

توزیع سرعت متوسط عمقی در کانال مرکب با وجود پوشش گیاهی در سیلاب دشت

مرضیه محسنی¹، جمال محمد ولی سامانی^{2*}، سید علی ایوب زاده³

1- دانشجوی دکتری سازه‌های آبی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس

2- استاد گروه سازه‌های آبی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس

3- دانشیار گروه سازه‌های آبی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس

* تهران، صندوق پستی 14115-336

samani_j@modares.ac.ir

چکیده - پوشش گیاهی در بسیاری از جریان‌ها و رودخانه‌ها وجود دارد. پوشش گیاهی موجب تغییر ساختار جریان، افزایش مقاومت کلی جریان و کاهش دبی سیلاب می‌شود، از این رو نقش قابل توجهی در تثبیت سواحل و احیای زیست محیطی رودخانه‌ها دارد. در چنین رودخانه‌هایی، پیش‌بینی توزیع عرضی سرعت در طرح‌های کنترل سیلاب و مطالعات انتقال- انتشار آلودگی و رسوب حائز اهمیت است. هدف از این مطالعه، شبیه‌سازی جریان در کانال مرکب با وجود پوشش گیاهی صلب غیر مستغرق در سیلاب دشت و معرفی مناسب‌ترین مدل، برای محاسبه فاکتور اصطکاک، ضریب لزجت گردابه‌ای و پارامتر جریان ثانویه می‌باشد. در مطالعه حاضر از یک مدل دوبعدی تحلیلی برای پیش‌بینی سرعت متوسط عمقی در کانال‌های مرکب با وجود پوشش گیاهی در سیلاب دشت‌ها استفاده شده است. در این مدل اثرات اصطکاک بستر، نیروی کشانه، آشفستگی عرضی و جریان‌های ثانویه، توسط 4 پارامتر f , C_D , λ , Γ در نظر گرفته شده‌اند. به منظور صحت‌سنجی، نتایج مدل عددی با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شده است. آزمایش‌ها در دو شیب و سه عمق نسبی مختلف انجام گرفته است. با توجه به نتایج آزمایشگاهی معادله کلبروک وایت، قادر به محاسبه دقیق ضریب اصطکاک ناشی از پوشش گیاهی در سیلاب دشت نمی‌باشد و خطای قابل توجهی در محاسبه سرعت در سیلاب دشت ایجاد می‌کند. با بررسی مطالعات مختلف، استفاده از معادله نادینگ (1998) برای محاسبه فاکتور اصطکاک، خطای مشاهده شده را به میزان قابل توجهی کاهش داد، بنابراین از این مدل برای محاسبه ضریب اصطکاک در سیلاب دشت استفاده شده است. با توجه به مدل‌های مختلف ارائه شده برای λ , Γ در مطالعات مختلف، مدل آل‌وین و چو (1985)، به عنوان مناسب‌ترین مدل، بر اساس کمترین اختلاف میان داده‌های مشاهداتی و محاسباتی معرفی شد.

کلیدواژگان: کانال مرکب، پوشش گیاهی، مدل‌های لزجت گردابه‌ای، پارامتر جریان ثانویه، ضریب کشانه، ضریب اصطکاک.

1- مقدمه

رودخانه‌های طبیعی معمولاً از یک کانال اصلی برای انتقال جریان پایه، و یک یا دو سیلاب دشت که اغلب به صورت جزئی با پوشش گیاهی از قبیل بوته‌ها یا درخت‌ها پوشیده شده است، تشکیل شده‌اند. جریان در کانال‌های مرکب با جریان در کانال‌های ساده متفاوت است، زیرا در دبی‌های بالا آب در کانال‌های مرکب در خارج از کانال و در سیلاب دشت‌ها جریان می‌یابد. به دلیل تغییر شکل مقطع و تفاوت قابل توجه زبری کانال اصلی و سیلاب دشت‌ها، ساختار جریان در کانال مرکب پیچیده‌تر است. انتقال مومتم میان کانال اصلی و سیلاب دشت، دبی در کانال اصلی را کاهش و دبی در سیلاب دشت را افزایش و در مجموع دبی کل کانال را کاهش می‌دهد. این پدیده را که اولین بار توسط سلین (1960) مشاهده شد "اثر کینماتیکی" می‌گویند (Helmio, 2002).

روش‌های زیادی برای محاسبه ظرفیت انتقال جریان در کانال‌های مرکب توسعه یافته است. در این روش‌ها تلاش شده اتلاف انرژی ناشی از تنش‌های برشی در سطح مشترک کانال اصلی و سیلاب‌دشت و جریان‌های ثانویه ناشی از شکل مقطع کانال در نظر گرفته شود. یکی از اولین روش‌ها، روش کانال منفرد می‌باشد که در این روش تنش‌های برشی ظاهری، در سطح مشترک کانال اصلی و سیلاب‌دشت، به صورت ضریب زبری در نظر گرفته می‌شود. طبق نظر مایرز (1987)، این روش دبی را کمتر از مقدار واقعی تخمین می‌زند. با این حال، این روش به صورت گسترده‌ای در محاسبه جریان یک بعدی در کانال‌های دارای سیلاب‌دشت به کار می‌رود (Stephenson and Kovlopoulos, 1990). در روش تقسیم کانال¹ (DCM)، که اولین بار توسط لوتر (1933) ارائه شده است، کانال مرکب بر اساس تفاوت خصوصیات زبری یا رفتار جریان به چند منطقه تقسیم

می‌شود. در این روش، معمولاً دبی بیشتر از مقدار واقعی محاسبه می‌شود، زیرا کاهش سرعت ناشی از تنش‌های برشی در سطح مشترک کانال اصلی و سیلاب‌دشت، در نظر گرفته نمی‌شود (Helmio, 2002).

در مطالعات راجراتام و احمدی (1979)، نایت و دمتریو (1983)، نایت و حامد (1984) اثر متقابل میان کانال اصلی و سیلاب دشت و توزیع تنش برشی مرزی مورد توجه قرار گرفته است (Yang et al., 2007). در این روش‌ها فرض می‌شود که تنش برشی در حدفاصل کانال اصلی و سیلاب‌دشت به طور معنی داری بیشتر از تنش برشی مرزی کانال اصلی یا سیلاب‌دشت می‌باشد. با وجود پیچیدگی، این روش‌ها نسبت به مدل‌های آشفتنگی ساده‌تر هستند (Helmio, 2002). نایت و شیونو (1990) ساختار جریان و تنش‌های برشی رینولدزی τ_{yx} و τ_{zx} را در منطقه لایه برشی بررسی و روش شیونو و نایت² (SKM) را برای پیش‌بینی توزیع عرضی سرعت متوسط-عمقی در کانال مرکب منشوری ارائه کردند (Shiono and Knight, 1991).

از روش‌های دیگر محاسبه ظرفیت کانال‌های مرکب مستقیم، روش ارائه شده توسط آکرز (1993) است که "روش کوهیرنس"³ را فرمول‌بندی کرد. وانگ (1989) و اکسی (1982) از تئوری انتقال مومتم، جی و هو (1998) و ژو (1994) از انتگرال‌گیری عمقی معادلات ناویر استوکس و هوانگ و کای (1990) از روش‌های لایه مرزی در مطالعات خود استفاده کردند. در این میان، روش‌هایی که انتقال عرضی مومتم را مورد توجه قرار می‌دهند، غالباً بهتر از روش‌های تقسیم کانال می‌باشند و پیش‌بینی‌های دقیق‌تری را ارائه می‌دهند (Yang et al., 2007).

پوشش گیاهی، از مشخصه‌های بسیاری از جریان‌ها و رودخانه‌ها است. نیروی کشانه ناشی از پوشش گیاهی

2. Shiono and Knight Method
3. Coherence Method

1. Divided Channel Method

آشفتگی افزوده می‌شود. این روش برای اولین بار توسط ویلسون و شاو (1977) پیشنهاد شد. شیمیزو و تسوجیموتو (1994) مدل محاسبه سرعت‌های متوسط و تنش‌های برشی را با تنظیم دو ضریب وزنی اضافی، که نشان دهنده نقش منبع پوشش گیاهی در معادلات آشفتگی می‌باشد، واسنجی کردند. لویز و گارسبا (1997) نیز این ضرایب وزنی را برای معادلات $k-\epsilon$ اصلاح کردند، اما مقادیر اصلاح شده حدود 500% با آنچه توسط شیمیزو و همکاران ارائه شده است، متفاوت است؛ این تفاوت ناشی از روش‌های مختلف میانگین‌گیری مکانی و زمانی مورد استفاده در هر یک از این مطالعات می‌باشد. نائوت و همکاران (1996) برای اولین بار از مدل تنش رینولدزی (RSM) برای شبیه‌سازی جریان درون پوشش گیاهی صلب مستغرق استفاده کردند. چوی و کانگ (2001) نتایج حاصل از مدل $k-\epsilon$ را با مدل RSM برای داده‌های آزمایشگاهی داون و همکاران (1966) مقایسه کرد و تفاوت معنی‌داری را در محاسبه پروفیل سرعت متوسط مشاهده نکرد. در کدهای HYDRO3D و SSIM که، به ترتیب، توسط استئوسر (2002) و اولسن (2002) توسعه داده شده‌اند، نیز از نظریه نیروی کشانه برای شبیه‌سازی جریان با پوشش گیاهی استفاده شده است. در هر دو مدل معادلات سه بعدی ناویر-استوکس و معادلات آشفتگی $k-\epsilon$ با روش عددی حجم محدود حل شده‌اند (Wilson et al., 2005). اخیراً رامشواران و شیونو (2007) نیز یک مدل شبه دو بعدی را برای پیش‌بینی سرعت عرضی و توزیع‌های تنش برشی بستر ارائه کردند. همه این مطالعات به درک الگوی پیچیده جریان، تنش برشی مرزی و در نهایت انتقال مومنت در حفاصل کانال اصلی و سیلاب دشت کمک می‌کند (Tang and Knight, 2009). در کارهای آزمایشگاهی یانگ و همکاران (2007) تأثیر پوشش گیاهی سیلاب‌دشت بر ساختار جریان در مقاطع

موجب افزایش مقاومت کلی جریان، کاهش تنش برشی بستر و در نتیجه کاهش ظرفیت انتقال بار بستر و افزایش تله‌اندازی و نشست رسوب می‌شود (Wu, 2009). مجموع این عوامل موجب تغییر شرایط هیدرولیکی رودخانه می‌شود که منجر به تغییر زیستگاه‌های آبی و مورفولوژی رودخانه می‌شود، لذا مدیریت زیست محیطی رودخانه‌ها نیازمند درک و پیش‌بینی این فرایندها می‌باشد.

بیشتر فعالیت‌های تحقیقاتی اولیه مربوط به پوشش گیاهی در محیط‌های ساحلی و در فلوم‌های آزمایشگاهی با مقطع ساده انجام شده است. نظریه‌های مختلفی برای توصیف هیدرولیک جریان با وجود پوشش گیاهی در محیط‌های ساحلی و ریپ‌رپ ارائه شده است. روش DCM معمولاً برای مقاطع مرکب به کار برده شده است؛ با این حال جامعه محققان آلمان روش DCM را برای کانال‌های با پوشش گیاهی جزئی، اصلاح کردند. برخی کارهای آزمایشگاهی اولیه توسط سازمان حفاظت خاک ایالات متحده بر روی کانال‌های با پوشش گیاهی بر روش n-UR متمرکز شده است. این روش بر این اساس ارائه شده است که برای یک نوع خاص پوشش گیاهی و با یک ارتفاع معین، یک رابطه منحصر به فرد میان ضریب مینینگ-استرینکلر و سرعت متوسط مقطع (U)، شعاع هیدرولیکی، و شیب خط انرژی وجود دارد. هیچ توجیه علمی برای نظریه n-UR ارائه نشده است. کاون و همکاران (1969) نشان دادند که برای یک نوع پوشش گیاهی و با یک ارتفاع، نمودارهای n مینینگ در مقابل UR روی یک خط قرار نمی‌گیرند و بنابراین این نظریه علمی دارای اشکالات جدی است.

در اغلب مدل‌سازی‌های عددی، برای شبیه‌سازی اثر پوشش گیاهی، از نظریه نیروی کشانه¹ استفاده شده است (Tanino, 2008). در این روش نیروی کشانه به عنوان منبع به معادلات مومنت و همچنین معادلات انتقال

1. Drag Force

می‌گردد. هدف از این مقاله بررسی مدل‌های ارائه شده برای محاسبه پارامترهای فاکتور اصطکاکی، لزجت گردابه‌ای و پارامتر جریان ثانویه و معرفی بهترین مدل برای محاسبه این پارامترها بر اساس کمترین اختلاف میان داده‌های آزمایشگاهی و نتایج عددی می‌باشد.

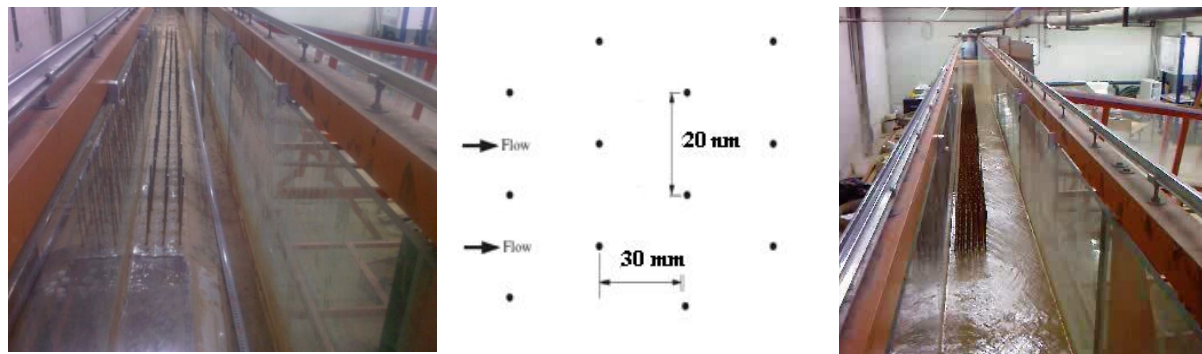
2- روش تحقیق

2-1- داده‌های آزمایشگاهی

آزمایش‌ها در فلوم شیب‌پذیر آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه تربیت مدرس با طول 10، عرض کف 0/3 و ارتفاع 0/45 متر انجام شده است. با استفاده از ورق‌های پلکسی‌گلاس به ضخامت 10 میلی‌متر، مقطع کانال به شکل کانال مرکب نامتقارن، تبدیل شد. برای شبیه‌سازی پوشش گیاهی صلب غیر مستغرق از میلگردهای رزوه شده به قطر 6 میلی‌متر و طول 120 میلی‌متر استفاده شده است. فاصله میان ردیف‌ها 30 میلی‌متر و فاصله میان گیاهان در هر ردیف 2 میلی‌متر در نظر گرفته شده است (جدول 1). آرایش پوشش گیاهی به صورت زیگزاگ در نظر گرفته شده است. در شکل‌های 1 و 2 تصویر فلوم آزمایشگاهی و چیدمان پوشش گیاهی نشان داده شده است. پوشش گیاهی در فاصله میان 4/5 متری تا 8/1 متری از ابتدای فلوم قرار داده شده‌اند. به منظور ایجاد عمق مناسب از دریچه انتهایی فلوم استفاده شده است. تمام اندازه‌گیری‌ها در شرایطی انجام گرفت که شرایط جریان یکنواخت در فلوم حاکم باشد. آزمایش‌ها در 2 شیب و 3 عمق نسبی مختلف انجام شده‌اند. در جدول 2 شرایط آزمایشگاهی نشان داده شده است. اندازه‌گیری عمق جریان با استفاده از عمق سنج با دقت 0/1 میلی‌متر انجام شده است. اندازه‌گیری‌های سرعت با استفاده از میکرومولینه در فاصله 6/5 متری از ابتدای فلوم انجام شده است.

مرکب، بررسی شده است. نتایج این تحقیق که در آن سه نوع پوشش گیاهی شامل درخت، درختچه و علف با استفاده از نوارهای پلاستیکی، پر اردک و علف پلاستیکی، به ترتیب، مدلسازی شده، نشان دادند که وجود هر سه نوع پوشش گیاهی موجب کاهش سرعت در سیلاب دشت و افزایش گرادیان عرضی سرعت می‌شود که باعث افزایش تنش برشی ظاهری در سطح مشترک کانال اصلی و سیلاب‌دشت می‌گردد. سان و شیونو (2009) تأثیر یک ردیف پوشش گیاهی در سیلاب دشت یک کانال مرکب مستطیلی مستقیم را، بر تنش برشی مرزی و توزیع عرضی سرعت بررسی و رابطه جدیدی برای فاکتور اصطکاکی در حالت با و بدون پوشش گیاهی بر اساس مشخصات جریان و تراکم پوشش گیاهی ارائه کردند (Sun and Shiono, 2009). تورنتون و همکاران (2000) تنش برشی ظاهری را در یک فلوم آزمایشگاهی با وجود پوشش گیاهی در سیلاب دشت مطالعه و معادلاتی را به منظور محاسبه تنش برشی ظاهری ارائه کردند (Tornton et al., 2000).

در این مقاله، شبیه‌سازی جریان در کانال مرکب با وجود پوشش گیاهی در سیلاب‌دشت، با استفاده از مدل تانگ و نایت (2009) انجام شده است. این مدل یک مدل شبه دوبعدی است که با داشتن اطلاعات اولیه از شرایط هیدرولیکی جریان (شیب و عمق آب) و خصوصیات هندسی مقطع جریان قادر به محاسبه توزیع سرعت متوسط عمقی در عرض کانال می‌باشد. معادلات ارائه شده با فرض تغییرات خطی پارامتر جریان ثانویه در حدفواصل کانال اصلی و سیلاب دشت، به صورت تحلیلی حل می‌شوند. حل تحلیلی مدل و نیاز به داده‌های ورودی کم، را می‌توان نقطه قوت مدل شمرد. عملکرد دقیق مدل در محاسبه توزیع عرضی سرعت، نیازمند تخمین صحیح پارامترهایی مانند جریان ثانویه و لزجت گردابه‌ای و فاکتور اصطکاکی است، که از نقاط ضعف مدل محسوب



شکل 1 فلوم آزمایشگاهی و نحوه چیدمان پوشش گیاهی

جدول 1 خصوصیات هندسی فلوم آزمایشگاهی و پوشش گیاهی

عرض کانال مرکب	ارتفاع لبریزی	عرض کانال اصلی	شیب دیواره کانال اصلی	فاصله عرضی پوشش گیاهی	فاصله طولی پوشش گیاهی	قطر پوشش گیاهی
B (mm)	h (mm)	b (mm)	s	l_x (mm)	l_y (mm)	d_v (mm)
30	60	80	1/33	20	30	6

2-2- مدل عددی: اصلاح معادلات متوسط عمقی برای

پوشش گیاهی

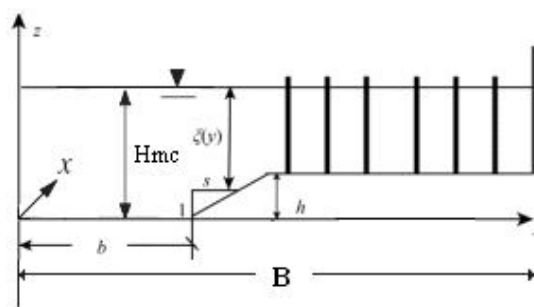
توسعه اولیه مدل‌های ریاضی برای پوشش گیاهی بر مبنای نظریه نیروی کشانه می‌باشد، به این معنا که برای بررسی تأثیر پوشش گیاهی در ساختار جریان، نیروی کشانه ناشی از آن به صورت ترم منبع در معادلات ناویر استوکس وارد می‌شود (Wilson et al., 2005). از ترکیب معادلات RANS با معادله پیوستگی و افزودن نیروی کشانه به عنوان ترم منبع، رابطه زیر برای تشریح اثر پوشش گیاهی بر ساختار جریان، حاصل می‌شود (Tang and Knight, 2009):

$$\rho \delta \frac{\partial H(UV)_d}{\partial y} = \rho \delta g H S_0 + \delta \frac{\partial \bar{\tau}_{yx}}{\partial y} - \delta \tau_b \sqrt{1 + \frac{1}{s^2}} - \frac{1}{2} \rho (C_D B A v) H U_d^2 \quad (1)$$

S_0 شیب بستر، H عمق آب، ρ جرم مخصوص سیال، C_D ضریب کشانه ناشی از پوشش گیاهی می‌باشد. انسداد

جدول 2 برنامه آزمایش‌ها

شماره آزمایش	شیب	H_{mc} (m)	Dr
1	0/001	0/096	0/38
2	0/001	0/089	0/32
3	0/001	0/081	0/26
4	0/002	0/098	0/39
5	0/002	0/088	0/32
6	0/002	0/082	0/26



شکل 2 سطح مقطع کانال مرکب با پوشش گیاهی جزئی

معادلات تحلیلی سرعت متوسط عمقی، بر اساس عمق ثابت و عمق متغیر جریان ارائه شده‌اند. بنابراین ابتدا مقطع کانال بر اساس ثابت یا متغیر بودن جریان به چند منطقه تقسیم می‌شود.

1- منطقه با عمق ثابت

چنانچه ضریب کشانه C_D ، تخلخل پوشش گیاهی (δ)، فاکتور اصطکاک محلی (f)، لزجت گردابه‌ای (λ) و ترم جریان ثانویه (Γ) معلوم باشند، حل تحلیلی معادله (7) به صورت رابطه (5) ارائه می‌شود (Tang and Knight, 2009):

$$U_d = [A_1 e^{\gamma y} + A_2 e^{-\gamma y} + k]^{1/2} \quad (5)$$

در اینجا:

$$k = \frac{gS_0 H - \Gamma / \rho}{f / 8 + 1 / (2\delta) C_D A_v} \quad (6)$$

$$\gamma = \sqrt{\frac{2}{\lambda} \left(\frac{8}{f}\right)^{1/4} \frac{1}{H} \sqrt{\frac{f}{8} + \left(\frac{H}{2\delta}\right) C_D A_v}} \quad (7)$$

2- منطقه بدون پوشش گیاهی با تغییرات خطی کناره بستر

$$Ud = [A_3 \zeta^\alpha + A_4 \zeta^{-(\alpha+1)} + \omega \zeta + \eta]^{1/2} \quad (8)$$

که در اینجا:

$$\alpha = -\frac{1}{2} + \frac{1}{2} \sqrt{1 + \frac{s\sqrt{1+s^2}}{\lambda} \sqrt{8f}},$$

$$\omega = \frac{gS_0}{\sqrt{1+s^2} \left(\frac{f}{8}\right) - \frac{\lambda}{2} \sqrt{f/8}},$$

$$\eta = \frac{-\Gamma}{\rho \sqrt{1 + \frac{1}{s^2} \left(\frac{f}{8}\right)}} \quad (9)$$

که ثابت‌های A_1 تا A_4 مجهولند، و ξ عمق محلی است که به صورت $\xi = H - (y-b)/s$ ($y > 0$) و $\xi = H + (y+b)/s$ ($y < 0$) تعریف می‌شود. برای تعیین ثابت‌های مجهول A_1 تا A_4 از شرایط مرزی به صورت: 1- شرط عدم لغزش $U_d = 0$ ، 2- پیوستگی سرعت U_d در منطقه تقاطع، یعنی $U_d^{(i)} = U_d^{(i+1)}$ ، 3- پیوستگی نیروی یک $(H\bar{\tau}_{yx})$ در هر منطقه تقاطع، یعنی $[H\bar{\tau}_{yx}]^{(i)} = [H\bar{\tau}_{yx}]^{(i+1)}$ استفاده می‌شود (Tang and Knight, 2009).

ناشی از پوشش گیاهی از طریق ترم تخلخل، δ ، شبیه‌سازی می‌شود که δ از رابطه $\delta = 1 - \phi$ محاسبه می‌شود، ϕ تراکم حجمی پوشش گیاهی به صورت نسبت حجم پوشش گیاهی به حجم جریان تعریف می‌شود (Tang and Knight, 2009).

در معادله (1)، زیرنویس d به مقدار متوسط عمقی اشاره می‌کند، s شیب جانبی کناره کانال می‌باشد (1:s افقی: عمودی، همان‌طور که در شکل 2 نشان داده شده است)، τ_b تنش برشی بستر و U_d سرعت متوسط عمقی است. نیروی کشانه به صورت زیر تعریف می‌شود (Tang and Knight, 2009):

$$F_D = \frac{1}{2} \rho (C_D A_v) U^2 \quad (2)$$

که C_D ضریب کشانه و A_v سطح پوشش گیاهی در جهت جریان در واحد حجم می‌باشد.

شیونو و نایت (1991)، با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی به این نتیجه رسیدند که تنش برشی ناشی از جریان ثانویه از حداکثر مقدارش، که در مرز بین کانال اصلی و سیلاب‌دشت اتفاق می‌افتد، تقریباً به صورت خطی کاهش می‌یابد، با استفاده از این فرض، گرادیان عرضی نیروی جریان ثانویه بر واحد طول کانال به صورت رابطه (3) ارائه شده است (Ervin et al., 2000):

$$\frac{\partial(H\rho UV)}{\partial y} = \Gamma_{mc} \text{ or } \Gamma_{fp} \quad (3)$$

H عمق آب، \bar{U} و \bar{V} سرعت متوسط به ترتیب در جهت‌های x و y ، پارامتر جریان ثانویه در کانال اصلی و Γ_{fp} پارامتر جریان ثانویه در سیلاب‌دشت می‌باشد. با انجام فرضیات زیر و با استفاده از فرض تغییر خطی ترم $(\rho UV)_d$ در حدفاصل کانال اصلی و سیلاب‌دشت، معادلات متوسط عمقی به معادلات دیفرانسیلی ضریب ثابت تبدیل می‌شوند که می‌تواند به صورت تحلیلی حل شوند.

$$\tau_b = \left(\frac{f}{8}\right) \rho U_d^2, \bar{\tau}_{yx} = \rho \bar{\varepsilon}_{yx} \frac{\partial U_d}{\partial y}$$

$$\bar{\varepsilon}_{yx} = \lambda U_* H, \Gamma = \frac{\partial}{\partial y} [H(\rho UV)_d] \quad (4)$$

3-2- پارامترهای ورودی مدل

برای اجرای مدل توزیع سرعت متوسط عمقی U_d ، برآورد پارامترهای ضریب کشانه C_D ، تخلخل پوشش گیاهی δ ، فاکتور اصطکاک محلی f ، لزجت گردابه‌ای λ و ترم جریان ثانویه I در یک مقطع، مورد نیاز می‌باشد. در ادامه، به اختصار به محاسبه هر یک از این ضرایب پرداخته شده است.

- ضریب کشانه C_D^5

به منظور مدل کردن پوشش گیاهی از میله‌های استوانه‌ای که به صورت شطرنجی و با فاصله 30 و 20 میلی‌متر از یکدیگر قرار گرفته‌اند، استفاده شده است (شکل 1). بر طبق نظریه اسجلی چینگ (1962) ضریب کشانه به رژیم جریان در اطراف میله و عدد رینولدز میله‌ها $(Re_{rod} = \frac{U_d d_v}{\nu})$ بستگی دارد. برای ردیفی از میله‌ها، دنباله ایجاد شده توسط میله‌های بالادست، ضریب کشانه را برای پوشش گیاهی پایین دست کاهش می‌دهد. نف (1999) نشان داد که این اثر با کاهش فاصله طولی و عرضی میان میله‌ها، افزایش می‌یابد (Nepf, 1999). تانینو و نف (2008) نشان دادند که ضریب کشانه (C_D) با افزایش عدد رینولدز کاهش می‌یابد، و برای $\phi < 0.09$ و Re_{rod} بالاتر از 10^3 تقریباً در حدود 1.0—1.05 می‌باشد (Tanino and Nepf, 2008). از آنجا که مقادیر عدد رینولدز در این مطالعه بیش از مقدار 10^3 می‌باشد، بنابراین، در کار حاضر ضریب کشانه 1/0 در نظر گرفته شده است.

- تخلخل δ

تخلخل δ برای محاسبه اثر انسداد پوشش گیاهی به کار می‌رود که از معادله (10) محاسبه می‌شود.

$$\delta = 1 - \sum (N_v A_v)_i \quad (10)$$

که A_v متوسط سطح مقطع i ساقه گیاهی و N_v متوسط تراکم i پوشش گیاهی بر واحد سطح می‌باشد. در

آزمایش‌ها، d_v قطر میله‌ها 6 میلی‌متر می‌باشد و تراکم میله‌ها N_v ، 16 بر هر متر مربع و تخلخل در حدود 0/9789 است.

- فاکتور اصطکاک f

فاکتور اصطکاک سیلاب‌دشت در مدل تانگ و نایت (2009) از رابطه کلبروک-وایت که توسط رامشواران و شیونو (2007) بر اساس داده‌های FCF اصلاح گردیده، برای محاسبه فاکتور اصطکاک در سیلاب‌دشت با پوشش گیاهی استفاده شده است. اما در این تحقیق، در صورت استفاده از این رابطه، خطای قابل توجهی در محاسبه توزیع سرعت مشاهده می‌شود. بنابراین، با بررسی روابط مختلف ارائه شده برای محاسبه فاکتور اصطکاک، مدل نادینگ (1998) به عنوان مناسب‌ترین مدل انتخاب گردید. براساس مدل نادینگ (1998) در سیلاب دشت با پوشش گیاهی، فاکتور اصطکاک به صورت مجموع فاکتور اصطکاک کف (f_b) (به استثنای مرز فرضی) و فاکتور اصطکاک پوشش گیاهی (f_v) محاسبه می‌شود:

$$f_{fp} = f_b + f_v \quad (11)$$

فاکتور اصطکاک پوشش گیاهی (f_v) از رابطه (12) محاسبه می‌شود (Helmio, 2002):

$$f_v = 4 \frac{h_v d_v}{l_x l_y} C_D \quad (12)$$

که l_x و l_y متوسط فاصله المان‌های گیاهی از هم، d_v قطر هر المان گیاهی، h_v ارتفاع پوشش گیاهی، l_z فاصله متوسط شاخه‌ها در جهت عمودی و d_z قطر هر شاخه می‌باشد (Helmio, 2002). در این مطالعه l_z ، d_z صفر می‌باشد.

برای محاسبه فاکتور اصطکاک بستر، در سیلاب دشت با پوشش گیاهی (f_b) از رابطه ارائه شده توسط رامشواران و شیونو (2007) استفاده شده است:

$$f_b = \left[-2 \log \left[\frac{3.029}{\sqrt{128gH^3 S_0 + \frac{k_s}{1.2H}}} \right] \right]^{-2} \quad (13)$$

فاکتور اصطکاک در کانال اصلی رامشواران و شیونو (2007) داده‌های FCF را بررسی و

(مدل 3)، ضریب λ در کانال اصلی ثابت می‌باشد، ولی در سیلاب دشت تابعی از عمق نسبی است. در مدل ون پوریجن و همکاران (مدل 4) نیز با ترکیب آشفتگی ناشی از تنش برشی و بستر معرفی شده است. مدل آلون و چاو (مدل 5) فرم ساده‌تری از مدل ون پوریجن و همکاران است، اما در ارائه این مدل، آلون و چاو (1985) از نظریه لایه اختلاط استفاده کرده اند (Rameshwaran and Shiono, 2007).

3- تجزیه و تحلیل نتایج

توزیع‌های سرعت محاسبه شده از مدل دوبعدی تانگ و نایت (2009) با توزیع سرعت اندازه‌گیری شده مقایسه شده‌اند (شکل‌های 4 تا 9). در مدل تانگ و نایت (2009) برای محاسبه فاکتور اصطکاکی سیلاب‌دشت از معادله کلبروک وایت استفاده شده است. در مطالعه حاضر با توجه به تراکم بالای پوشش گیاهی، معادله کلبروک وایت قادر به محاسبه مقدار صحیح فاکتور اصطکاکی نبوده و موجب خطای قابل توجهی در محاسبه توزیع سرعت در سیلاب‌دشت می‌شود، توزیع سرعت مشاهداتی و محاسباتی برای آزمایش شماره 3 در حالت استفاده از معادله کلبروک وایت در شکل 3- الف و در صورت بکارگیری معادله نادینگ در شکل 3- ب نشان داده شده است. میزان خطای مشاهده شده نیز به تفکیک در جدول 4 ارائه شده است.

شکل اصلاح شده معادله کلبروک-وایت را برای تعیین مقادیر فاکتور اصطکاکی بستر برای کانال صاف به صورت رابطه (14) ارائه کردند:

$$f_{mc} = \left[-2 \log \left[\frac{3.02\theta}{\sqrt{128gH^3S_0 + \frac{k_s}{12.3H}}} \right] \right]^{-2} \quad (14)$$

ارتفاع معادل زبری شن، k_s ، برای سطح کانال صاف 0/16 میلی‌متر می‌باشد.

پارامتر جریان ثانویه I و لزجت گردابه‌ای λ

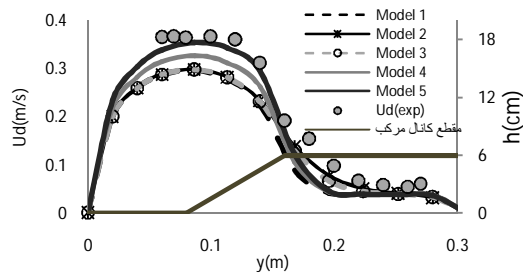
شیونو و نایت (1991) با بررسی داده‌های آزمایشگاهی، به این نتیجه رسیدند که تنش برشی رینولدزی در خارج از منطقه لایه برشی عرضی بی اهمیت است. بنابراین در مرکز کانال اصلی و روی سیلاب‌دشت خارج از لایه برشی، ترم جریان ثانویه می‌تواند با اندازه‌گیری تنش برشی و توزیع‌های سرعت در مقابل کانال و چشم‌پوشی از ترم لایه برشی از معادله (7) محاسبه شود. به منظور پیش‌بینی انتقال عرضی مومتم در لایه اختلاط، مدل‌های مختلف برای لزجت گردابه‌ای ارائه شده است. مدل‌های مورد استفاده در این تحقیق برای تعریف پارامتر جریان ثانویه و لزجت گردابه‌ای در جدول 3 ارائه شده است. در کلیه مدل‌ها ضریب لزجت گردابه‌ای در کانال اصلی مقدار ثابت 0.6κ تعریف شده است. در مدل رامشواران و شیونو (مدل 1) ضریب λ در کل مقطع ثابت می‌باشد. در مدل شیونو و نایت (مدل 2) و مدل آبریل و نایت

جدول 3 مقادیر ثابت پارامتر جریان ثانویه و لزجت گردابه‌ای ($\kappa=0.041$)

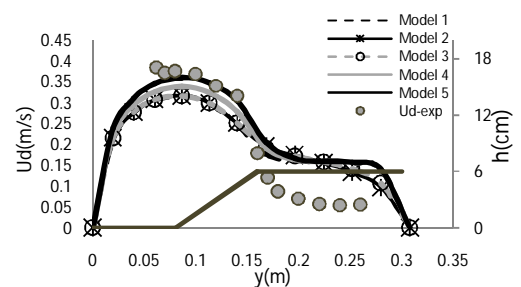
پارامتر جریان ثانویه در کانال اصلی I_{mc}	پارامتر جریان ثانویه در سیلاب‌دشت I_{fp}	ثابت لزجت گردابه‌ای در سیلاب‌دشت λ_{fp}	ثابت لزجت گردابه‌ای در کانال اصلی λ_{mc}	مدل‌های لزجت گردابه‌ای
$1.2 \delta pg S_0 H Dr$	$0.6 \delta pg S_0 H Dr$	$\lambda_{fp} = \lambda_{mc}$	$\lambda_{mc} = \kappa/6$	مدل (1) (Rameshwaran and Shiono, 2007)
$1.2 \delta pg S_0 H Dr$	$0.6 \delta pg S_0 H Dr$	$\lambda_{fp} = \lambda_{mc} (2Dr)^{-4}$	$\lambda_{mc} = \kappa/6$	مدل (2) (Shiono and Knight, 1991)
$1.2 \delta pg S_0 H Dr$	$0.6 \delta pg S_0 H Dr$	$\lambda_{fp} = \lambda_{mc} (-2.0 + 1.20 Dr)^{-1.44}$	$\lambda_{mc} = \kappa/6$	مدل (3) (Abril and Knight, 2004)
$0.9 \delta pg S_0 H Dr$	$0.6 \delta pg S_0 H Dr$	$\lambda_{fp} = \lambda_{mc}$	$\lambda_{mc} = \kappa/6$	مدل (4) (van Prooijen et al., 2005)
$0.6 \delta pg S_0 H Dr$	$0.6 \delta pg S_0 H Dr$	$\lambda_{fp} = \lambda_{mc}$	$\lambda_{mc} = \kappa/6$	مدل (5) (Alavian and Chu, 1985)

جدول 4 مقایسه میانگین مجموع مجذور خطا RMSE(m/s) در شرایط استفاده از معادله کلبروک وایت و معادله نادینگ در آزمایش 3

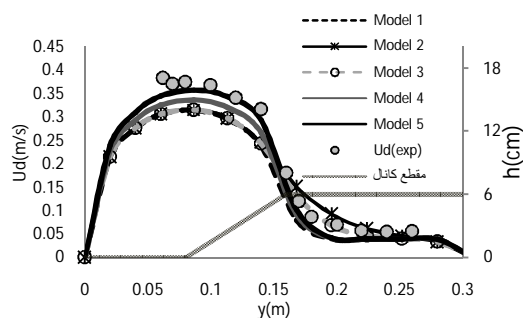
مدل (5)		مدل (4)		مدل (3)		مدل (2)		مدل (1)		معادله تخمین ضریب اصطکاک
سیلاب	کانال	سیلاب	کانال	سیلاب	کانال	سیلاب	کانال	سیلاب	کانال	
دشت	اصلي	دشت	اصلي	دشت	اصلي	دشت	اصلي	دشت	اصلي	معادله کلبروک وایت
0/0949	0/0233	0/0921	0/0444	0/0851	0/0676	0/0832	0/0674	0/0895	0/0684	
0/0194	0/0268	0/0219	0/0485	0/0140	0/0703	0/0209	0/0695	0/0255	0/0726	معادله نادینگ



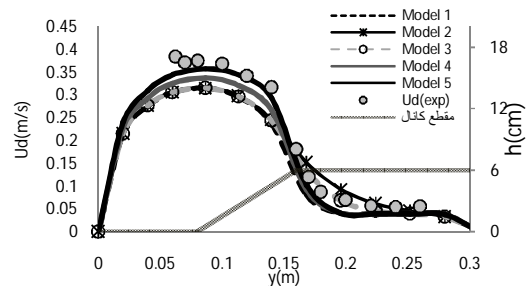
شکل 5 توزیع سرعت متوسط عمقی در آزمایش (2) عمق نسبی 0/32 و شیب 0/001



الف - توزیع سرعت در صورت استفاده از معادله کلبروک وایت

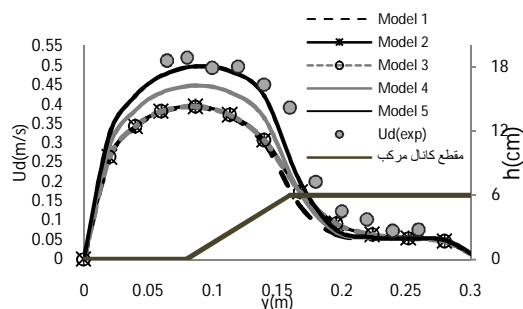


شکل 6 توزیع سرعت متوسط عمقی در آزمایش (3) عمق نسبی 0/26 و شیب 0/001

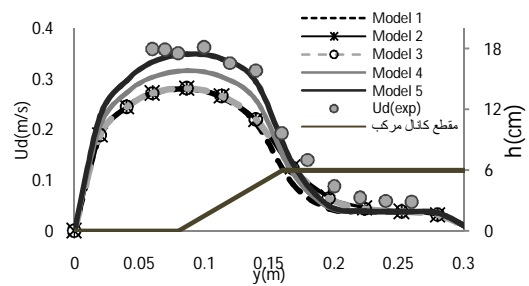


ب - توزیع سرعت در صورت استفاده از معادله نادینگ

شکل 3 توزیع سرعت متوسط عمقی در آزمایش 3



شکل 7 توزیع سرعت متوسط عمقی در آزمایش (4) عمق نسبی 0/39 و شیب 0/002

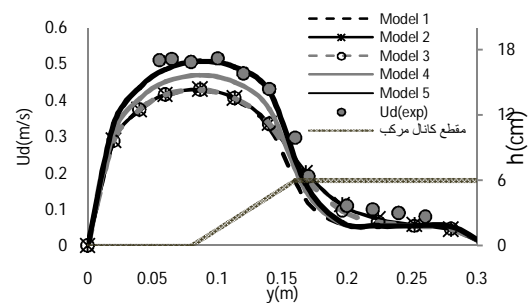


شکل 4 توزیع سرعت متوسط عمقی در آزمایش (1) عمق نسبی 0/38 و شیب 0/001

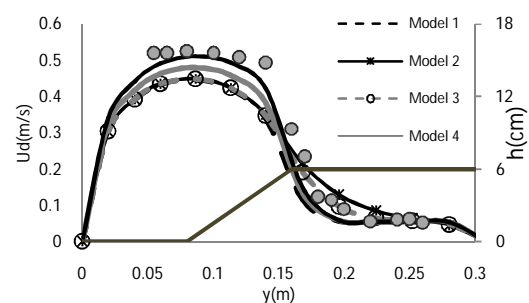
سیلاب دشت ناشی از اختلاف ضرایب لزجت گردابه‌ای است. نایت و آبریل (1996) در تحقیقات خود به این نتیجه رسیدند که مدل دو بعدی سرعت متوسط عمقی آنها، به مقدار بی‌بعد لزجت گردابه‌ای غیر حساس است و استفاده از یک مقدار ثابت در عرض کانال، نتایج قابل قبولی می‌دهد (Knight, 1996). گرچه نتایج مطالعه حاضر نشان می‌دهد که تغییر ضرایب لزجت گردابه‌ای و استفاده از ضرایب بهینه می‌تواند خطای مشاهده شده در محاسبه توزیع سرعت در سیلاب دشت را کاهش دهد، با این وجود این مقدار کاهش خطا، قابل ملاحظه نبوده و بنابراین می‌توان از یک ضریب ثابت لزجت گردابه‌ای در عرض کانال استفاده کرد.

در مدل‌های رامشواران و شیونو (2007)، شیونو و نایت (1991) و آبریل و نایت (2004)، از یک رابطه برای محاسبه پارامتر جریان ثانویه در کانال اصلی استفاده شده است که با رابطه معرفی شده در مدل‌های ون پوریجن و همکاران (2005) و آلون و چاو (1985) متفاوت است. با توجه به تفاوت قابل توجه نتایج مدل ون پوریجن و همکاران (2005) با مدل‌های آلون و چاو (1985) و مدل‌های رامشواران و شیونو (2007)، شیونو و نایت (1991) و آبریل و نایت (2004) در محاسبه سرعت در کانال اصلی، حساسیت مدل به ترم جریان ثانویه، در کانال اصلی قابل توجه می‌باشد.

ریشه میانگین مجذور خطا (RMSE) برای آزمایش‌های مختلف و در شرایط استفاده از مدل‌های مختلف، در جدول 5 به صورت جداگانه برای کانال اصلی و سیلاب دشت ارائه شده است. همان‌گونه که در جدول 5 مشخص شده است مقدار خطا در محاسبه توزیع سرعت در کانال اصلی با بکارگیری مدل آلون و چاو (1985) برای تمامی آزمایش‌ها کمترین مقدار را دارد. اما کمترین خطا در محاسبه سرعت سیلاب دشت در آزمایشات مختلف، در شرایط استفاده از یک مدل خاص اتفاق نمی‌افتد بنابراین نمی‌توان به صورت قطعی مدل مشخصی را معرفی کرد.



شکل 8 توزیع سرعت متوسط عمقی در آزمایش (5) عمق نسبی 0/32 و شیب 0/002



شکل 9 توزیع سرعت متوسط عمقی در آزمایش (6) عمق نسبی 0/24 و شیب 0/002

همان‌گونه که در جدول 4 مشخص است، استفاده از معادله کلبروک وایت موجب خطای قابل ملاحظه‌ای در محاسبه سرعت در سیلاب دشت می‌شود، از این رو با بررسی مطالعات مختلف، مدل نادینگ (1998) به عنوان مناسب‌ترین مدل برای محاسبه فاکتور اصطکاکی در سیلاب دشت با وجود پوشش گیاهی معرفی شد.

مدل‌های ارائه شده تقریباً در همه موارد، مقادیر سرعت در کانال اصلی را کمتر از مقدار واقعی آن محاسبه می‌کنند. توزیع سرعت محاسبه شده در سیلاب دشت نیز در اغلب موارد، به جز آزمایش‌های 3 و 6 کمتر از مقدار واقعی می‌باشند. از آنجا که اختلاف مدل‌های رامشواران و شیونو (2007)، شیونو و نایت (1991) و آبریل و نایت (2004)، تنها در تعریف ضریب لزجت گردابه‌ای می‌باشد، بنابراین اختلاف مشاهده شده در سرعت‌های متوسط عمقی در

جدول 5 میانگین مجموع مجذور خطا RMSE(m/s) در شرایط استفاده از معادله نادینگ (1998) برای محاسبه ضریب اصطکاک

شماره آزمایش	مدل 1		مدل 2		مدل 3		مدل 4		مدل 5	
	کانال اصلی	سیلاب دشت	کانال اصلی	سیلاب دشت	کانال اصلی	سیلاب دشت	کانال اصلی	سیلاب دشت	کانال اصلی	سیلاب دشت
1	0/0905	0/0518	0/0875	0/0356	0/0877	0/0367	0/0523	0/0430	0/0199	0/0360
2	0/0861	0/0548	0/0824	0/0298	0/0831	0/0350	0/0539	0/0481	0/0256	0/0427
3	0/0726	0/0255	0/0695	0/0209	0/0703	0/0140	0/0485	0/0219	0/0268	0/0194
4	0/2978	0/1428	0/1299	0/0998	0/1299	0/0999	0/0754	0/1041	0/0260	0/0915
5	0/0987	0/0460	0/0937	0/0246	0/0947	0/0272	0/0543	0/0397	0/0171	0/0360
6	0/1084	0/0549	0/1028	0/0237	0/1043	0/0207	0/0726	0/0741	0/0411	0/0402

با این وجود، چنانچه مجموع خطا در نظر گرفته شود، مدل آلون و چاو (1985) بیشترین دقت را در محاسبه توزیع سرعت دارد و به عنوان مدل بهینه معرفی می‌شود.

4- نتیجه گیری

به منظور تعیین توزیع سرعت متوسط عمقی در کانال مرکب مستقیم با پوشش گیاهی در سیلاب دشت از مدل شبه دوبعدی تانگ و نایت استفاده شده است. در این مدل اثر پوشش گیاهی به صورت مقاومت داخلی جریان و به شکل ترم منبع به معادله ناویراستوکس اضافه شده است. انسداد ناشی از پوشش گیاهی با استفاده از پارامتر تخلخل شبیه سازی شده است. اجرای این مدل، نیازمند محاسبه 4 پارامتر ضریب کشانه، فاکتور اصطکاک، ضریب لزجت گردابه‌ای و جریان ثانویه می‌باشد. برای محاسبه فاکتور اصطکاک کانال اصلی، از معادله کلبروک وایت اصلاح شده، استفاده شده است. در مطالعه حاضر با توجه به تراکم بالای پوشش گیاهی، معادله کلبروک وایت قادر به محاسبه مقدار صحیح فاکتور اصطکاک در سیلاب دشت نبوده و موجب خطای قابل توجهی در محاسبه توزیع سرعت در سیلاب دشت می‌شود، از این رو با بررسی مطالعات مختلف، مدل نادینگ به عنوان مناسب ترین مدل برای محاسبه فاکتور اصطکاک در سیلاب دشت با وجود

پوشش گیاهی معرفی گردید. برای محاسبه پارامترهای جریان ثانویه و لزجت گردابه‌ای، مدل‌های مختلفی در مقالات ارائه شده است. از مقایسه توزیع سرعت محاسبه شده با توزیع سرعت اندازه‌گیری شده در آزمایشگاه، مشخص گردید که حساسیت مدل تانگ و نایت نسبت به مقدار لزجت گردابه‌ای قابل ملاحظه نیست، از این رو می‌توان از مقدار استاندارد آن در عرض کانال استفاده کرد و نتایج رضایت بخش خواهد بود. اما در مورد ترم جریان ثانویه، حساسیت قابل توجهی مشاهده شده است، بنابراین با توجه به کمترین خطای مقادیر مشاهده‌ای و محاسبه‌ای، مدل آلون و چاو، به عنوان مناسب ترین مدل برای محاسبه پارامتر لزجت و جریان ثانویه معرفی شد.

5- فهرست علائم

A_v	سطح پوشش گیاهی در جهت جریان در واحد حجم
B	عرض کانال مرکب
b	عرض کانال اصلی
β	فاکتور اصلاح
C_D	ضریب کشانه ناشی از پوشش گیاهی
Dr	عمق نسبی
dv	قطر پوشش گیاهی
f	فاکتور اصطکاک محلی
f_f	فاکتور اصطکاک در سیلاب دشت

- Helmio, T. (2002). "Unsteady 1D flow model of compound channel with vegetated floodplains", Journal of Hydrology, 269, pp. 89-99.
- Hua, W. X., Gao, M., Zeng, Y.H. and Li, D. (2009). "Two-dimensional analytical solution for compound channel flows with vegetated floodplains", Appl. Math. Mech. Engl. Ed., 30(9), pp. 1121-1130.
- Knight, D. W. and Abril, J. B. (1996). "Refined calibration of a depth averaged model for turbulent flow in a compound channel", Proc. Instn. Civ. Engrs. Water, Maritime and Energy. London, 118(3), pp. 151-159.
- Nepf, H. M. (1999). "Drag, turbulence, and diffusion in flow through emergent vegetation", Water Resources Research, 35(2), pp. 479-489.
- Pasch'e, E. and Rouve, G., (1985). "Overbank flow with vegetatively roughened floodplains", Journal of Hydraulic Engineering, 111(9), pp. 1262-1278.
- Rameshwaran, P. and Shiono, K. (2007). "Quasi two-dimensional model for straight overbank flows through emergent vegetation on floodplains", Journal of Hydraulic Research, 45(3), pp. 302-315.
- Sadeghi, A., Shafai Bajestan, M. and Saneie, M. (2010). "Experimental investigation on flow velocity variation in compound channel with non-submerged rigid vegetation in floodplain", World Applied Sciences Journal, 9 (5), pp. 489-493.
- Shiono, K. and Knight, D. W. (1991). "Turbulent open channel flows with variable depth across the channel", J. Fluid Mech., 222, pp. 617-646.
- Sun, X. and Shiono, K. (2009). "Flow resistance of one-line emergent vegetation along the floodplain edge of a compound open channel", Advances in Water Resources, 32. Pp. 430-438.
- Stephenson, D. and Kovlopoulos, P. (1990). "Effects of momentum transfer in compound channels", Journal of Hydraulic Engineering, 116 (12), pp. 1512-1522.
- Stoesser, T. (2002). "Development and validation of a CFD code for open-channel flows", PhD Thesis, Department of Civil Engineering, University of Bristol.
- Tang, X. N. and Knight, D. W. (2009). "Lateral distributions of streamwise velocity in compound channels with partially vegetated floodplains", Sci. China Ser E-Tech Sci., 52(11), pp. 3357-3362.
- Tanino, Y. and Nepf, H. M. (2008). "Laboratory investigation of mean drag in a random array of rigid, emergent cylinders", J. Hydraul. Eng., 134(1).
- F_v ضریب اصطکاک ناشی از پوشش گیاهی
- F_w فاکتور اصطکاک بستر در سیلاب دشت
- f_{mc} فاکتور اصطکاک بستر در کانال اصلی
- g شتاب ثقل
- H عمق آب در کانال
- h ارتفاع لبریزی
- h_v ارتفاع پوشش گیاهی
- k_s ارتفاع معادل زبری شن
- l_x, l_y متوسط فاصله المان‌های گیاهی
- S_0 شیب بستر
- s شیب جانبی کانال اصلی
- U مولفه سرعت در جهت جریان
- U_d سرعت متوسط عمقی
- V مولفه سرعت در جهت عمود بر جریان
- W_v فاکتور تراکم پوشش گیاهی
- x جهت جریان
- y عمود بر جهت جریان
- δ تخلخل پوشش گیاهی
- ϕ تراکم پوشش گیاهی
- λ ثابت لزجت گردابه‌ای
- \bar{I}_{fp} پارامتر جریان ثانویه در سیلاب دشت
- \bar{I}_{mc} پارامتر جریان ثانویه در کانال اصلی
- ρ جرم مخصوص آب
- $\{\tau_{xx}, \tau_{yx}, \tau_{zx}\}$ تنش برشی رینولدزی روی صفحات عمود بر جهت‌های X,Y,Z
- τ_b تنش برشی بستر
- $\bar{\tau}_{yx}$ متوسط تنش برشی رینولدزی

6- منابع

- Afzalimehr, H., Sui, J. and Moghbel, R. (2010). "Hydraulic parameters in channels with wall vegetation and gravel bed", International Journal of Sediment Research., 25(1), pp. 81-90.
- Ervine, D. A., Babaeyan-Koopaei, K. and Sellin, R.H. J. (2000). "Two-dimensional solution for straight and meandering overbank flows", Journal of Hydraulic Engineering, 126(9), pp. 653-669.

Press. New York. USA.

Wu, W. and He, Z. (2009). "Effects of vegetation on flow conveyance and sediment transport capacity", *International Journal of Sediment Research*, 24, pp. 247-259.

Yang, K., Cao, S. and Knight, D. W. (2007). "Flow patterns in compound channels with vegetated floodplains", *Journal of Hydraulic Engineering*, 133(2), pp. 148-159.

pp. 34-41.

Thornton, C.I., Abt, S.R., Morris, C.E. and Fischenich, J. (2000). "Calculating shear stress at channel overbank interfaces in straight channels with vegetated floodplains", *J. of Hydr. Eng. ASCE*, 126(12), pp. 929-936.

Wilson, C. A. M. E., Stoesser, T. and Bates, P. D. (2005). *Computational fluid dynamics: applications in environmental hydraulics*, John Wiley & Sons