

## Modeling Bed Load Transport through Vegetated Channels Using Conceptual Pseudo Fluid Model

HOSSEIN RIAHI-MADVAR\*

1. Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Vali-e-Asr University of Rafsanjan, Rafsanjan, Iran  
(Received: Aug. 13, 2020- Revised: Oct. 20, 2020- Accepted: Oct. 31, 2020)

### ABSTRACT

Bed load transport modeling in rivers and channels with vegetation over bed and banks is important. On the other hand, the complexity of bed load transport through vegetation and shortcoming of previous studies, declare the necessity of developing new models. Therefore, in the present study, the pseudo fluid model in combination with bed shear stress and resistance equation was used based on stochastic method of bed load transport. The developed model uses new definitions for dimensionless parameters of flow intensity and bed load rate that include vegetation properties with fluid and sediments. The calibration and verification of model results with experimental results showed that the model with  $R^2=0.91$  and  $RMSE=8.2$  have accurate capability in modelling bed load transport through vegetation. The parametric analysis of vegetation features and comparing the results with previous equations showed the reduction of 45 and 68 % in absolute mean error in Mayer-Peter-Muler ( $R^2=0.45$ ,  $RMSE=231.9$ ) and Parker ( $R^2=0.75$ ,  $RMSE=91.9$ ) models, which indicates the superiority of developed model and the presented framework can be used in hydraulic analysis of sedimentation engineering in rivers.

**Keywords:** Bed Load Transport, Shear Stress, Flow Through Vegetation, Pseudo Fluid Model.

## کاربرد مدل مفهومی شبه‌سیال در مدلسازی انتقال بار بستر رسوبات در آبراهه‌های حاوی پوشش گیاهی

حسین ریاحی مدوار\*

۱. گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ولی‌عصر (عج) رفسنجان، ایران.  
(تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۵/۲۳ - تاریخ بازنگری: ۱۳۹۹/۷/۲۹ - تاریخ تصویب: ۱۳۹۹/۸/۱۰)

### چکیده

مدلسازی انتقال بار بستر در رودخانه‌ها و آبراهه‌های حاوی پوشش گیاهی در بستر و سواحل، از اهمیت کاربردی ویژه‌ای برخوردار است و پیچیدگی پدیده انتقال باربستر از درون پوشش گیاهی از یک‌طرف و محدود بودن تحقیقات در این زمینه از طرف دیگر، ضرورت توسعه مدل‌های مناسب را مشهود می‌سازد. به همین منظور در این تحقیق از مدل مفهومی شبه‌سیال در ترکیب با معادلات تنش برشی و مقاومت بستر جریان از درون پوشش گیاهی استفاده شده است و مبتنی بر تحلیل احتمالاتی انتقال باربستر، مدلی برای انتقال بار بستر درون پوشش گیاهی توسعه مدل یافته است. این مدل براساس تعریف جدیدی از پارامترهای بدون بعد شدت جریان و شدت انتقال بار بستر رسوبات توسعه یافته است که خصوصیات پوشش گیاهی را با خصوصیات جریان و رسوبات ترکیب می‌کند. واسنجی توزیع احتمال تخمینی مدل و ضرایب مدل و ارزیابی دقت آن در مقایسه با نتایج داده‌های آزمایشگاهی نشان داد مدل توسعه یافته با  $R^2=0.91$  و  $RMSE=8.2$  دقت مطلوبی در تخمین باربستر رسوبات در مطالعه موردی دارد. تحلیل پارامتریک مشخصات پوشش گیاهی و همچنین مقایسه نتایج مدل شبه‌سیال توسعه یافته با مدل بار بستر پارکر ( $R^2=0.45$ ،  $RMSE=231.9$ ) و مدل مایر-پیتر-مولر ( $R^2=0.75$ )،  $RMSE=91.9$  نشان داد مدل توسعه یافته دقت بهتری در تخمین باربستر رسوبات از درون پوشش گیاهی دارد و به ترتیب ۴۵ و ۶۸ درصد، خطای مطلق نسبی را نسبت به آنها کاهش داده است. رویکرد توسعه یافته در تحقیق حاضر قابلیت توسعه برای تحلیل هیدرولیکی مسایل مهندسی رسوب در رودخانه را دارد.

**واژه‌های کلیدی:** بار بستر رسوبات، تنش برشی، جریان درون پوشش گیاهی، مدل شبه‌سیال.

### مقدمه

وجود پوشش گیاهی در بستر و ساحل آبراهه‌ها و رودخانه‌ها با افزایش مقاومت حاصله از درگ پوشش گیاهی، کاهش سرعت جریان، افزایش عمق جریان، کاهش سطح مقطع موثر عبور جریان، تأثیری زیادی بر هیدرولیک و هیدرودینامیک جریان در اکوسیستم‌های آبی دارد (Cavedon, 2012) و باعث تغییر و تعدیل جریان آشفته در رودخانه و دشت‌های سیلابی، ایجاد نیروی درگ مازاد بر توزیع سرعت طولی و عرضی، تنشهای توربولانسی و رینولدزی جریان می‌شود که در نهایت تغییر این پارامترها به طور مستقیم بر انتقال بار بستر در رودخانه تأثیر دارد (Zong and Nepf, 2010; Armanini and Cavedon, 2019).

انتقال رسوبات در جریان درون کانال‌های روباز یک پدیده تصادفی پیچیده است که تحت تأثیر پارامترهای مختلفی از قبیل خصوصیات جریان، خصوصیات رسوبات، خصوصیات سیال و مشخصات هندسی مقطع عبور جریان قرار می‌گیرد و مدلسازی آن همواره با عدم قطعیت قابل توجه در نتایج همراه است (Ebtehaj et al., 2020; Qasem et al., 2017; Riahi-Madvar )

Roushangar and Shahnazi, 2019; Aminian and Seifi, 2018  
et al., 2019; Noori and Amini, 2020). همچنین وجود پوشش گیاهی باعث ایجاد گرادیان سرعت شدید در جهات طولی، عرضی و عمقی می‌شود که خود باعث ایجاد لایه برشی قوی بین جریان عبوری از روی پوشش گیاهی و جریان عبوری از قسمت بدون پوشش رودخانه می‌شود (Stoesser et al., 2010). بنابراین، ملاحظه می‌شود که با داشتن معادلات مقاومت جریان پوشش گیاهی و انتقال رسوبات می‌توان مدلسازی هیدرولیکی جریان در آبراهه‌های حاوی پوشش گیاهی در بستر و جداره‌ها را انجام داد (Wu et al., 2005).

وجود پوشش گیاهی علاوه بر پیچیدگی‌های ذاتی انتقال بار بستر در رودخانه‌ها، با توجه به تأثیرهای ناشناخته آن بر هیدرودینامیک جریان، باعث افزایش درجه پیچیدگی فرآیندهای انتقال رسوب در جریان کانال‌های روباز می‌شود (Armanini and Cavedon, 2019). تأثیر پوشش گیاهی در اغلب مطالعات هیدرولیکی جریان در آبراهه‌های حاوی پوشش گیاهی بصورت ترم‌هایی از زبری و مقاومت جریان (Li et al., 2015; Afzalimehr )

رسوبات در مخلوط است. بررسی تغییرات غلظت در رآکتور بستر سیال (Gibilaro *et al.*, 2007)، انتقال رسوبات جریان غلیظ (Wan and Wang, 1994)، ته نشینی رسوبات (Cheng, 1997)، تخمین ضریب درگ در جریان از درون پوشش گیاهی (Cheng, 2013)، تخمین سرعت جریان از درون بستر سنگریزه (Cheng *et al.*, 2014) از جمله مطالعاتی است که با کاربرد مفهوم شبه سیال و چگالی نسبی مدلسازی شده‌اند.

علیرغم نمونه‌های نسبتاً موفقی که از کاربرد مدل مفهومی شبه سیال در مطالعات ترکیب سیال - ذرات جامد وجود دارد، ولی در زمینه مدلسازی باربستر از درون پوشش گیاهی با مدل مفهومی شبه سیالی مطالعه‌ای وجود ندارد. بنابراین با توجه به محدودیت مطالعات انتقال بار بستر در جریان درون پوشش گیاهی و جنبه‌های کاربردی انتقال بار بستر در پوشش گیاهی برای مطالعات مهندسی رودخانه، از یک طرف و تاثیر توامان تراکم پوشش گیاهی و رسوبات بر انتقال بار بستر، مقاله حاضر با هدف توسعه مفهوم مدل شبه سیال برای مدلسازی بار بستر از درون پوشش گیاهی انجام شده است و مبتنی بر انتقال تئوری بار بستر اینشتین (Einstein, 1950)، و روش احتمالاتی/قطعی Armanini and Cavedon (2019) و اعمال اصلاحاتی در آن، مدلی برای محاسبه بار بستر در آبراهه‌ها و کانال‌های حاوی پوشش گیاهی براساس مفهوم شبه سیال توسعه یافته است و دقت آن با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی موجود در شبیه‌سازی انتقال باربستر در کانال‌های حاوی پوشش گیاهی ارزیابی شده است.

## مواد و روش‌ها

### توسعه مدل شبه سیال انتقال باربستر در جریان از درون پوشش گیاهی

هدف اصلی تحقیق حاضر توسعه مدلی برای تخمین باربستر انتقال رسوبات در جریان از درون پوشش گیاهی با استفاده از مدل مفهومی شبه سیال و مبتنی بر تئوری بار بستر اینشتین و توسعه روش Armanini and Cavedon (2019) برای مفهوم شبه سیال است. در روش شبه سیال از یک سیال با چگالی و لزجت ظاهری متناسب با دو ماده مخلوط استفاده می‌شود. در این صورت جرم مخصوص ظاهری ( $\rho'$ ) و لزجت ظاهری ( $\mu'$ ) بصورت زیر تعریف می‌شوند:

(رابطه ۱)

$$\rho' = \rho(1 - \lambda) + \rho_s \lambda, \quad \mu' = \mu(1 + \alpha \lambda),$$

$$v_r = \frac{v'}{v} = \frac{\rho \mu'}{\mu \rho'} = \frac{\mu_r}{1 + \Delta \lambda}$$

که در آن  $\lambda$  تراکم پوشش گیاهی و  $\alpha$  ضریب ثابت که در مدل شبه سیال ۸۰ فرض شده است (Cheng, 2013)،  $v_r$  نسبت

گیاهی (Armanini, 2018; *et al.*, 2019)، نیروی کشسانه و درگ پوشش Etminan *et al.*, 2017; Cheng and Nguyen, 2011; Liu *et al.*, 2020)، مدلسازی عددی با مدل‌های آشفتگی اصلاح شده (Stoesser *et al.*, 2010; Kim *et al.*, 2012; Ai *et al.*, 2020) مطالعه شده است که تاثیر وجود پوشش گیاهی را بصورت یک مقاومت و زبری مازاد قابل توجه نسبت به مقاومت بستر و زبری جداره‌ها لحاظ کرده‌اند. افزایش عمق، کاهش تنش برشی آشفته بستر و کاهش سرعت در اثر وجود پوشش گیاهی باعث افزایش ته نشینی، کاهش برداشت رسوبات و کاهش بار باستر و فرسایش بستر می‌شود (Neary *et al.*, 2012).

با وجود مطالعات متعددی که در زمینه انتقال بار بستر در کانال‌ها و رودخانه‌ها انجام شده است، ولی در زمینه انتقال بار بستر در جریان از درون پوشش گیاهی مطالعات محدودی وجود دارد (Jordanova and James, 2003; Le Bouteiller and Venditti, 2015; Armanini and Cavedon, 2019). مطالعات پیشین، انتقال رسوبات در کانال‌های حاوی پوشش گیاهی، تابع شرایط هیدرولیکی جریان، مشخصات هندسی مقطع، مشخصات پوشش گیاهی ویژگی‌های رسوبات است که در مدل-های مرسوم بار بستر خصوصیات پوشش گیاهی وارد نشده است (Montakhab *et al.*, 2012). انتقال رسوب در کانال‌های حاوی پوشش گیاهی در اغلب مطالعات براساس معادلات بار بستر در جریان‌های فاقد پوشش گیاهی با این فرض انجام شده است که تنش برشی بستر  $\tau_0$  سبب فرسایش و انتقال رسوبات بار بستر می‌شود، و تنش برشی براساس روابط مبتنی بر جریان‌های بدون پوشش گیاهی محاسبه شده است (Weiming and Zhiguo, 2009; Montakhab *et al.*, 2012; Le Bouteiller and Venditti, 2015) و سپس تنش برشی محاسبه شده وارد معادلات انتقال رسوب شده و بار بستر تخمین زده می‌شود. این در حالی است که مکانیسم هیدرولیک جریان و انتقال رسوب در کانال‌های حاوی پوشش گیاهی با شرایط جریان بدون پوشش گیاهی متفاوت است و لازم است تخمین دقیقی از شعاع هیدرولیکی موثر، تنش برشی بستر و سایر پارامترهای موثر بر انتقال رسوبات در جریان درون پوشش گیاهی در این شرایط داشت (Wu and Wu *et al.*, 2005; He, 2009; Yager and Schmeekle, 2013).

به همین منظور در مقاله حاضر از مدل مفهومی شبه سیال برای مدلسازی محیط سه گانه سیال- رسوب - پوشش گیاهی استفاده شده است. مدل مفهومی شبه سیال در حقیقت مخلوط رسوب - سیال را بعنوان یک سیال جدید با چگالی ظاهری (یا مخلوط) و لزجت مخصوص به خود در نظر می‌گیرد که با این مشخصات در جریان عاری از رسوبات متفاوت است و تابع غلظت

که  $n_v$  تعداد گیاهان است. تنش برشی کل بستر در جریان حاوی پوشش گیاهی ( $\tau_{tot}$ ) و تنش برشی بستر در اثر ذرات ( $\tau_o$ ) براساس مدل شبه سیال برابر است با:

$$\tau_{tot} = \gamma' R S_f = \rho' u_{*tot}^2, \quad \longrightarrow \quad u_{*tot}^2 = S_f g R$$

$$\tau_o = \rho' u_{*o}^2 \quad (\text{رابطه ۶})$$

که در آن R شعاع هیدرولیکی،  $u_{*o}$  سرعت برشی مرتبط با ذرات، و  $u_{*tot}^2$  سرعت برشی کل متناسب با ذرات و پوشش گیاهی، و  $S_f$  شیب خط انرژی کل است. همچنین نیروی درگ براساس مدل شبه سیال برابر است با:

$$F_D = \frac{C_D \rho' U^2 d_v h}{2} \quad (\text{رابطه ۷})$$

که در آن  $C_D$  ضریب درگ،  $d_v$  قطر ساقه گیاه و  $h$  عمق جریان است. و با تعریف تراکم پوشش گیاهی  $\lambda$  بصورت زیر:

$$\lambda = \frac{n_v \pi d_v^2}{4 P L} \quad (\text{رابطه ۸})$$

با جایگذاری معادلات فوق در معادله (۵)، معادله سرعت برشی کل براساس خصوصیات پوشش گیاهی به صورت زیر بدست می آید:

$$(\text{رابطه ۹})$$

$$u_{*tot}^2 = u_{*o}^2 + \frac{1}{P L} \sum_{i=1}^{n_v} \frac{C_D U^2 d_v h}{2} = u_{*o}^2 \left( 1 + \frac{n_v d_v h C_D U^2}{2 P L u_{*o}^2} \right) = u_{*o}^2 \left( 1 + \frac{2 \lambda h C_D U^2}{\pi d_v u_{*o}^2} \right)$$

همچنین با تعریف نسبت سرعت های  $\frac{U}{u_{*o}}$  بصورت تابعی نمای از نسبت عمق به قطر ساقه گیاه به صورت زیر:

$$\frac{U}{u_{*o}} = K_0 \left( \frac{h}{d_v} \right)^{K_1} \quad (\text{رابطه ۱۰})$$

که در آن  $k_1, k_0$  ضرایب ثابت است و با جایگذاری آن در معادله (۹) داریم:

$$(\text{رابطه ۱۱})$$

$$u_{*tot} = u_{*o} \left[ 1 + \frac{2 \lambda h C_D}{\pi d_v} \left( K_0 \left( \frac{h}{d_v} \right)^{K_1} \right)^2 \right]^{0.5} = u_{*o} \left[ 1 + \beta_{veg} \lambda \left( \left( \frac{h}{d_v} \right)^{\alpha_{veg}} \right) \right]^{0.5}$$

که در آن  $\alpha_{veg}$  و  $\beta_{veg}$  ضرایب ثابت مدل به ترتیب برابر ۴۰ و ۱ بدست آمده است. بنابراین در این حالت پارامتر شدت جریان بدون بعد کل با لحاظ اثرات پوشش گیاهی برابر است با:

$$(\text{رابطه ۱۲})$$

$$\Psi_{tot} = \frac{g \Delta' d_{eff}}{u_{*o}^2 [1 + \beta_{veg} \lambda \left( \left( \frac{h}{d_v} \right)^{\alpha_{veg}} \right)]} = \frac{\Psi_o}{[1 + \beta_{veg} \lambda \left( \left( \frac{h}{d_v} \right)^{\alpha_{veg}} \right)]}$$

و طبق پیشنهاد Armanini et al. (2015) پارامتر شدت جریان بدون بعد شبه سیال مرتبط با پوشش گیاهی ( $\Psi'_{veg}$ ) براساس سرعت برشی کل اصلاح می شود و برابر است با:

$$\Psi'_{veg} = \frac{g^{(1-\lambda)} \Delta' d_{eff}}{u_{*tot}^2} \left[ 1 + \beta_{veg} \lambda \left( \left( \frac{h}{d_v} \right)^{\alpha_{veg}} \right) \right] \quad (\text{رابطه ۱۳})$$

که در این رابطه  $d_{eff}$  قطر موثر ذرات است و طبق نظر

لزجت سینماتیکی شبه سیال به لزجت سینماتیکی سیال و  $\mu_r$  نسبت لزجت دینامیکی شبه سیال به لزجت دینامیکی سیال است و بنابراین مشاهده می شود که در مدل شبه سیال خصوصیات پوشش گیاهی (تراکم) هم در مدلسازی وارد می شود. در مدل شبه سیال  $\Delta'$  اختلاف چگالی نسبی است و بصورت زیر تعریف می شود:

$$\Delta' = \frac{\rho_s - \rho'}{\rho'} = \frac{(1-\lambda)\Delta}{1+\Delta\lambda} \quad (\text{رابطه ۲})$$

اینشتین (۱۹۵۰) با رویکرد احتمالاتی برای جهش ذره با قطر  $d$  در بستر با طول پرش تصادفی  $L_p$ ، احتمال پرش  $P_1$  و به تعداد  $L_p / \alpha_2 d_2$  در واحد سطح، و با لحاظ مجموع کل ذرات با احتمال انتقال، مدلی برای انتقال بار بستر در جریان بدون پوشش گیاهی ارائه داده است. در این روش فرض می شود که  $L_p$  برای هر ذره ثابت است و مستقل از مشخصات جریان، رسوب و ترکیب بستر و برابر  $L_p = 100d$  و احتمال فرسایش ذره از بستر نیز مستقل از بستر و ذرات دیگر فرض شده است (Armanini, 2018) و شدت انتقال بار بستر به صورت زیر بدست آمده است:

$$\frac{q_b}{d \sqrt{g \Delta d}} = \frac{p_1}{A_* - A_* p_1} \quad (\text{رابطه ۳})$$

عبارت بدون بعد سمت چپ معادله بالا، نرخ انتقال بار بستر بدون بعد  $\Phi$  یا پارامتر شدت رسوب اینشتین،  $A_*$  عدد ثابت،  $q_b$  بار بستر در واحد عرض،  $\Delta = (\rho_s - \rho) / \rho$  است و احتمال  $P_1$  نیز به صورت تابعی گوسی از پارامتر مشخصه نیروی بالابرنده شناوری و نیروی سقوط ذره بنام پارامتر بدون بعد شدت جریان  $\Psi = g \Delta d / u_*^2$  (عکس پارامتر شیلدرز) فرض شده است. فرم نهایی مدل بار بستر اینشتین به صورت زیر می باشد:

$$\Phi = \frac{1}{43.13} \left( \frac{\sqrt{\pi}}{\int_{-0.143\psi-2}^{+0.143\psi-2} e^{-\xi^2} d\xi} - 1 \right) \quad (\text{رابطه ۴})$$

در روش اینشتین فرض شده است که درگ فرم بستر و درگ حاصله از پوشش گیاهی بر انتقال بار بستر موثر نیست و تنها اثرات زبری سطحی بستر لحاظ شده است بنابراین استفاده از روش اینشتین در محاسبات بار بستر نیازمند اصلاح برخی فرضیات اولیه آن است (Armanini, 2018; Yalin, 1977). همان گونه که در قسمت های قبلی بیان شد وجود پوشش گیاهی باعث افزایش تنش برشی بستر می شود و در محاسبات تنش برشی بستر و سرعت برشی در پارامتر  $\Psi$  لازم است که تاثیر تغییرات تنش برشی حاصله از وجود پوشش گیاهی نیز لحاظ شود و از مفهوم شبه سیال در مقاله حاضر استفاده شده است. بدین منظور در جریان یکنواخت داخل پوشش گیاهی و با استفاده از مفهوم شبه سیال، و مشابه رویکرد Armanini and Cavedon (2019) معادله ممننوم را به صورت زیر می توان نوشت:

$$\gamma' A L S_f = \tau_o P L + \sum_{i=1}^{n_v} F_{D,i} \quad (\text{رابطه ۵})$$

موثر است نمی‌تواند به شکل متقارن تابع گوسی که اینشتین لحاظ کرده، فرض شود (Ancey *et al.*, 2006) و بهتر است از توابع احتمال غیرمتقارن، مثل تابع گاما که توسط Ancey *et al.* (2006) پیشنهاد شده، استفاده شود. احتمال اینکه طول پرش موثر ذره  $l_d$  نسبت به متوسط طول پرش ذرات تشکیل دهنده بار بستر  $\bar{l}_d$ ، بزرگتر از فاصله  $x$  باشد برابر سطح زیر منحنی تابع گامای آن به صورت زیر است (Armanini, 2018):

(رابطه ۱۷)

$$P_l = P\left(\frac{l_d}{\bar{l}_d} > \frac{x}{\bar{l}_d}\right) = \int_{\frac{x}{\bar{l}_d}}^{\infty} \eta e^{-\eta} d\eta = \left(1 + \frac{x}{\bar{l}_d}\right) e^{-x/\bar{l}_d}$$

متوسط طول پرش برابر  $\bar{l}_d = \frac{\beta d}{1 + \kappa \psi'_{veg}}$  است. و احتمال جداشدن و بلندشدن ذره از بستر، متناظر با متوسط نسبت نیروی بالابرنده شناوری به وزن مستغرق ذره ( $\delta_{cr}$ ) و مستقل از  $x$  است (Einstein, 1950):

(رابطه ۱۸)

$$P_d = P(\delta > \delta_{cr}) = \int_{\delta_{cr}}^{\infty} \eta e^{-\eta} d\eta = (1 + \delta_{cr}) e^{-\delta_{cr}}$$

طبق نظر اینشتین (۱۹۵۰) آستانه حرکت  $\delta_{cr} = \beta \psi$  است. مولفه طولی سرعت ذره در لحظه عبور از مقطع  $u_s$  تابعی غیرخطی از نسبت سرعت برشی و پارامتر شدت جریان فرض می‌شود:

$$u_s = A_u \frac{u_{*tot}}{\psi'_{veg}} \quad (\text{رابطه ۱۹})$$

$A_u$  ثابت است. با جایگذاری معادلات ۱۷-۱۹ در معادله (۱۶) و انتگرال گیری از آن و ساده سازی ضرایب و پارامترهای آن، مدل انتقال بار بستر در پوشش گیاهی براساس مفهوم شبه سیال بصورت زیر بدست می‌آید:

(رابطه ۲۰)

$$\frac{(1-5\lambda)q_b}{d\sqrt{g\Delta'd}} = \frac{A_u}{\psi'_{veg}(1+\kappa\psi'_{veg})} (1 + \beta\psi'_{veg}) \exp(\zeta\psi'_{veg})$$

که در آن ضرایب  $\zeta, \beta, \kappa, A_u$  پارامترهای ثابت مدل مربوط به احتمال فرسایش و احتمال پرش ذره رسوب هستند و براساس واسنجی با نتایج آزمایشگاهی باربستر که توسط Armanini and Canevi (2019) انجام شده‌اند، به ترتیب برابر  $1/7, -0.1, 4\lambda/5$  و  $10/25$  به دست آمدند. در رابطه فوق شدت بار رسوب بدون بعد ( $\phi'_{veg}$ ) و پارامتر شدت جریان بدون بعد ( $\psi'_{veg}$ ) داخل پوشش گیاهی براساس مفهوم شبه سیال برابر است با:

$$\phi'_{veg} = \frac{(1-5\lambda)q_b}{d\sqrt{g\frac{(1-\lambda)\Delta}{1+\Delta\lambda}}} \quad (\text{رابطه ۲۰})$$

$$\psi'_{veg} = \frac{g\frac{(1-\lambda)\Delta}{1+\Delta\lambda} d \left(1 - 1.5 \left(\frac{d_v}{1-\lambda} \left(\frac{\theta}{(1+80\lambda)^2} \right)^{1/3}\right)^{-0.2}\right)}{u_{*tot}^2} \left[1 + 40\lambda \left(\left(\frac{h}{d_v}\right)\right)\right]$$

بنابراین ملاحظه می‌شود که در مدل حاضر علاوه بر خصوصیات سیال و رسوبات، خصوصیات پوشش گیاهی نیز در

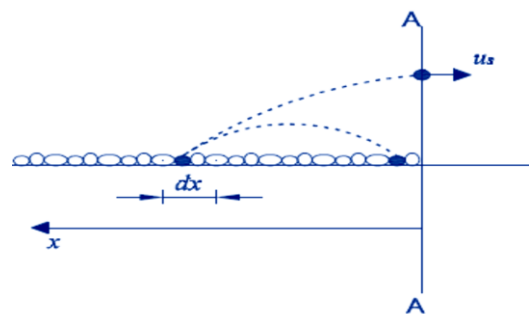
(Van Rijn (1984) و Armanini (2018) با ضریب اصلاحی قطر بدون بعد پوشش گیاهی تابعی از قطر ذرات است. در مقاله حاضر به توجه به مفهوم شبه سیال و وجود پوشش گیاهی، قطر بدون بعد پوشش گیاهی به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$D'_* = \frac{d_v}{1-\lambda} \left(\frac{g\Delta'}{v'^2}\right)^{1/3} \quad (\text{رابطه ۱۴})$$

و قطر موثر متناظر با پیشنهاد (Armanini (2018) برابر است با:

$$d_{eff} = d(1 - 1.5D'^{-0.2}) \quad (\text{رابطه ۱۵})$$

است. بنابراین مشاهده می‌شود که پارامتر شدت جریان شبه سیال مرتبط با پوشش گیاهی ( $\psi'_{veg}$ ) به صورت ضریب اصلاحی از پوشش گیاهی، لزجت ظاهری شبه سیال است و براساس تنش برشی کل و مفهوم شبه سیال بیان می‌شود. در ادامه با ترکیب مدل مفهومی شبه سیال فوق با رویکرد احتمالاتی (Armanini (2018)، مدل انتقال بار بستر داخل پوشش گیاهی توسعه می‌یابد. طبق شکل (۱)، با در نظر گرفتن المانی به طول  $dx$ ، بار رسوبات  $dq_s$  به صورت حجم ذراتی از این المان که از مقطع قائم  $A$  در واحد زمان عبور می‌کنند، تعریف می‌شود (Armanini, 2018):



شکل ۱- المان به طول  $dx$  در محاسبه دبی رسوب عبوری از مقطع  $A$  با احتمال  $P$  (Armanini, 2018)

$$dq_b = \Omega_{veg} u_s \alpha_2 d^2 \frac{dx}{\alpha_2 d^2} P \quad (\text{رابطه ۱۶})$$

که در این رابطه  $u_s$  مولفه طولی سرعت ذره در لحظه عبور از مقطع  $A$ ،  $\alpha_2 d^2$  مساحت مقطع ذرات،  $\frac{dx}{\alpha_2 d^2}$  تعداد ذرات المان  $dx$  در واحد عرض و  $dx$  در فاصله  $x$  بالادست مقطع  $A$  فرض می‌شود.  $\Omega_{veg}$  ضریب کاهش سطح فعال رسوبات در بستر بعثت وجود پوشش گیاهی است که سطح موثر بستر برای برداشت رسوبات را کاهش می‌دهد و طبق نظر (Armanini (2018) برابر  $\Omega_{veg} = (1 - 5\lambda)^{-1}$  فرض شده است.  $P$  احتمال عبور ذرات از مقطع  $A$  است و ترکیبی از دو احتمال مستقل جداشدن ذرات  $P_d$  و طول پرش ذره  $P_l$  است و برابر  $P = P_d P_l$  است. با توجه به اینکه انتقال ذرات روی بستر در اثر رفتار لحظه‌ای و نوسانی پدیده‌ای

پس از تایید نتایج مدل در تخمین احتمال انتقال رسوبات، در این قسمت نتایج مدل در تخمین باربستر بررسی شده است. برای ارزیابی نتایج مدل توسعه یافته، ابتدا منطبق بر معادلات ۲۰ و ۲۱ پارامترهای بدون بعد مدل شبه سیال محاسبه شد و در شکل (۳) مقایسه بین نتایج مدل و نتایج اندازه‌گیری شده آزمایشگاهی ارایه شده است. با توجه به اینکه در داده‌های آزمایشگاهی انتقال بار بستر در حالت با و بدون وجود پوشش گیاهی اندازه‌گیری شده است مشاهده می‌شود که واسنجی ضرایب مدل به خوبی توانسته است مدل‌سازی انتقال بار بستر را انجام دهد. به منظور واسنجی مدل و تعیین ضرایب  $A_H, \kappa, \beta, \zeta$  در معادله ۲۰ از برنامه Solver در محیط اکسل استفاده شده و با بهینه‌سازی غیرخطی و حداقل سازی RMSE و حداکثر سازی  $R^2$  بین مقادیر  $\phi'_{veg}$  اندازه‌گیری شده آزمایشگاهی و برآورد شده از مدل شبه سیال مقادیر بهینه این ضرایب تعیین شد که این مقادیر به ترتیب  $A_H = 10.25, \kappa = 48.5, \beta = -0.1, \zeta = -1.7$  بدست آمدند. طبق نتایج مشاهده شد که مدل با ضریب تعیین  $R^2=0.91$  و  $RMSE=8.2$  پیش‌بینی انتقال باربستر را انجام داده است. بنابراین مشاهده می‌شود که ترکیب مدل مفهومی شبه سیال با مکانیزم‌های انتقال بار بستر دقت مطلوبی در مدل‌سازی انتقال بار بستر در کانال‌های حاوی پوشش گیاهی فراهم کرده است.

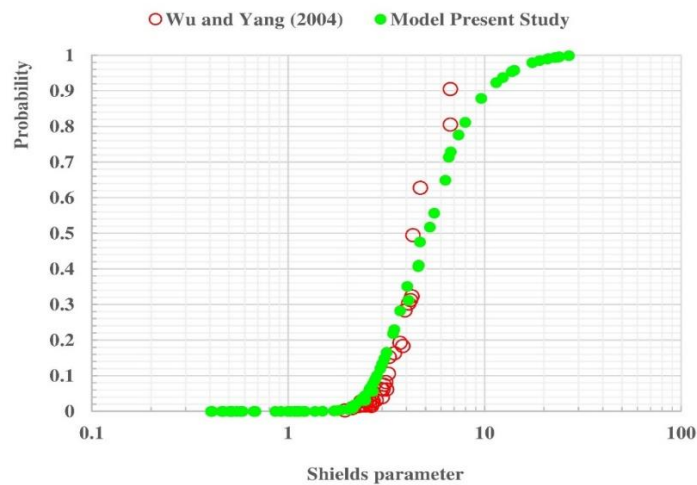
در رودخانه‌های حاوی پوشش گیاهی افزایش تراکم پوشش گیاهی طبق شکل (۴) باعث افزایش عمق و کاهش سرعت جریان می‌شود و بر توزیع تنش برشی بستر نیز تاثیر بارزی دارند و مدل حاضر با لحاظ کردن این اثرات، قابلیت مدل‌سازی مفهومی پدیده را فراهم کرده است. در این زمینه تنش برشی بستر حاصله از پوشش گیاهی را با کسر تنش برشی مربوط به نیروی کشانه و درگ جریان از تنش برشی کل جریان، مشابه رویکرد تحقیق حاضر قابل بررسی است و همبستگی بین بار بستر و تنش برشی مازاد مربوطه در تحقیق (Jordanova and James, 2003) نیز تایید شده است. توجه شود که مدل ارایه شده در مقاله حاضر مبتنی بر تعریف جدیدی برای پارامترهای بدون بعد موثر بر انتقال رسوب با در نظر گرفتن خصوصیات پوشش گیاهی و خصوصیات ظاهری شبه سیال است. بنابراین با توجه به اینکه در مدل مفهومی توسعه یافته دو رابطه و تعریف جدید برای پارامترهای بدون بعد  $\phi'_{veg}$  و  $\psi'_{veg}$  ارایه شده است، برای توسعه دیگر مدل‌های باربستر برای جریان درون پوشش گیاهی نیز می‌توان همین رویکرد پیشنهادی و اصلاح پارامترهای بدون بعد را استفاده نمود.

محاسبات  $\psi'_{veg}$  و  $\phi'_{veg}$  وارد شده است و اثرات تغییرات تنش برشی بستر در اثر وجود و تراکم پوشش گیاهی را لحاظ می‌کند. علاوه بر این در صورت عدم وجود پوشش گیاهی مقدار  $\lambda = 0$  و  $d_v=0$  خواهد بود و عبارات مربوطه از پارامترها حذف می‌شود و مدل به مدل انتقال باربستر در شرایط عدم وجود پوشش گیاهی تبدیل می‌شود.

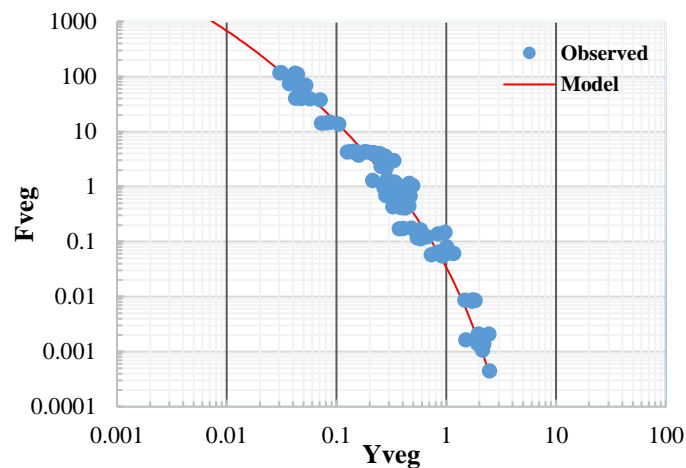
## نتایج و بحث

در این پژوهش برای استخراج مدل انتقال بار بستر در جریان داخل کانال‌های حاوی پوشش گیاهی از مفهوم شبه سیال در ترکیب با رویکرد احتمالاتی (Armanini (2018) استفاده شده است و ضرایب ثابت آن و دقت مدل براساس داده‌های آزمایشگاهی (Armanini and Canevi (2019) بررسی شده است. بنابراین ارزیابی دقت مدل با استفاده از آزمایش‌های Armanini and Canevi (2019) انجام شده است که در فلومی به طول ۱۵ متر و عرض ۰/۵ متر با جداره و بستر شفاف با جریان دایمی و یکنواخت انجام شده‌اند. پوشش گیاهی مورد استفاده در آزمایش‌های (Armanini and Canevi (2019) به صورت استوانه‌های آلومینیومی با قطر ۱ سانتی‌متر و استوانه پلاستیکی با قطر ۳ سانتی‌متر و رسوبات از جنس ماسه با قطر ۰/۵ میلی‌متر و پلاستیک با قطر ۰/۵۵ میلی‌متر انجام شده است. آزمایشها در دو حالت با و بدون وجود پوشش گیاهی انجام شده است.

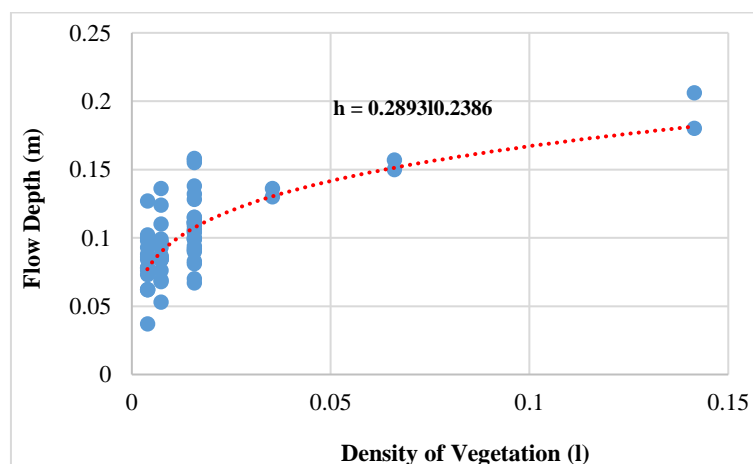
همان‌گونه که در قسمت توسعه مدل بیان شد برای تخمین نرخ انتقال باربستر از رویکرد احتمالاتی استفاده شده است. در مدل توسعه یافته P احتمال انتقال رسوبات باربستر ترکیبی از دو احتمال مستقل ( $P=P_d \cdot P_l$ ) فرض شده است که احتمال جدا شدن و بلند شدن ذرات  $P_d$  و احتمال بزرگ‌تر بودن طول پرش ذره از فاصله‌اش تا مقطع مورد بررسی  $P_l$  است. با توجه به اینکه تابع توزیع احتمال گاما برای این دو احتمال فرض شده است برای ارزیابی این فرض، نتایج احتمال انتقال باربستر محاسباتی با داده‌های مربوط به احتمال انتقال رسوبات هم اندازه در مطالعه Wu and Yang (2004) در شکل (۲) مقایسه شده است. نتایج نشان می‌دهد که نتایج مدل احتمالاتی پیشنهاد شده به خوبی می‌تواند احتمال انتقال رسوبات را تخمین بزند و همچنین در مقادیر کوچکتر پارامتر  $\theta$  احتمال محاسباتی مدل بسیار نزدیک به احتمال واقعی اندازه‌گیری شده است و نشان می‌دهد که در اندازه رسوبات کوچک و یا آستانه انتقال کوچکتر، دقت مدل بهتر است. بنابراین استفاده از توزیع احتمال گاما و همچنین دو احتمال مستقل جدا شدن و پرش رسوبات در مدل توسعه یافته، رفتار کلی و احتمال انتقال باربستر را بخوبی برآورد می‌کند.



شکل ۲- تغییرات احتمال انتقال رسوبات با پارامتر شیلدز (تنش برشی بدون بعد) در مدل و داده‌های اندازه‌گیری (Wu and Yang (2004)



شکل ۳- مقایسه نتایج مدل مبتنی بر مفهوم شبه سیال با داده‌های اندازه‌گیری شده باربستر در تحقیق (Armanini and Canevi (2019)



شکل ۴- تغییرات عمق جریان با افزایش تراکم پوشش گیاهی در جریان حاوی بار بستر رسوبات در تحقیق (Armanini and Canevi (2019)

در زمینه آستانه حرکت رسوبات در بسترهای حاوی پوشش گیاهی و برآورد دقیق معادلات مقاومت جریان در این شرایط دارد، ولی مقایسه نتایج نشان از موفقیت آمیز بودن رویکرد پیشنهادی در مدلسازی باربستر در بسترهای حاوی پوشش گیاهی دارد. بنابراین، در بسترهای فرسایشی در جریان از درون

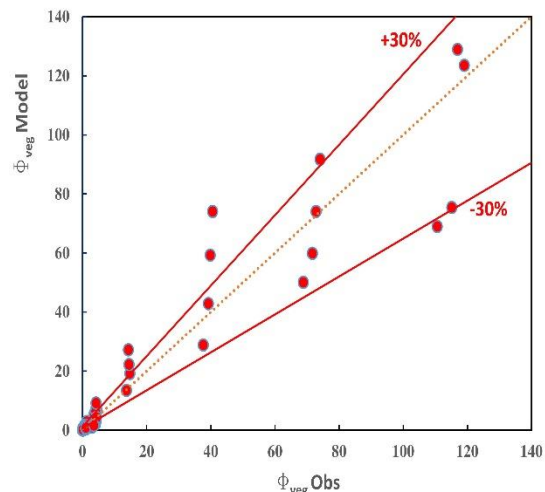
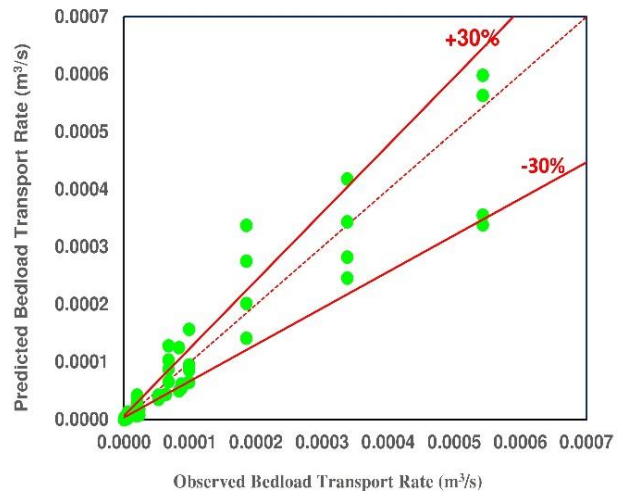
در شکل (۵) شدت بار بستر اندازه‌گیری شده آزمایشگاهی در مقابل مقادیر پیش‌بینی شده توسط مدل شبه سیال رسم شده است که نشان دهنده همبستگی و انطباق مناسب دبی رسوب برآورد شده با دبی رسوب اندازه‌گیری شده دارد. هرچند ارزیابی و توسعه کامل‌تر مدل نیازمند اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی بیشتر

پوشش گیاهی، با در نظر گرفتن تنش برشی و تراکم پوشش گیاهی و تعیین پارامترهای بدون بعد موثر به صورت تابعی که خصوصیات پوشش گیاهی را نیز علاوه بر خصوصیات رسوب و جریان لحاظ می‌کند، نتیجه مناسبی حاصل می‌شود.

در شکل (۷) تاثیر تغییرات قطر پوشش گیاهی بر پارامترهای بدون بعد با استفاده از نتایج مدل شبه سیال ارایه شده است. مشاهده می‌شود که در شرایط ثابت بودن تراکم پوشش گیاهی، افزایش قطر پوشش گیاهی باعث افزایش فعالیت جریان-های گردابی و ایجاد منطقه پرفشار وسیع تر اطراف ساقه‌های پوشش گیاهی شده و در نتیجه باعث افزایش شدت باربستر شده است و همچنین طبق رابطه ۱۳ و ۱۵ افزایش قطر ساقه پوشش گیاهی باعث کاهش قطر موثر شده و پارامتر شدت جریان بدون بعد را کاهش داده است. مشابه این روند در مطالعات آبخستگی اطراف پایه پل نیز مشاهده شده است. در تحقیق Sanaei and Mohammadnejad (2012) نیز مشاهده شده است که با افزایش قطر پایه پل، افزایش قابل ملاحظه در میزان آبخستگی و و حجم حفره آبخستگی مشاهده شده است. بنابراین مشاهده می‌شود که در مبحث کنترل رسوبات و باربستر رودخانه‌ها، تاثیر تراکم پوشش گیاهی بر کنترل و کاهش باربستر بیشتر از تاثیر پوشش گیاهی قطورتر است. همچنین در شکل (۸) تاثیر تغییرات قطر رسوبات بر شدت باربستر نشان داده شده است، مشاهده می‌شود که با افزایش قطر رسوبات بعثت افزایش وزن مستغرق ذرات و کاهش نیروی شناوری، پارامتر بدون بعد شدت باربستر کاهش می‌یابد و میزان انتقال باربستر نیز کاهش می‌یابد که در مطالعات قبلی از جمله Zhang et al. (2011) گزارش شده است.

به منظور مقایسه نتایج مدل با نتایج روابط باربستر دیگر، از دو مدل پارکر و مایر-پیتر-مولر استفاده شد و به علت در نظر نگرفتن خصوصیات پوشش گیاهی و تاثیر آن بر انتقال رسوبات در این روابط، به منظور وارد نمودن اثرات پوشش گیاهی در این روابط از پارامترهای بدون بعد توسعه یافته در تحقیق حاضر استفاده شد. در شکل (۹) نتایج مدل شبه سیال توسعه یافته با نتایج روش‌های مایر-پیتر-مولر (MPM) و روش پارکر در پیش-بینی انتقال باربستر درون پوشش گیاهی نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که دقت روش‌های مایر-پیتر-مولر و پارکر مطلوب نیست و اختلاف بین مقادیر اندازه‌گیری شده و مقادیر برآوردی دو رابطه فوق زیاد است. مقادیر باربستر برآورد شده توسط رابطه پارکر و رابطه مایر-پیتر-مولر بسیار بیشتر از مقادیر اندازه‌گیری شده است و هر دو رابطه مقادیر را بیشتر از مقادیر اندازه‌گیری شده تخمین می‌زنند. بدین منظور اقدام به واسنجی ضرایب این روابط و اصلاح آنها براساس داده‌های اندازه‌گیری شد. در شکل نتیجه

پوشش گیاهی، با در نظر گرفتن تنش برشی و تراکم پوشش گیاهی و تعیین پارامترهای بدون بعد موثر به صورت تابعی که خصوصیات پوشش گیاهی را نیز علاوه بر خصوصیات رسوب و جریان لحاظ می‌کند، نتیجه مناسبی حاصل می‌شود.



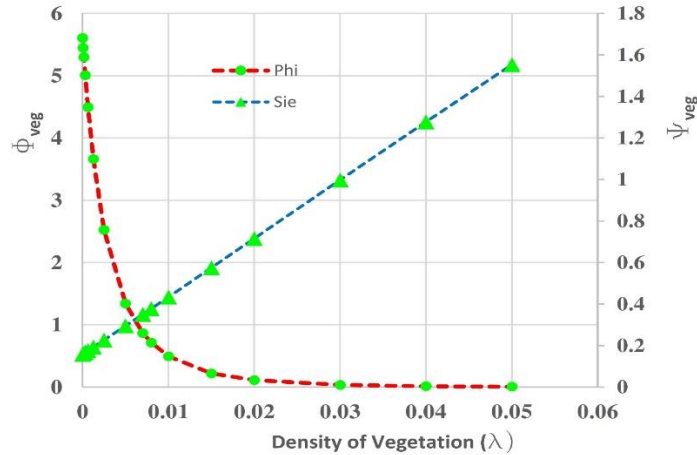
شکل ۵- مقایسه باربستر پیش‌بینی و اندازه‌گیری شده بدون بعد (راست)، دبی رسوب (چپ) در تحقیق Armanini and Canevi (2019)

در شکل (۶) تاثیر تغییرات تراکم پوشش گیاهی بر پارامترهای بدون بعد با استفاده از مدل شبه سیال تحت شرایط ثابت بودن سایر متغیرهای جریان و رسوب بررسی شده است. مشاهده می‌شود که با افزایش تراکم پوشش گیاهی پارامتر شدت جریان بعثت افزایش ضریب اصلاح تنش برشی افزایش می‌یابد و پارامتر بدون بعد شدت انتقال رسوب باربستر بعثت ایجاد مقاومت بیشتر در مقابل جریان و همچنین زبری بیشتر در اثر تراکم بیشتر پوشش گیاهی، ظرفیت انتقال باربستر نیز کاهش می‌یابد که در انطباق با نتایج آزمایشگاهی در شکل (۴) نیز است. مشابه این روند تغییرات پارامترها با افزایش تراکم پوشش گیاهی در بررسی آزمایشگاهی توسط Cavedon (2012) نیز گزارش شده است. همچنین بررسی انجام شده توسط (Drikvaandi et al., 2012;

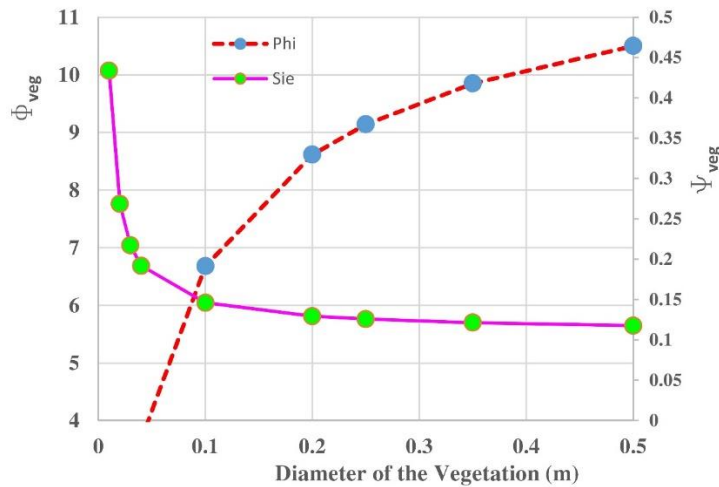


مفاهیم تیوری و فیزیکی قوی مرتبط با مفاهیم جریان درون پوشش گیاهی استفاده می‌نماید از دقت و کاریی مطلوبی نیز در بررسی مهندسی رسوب رودخانه‌های حاوی پوشش گیاهی برخوردار است.

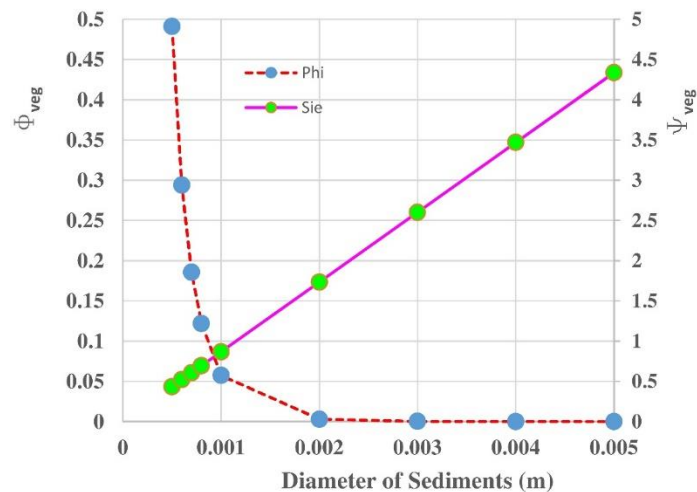
روابط پارکر و مایر-پیتر-مولر با ضرایب واسنجی شده بصورت خط چین نشان داده شده است و مشاهده می‌شود مجددا در این زمینه دقت مدل شبه سیال توسعه یافته بهتر از نتایج روابط فوق است و خصوصا در مقادیر حدی کم و زیاد باربستر، دقت مدل شبه سیال بسیار بهتر است. بنابراین مدل توسعه یافته علاوه بر اینکه از



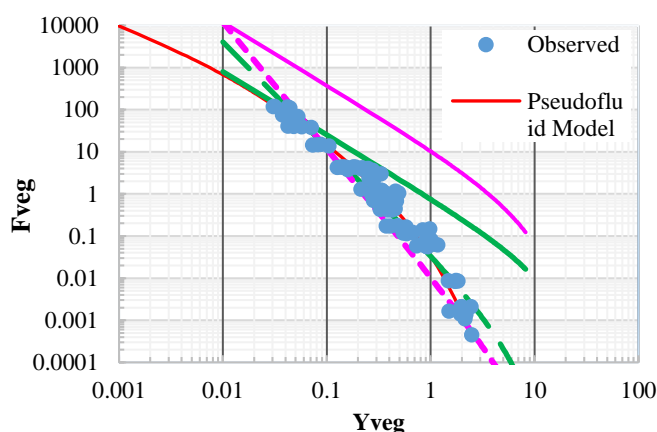
شکل ۶- تاثیر تغییرات تراکم پوشش گیاهی بر پارامترهای بدون بعد در مدل شبه سیال



شکل ۷- تاثیر تغییرات قطر پوشش گیاهی بر پارامترهای بدون بعد در مدل شبه سیال



شکل ۸- تاثیر تغییرات قطر رسوبات بر پارامترهای بدون بعد در مدل شبه سیال



شکل ۹- مقایسه نتایج مدل شبه سیال با نتایج روابط پارکر و مایر-پیتر-مولر

### نتیجه‌گیری

است. بنابراین مشاهده می‌شود که ترکیب مدل مفهومی شبه سیال با مکانیزم‌های انتقال بار بستر دقت مطلوبی در مدلسازی انتقال بار بستر در کانال‌های حاوی پوشش گیاهی فراهم کرده است. همچنین تحلیل پارامتریک اثرات پوشش گیاهی بر مقادیر باربستر انجام شد و نتایج در انطباق با مطالعات قبلی در زمینه فرسایش و انتقال رسوبات اطراف پوشش گیاهی و موانع در مسیر جریان بود. مقایسه نتایج مدل شبه‌سیال توسعه یافته با نتایج روابط مایر-پیتر-مولر و پارکر نشان داد که علیرغم استفاده از پارامترهای بدون بعد در روابط باربستر این محققین، ولی دقت مدل شبه‌سیال هم از رابطه اولیه و هم از نتایج واسنجی شده این روابط بهتر است. با توجه به نتایج مطلوب رویکرد شبه‌سیال پیشنهادی تحقیق حاضر در شبیه‌سازی انتقال رسوبات بار بستر در جریان از درون پوشش گیاهی، می‌توان رویکرد پیشنهادی را در دیگر مطالعات مرتبط با مهندسی رسوب و رودخانه توسعه داد و محدودیت تحقیقات در زمینه انتقال باربستر از درون پوشش گیاهی در بستر و بدنه کانال‌ها و رودخانه‌ها را مرتفع نمود.

"هیچ‌گونه تعارض منافع بین نویسندگان وجود ندارد"

در این مقاله با استفاده از مفهوم مدل شبه سیال و ترکیب آن با معادلات تنش برشی بستر و مقاومت جریان در کانال‌های حاوی پوشش گیاهی و رویکرد مدلسازی احتمالاتی Armanini and Canvei (2019)، مدلی برای انتقال بار بستر رسوبات در جریان داخل کانال‌ها و آبراهه‌های حاوی پوشش گیاهی ارائه شده است. مدل توسعه یافته براساس تعریف جدیدی از پارامترهای بدون بعد شدت جریان و شدت بار بستر با لحاظ مشخصات پوشش گیاهی، علاوه بر خصوصیات جریان و رسوبات توسعه یافته است. واسنجی ضرایب مدل و ارزیابی کارایی آن در پیش‌بینی بار بستر رسوبات جریان از درون پوشش گیاهی در مقایسه با داده‌های آزمایشگاهی Armanini and Canvei (2019) انجام شده است. با بهینه‌سازی ضرایب مدل، مقادیر پارامترهای احتمال طول جهش ذرات رسوب و احتمال برداشت رسوبات در جریان از درون پوشش گیاهی برابر  $A_{rl} = 10.25, \kappa = 48.5, \beta = -0.1, \zeta = -1.7$  بدست آمد. طبق نتایج مشاهده شد که مدل با ضریب تعیین  $R^2=0.91$  و  $RMSE=8.2$  پیش‌بینی انتقال باربستر را با دقت خوبی انجام داده

### REFERENCES

- Afzalimehr, H., Riazi, P., Jahadi, M., & Singh, V. P. (2019). Effect of vegetation patches on flow structures and the estimation of friction factor. *ISH Journal of Hydraulic Engineering*, 1-11.
- Ai, Y. D., Liu, M. Y., & Huai, W. X. (2020). Numerical investigation of flow with floating vegetation island. *Journal of Hydrodynamics*, 32(1), 31-43.
- Aminian, P., Ahmadi, A., Emamgholizadeh, S. (2019). Experimental Study of the Effects of Hydraulic and Geometric Parameters of the Sediment Transport Tunnel on the Flow and Transmitted Sediment. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 50(2), 505-514. doi: 10.22059/ijswr.2018.256432.667896. (In Farsi).
- Ancey, C., Böhm, T., Jodeau, M., & Frey, P. (2006). Statistical description of sediment transport experiments. *Physical Review E*, 74(1), 011302. <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.74.011302>
- Armanini, A. (2018). *Principles of river hydraulics* (p. 217). Berlin: Springer.
- Armanini, A., & Cavedon, V. (2019). Bed-load through emergent vegetation. *Advances in Water Resources*, 129, 250-259.
- Armanini, A., Cavedon, V., & Righetti, M. (2015). A probabilistic/deterministic approach for the prediction of the sediment transport rate. *Advances in Water Resources*, 81, 10-18.
- Cavedon, V. (2012). Effects of rigid stems on sediment transport (Doctoral dissertation, University of Trento).
- Cheng, N. S. (1997). Effect of concentration on settling velocity of sediment particles. *J. Hydraul. Eng.*, 123(8), 728-731.
- Cheng, N. S. (2013). Calculation of drag coefficient for

- arrays of emergent circular cylinders with pseudofluid model. *Journal of Hydraulic Engineering*, 139(6), 602-611.
- Cheng, N. S., & Nguyen, H. T. (2011). Hydraulic radius for evaluating resistance induced by simulated emergent vegetation in open-channel flows. *Journal of hydraulic engineering*, 137(9), 995-1004.
- Cheng, N.-S., Qiao, C., Chen, X., & Liu, X. (2014). Application of pseudo-fluid approximation to evaluation of flow velocity through gravel beds. *Powder Technology*, 260, 15-21.
- Drikvaandi, K., Fathi, M. M., Masjedi, A., & Bina, M. (2012). Evaluation effect of density and flexibility of non-submerged vegetation on river banks and floodplains on the friction factors. *Iran-Water Resources Research*. 8(2). 24-35
- Ebrahimi, N., Shirdeli, A., Nikkhah, J. E., & Hossrini, M. (2016). The impact of waterways bed's vegetation on flow hydraulic and bed form. *Journal of Watershed Engineering and Management* 8(2).P.182-192
- Ebtehaj, I., Bonakdari, H., Safari, M. J. S., Gharabaghi, B., Zaji, A. H., Madavar, H. R., ... & Mehr, A. D. (2020). Combination of sensitivity and uncertainty analyses for sediment transport modeling in sewer pipes. *International Journal of Sediment Research*, 35(2), 157-170. <https://doi.org/10.1016/j.ijsrc.2019.08.005>
- Einstein, H. A. (1950). The bed-load function for sediment transportation in open channel flows (No. 1026). US Government Printing Office.
- Etminan, V., Lowe, R. J., & Ghisalberti, M. (2017). A new model for predicting the drag exerted by vegetation canopies. *Water Resources Research*, 53(4), 3179-3196.
- Gibilaro, L. G., Gallucci, K., Di Felice, R., & Pagliai, P. (2007). On the apparent viscosity of a fluidized bed. *Chemical engineering science*, 62(1-2), 294-300.
- Jordanova, A. A., & James, C. S. (2003). Experimental study of bed load transport through emergent vegetation. *Journal of Hydraulic Engineering*, 129(6), 474-478.
- Kim, J., Ivanov, V. Y., & Katopodes, N. D. (2012). Hydraulic resistance to overland flow on surfaces with partially submerged vegetation. *Water Resources Research*, 48(10).
- Le Bouteiller, C., & Venditti, J. G. (2014). Sediment transport and shear stress partitioning in a vegetated flow. *Water Resources Research*, 51(4), 2901-2922.
- Li, S., Shi, H., Xiong, Z., Huai, W., & Cheng, N. (2015). New formulation for the effective relative roughness height of open channel flows with submerged vegetation. *Advances in Water Resources*, 86, 46-57.
- Liu, M. Y., Huai, W. X., Yangyzh, Z. H., & Zeng, Y. H. (2020). A genetic programming-based model for drag coefficient of emergent vegetation in open channel flows. *Advances in Water Resources*, 103582.
- Montakhab, A., Yusuf, B., Ghazali, A. H., & Mohamed, T. A. (2012). Flow and sediment transport in vegetated waterways: a review. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, 11(3), 275-287.
- Neary, V. S., Constantinescu, S. G., Bennett, S. J., & Diplas, P. (2012). Effects of vegetation on turbulence, sediment transport, and stream morphology. *Journal of Hydraulic Engineering*, 138(9), 765-776.
- Noori, A., Amini, R. (2020). Numerical Simulation of Incipient Motion Parameters of the Sediment Particles with Eulerian-Lagrangian Approach. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 50(10), 2439-2451. doi: 10.22059/ijswr.2019.272999.668088. (In Farsi).
- Qasem, S. N., Ebtehaj, I., & Riahi Madavar, H. (2017). Optimizing ANFIS for sediment transport in open channels using different evolutionary algorithms. *Journal of Applied Research in Water and Wastewater*, 4(1), 290-298. <https://dx.doi.org/10.22126/arww.2017.773>
- Riahi-Madvar, H., & Seifi, A. (2018). Uncertainty analysis in bed load transport prediction of gravel bed rivers by ANN / ANFIS. *Arabian Journal of Geosciences*, 11(21), 688. <https://doi.org/10.1007/s12517-018-3968-6>
- Roushangar, K., Shahnazi, S. (2019). Evaluating the Performance of Data-Driven Methods for Prediction of Total Sediment Load in Gravel-Bed Rivers. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 50(6), 1467-1477. doi: 10.22059/ijswr.2019.253848.667867 . (In Farsi).
- Stoesser, T., Kim, S. J., & Diplas, P. (2010). Turbulent flow through idealized emergent vegetation. *Journal of Hydraulic Engineering*, 136(12), 1003-1017.
- Van Rijn, LC. (1984). Sediment transport, part I: bed load transport. *J Hydraul Eng*;110(10):1431-56.
- Wan, Z., and Wang, Z. (1994). Hyperconcentrated flow, A.A. Balkema Rotterdam, The Netherlands
- Weiming, W. U., & Zhiguo, H. E. (2009). Effects of vegetation on flow conveyance and sediment transport capacity. *International Journal of Sediment Research*, 24(3), 247-259.
- Wu, W., and He, Z., (2009) Effects of vegetation on flow conveyance and sediment transport capacity. *Int. J. Sed. Res.* 24 (3), 247-259. [https://doi.org/10.1016/S1001-6279\(10\)60001-7](https://doi.org/10.1016/S1001-6279(10)60001-7) .
- Wu, F. C., & Yang, K. H. (2004). Entrainment probabilities of mixed-size sediment incorporating near-bed coherent flow structures. *Journal of Hydraulic Engineering*, 130(12), 1187-1197.
- Wu, W., Shields, F.D., Bennett, S.J., and Wang, S.S., (2005). A depth-averaged two- dimensional model for flow, sediment transport, and bed topography in curved channels with riparian vegetation. *Water Resou. Res.* 41 (3), W03015. <https://doi.org/10.1029/2004WR003730> .
- Yager, E. M., & Schmeckle, M. W. (2013). The influence of vegetation on turbulence and bed load transport. *Journal of Geophysical Research: Earth*

- Surface, 118(3), 1585-1601.
- Yalin, M.S. (1977). Mechanics of sediment transport. Pergamon
- Zhang, G. H., Wang, L. L., Tang, K. M., Luo, R. T., & Zhang, X. C. (2011). Effects of sediment size on transport capacity of overland flow on steep slopes. Hydrological sciences journal, 56(7), 1289-1299.  
<https://doi.org/10.1080/02626667.2011.609172>
- Zong, L., & Nepf, H. (2010). Flow and deposition in and around a finite patch of vegetation. Geomorphology, 116(3-4), 363-372.