup>۱</sup> کوچکتر می‌شود.

شکل ۱۳ به مقایسه پروفیل سرعت و شکل ۱۴ به مقایسه تنش رینولدز برآورد شده بر روی توده گیاهی مطالعه شده با سه تراکم مختلف بر اساس ادغام تئوری لایه اختلاط با

2. Boundary layer characteristics method

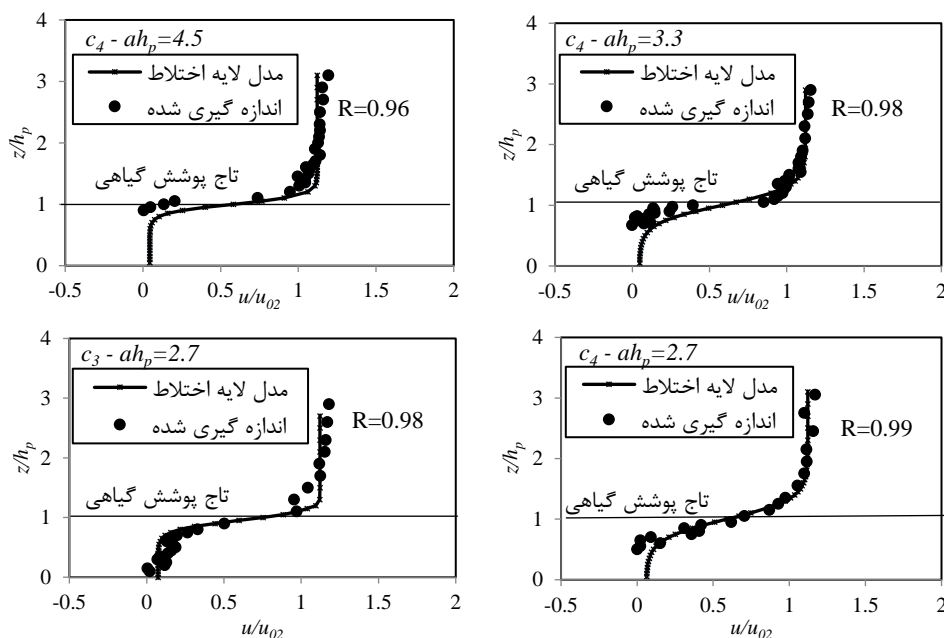
1. Eddies

ایجاد گرادیان فشار نامطلوب شده و در پی آن توزیع غیرخطی تنش رینولدز (توزیع محدب) مشاهده می‌شود (Afzalimehr and Dey, 2009; Afzalimehr et al., 2015). این نتایج توسط داده‌های آزمایشگاهی و مدل لایه اختلاط (شکل ۱۴) تایید می‌شوند. همچنین بر اساس شکل ۱۳ پروفیل سرعت اندازه‌گیری شده 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 انحناست، پروفیل تنش رینولدز جریان آشفته در شکل ۱۴ نیز به حداکثر خود می‌رسد و سپس در دو جهت بستر و سطح آب کاهش می‌یابد. در مطالعه حاضر به دلیل محدودیت ADV، سرعت در تمام موقعیت‌ها داخل پوشش گیاهی قابل اندازه‌گیری نمی‌باشد. به این دلیل در برخی مکان‌ها به دلیل خصوصیت پوشش گیاهی، نقطه انحناست 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.

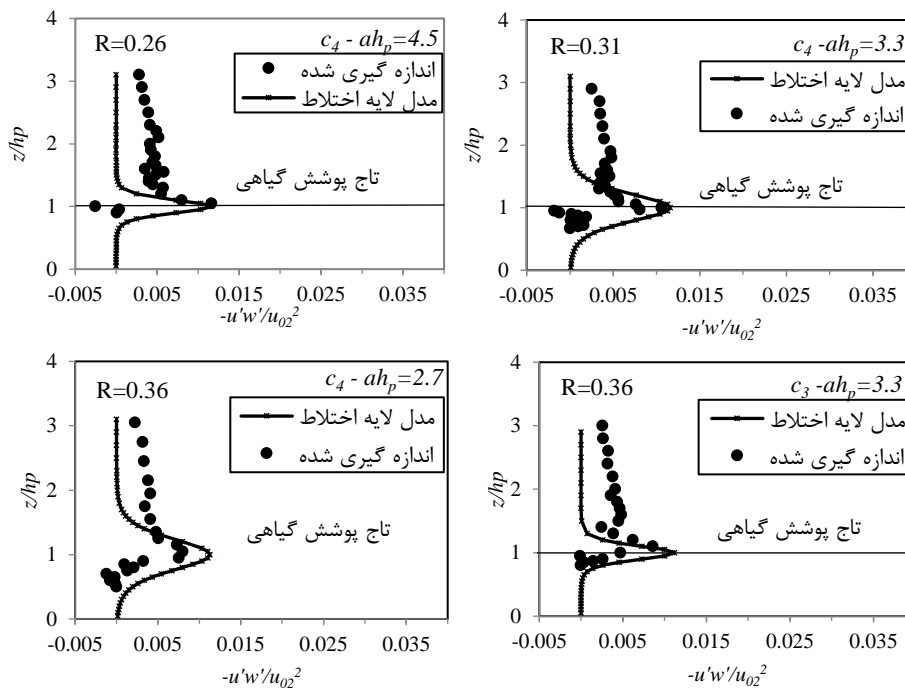
$$u_* = \frac{(\delta_* - \theta) u_{\max}}{C \delta_*} \quad (10)$$

در این معادله،  $C$  ضریب ثابت تجربی؛  $\delta_*$  ضخامت جابه‌جایی لایه مرزی؛  $\theta$  ضخامت اندازه حرکت لایه مرزی است.  $\delta_*$  و  $\theta$  براساس پروفیل سرعت اندازه‌گیری شده بر روی توده گیاهی مورد بررسی برآورد می‌شود.

نتایج حاصل نشان می‌دهند که تئوری لایه اختلاط با ادغام معادلات اصلاحی برای جریان درحال توسعه تطابق خوبی با داده‌های اندازه‌گیری شده سرعت دارد. اگرچه بین داده‌های تنش رینولدز اندازه‌گیری شده و برآورد شده اختلافی وجود دارد که دلیل آن پیچیدگی تعامل بستر قلوه سنگ و پوشش گیاهی است. بستر قلوه رودخانه بهشت‌آباد و افزایش تنش رینولدز ناشی از آن سبب اختلاف مقادیر تنش رینولدز برآورد شده در این رودخانه نسبت به داده‌های اندازه‌گیری شده می‌شود، هرچند در قسمت عمده از عمق جریان تطابق معقولی بین مدل و داده‌های اندازه‌گیری شده مشاهده می‌شود، به طوری که در شکل‌های ۱۴ توزیع محدب تنش‌های رینولدز در مدل اختلاط و مقادیر اندازه‌گیری شده نیز دیده می‌شود. حضور پوشش گیاهی سبب کندی جریان و

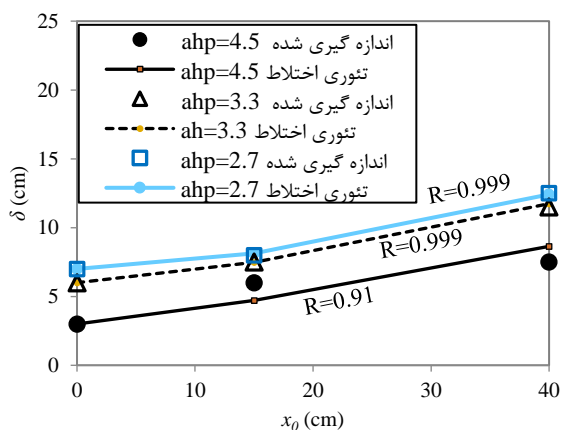


شکل ۱۳ مقایسه پروفیل سرعت برآورد شده از مدل لایه اختلاط با در نظر گرفتن جریان درحال توسعه با داده‌های اندازه‌گیری شده بر روی توده گیاهی مورد مطالعه در بازه انتخابی رودخانه بهشت‌آباد با سه تراکم مختلف



شکل ۱۴ 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 مورد مطالعه در بازه انتخابی رودخانه بهشت‌آباد با سه تراکم مختلف

پوشش گیاهی ضخامت لایه برشی در راستای توده گیاهی به دلیل عدم گسترش آزادانه پیچک‌ها کاهش می‌یابد (شکل ۱۲) که این مسئله بر ضخامت لایه اختلاط در پایین‌دست توده گیاهی نیز تاثیرگذار است.



شکل ۱۵ ضخامت لایه اختلاط اندازه‌گیری شده (نقطه)، محاسبه شده بر اساس تئوری اختلاط استاندارد (خط)، در پایین‌دست توده گیاهی مورد بررسی در بازه انتخابی رودخانه بهشت‌آباد در سه تراکم مختلف.

### ۳-۳- ارزیابی مدل لایه اختلاط در پایین‌دست توده گیاهی

جریان در پایین‌دست توده گیاهی دارای دو الگوی متفاوت است. در روی توده گیاهی با حرکت به سمت پایین‌دست الگوی جریان شبیه یک جت با ساختار لایه اختلاط است، در حالی که جریان مجاور بستر دارای الگوی لایه مرزی است. برای درک بهتر این تفاوت شکل ۱۵ مقایسه برآورد ضخامت لایه اختلاط اندازه‌گیری شده (نقطه) و محاسبه شده (خط) در پایین‌دست توده گیاهی مطالعه شده در بازه انتخابی رودخانه بهشت‌آباد (با سه تراکم مختلف) را نشان می‌دهد. ضخامت لایه اختلاط ( $\delta$ ) بلافاصله در پایین‌دست توده گیاهی بررسی شده در هر سه تراکم افزایش یافته و دامنه پیشنهادی برای ضریب پخشیدگی (۰/۰۹) تطابق خوبی با داده‌های اندازه‌گیری شده نشان می‌دهد.

مطابق شکل ۱۵ با افزایش تراکم پوشش گیاهی ضخامت لایه برشی در پایین‌دست توده گیاهی کوچکتر می‌شود. زیرا همان‌طور که پیشتر بیان گردید با افزایش تراکم

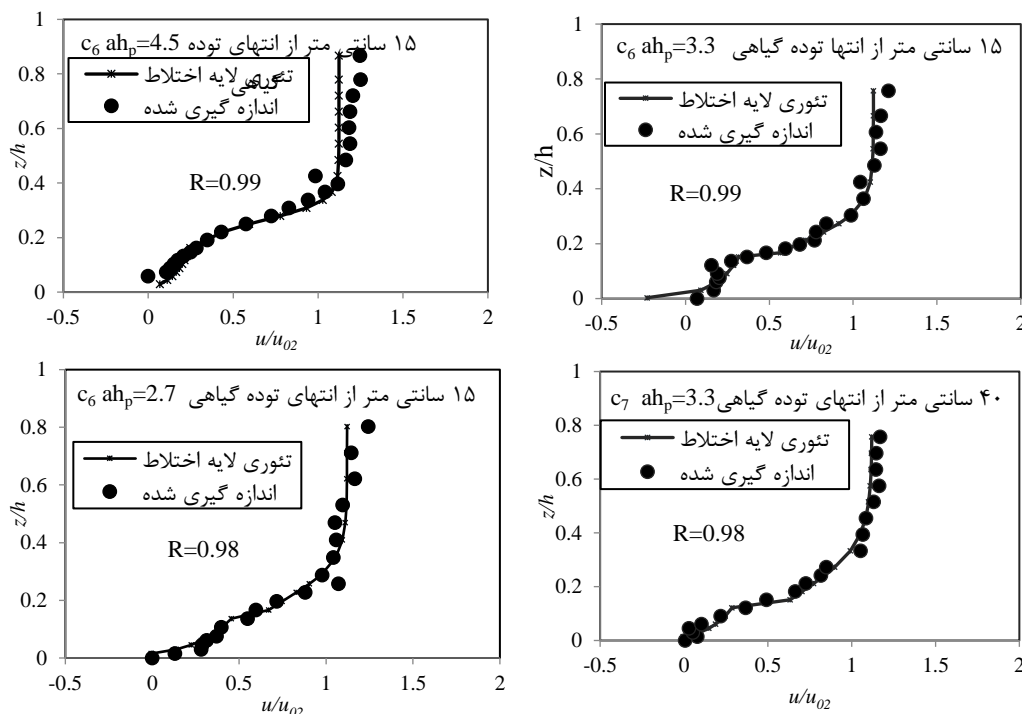
می‌یابد. ضریب تجربی لزجت گردابی ( $\gamma$ ) بلافاصله پایین دست توده گیاهی حدوداً ۲ الی ۳ برابر مقدار اسمی است که دلیل آن ساختار منسجم جریان در تعامل با پوشش گیاهی است.

#### ۴- نتیجه گیری

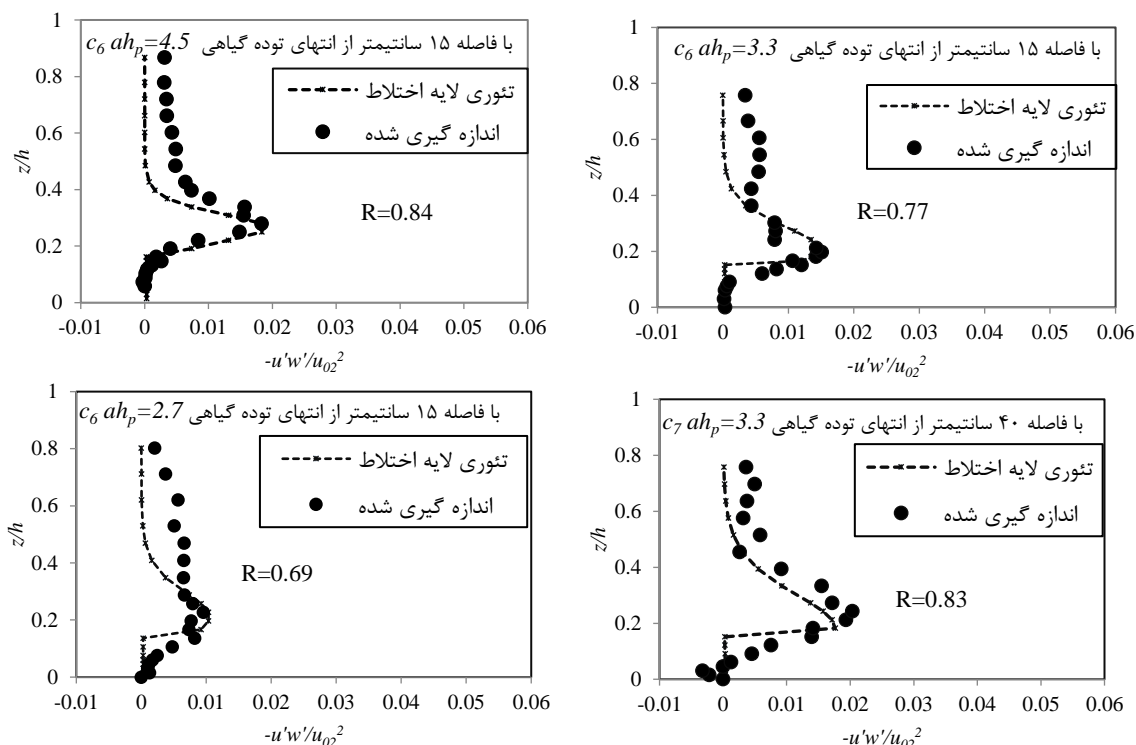
در تحقیق حاضر بررسی و مطالعه ساختار جریان پیرامون توده گیاهی مستغرق و منفرد در بازه انتخابی رودخانه قلوه سنگی بهشت‌آباد در جریان درحال توسعه با سه تراکم مختلف صورت گرفت. نتایج نشان دادند که پروفیل جریان روی پوشش گیاهی مشابه لایه اختلاط است اگرچه تاثیر جریان درحال توسعه یافته در تئوری لایه اختلاط استاندارد در نظر گرفته نشده است. از جمله تفاوت‌های اساسی لایه اختلاط متعارف با لایه اختلاط اندازه‌گیری شده روی پوشش گیاهی افزایش پارامتر  $\frac{\Delta u}{2u_c}$  در جهت جریان در ناحیه درحال توسعه است. همچنین یکی دیگر از تفاوت‌های تئوری اختلاط کلاسیک با تئوری اختلاط روی پوشش

شکل ۱۶ همخوانی مناسب مقادیر پروفیل سرعت اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده در پایین دست توده گیاهی بر اساس تئوری اختلاط را نشان می‌دهد. لازم به ذکر است توزیع سرعت در نزدیک بستر (عمق جریان  $z/h$  کوچکتر از ۰/۲) براساس قانون لگاریتمی برآورد می‌شود. براساس شکل ۱۶ پروفیل سرعت در پایین دست توده گیاهی مشابه لایه اختلاط شامل جریان با دو سرعت مختلف و یک نقطه انحنا است.

شکل ۱۷ به ارزیابی تئوری اختلاط برای برآورد تنش رینولدز بر اساس داده‌های اندازه‌گیری شده در پایین دست توده گیاهی در سه تراکم مختلف می‌پردازد. بر اساس شکل ۱۷ هر دو ناحیه ساختار جت مانند (لایه اختلاط) و لایه مرزی در پروفیل تنش رینولدز در پایین دست توده گیاهی قابل رویت است. شکل ۱۷ تطابق قابل قبولی بین مقادیر اندازه‌گیری شده و محاسبه شده نشان می‌دهد. مطابق شکل ۱۷ با افزایش تراکم توده گیاهی، ضخامت لایه اختلاط کاهش و آشفتگی در لایه اختلاط افزایش



شکل ۱۶ مقایسه پروفیل سرعت اندازه‌گیری شده و برآورد شده در پایین دست توده گیاهی مورد مطالعه در بازه انتخابی رودخانه بهشت‌آباد



شکل ۱۷ مقایسه پروفیل تنش رینولدز اندازه‌گیری شده و برآورد شده در پایین‌دست توده گیاهی مورد مطالعه در بازه انتخابی رودخانه بهشت‌آباد.

آباد (با سه تراکم مختلف) تطابق قابل قبولی نشان می‌دهند. اختلاف بین داده‌های اندازه‌گیری شده و برآورد ناشی از پیچیدگی تعامل بستر قلوه سنگ و پوشش گیاهی است.

پیشامد غالب در داخل توده گیاهی برای هر سه تراکم رویداد پرتاب است، هر چند در پایین‌دست پوشش گیاهی جاروب پیشامد غالب را تشکیل می‌دهد.

با ارزیابی جریان در پایین‌دست توده گیاهی مورد بررسی در بازه انتخابی رودخانه بهشت‌آباد مشاهده شد که جریان در پایین‌دست توده گیاهی از دو الگوی مختلف جریان حاصل می‌شود به نحوی که جریان در بالای پوشش گیاهی مشابه یک جت یا لایه اختلاط (جریان با دو سرعت مختلف و یک نقطه انحناء) و جریان مجاور بستر مشابه لایه مرزی است. تطابق نسبتاً مناسبی بین پروفیل سرعت و تنش رینولدز اندازه‌گیری شده و برآورد شده در پایین‌دست توده گیاهی بر اساس مدل ترکیبی تئوری اختلاط با قانون لگاریتمی مشاهده شد.

گیاهی مربوط به شرایطی است که رشد و توسعه پیچک‌ها به دلیل تراکم بسیار زیاد پوشش گیاهی محدود می‌شود به طوری که مقادیر ضریب پخشیدگی با افزایش تراکم پوشش گیاهی از دامنه پیشنهادی در تئوری اختلاط استاندارد (۰/۰۶ تا ۰/۱۲) فاصله می‌گیرند. با افزایش تراکم پوشش گیاهی ضخامت لایه اختلاط به دلیل عدم گسترش و توسعه آزادانه پیچک‌ها کوچکتر می‌شود. بر این اساس ضریب پخشیدگی توده گیاهی با تراکم ( $ah_p$ ) برابر ۲/۷، ۳/۳ و ۴/۵ به ترتیب برابر ۰/۰۶۲، ۰/۰۵۵ و ۰/۰۲۶ منجر به بهترین تطابق با ضخامت لایه اختلاط اندازه‌گیری شده می‌شود. در شرایط جریان بر روی توده گیاهی با شاخص تراکم ( $ah_p$ ) برابر ۲/۷، ضریب پخشیدگی به دلیل عدم وجود محدودیت در رشد پیچک‌ها و لایه اختلاط به دامنه پیشنهادی در تئوری اختلاط استاندارد (۰/۰۶ تا ۰/۱۲) نزدیک خواهد شد.

پروفیل‌های سرعت و تنش رینولدز برآورد شده بر اساس تئوری اختلاط با در نظر گرفتن جریان در حال توسعه، با داده‌های اندازه‌گیری شده در بازه انتخابی رودخانه بهشت-



$u_2$	سرعت جریان در بالای پوشش گیاهی
	میانگین سرعت در بالای پوشش گیاهی و مجاور سطح
$u_{2e}$	آب در ناحیه در حال توسعه
$u_c$	سرعت جابه جایی
$u'$	مولفه طولی نوسان سرعت
$u_*$	سرعت برشی
$-u'w'$	تنش رینولدز
$W$	عرض مقطع رودخانه
$w'$	مولفه قائم نوسان سرعت
$x$	فاصله از ابتدای توده گیاهی
$x_0$	فاصله از انتهای توده گیاهی
$z$	فاصله عمودی از بستر کانال
$z_c$	موقعیت مرکز لایه اختلاط
$\alpha$	ضریب پراکنش
$\Delta S$	متوسط فاصله بین ساقه‌ها
$\Delta u$	اختلاف سرعت جریان در بالا و داخل پوشش گیاهی
$\delta$	ضخامت لایه اختلاط
$\delta_*$	ضخامت جابه‌جایی لایه مرزی
$\gamma$	ضریب تجربی
$\theta_t$	لزجت گردابی
$\theta$	ضخامت اندازه حرکت لایه مرزی

### ۶- منابع

- 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, 519-541. DOI: 10.1007/978-3-319-17719-9.
- Afzalimehr, H. and Ancil, F. (2000). Accelerating shear velocity in gravel bed channels. *J. hydrol. Sci. IAHS*. 45(1): 143-155.
- Afzalimehr, H., and Dey, S. (2009). Influence of Bank Vegetation and Gravel Bed on Velocity and Reynolds Stress Distributions. *Int. J. Sediment Res.* 24(2): 236-246.
- Afzalimehr, H., Moghbel, R., Gallichand, J., and Sui, J. (2011). Investigation of turbulence characteristics in channel with dense vegetation. *Int. J. Sediment. Res.* 26: 269-282.

بی‌توجهی به اکوسیستم رودخانه و عوامل تشکیل‌دهنده آن سبب برآورد نادرست پارامترهای هیدرولیکی و استنتاج نامناسب از آنها در پروژه‌های مهندسی رودخانه می‌شود. بر این اساس نتایج این تحقیق می‌تواند در کاربرد مدل‌های هیدرولیکی مورد نظر قرار گیرد. به‌گونه‌ای که تخمین صحیح از تاثیر پوشش گیاهی بر جریان در مدل‌ها و تئوری‌های برآورد بار معلق، بار بستر و غلظت آلاینده متاثر از توده گیاهی دارای اهمیت است.

### ۵- فهرست علائم

$A$	مساحت مقطع انتخابی رودخانه
$A_i$	مساحت هر یک از اجزاء سطح مقطع
$a$	سطح پیشانی پوشش گیاهی در واحد سطح
$C_D$	ضریب دراگ
$d$	قطر هر ساقه گیاه منفرد
$d_{50}$	قطر میانه ذرات
$Fr$	عدد فرود
$g$	شتاب ثقل
$h$	عمق جریان
$H$	عمق متوسط جریان
$h_p$	ارتفاع پوشش گیاهی
$P$	محیط هیدرولیکی
$R$	شعاع هیدرولیکی
$Re$	عدد رینولدز
$S_0$	شیب متوسط
$u$	سرعت در هر عمق از بستر کانال
$U$	سرعت متوسط مقطع انتخابی
$U_i$	سرعت متوسط در هر یک از اجزاء سطح مقطع
$\bar{u}_{o1}$	سرعت نزدیک شونده به توده گیاهی در مجاور بستر
	سرعت نزدیک شونده به توده گیاهی در مجاور سطح آب
$u_{o2}$	
$u_1$	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
$\bar{u}_{1e}$	

- Michalke, A. (1965). Spatially growing disturbances in an inviscid shear layer. *J. Fluid. Mech.* 23: 521-544.
- Mohammadzadeh Miyab, N., Afzalimehr, H., and Singh, V. P. (2015). Experimental investigation of influence of vegetation on flow turbulence. *J. Hydraul. Eng.* 4: 54-69.
- Nepf, H. (2012). Hydodynamic of vegetated channels. *J. Hydraul. Res.* 50(3): 262-279.
- Nepf, H., and Vivoni, E. (2000). Flow structure in depth-limited, vegetated flow. *J. Geophys. Res.* 105 (C12): 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: 2585-2599.
- Pang, C. C., Wu, D., Lai, X. J., Wu, S. q., and Wang, F. F. (2014). Turbulence structure and flow field of shallow water with a submerged ell grass patch". *Ecol. Eng.* 69: 201-205.
- 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. 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): 434-446.
- 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
- Sukhodolova, T. A. (2008). Studies of Turbulent flow in vegetated river reaches with implications for transport and mixing processes. Ph.D. Dissertation, Humboldt University, Berlin.
- 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.* 40. W10533.
- Wang, G., Shi, F., Chen, P. P., and Sui, J. (2015). Impact of bridge pier on the stability of ice jam. *J. Hydrodyn.* 27: 865-871.
- Wolman, M. G. (1954). A method of sampling coarse river bed material. *Trans. AGU.*, 35(6): 951-956.
- 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): 1-9.
- Afzalimehr, H., and Rennie, C. D. (2009). Determination of bed shear stress using boundary layer parameters in a gravel-bed river. *Hydrolog. Sci. J.* 54: 147-159.
- Carollo, F. G., Ferro, V., and Termini, D. (2002). Flow velocity measurement in vegetated Channels. *J. Hydraul. Eng.* 128(7): 664-673.
- Cui, J., and Neary, V. (2008). LES study of turbulent flows with submerged vegetation. *J. Hydraul. res.* 46(3): 307-316.
- Fazel, E.; Afzalimehr, H., and Sui, J. (2015). Turbulence characteristics of favorable pressure gradient flows in gravel- bed channel with vegetated walls. *J. Hydrol. Hydromech.* 63: 154-163.
- Finnigan, J. J. (2000). Turbulence in plant canopies. *Annu. Rev. Fluid Mech.* 32: 519-571.
- Folkard, A. (2005). Hydrodynamics of model *Posidonia oceanica* patch in shallow water. *Limnol. Oceanogr.* 50(5): 1592-1600.
- Folkard, A.M. (2011). Flow Regimes in gaps within stands of flexible vegetation: laboratory flume simulations". *Environ Fluid Mech.* 11: 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.
- Ghisalberti, M., and Nepf, H. M. (2004). The limited growth of vegetated shear layers. *Water Resour. Res.* 40, W07502, doi:10.1029/2003WR002776.
- Goring, D. G., and Nikora, V. I. (2002). Despiking acoustic Doppler velocimeter data. *J. Hydraul. Eng.* 128: 117-126.
- Gurnell, A. M.; Bertoldi, W., and Corenblit, D. (2012). Changing river channels: The roles of hydrological processes, Plants and pioneer fluvial landforms in humid temperate, mixed load, Gravel bed rivers. *Earth Sci, Rev.* 111: 129-141.
- 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): 277-301.

Yan, Ch., Nepf, H. M. Huang, W. X., and Cui, G. X. (2017). Large Eddy Simulation of flow and scalar transported in a vegetated channel. *Environ. Fluid Mech.* 17: 497–519.

Zong, L., and Nepf, H. (2011). Spatial distribution of deposition within a patch of vegetation. *Water Resour. Res.* 47. W03516. doi: 10.1029/2010WR009516.

## Investigation of the flow structure within a vegetation patch in a rubble-bed river

Mahsa Jahadi<sup>1</sup> and Hossein Afzalimehr<sup>2\*</sup>

1- Department of Water Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan

2- Department of Civil Engineering, Iran University of Science and Technology

\*hafzali@iust.ac.ir

### Abstract

The impact of submerged vegetation patch on the hydraulic parameters such as flow resistance and sediment transfer is significant. However, a few researches in this field have been reported. Flow within and just above the vegetation patch behaves similarly to the mixing layer rather than the boundary layer, thus at this research, the mixing layer theory to quantify the interaction between flow and submerged vegetation patch was evaluated. Although, the effects of the not fully-developed flow over small patches has not been considered in the canonical mixing layer theory. Accordingly, it is essential to combine a canonical mixing layer model and modified equations to quantify evolving area along the patch. This study used the field experiments to evaluate the applicability of this theory. Field experiments were conducted over vegetation patches with three different densities in Beheshtabad River with rubble bed in Chaharmahal-Bakhtiari province. The results reveal that there is a reasonable agreement between the measured values of velocity and Reynolds stress profile with the estimated ones by evolving mixing layer equations. However, the spreading coefficient of this model is reduced by increasing the canopy density thanks to the limitation in the vertical development of eddies. Quadrant analysis over vegetation patch shows the dominate event under the crest of canopy is “ejection” and over the crest of canopy is “sweep”. Moreover, the contribution of “sweep” event increases slightly at downstream of vegetation patch.

**Keywords:** Vegetation patch, Beheshtabad River, Mixing layer, Quadrant analysis, Reynolds stress.