

برآورد ضرایب انتشار و نرخ رسوب‌گذاری در کانال مرکب با وجود پوشش گیاهی در سیلاب‌دشت

مرضیه محسنی^{۱*}، جمال محمدولی سامانی^۲ و سید علی ایوب‌زاده^۳

چکیده

توجه روزافزون به مسائل زیست‌محیطی در مدیریت رودخانه‌ها، موجب گسترش تحقیقات در زمینه بررسی پارامترهای مؤثر بر هیدرولیک جریان و انتقال-انتشار آلودگی و رسوب در رودخانه‌ها شده است. وجود پوشش گیاهی در بسیاری از رودخانه‌ها، تأثیر قابل توجهی بر هیدرولیک جریان، مورفولوژی و فرایندهای انتقال و انتشار رسوب و آلودگی دارد. با وجود این، مطالعه کمی در زمینه تأثیر پوشش گیاهی بر ضرایب انتشار و نرخ رسوب‌گذاری انجام شده است. هدف از تحقیق حاضر، برآورد ضرایب انتشار و نرخ رسوب‌گذاری در کانال مرکب با وجود پوشش گیاهی صلب غیرمستغرق در سیلاب‌دشت است. بدین منظور، توسعه مدل دوبعدی جریان و انتقال رسوب در کانال مرکب با وجود پوشش گیاهی در سیلاب‌دشت، مورد توجه قرار گرفت. برای برآورد توزیع سرعت متوسط عمقی از مدل دوبعدی شیونو و نایت، که با افزودن نیروی کشانه به معادله مومنتم اصلاح شده، استفاده شد. برای حل این مدل بایستی ۴ پارامتر ضریب کشانه، فاکتور اصطکاکی، ضریب لزجت گردابه‌ای، پارامتر جریان ثانویه در کانال اصلی و سیلاب‌دشت محاسبه شود. معادله انتقال انتشار دوبعدی به روش حجم محدود حل شد. ضرایب انتشار و نرخ رسوب‌گذاری براساس کمترین خطای مشاهداتی میان داده‌های آزمایشگاهی و نتایج مدل عددی توسعه داده شده در این مطالعه، برآورد شد. مدل دوبعدی توسعه داده شده برای مطالعه زانگ (۲۰۱۱) اجرا شد و مقدار نرخ رسوب‌گذاری را با اختلافی حدود ۲۲٪ بیشتر از مقدار آزمایشگاهی برآورد کرد.

واژه‌های کلیدی: پوشش گیاهی، ضرایب انتشار، کانال مرکب، مدل دوبعدی جریان، معادله انتقال-انتشار، نرخ رسوب‌گذاری.

ارجاع: محسنی م. محمدولی سامانی ج. و ایوب‌زاده س. ع. ۱۳۹۸. برآورد ضرایب انتشار و نرخ رسوب‌گذاری در کانال مرکب با وجود پوشش گیاهی در سیلاب‌دشت. مجله پژوهش آب ایران. ۳۵: ۵۱-۶۱.

۱- استادیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی سیرجان، سیرجان.

۲- استاد گروه سازه‌های آبی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران.

۳- دانشیار گروه سازه‌های آبی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران.

* نویسنده مسئول: mohseni_m@sirjantech.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۰۱/۳۰

تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۰۹/۰۶

مقدمه

رسوب از معادله انتقال- انتشار دوبعدی استفاده شده است. نتایج این تحقیق نشان داد که پوشش گیاهی باعث افزایش نرخ رسوب گذاری می شود؛ همچنین، نرخ رسوب گذاری به تراکم پوشش گیاهی، عمق جریان و سرعت ته نشینی رسوب وابسته است. اشمیت و همکاران (۲۰۰۵)، ته نشینی رسوبات را در تالاب مصنوعی با وجود پوشش گیاهی به صورت آزمایشگاهی بررسی کرده و نتایج حاصل را با نتایج حل تحلیلی مدل انتقال- انتشار دوبعدی مقایسه کردند. هوانگ و همکاران (۲۰۰۸) حرکت ذرات را درون پوشش گیاهی به صورت آزمایشگاهی مطالعه کردند. آنها نتایج داده های آزمایشگاهی را با نتایج حاصل از حل عددی معادله دوبعدی انتقال- انتشار مقایسه و مقادیر بهینه ضرایب انتشار عمقی و طولی و همچنین نرخ ته نشینی را محاسبه و به این نتیجه رسیدند که معادله انتقال- انتشار به خوبی قادر به شبیه سازی حرکت ذرات در پوشش گیاهی است.

زانگ (۲۰۱۱)، تحقیقی آزمایشگاهی را برای بررسی تأثیر متقابل پوشش گیاهی و رسوب انجام داد. در این تحقیق که در دو تراکم و سه شدت جریان کم، متوسط و زیاد انجام شده است، انحراف جریان در ابتدای پوشش گیاهی بررسی شد و رابطه ای برای برآورد طول انحراف جریان ارائه کرده است. میزان رسوب در قسمت آزاد جریان (بدون وجود پوشش گیاهی) و در پوشش گیاهی اندازه گیری شده است.

با توجه به کمبود مطالعات انجام شده در زمینه انتقال و انتشار در کانال های مرکب با وجود پوشش گیاهی، هنوز درک درستی از تأثیر وجود پوشش گیاهی بر ضرایب انتشار و نرخ رسوب گذاری وجود ندارد. بنابراین در تحقیق حاضر، مدل شبه دوبعدی سرعت متوسط عمقی با معادله انتقال- انتشار تلفیق و با مقایسه نتایج مدل عددی و داده های آزمایشگاهی، ضرایب انتشار طولی و عرضی و همچنین نرخ رسوب گذاری محاسبه می شود.

مواد و روش ها

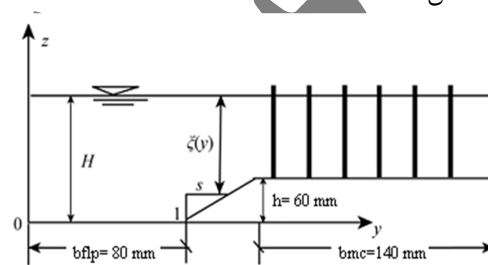
این تحقیق در دو بخش عددی و آزمایشگاهی انجام شد. در بخش آزمایشگاهی، به معرفی فلوام آزمایشگاهی، شرایط آزمایش ها و نحوه اندازه گیری پارامترها پرداخته شد. در بخش عددی، مدل سرعت و معادله انتقال- انتشار، پارامترهای مورد نیاز، روش حل و شرایط مرزی معرفی شد.

کاهش سرعت در پوشش گیاهی، موجب کاهش آشفتنگی و در نتیجه کاهش پخشیدگی آشفتنگی می شود که این تغییر در فرایند انتقال و انتشار، بر حرکت دانه ها، لاروها و آلودگی در پوشش گیاهی اثر می گذارد (نف و همکاران، ۱۹۹۷). خطوط جریان در مسیر حرکت خود ممکن است با ساقه و شاخ و برگ گیاهان به مانند یک مانع برخورد کند. بنابراین، چنانچه دو ذره سیال که بر روی دو خط جریان قرار دارند، از یک نقطه مشخص از کانال به سمت پایین دست حرکت کنند، طی یک زمان مشخص مسافت های متفاوتی را می پیمایند؛ به طوری که برخی از ذرات ممکن است در یک مسیر مستقیم به حرکت خود به سمت جلو ادامه دهند؛ اما برخی از ذرات دیگر در اثر برخورد با موانع، انحراف مسیر قابل توجهی را تجربه کنند که موجب تغییر ضرایب انتشار طولی و عرضی می شود. ضریب انتشار، پارامتر بسیار مهمی است که انتقال یک آلاینده در رودخانه ها و سایر آبراهه ها را توصیف می کند. انتشار را پخش شدن یک مشخصه از سیال نسبت به مرکز جرم تعریف می کنند. علاوه بر تغییر مسیر جریان در اثر برخورد با پوشش گیاهی که منجر به افزایش ضریب انتشار عرضی می شود، شکل گیری ساختاری ویژه از جریان در اطراف گیاه نیز بر نحوه پخش آلودگی مؤثر است. مشاهدات موگنیر (۱۹۹۵) بر روی تأثیر پوشش گیاهی بر ضریب انتشار طولی نشان داد که یک جریان رو به پایین و یک جریان رو به بالا، به ترتیب قبل و بعد از پوشش گیاهی به وجود می آید که باعث طولانی تر شدن مسیر حرکت و کاهش ضریب انتشار طولی می شود (موگنیر، ۱۹۹۵).

مقاومت ناشی از پوشش گیاهی موجب کاهش تنش برشی بستر و در نتیجه ته نشینی رسوب داخل و پشت منطقه گیاهی می شود. مطالعات صحرایی، تجمع رسوب را در اطراف مناطق گیاهی در رودخانه ها نشان می دهد (تسوچیموتو، ۱۹۹۹). مطالعه تورنتون و همکاران (۲۰۰۰) نشان داد که وجود پوشش گیاهی در کانال موجب افزایش قابل توجه رسوب گذاری می شود. آنها مدلی را با استفاده از آنالیز ابعادی برای پیش بینی نرخ رسوب گذاری ارائه کردند (تورنتون و همکاران، ۲۰۰۰). شارپ (۲۰۰۳) در رساله خود تأثیر پوشش گیاهی غیرمستغرق را بر نرخ رسوب گذاری به صورت عددی و آزمایشگاهی بررسی کرد. در تحقیق مورد اشاره برای مدل سازی عددی انتقال

مدل آزمایشگاهی

آزمایش‌ها در فلوم شیب‌پذیر آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه تربیت مدرس انجام شده‌اند. فلوم با سطح مقطع مستطیلی دارای دیواره‌های شیشه‌ای و کف فلزی است. عرض، ارتفاع و طول فلوم، به ترتیب، ۰/۳، ۰/۴۵ و ۱۰ متر است. برای ایجاد کانال مرکب مستقیم غیرمتقارن از صفحات پلکسی گلاس استفاده شد. به این ترتیب، عرض کانال اصلی ۰/۸ متر، شیب جانبی کانال اصلی ۱:۱/۳۳، عرض سیلاب‌دشت ۰/۱۴ متر و ارتفاع لبریزی ۰/۰۶ متر در نظر گرفته شده‌اند. در شکل ۱، مقطع عرضی کانال مرکب نشان داده شده است.



شکل ۱- مقطع عرضی کانال مرکب

یکی از مهم‌ترین پارامترهای مؤثر بر هیدرولیک جریان در کانال‌های مرکب عمق نسبی است که به صورت نسبت عمق جریان در سیلاب‌دشت به عمق جریان در کانال اصلی $(Dr = (H-h)/H)$ تعریف می‌شود. در این معادله H عمق جریان در کانال اصلی و h عمق لبریزی است. بر طبق نظر نف و همکاران (۱۹۹۷) سیلندرهای با قطر ۵ میلی‌متر، نشان‌دهنده پوشش گیاهی واقعی در تالاب‌ها هستند (شاویت و براندون، ۲۰۰۱). بنابراین، برای شبیه سازی پوشش گیاهی از میلگردهای به قطر ۵ میلی‌متر استفاده شده است. پوشش گیاهی در فاصله ۴/۵ متری از ابتدای فلوم و به طول ۴/۵ متر نصب شده است. پوشش گیاهی در سه تراکم مختلف قرار گرفته شده است. در تراکم اول، فاصله طولی پوشش گیاهی ۰/۱۲ متر و فاصله عرضی آنها ۰/۰۴ متر است؛ در تراکم دوم فاصله طولی پوشش گیاهی ۰/۰۶ متر و فاصله عرضی آنها ۰/۰۴ است؛

در تراکم سوم، فاصله طولی پوشش گیاهی ۰/۰۳ و فاصله عرضی نسبت به شرایط یک سیلندر تک متفاوت است که در این حالت به آن ضریب کشانه حجمی گفته می‌شود. در این مطالعه، ضریب کشانه حجمی $(C_D = C_{DSF})$ ، با در نظر گرفتن اثرات سایه‌اندازی بر میله پایین دست (SF) آنها ۰/۰۲ متر است و با آرایش شطرنجی قرار گرفته است. نف (۱۹۹۹) نشان داد که ضریب کشانه در یک ردیف سیلندر تحت تأثیر اثر دنباله‌ها قرار می‌گیرد و مقدار آن برای تراکم‌های مختلف از مدل تداخلی نف (۱۹۹۹) تعیین و در جدول ۱ ارائه شده است.

اندازه‌گیری سرعت در دو مقطع ۵/۵ و ۶/۵ متری از ابتدای کانال انجام شد. در هر مقطع، سطح مقطع کانال به ۱۴ قسمت تقسیم شد. مختصات y در نقاط اندازه‌گیری، ۲۰، ۴۰، ۶۰، ۸۰، ۱۰۰، ۱۲۰، ۱۴۰، ۱۶۰، ۱۸۰، ۲۰۰، ۲۲۰، ۲۴۰، ۲۶۰ و ۲۸۰ میلی‌متر از دیواره کانال اصلی است. اندازه‌گیری سرعت‌های نقطه‌ای با استفاده از میکرومولینه نیکسون با دقتی در حدود $\pm 0.2\%$ انجام شده است. از آنجا که قطر پراب اندازه‌گیری سرعت حدود ۲/۵ سانتی‌متر است، زمانی که عمق آب ۶/۵ سانتی‌متر و بیشتر باشد، امکان اندازه‌گیری سرعت در ۰.۲H و ۰.۸H وجود دارد (در واقع، در این عمق می‌توان با استفاده از پراب با این ابعاد، سرعت را در ۰/۸ عمق جریان اندازه‌گیری کرد). در غیر این صورت، سرعت تنها در ۰.۶H اندازه‌گیری می‌شود. برنامه آزمایش‌های اندازه‌گیری سرعت در جدول ۱ ارائه شده است. دسته دوم آزمایش‌ها برای اندازه‌گیری نرخ رسوب‌گذاری، انجام شده است (جدول ۲). در این آزمایش‌ها از پودر میکرونیزه سیلیس با قطر متوسط ۷ میکرومتر و چگالی ۲/۱۴۳ گرم بر سانتی‌مترمکعب، به‌عنوان رسوب معلق استفاده شده است. از این رسوب، مخلوطی با غلظت ۶ گرم در لیتر تهیه می‌شود. در انتهای هر آزمایش، ابتدا پمپ خاموش شده، سپس فلوم در مدت زمانی بیش از ۲۰ دقیقه تخلیه می‌شود، پس از گذشت ۲ روز فلوم کاملاً خشک شده، سپس رسوب با دقت جمع‌آوری و توزین می‌شود.

جدول ۱- شرایط آزمایشگاهی محاسبه سرعت

شماره آزمایش	شیب کانال	عمق آب در کانال اصلی (متر)	عمق نسبی	آرایش پوشش گیاهی	ضریب کشانه حجمی CD
S11	۰/۰۰۱	۰/۰۸۱	۰/۲۷۷	۲۰×۳۰	۰/۷
S12	۰/۰۰۱	۰/۰۹۳	۰/۳۵	۲۰×۳۰	۰/۷
S13	۰/۰۰۱	۰/۱۱۲	۰/۴	۲۰×۳۰	۰/۷
S14	۰/۰۰۱	۰/۱۲	۰/۵	۲۰×۳۰	۰/۷
S15	۰/۰۰۲	۰/۰۸۲	۰/۲۷	۲۰×۳۰	۰/۷
S16	۰/۰۰۲	۰/۰۹۳	۰/۳۶	۲۰×۳۰	۰/۷
S17	۰/۰۰۲	۰/۱۰۲	۰/۴۱۲	۲۰×۳۰	۰/۷
S18	۰/۰۰۲	۰/۱۲۲	۰/۵۰۸	۲۰×۳۰	۰/۷
S19	۰/۰۰۴	۰/۰۸۳	۰/۲۷۷	۲۰×۳۰	۰/۷
S110	۰/۰۰۴	۰/۰۹۳	۰/۳۵۵	۲۰×۳۰	۰/۷
S111	۰/۰۰۴	۰/۱۰۲	۰/۴۱۲	۲۰×۳۰	۰/۷
S112	۰/۰۰۴	۰/۱۲	۰/۵	۲۰×۳۰	۰/۷
S113	۰/۰۰۱۵	۰/۰۷۹	۰/۲۴۱	۴۰×۶۰	۱/۰۷
S114	۰/۰۰۱۵	۰/۱	۰/۴	۴۰×۶۰	۱/۰۷
S115	۰/۰۰۱۵	۰/۱۲	۰/۵	۴۰×۶۰	۱/۰۷
S116	۰/۰۰۱۵	۰/۰۷۴	۰/۱۸۹	۴۰×۱۲۰	۱/۱۵
S117	۰/۰۰۱۵	۰/۰۸	۰/۲۹۴	۴۰×۱۲۰	۱/۱۵
S118	۰/۰۰۱۵	۰/۱۲	۰/۳۳۳	۴۰×۱۲۰	۱/۱۵

جدول ۲- برنامه آزمایشها برای محاسبه نرخ رسوب گذاری

شماره آزمایش	شیب فلوم	عمق آب در کانال اصلی (متر)	تراکم پوشش گیاهی ($1/m^2$)	زمان کل آزمایش (ثانیه)
S31	۰/۰۰۱	۰/۰۷۵	۱۶۶۶/۶	۵۴۰۰
S32	۰/۰۰۱	۰/۰۸۲	۱۶۶۶/۶	۱۸۰۰۰
S33	۰/۰۰۱	۰/۰۸۷	۱۶۶۶/۶	۱۴۴۰۰
S34	۰/۰۰۱	۰/۰۷۹	۱۶۶۶/۶	۱۸۰۰۰
S35	۰/۰۰۱	۰/۰۸۲	۱۶۶۶/۶	۱۸۰۰۰
S36	۰/۰۰۱	۰/۰۹	۱۶۶۶/۶	۱۸۰۰۰
S37	۰/۰۰۱	۰/۰۸۹	۱۶۶۶/۶	۱۴۴۰۰
S38	۰/۰۰۲	۰/۰۸۲	۱۶۶۶/۶	۱۶۲۰۰
S39	۰/۰۰۲	۰/۰۸۵	۱۶۶۶/۶	۱۶۲۰۰
S310	۰/۰۰۲	۰/۰۷۵	۱۶۶۶/۶	۱۸۰۰۰
S311	۰/۰۰۲	۰/۰۷۹	۱۶۶۶/۶	۱۷۱۰۰
S312	۰/۰۰۲	۰/۰۹۴	۱۶۶۶/۶	۷۲۰۰

توسعه مدل عددی

مدل سرعت در کانالهای مرکب

شیونو و نایت (۱۹۹۱)، الگوی جریان در سیلاب دشت و تنشهای برشی رینولدزی τ_{yx}, τ_{zx} را در منطقه لایه برشی بررسی کردند و مدل شیونو و نایت^۱ (SKM) را برای پیش بینی توزیع عرضی سرعت متوسط عمقی در کانالهای مرکب، ارائه کردند. مدل شیونو و نایت، یک

روش توزیع عرضی براساس توجه به جریانهای ثانویه و سرعتهای افقی است و می تواند برای انواع کانال استفاده شود (شیونو و نایت، ۱۹۹۱). مدل SKM توسط تانگ و نایت در سال ۲۰۰۹، برای مدل سازی جریان در کانال مرکب با وجود پوشش گیاهی اصلاح شده است. در این مدل برای تشریح آثار پوشش گیاهی براساس نظریه نیروی کشانه، یک ترم مخزن به معادله مومنتم اضافه شده است. جزئیات این مدل در مطالعه تانگ و نایت (۲۰۰۹) ارائه شده است. در این مدل، ابتدا سطح مقطع جریان با توجه

1- Shiono and Knight Model

کشانه؛ f ، ضریب اصطکاک؛ δ ، تخلخل پوشش گیاهی؛ A_v ، سطح مواجهه پوشش گیاهی؛ S_F ، فاکتور سایه اندازی؛ Γ ، پارامتر جریان ثانویه؛ و λ ، لزجت گردابه‌ای است. برای محاسبه ضریب کشانه از مدل تداخلی نف (۱۹۹۹) استفاده شده است. در جدول ۲ ضرایب کشانه حجمی برای تراکم‌های مختلف مورد استفاده در این تحقیق ارائه شده است.

برای محاسبه پارامتر جریان ثانویه، روابط مختلفی ارائه شده است؛ به‌عنوان مثال رامشواران و شیونو (۲۰۰۷) این روابط را برای شرایط وجود پوشش گیاهی در سیلاب‌دشت اصلاح و رابطه $\Gamma/[\rho g(H-h)S_0] = 1.2 Dr$ را برای کانال اصلی و $\Gamma/[\rho g(H-h)S_0] = 0.6 Dr$ را برای سیلاب‌دشت با وجود پوشش گیاهی ارائه کردند. محسنی (۱۳۹۴) نیز پارامتر جریان ثانویه را برای شرایط وجود پوشش گیاهی در سیلاب‌دشت واسنجی و رابطه $0.417\delta\rho gS_0HD_r$ و $0.62\delta\rho gS_0HD_r$ را برای پارامتر جریان ثانویه، به‌ترتیب برای کانال اصلی و سیلاب‌دشت با وجود پوشش گیاهی ارائه کرد. شیونو و نایت مقدار لزجت گردابه‌ای (λ) را هم برای کانال اصلی و هم در سیلاب‌دشت مقدار ثابت 0.07 در نظر گرفتند؛ در حالی که آپریل و نایت، مقدار λ را برای سیلاب‌دشت به‌صورت $\lambda_{mc}(-0.2 + 1.2Dr^{-1.44})$ پیشنهاد کردند؛ در این تحقیق، از مقایسه نتایج آزمایشگاهی و مقادیر مدل عددی سرعت، مشخص شد که استفاده از مقدار ثابت 0.0683 برای ضریب لزجت گردابه‌ای در عرض کانال مرکب، تأثیر قابل توجهی بر نتایج توزیع سرعت نخواهد داشت (محسنی، ۱۳۹۴).

برای تعیین مقادیر f ، رامشواران و شیونو (۲۰۰۷) داده‌های FCF را بررسی و فرم اصلاح‌شده معادله کلبروک- وایت را به‌صورت معادلات (۱۳) و (۱۴) ارائه کردند:

$$f_b = [-2\log[\frac{3.02\theta}{\sqrt{128gH^3S_0 + \frac{k_s}{12.3H}}}]^{-2} \quad (13)$$

$$f_v = [-2\log[\frac{3.02\theta}{\sqrt{128gH^3S_0 + \frac{k_s}{1.2H}}}]^{-2} \quad (14)$$

معادلات (۱۳) و (۱۴)، به‌ترتیب برای شرایط با و بدون پوشش گیاهی هستند. در این معادله k_s ، ارتفاع زبری یا اصطکاک سطحی بستر کانال است. اصطکاک سطحی k_s از معادله استریکلر $n = k_s^{1/6}/(8.25\sqrt{g})$ محاسبه شده است. در این تحقیق، ابتدا با استفاده از داده‌های

به شیب عرضی و وجود و یا عدم وجود پوشش گیاهی به چند منطقه تقسیم می‌شود و برای هر منطقه، معادله خاص آن منطقه ارائه می‌شود. در ادامه، معادلات نهایی این مدل ارائه شده است.

- توزیع سرعت در منطقه بدون وجود پوشش گیاهی و عمق ثابت (اگر شیب عرضی بستر صفر باشد، $S=\infty$ است).

$$U_d = [A_1e^{\gamma y} + A_2e^{-\gamma y} + k]^{1/2} \quad (1)$$

در اینجا:

$$k = \frac{8gS_0H}{f/8} (1 - \beta) \quad (2)$$

$$\gamma = \frac{\sqrt{\frac{2}{\lambda}} (\frac{8}{f})^{1/4} \frac{1}{H} \sqrt{\frac{f}{8}}}{\Gamma} \quad (3)$$

$$\beta = \frac{\Gamma}{\rho gS_0H} \quad (4)$$

- منطقه بدون پوشش گیاهی با شیب عرضی بستر (1:s)

$$U_d = [A_3\xi^\alpha + A_2\xi^{-(\alpha+1)} + \omega\xi + \eta]^{1/2} \quad (5)$$

که در اینجا:

$$\alpha = -\frac{1}{2} + \frac{1}{2} \sqrt{1 + \frac{s\sqrt{1+s^2}}{\lambda} \sqrt{8f}} \quad (6)$$

$$\omega = \frac{gS_0}{\sqrt{1+s^2} (\frac{f}{8}) - \frac{\lambda}{s^2} \sqrt{f/8}} \quad (7)$$

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

- توزیع سرعت در منطقه با وجود پوشش گیاهی و عمق ثابت (اگر شیب عرضی بستر صفر باشد، $S=\infty$ است).

$$U_d = [A_5e^{\gamma y} + A_6e^{-\gamma y} + k]^{1/2} \quad (9)$$

در اینجا:

$$k = \frac{8gS_0H}{f/8 + C_D S_F A_v H / (2\delta)} (1 - \beta) \quad (10)$$

$$\gamma = \frac{\sqrt{\frac{2}{\lambda}} (\frac{8}{f})^{1/4} \frac{1}{H} \sqrt{\frac{f}{8}} + (\frac{H}{2\delta}) C_D S_F A_v}{\Gamma} \quad (11)$$

$$\beta = \frac{\Gamma}{\rho gS_0H} \quad (12)$$

در معادلات (۱)، (۵) و (۹)، ضرایب A_1 تا A_6 مجهول‌اند، که با به‌کارگیری شرایط مرزی محاسبه می‌شوند. ξ ، عمق محلی است که از معادلات $\xi = H - (y-b)/s$ (for $y > 0$) و $\xi = H + (y+b)/s$ (for $y < 0$) محاسبه می‌شود؛ H ، عمق آب در کانال اصلی؛ s ، شیب جانبی؛ و b ، عرض کانال است. جزئیات در شکل ۱ نشان داده شده است. در معادلات (۱) تا (۱۲)، S_0 ، شیب طولی کانال؛ g ، شتاب ثقل؛ C_D ، ضریب

انتقال-انتشار^۱ (ADE) را در حالت کلی می توان به صورت زیر نوشت:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial(UC)}{\partial x} + \frac{\partial(VC)}{\partial y} + \frac{\partial(WC)}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\epsilon_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\epsilon_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\epsilon_z \frac{\partial C}{\partial z} \right) \pm rC - Sd \quad (15)$$

که C، غلظت آلاینده؛ U، V و W، به ترتیب سرعت در راستای x، y و z هستند؛ t، زمان پس از شروع تزریق؛ r، ضریب واکنش^۲؛ و Sd، نماینده بخش چشمه و چاه^۳ است. همچنین، ضرایب ϵ_x ، ϵ_y و ϵ_z ، به ترتیب ضرایب انتشار طولی، عرضی و عمقی هستند. در این تحقیق، تأثیر مؤلفه عرضی سرعت در قالب پارامتر جریان ثانویه در محاسبه سرعت طولی جریان در نظر گرفته شده است؛ از این رو، فرض شده است که می توان از سرعت V صرف نظر و مقدار آن را صفر در نظر گرفت. تحت این شرایط، انتقال در جهت y (عرض کانال) تنها به صورت انتشار است و معادله (۱۶) را می توان برای کانال مرکب منشوری مستقیم به صورت زیر نوشت:

$$\frac{\partial(HC)}{\partial t} + \frac{\partial(HUC)}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left(H\epsilon_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(H\epsilon_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) - S_d H \quad (16)$$

روابط ضرایب انتشار و نرخ رسوب گذاری

در این تحقیق برای معرفی ضریب انتشار عرضی و طولی در کانال اصلی روابط ارائه شده توسط الدر (۱۹۵۹) به دلیل سادگی و گستردگی استفاده از آن در تحقیقات گذشته، به کار گرفته شده است. الدر، ضریب انتشار طولی ϵ_{xm} در جهت X و ϵ_{ym} ضریب انتشار عرضی در جهت Y در کانال اصلی را به صورت معادله (۱۷) ارائه کرد:

$$\epsilon_{xm} = p_{\epsilon_{xm}} u_* h \quad (17)$$

$$\epsilon_{ym} = p_{\epsilon_{ym}} u_* h$$

در اینجا u_* ، سرعت برشی؛ و h ، عمق جریان است؛ $p_{\epsilon_{xm}}$ و $p_{\epsilon_{ym}}$ ، نیز ضرایبی هستند که بایستی واسنجی شوند. برای محاسبه ضریب انتشار طولی در سیلاب دشت با وجود پوشش گیاهی ϵ_{xf} ، رابطه الدر به صورت معادله (۱۸) بازنویسی شده است.

$$\epsilon_{xf} = p_{\epsilon_{xf}} u_* h \quad (18)$$

با بررسی تحقیقات مختلف برای برآورد ضریب انتشار عرضی در سیلاب دشت با وجود پوشش گیاهی، معادله نف

آزمایشگاهی سرعت، ضریب مانینگ در حالت بدون وجود پوشش گیاهی در کانال اصلی و سیلاب دشت محاسبه و سپس از معادله استریکلر، ضریب استریکلر در کانال اصلی حدود ۰/۰۰۵ و برای سیلاب دشت ۰/۰۰۷ متر برآورد شد.

شرایط مرزی حل مدل جریان

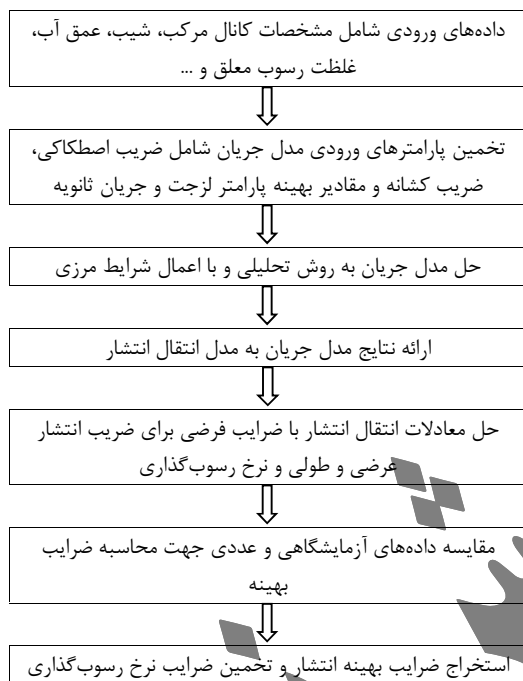
برای حل تحلیلی و تعیین ضرایب مجهول A_1 تا A_6 ، تعیین شرایط مرزی مناسب در دیواره کانال و حد فاصل مناطق مختلف (که براساس شیب کف و وجود یا عدم وجود پوشش گیاهی تقسیم شده اند) ضروری است. در حد فاصل مناطق مختلف بایستی دو شرط پیوستگی سرعت $U_d^{(i)} = U_d^{(i+1)}$ و پیوستگی نیروی یک $[H\bar{\tau}_{yx}]^{(i)} = [H\bar{\tau}_{yx}]^{(i+1)}$ رعایت شود. سرعت در مرزهای ثابت مساوی سرعت دیواره، یعنی $U_d = U_{wall}$ در نظر گرفته شده است. در مدل تانگ و نایت (۲۰۰۹) این شرط به صورت سرعت صفر در دیواره در نظر گرفته شده بود که با توجه به باریک بودن کانال مورد استفاده در این تحقیق نتایج قابل قبولی نداشت. سان و شیونو (۲۰۰۸)، فرض کردند که برای شرط مرزی نزدیک دیواره، سرعت از قانون لگاریتمی یا قانون توان هفتم پیروی می کند. در این حالت، سرعت دیواره از نسبت تنش برشی متوسط بستر بر تنش برشی دیواره، با رابطه اصطکاکی داری از رابطه $U_{wall}^2 = 0.75RgS_0/(f/8)$ محاسبه می شود. برای شرط مرزی دیواره در منطقه با پوشش گیاهی، سرعت به طور مشابه با استفاده از نسبت تنش برشی مرزی بر نیروی کشانه در واحد سطح محاسبه می شود. در این حالت، سرعت در دیواره منطقه با پوشش گیاهی، از رابطه $U_{wall}^2 = RgS_0/(0.5 * CD * N_a * H * d_{veg})$ (سان و شیونو، ۲۰۰۸).

معادله انتقال - انتشار

ذرات جامد مانند رسوب به واسطه آشفتگی به حال تعلیق در می آیند. آثار آشفتگی بر ذرات می تواند مشابه فرایند پخش - انتشار در نظر گرفته شود. این مدل تمام اثرهای ناشی از آشفتگی را در نظر نمی گیرد؛ با این حال، برای توضیح اغلب مسائل انتقال رسوب معلق به شکل رضایت بخشی قابل استفاده است (چتیلا، ۱۹۹۷). معادله

1- Advection Dispersion Equation
2- Reaction coefficient
3- Source or sink

می‌شوند و مقادیر بهینه ضرایب انتشار براساس کمترین خطای مشاهده شده، محاسبه می‌شوند؛ بدین‌منظور از الگوریتم لونبرگ مارکاد^۱ استفاده شده است. الگوریتم مدل عددی توسعه داده شده در این مطالعه، در شکل ۲ ارائه شده است. لازم به ذکر است که مدل در محیط نرم‌افزار متلب کد نویسی و اجرا شده است.



شکل ۲- شمای کلی مدل عددی

نتایج و بحث

نتایج آزمایشگاهی توزیع عرضی سرعت متوسط عمقی (Ud)، در شرایط وجود پوشش گیاهی برای دو تراکم مختلف در شکل ۳ نشان داده شده است. همان‌گونه که مشخص است، مقدار سرعت در کانال اصلی همواره از سرعت سیلاب‌دشت بزرگ‌تر است. این اختلاف سرعت منجر به ایجاد یک جریان برشی قوی در مرز مشترک کانال اصلی و سیلاب‌دشت می‌شود که به نوبه خود بر پدیده‌هایی همچون انتقال آلاینده در مقاطع مرکب بسیار مؤثر است. علاوه بر این، ملاحظه می‌شود که سرعت متوسط بر روی دشت سیلابی در حالت وجود پوشش گیاهی نسبتاً ثابت است که نشان می‌دهد می‌توان جریان بر روی دشت سیلابی را دوبعدی در نظر گرفت. در هر حال، اثرهای جریان‌های ثانویه و انتقال مومنتم بر کانال

و همکاران (۱۹۹۷) انتخاب شد. نف، معادله (۱۹) را برای محاسبه ضریب انتشار عرضی برای حالت وجود پوشش گیاهی ϵ_{yf} ارائه کرده است. در این معادله، ضریب انتشار عرضی کل، شامل دو بخش پخشیدگی آشفته‌گی و پخشیدگی مکانیکی است که در آن پخشیدگی خالص با استفاده از سرعت متوسط U و قطر سیلندر d بی‌بعد شده است.

$$\frac{\epsilon_{yf}}{Ud} = p_{af} [C_D ad]^{1/3} + \left[\frac{p_{bf}^2}{2} \right] ad \quad (19)$$

در اینجا، a، تراکم پوشش گیاهی و C_D ، ضریب کسانه حجمی است. ضرایب p_{af} و p_{bf} ضرایبی هستند که بایستی با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی واسنجی شوند. نف و همکاران (۱۹۹۷)، در تحقیق خود ضرایب ۱ و ۱ را برای p_{af} و p_{bf} پیشنهاد داده است. نرخ رسوب‌گذاری در کانال اصلی و سیلاب‌دشت براساس مدل الیوت در معادله (۲۰) تعریف شده است (الیوت، ۲۰۰۰).

$$S_{am} = p_{sam} v_s C \quad (20)$$

$$S_{af} = p_{saf} v_s C$$

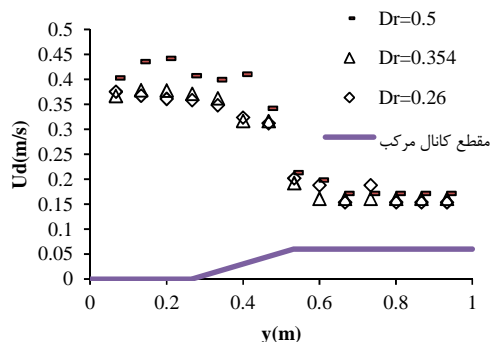
S_{am} و S_{af} نرخ رسوب‌گذاری، به ترتیب، در کانال اصلی و سیلاب‌دشت بر حسب کیلوگرم بر مترمربع در ثانیه؛ v_s ، سرعت سقوط ذره رسوب بر حسب متر بر ثانیه؛ C، غلظت متوسط عمقی رسوب معلق بر حسب کیلوگرم بر مترمکعب؛ و p_{saf} و p_{sam} ضرایبی هستند که بایستی واسنجی شوند. سرعت سقوط ذرات v_s از معادله (۲۱) که توسط سولسبی (۱۹۹۷) ارائه شده است، محاسبه می‌شود:

$$v_s = \frac{g}{dp} \left[\left(10.36^2 + 1.049 \left(\frac{g(G_s - 1)}{g^2} \right) dp^3 \right)^{1/2} - 10.36 \right] \quad (21)$$

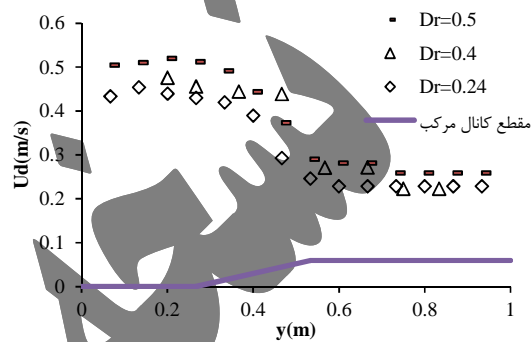
در اینجا g ، لزجت سینماتیک آب؛ $G_s = \rho_p / \rho_{water}$ وزن مخصوص ذره؛ dp ، قطر متوسط ذرات رسوب معلق؛ و g ، شتاب ثقل است. در این تحقیق، برای حل معادله انتقال-انتشار از روش حجم محدود استفاده شده است. در مرز ورودی، غلظت ورودی مشخص $C_{x=0} = C$ در نظر گرفته شده است. در مرز خروجی، گرادیان غلظت در جهت جریان صفر $(\partial C / \partial x)_{x=L} = 0$ فرض شده است و در دیواره‌های کناری، گرادیان غلظت در جهت عمود بر جریان صفر $\frac{\partial C}{\partial y} = 0$ در نظر گرفته شده است. برای تخمین ضرایب انتشار و نرخ رسوب‌گذاری، نتایج حاصل از مدل عددی با نتایج داده‌های آزمایشگاهی مقایسه

1- Levenberg Marquardt Algorithm

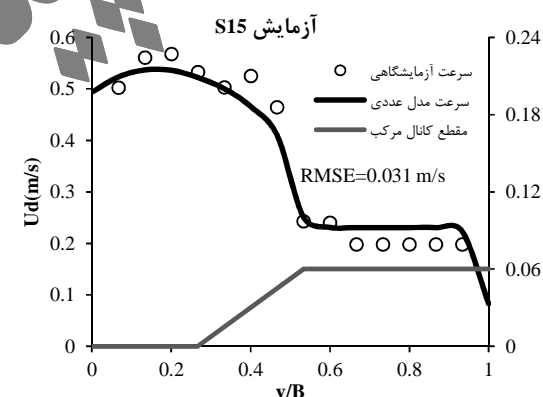
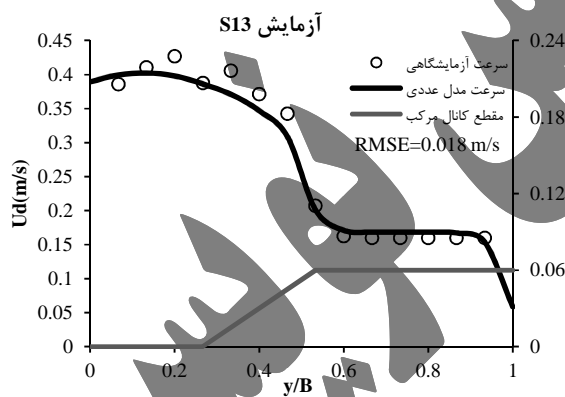
جریان ثانویه توسط محسنی (۱۳۹۴)، ارائه شده است. اختلاف مشاهده شده میان داده‌های آزمایشگاهی و مدل عددی در حدود ۱٪ و ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) در برآورد توزیع عرضی سرعت حدود ۰/۰۲۵ متر بر ثانیه است. همان‌گونه که مشخص است، مدل تانگ و نایت به‌خوبی قادر به برآورد توزیع عرضی سرعت متوسط عمقی است.



اصلی مشهودتر از دشت سیلابی است؛ به‌گونه‌ای که گرادیان عرضی سرعت در کانال اصلی بسیار متغیر است. در شکل ۴ سرعت‌های محاسبه شده از مدل عددی با مقادیر آزمایشگاهی سرعت، مقایسه شده‌اند. نتایج مدل عددی با در نظر گرفتن شرایط مرزی جدید در دیواره (به جای سرعت صفر از رابطه سرعت دیواره در مرز صلب استفاده شده است) و استفاده از مقادیر اصلاح‌شده پارامتر



شکل ۳- توزیع سرعت متوسط عمقی با وجود پوشش گیاهی در شیب ۰/۰۱۵، در ۶/۵ متری از ابتدای فلوم الف) تراکم $1/16/6$ (ب) در تراکم ۱۶۶۷



شکل ۴- مقایسه داده‌های آزمایشگاهی و مدل جریان جهت صحت‌سنجی مدل

(آزمایش‌های S31 تا S34 و آزمایش‌های S310 تا S312) برای واسنجی ضرایب نرخ رسوب گذاری انتخاب شد. در شکل ۵ نرخ رسوب گذاری آزمایشگاهی و عددی مقایسه شده‌اند. نتایج حاصل از این واسنجی در جدول ۳ ارائه شده‌اند.

واسنجی ضرایب انتشار و نرخ رسوب گذاری

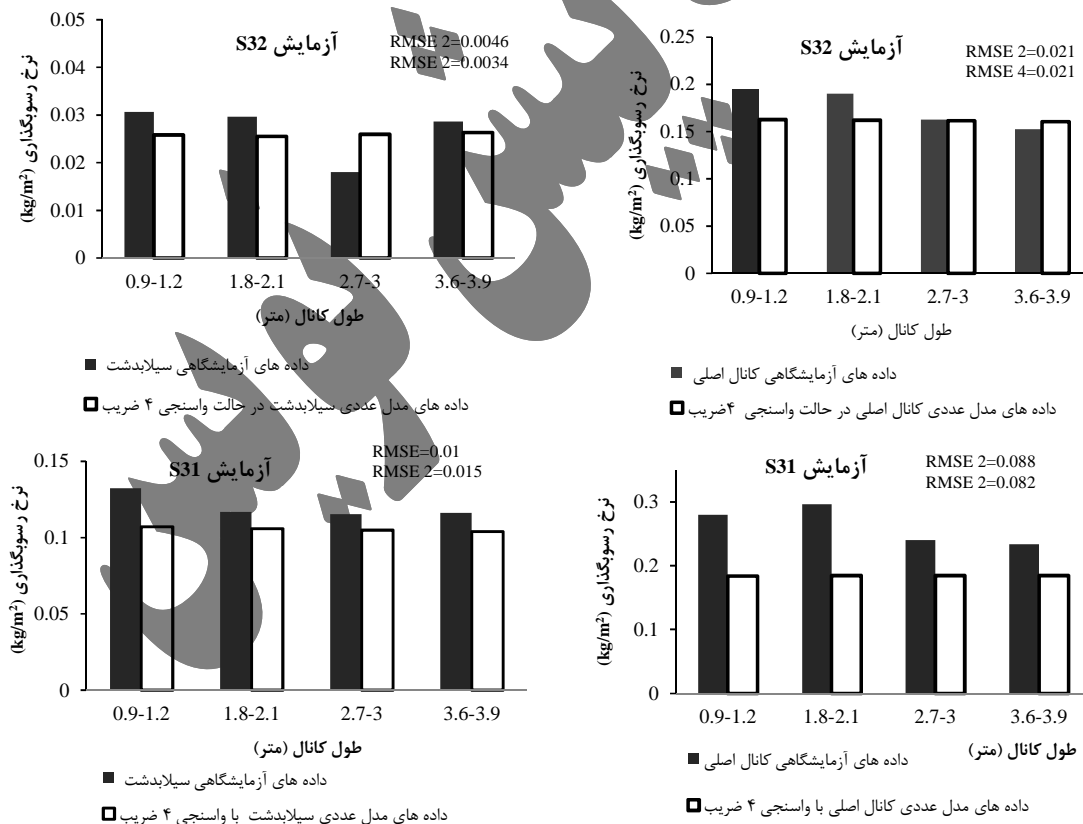
هدف از این بخش، واسنجی ضرایب $p_{\epsilon_{ym}}$ و $p_{\epsilon_{xm}}$ و $p_{\epsilon_{xf}}$ ، p_{af} و $p_{\beta f}$ ، $p_{s_{dm}}$ و $p_{s_{df}}$ جهت محاسبه ضرایب انتشار طولی و عرضی نرخ رسوب گذاری است؛ برای این منظور، از میان ۱۲ آزمایش انجام گرفته، ۷ آزمایش

جدول ۳- واسنجی ضرایب رسوب گذاری همراه با ضرایب انتشار

RMSE(kg/m ²)	R ²	$p_{s_{df}}$	$p_{s_{dm}}$	$p_{\beta f}$	p_{af}	$p_{\epsilon_{ym}}$	$p_{\epsilon_{xf}}$	$p_{\epsilon_{xm}}$	ضریب مقدار بهینه
۰/۰۵۲	۰/۸۳۷	۰/۰۰۰۲	۰/۰۰۰۶	۱	۰/۶۱۳۸	۱/۳۲	۵/۲۳	۵/۳	

رسیدند که وجود پوشش گیاهی، ضریب انتشار عرضی را ۳/۱۹ برابر افزایش می‌دهد (طباطبایی و همکاران، ۲۰۱۳) در این تحقیق، مقدار p_{bf} که به پخشیدگی مکانیکی مرتبط است همان مقدار ۱ باقی مانده است؛ اما پارامتر p_{af} مربوط به پخشیدگی آشفته‌گی، به ۰/۴۵ کاهش یافته است که می‌تواند به دلیل تراکم بالای پوشش گیاهی در این تحقیق باشد؛ زیرا افزایش تراکم پوشش گیاهی موجب کاهش قابل ملاحظه سرعت و در نتیجه کاهش آشفته‌گی می‌شود. نف (۱۹۹۹) بیان می‌کند که چنانچه تراکم پوشش گیاهی کمتر از ۱٪ (ad) باشد، با افزایش تراکم پوشش گیاهی، به دلیل تأثیر دنباله، شدت آشفته‌گی افزایش می‌یابد؛ اما چنانچه تراکم پوشش گیاهی بیشتر از ۱٪ (ad) باشد، به دلیل کاهش مقیاس گردابه، شدت آشفته‌گی به صورت ناگهانی کاهش می‌یابد. در این حالت، مقیاس آشفته‌گی توسط خصوصیات پوشش گیاهی (قطر) کنترل می‌شود $l \sim d_p$ (نف، ۱۹۹۹).

در مطالعه چتیلا (۱۹۹۹)، مقادیر p_{exf} و p_{exm} برای کانال مرکب بدون پوشش گیاهی ۵/۲ در نظر گرفته شده‌اند که با مقایسه نتایج حاصل از این تحقیق در حضور پوشش گیاهی، مقادیر تفاوت چندانی نداشته‌اند. چتیلا، مقدار p_{ey} را برای کانال اصلی و سیلاب‌دشت ۰/۲۳ در نظر گرفت و نتایج قابل قبولی به دست آورد. فراسل و همکاران (۲۰۰۷) نیز این ضریب را در محدوده ۰/۱۸ تا ۰/۲۴ در نظر گرفته است. در این تحقیق، ضریب بهینه ۱/۳۲ برآورد شده است که با توجه به افزایش قابل توجه گرادیان عرضی سرعت در کانال مرکب به دلیل وجود پوشش گیاهی در سیلاب‌دشت که منجر به افزایش پخشیدگی آشفته‌گی، نسبت به حالت بدون وجود پوشش گیاهی می‌شود، قابل توجیه است. در این مورد، طباطبایی و همکاران (۲۰۱۳) ضریب انتشار عرضی در حالت بستر دون و وجود پوشش گیاهی را در دیواره کانال بررسی کردند و به این نتیجه

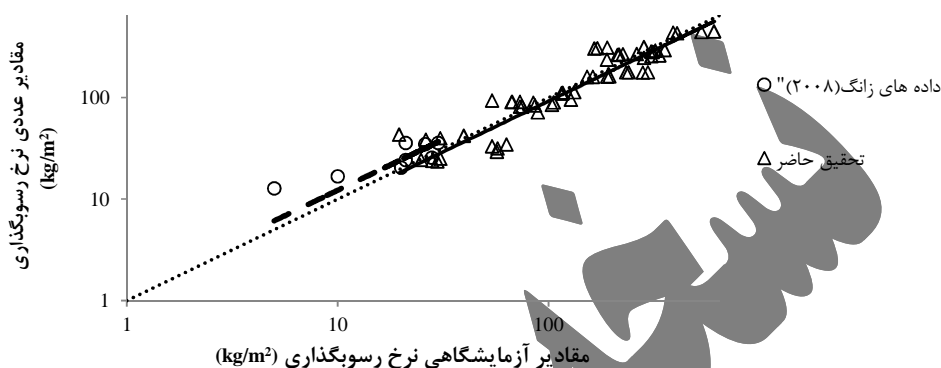


شکل ۵- مقایسه نرخ رسوب گذاری آزمایشگاهی با نرخ رسوب گذاری حاصل از مدل عددی

داد که مدل ارائه شده در این مطالعه، مقادیر نرخ رسوب گذاری رسوب معلق را در حدود ۸٪ کمتر از مقدار واقعی برآورد می کند. همچنین، این مدل قادر است داده های آزمایشگاهی زانگ را با اختلافی حدود ۲۲٪ محاسبه کند.

صحت سنجی نرخ رسوب گذاری

برای صحت سنجی مدل عددی، نتایج مدل با داده های آزمایش های S35 تا S39 و همچنین با داده های آزمایشگاهی مطالعه زانگ (۲۰۱۱) مقایسه شده است (شکل ۶). مختصری از مطالعه زانگ در مقدمه ارائه شده است. مقایسه داده های آزمایشگاهی و مدل عددی نشان



شکل ۶- مقایسه نتایج مدل عددی و داده های آزمایشگاهی

رسوب گذاری را در حدود ۸٪ کمتر از مقدار واقعی برآورد می کند. برای صحت سنجی مدل، مدل عددی برای مطالعه زانگ (۲۰۱۱) اجرا و خطایی برابر با ۲۲٪ مشاهده شد؛ بنابراین، مدل کارایی قابل قبولی را در برآورد سرعت جریان، غلظت رسوب و نرخ رسوب گذاری در کانال مرکب با وجود پوشش گیاهی دارد.

نتیجه گیری

با مقایسه نتایج مدل عددی و داده های آزمایشگاهی، ضرایب انتشار و نرخ رسوب گذاری برای معادلات حاکم بر جریان در کانال مرکب با وجود پوشش گیاهی در سیلاب دشت واسنجی شده اند. از مقایسه توزیع سرعت حاصل از مدل با داده های آزمایشگاهی مشخص است که مدل تانگ و نایت (۲۰۰۹) با در نظر گرفتن مقادیر اصلاح شده پارامتر جریان ثانویه و به کارگیری شرایط مرزی جدید، به خوبی قادر به پیش بینی توزیع سرعت متوسط عمقی در کانال مرکب با پوشش گیاهی در سیلاب دشت است. روابط الدر (۱۹۵۹) و نف (۱۹۹۹) برای محاسبه ضرایب انتشار طولی و عرضی در کانال اصلی و سیلاب دشت با وجود پوشش گیاهی واسنجی شده اند. بررسی نتایج نشان داد که ضریب انتشار طولی در شرایط وجود پوشش گیاهی در مقایسه با شرایط بدون پوشش گیاهی تفاوت قابل توجهی ندارد. اما افزایش قابل توجهی برای ضریب انتشار عرضی در کانال اصلی به دلیل افزایش قابل توجه گرادیان عرضی سرعت، مشاهده شده است. در سیلاب دشت، ضریب انتشار عرضی به دلیل تراکم بالای پوشش گیاهی و کاهش سرعت و در نتیجه کاهش شدت آشفتنگی جریان، کاهش یافته است. مقایسه داده های آزمایشگاهی و مدل عددی نشان داد که مدل، مقادیر نرخ

منابع

۱. محسنی م. ۱۳۹۴. توسعه مدل ریاضی دوبعدی انتقال بار معلق در کانال مرکب با وجود پوشش گیاهی صلب غیرمستغرق در سیلاب دشت. رساله دکتری. دانشگاه تربیت مدرس. ۲۶۸ ص.
2. Chatila G. J. 1997. Modeling of pollutant transport in compound open channels, Ph.D. Thesis, University of Ottawa. Ontario. Canada. 278 p.
3. Elliott A. H. 2000. Settling of fine sediment in a channel with emergent vegetation. Journal of Hydraulic Engineering. 126: 570-577.
4. Fraselle Q. Bousmar D. and Zech Y. 2007. Diffusion and dispersion in compound channels: the role of large scale turbulent structures. Proceedings 32nd Congress. International Association of Hydraulic Engineering and Research. Venice. 6 p.

- compound channels with partially vegetated floodplains. *Sci China Ser.* 52:3357-3362.
18. Thornton C. I. Abt S. R. Morris C. E. and Fischenich J. C. 2000. Calculating shear stress at channel-overbank interfaces in straight channels with vegetated floodplains. *Journal of Hydraulic Engineering.* 126(12): 929-936.
 19. Tsujimoto T. 1999. Fluvial processes in streams with vegetation *Journal of Hydraulic Research.* 37: 789-803.
 20. Zong L. 2011. Interactions among flow, sediment deposition and aquatic vegetation in a channel. M. Sc. Thesis, Civil and Environmental Engineering Department. Massachusetts Institute of Technology. 74 p.
 5. Huang Y. H. Saiers J. E. Harvey. J. W. Noe. G. B. and Mylon S. 2008. Advection, dispersion and filtration of fine particles within emergent vegetation of the Florida Everglades. *Water Resources Research.* 44 p.
 6. Mugnier C. G. 1995. Experimental study of the influence of vegetation on longitudinal dispersion. Civil and Environmental Engineering. M.Sc. thesis Massachusetts Institute of Technology. 82 p.
 7. Nepf H. M. 1999. Drag, turbulence, and diffusion in flow through emergent vegetation. *Water Resources Research.* 35: 479-489.
 8. Nepf H. M. Sullivan J. A. and Zavistoski R. A. 1997. A model for diffusion within emergent vegetation, *American Society of Limnology and Oceanography.* Inc 42: 1735-1745.
 9. 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): 302-315.
 10. Schmid B. H. Stephan U. and Hengl M. A. 2005. Sediment deposition in constructed wetland ponds with emergent vegetation: laboratory study and mathematical model. *Water Science and Technology.* 51(9): 307-314.
 11. Sharpe R. G. 2003. Suspended sediment transport through non-submerged reeds, faculty of engineering. M. Sc. Thesis, University of the Witwatersrand. Johannesburg. 196 p.
 12. Shavit U. and Brandon T. 2001. Dispersion within emergent vegetation using piv and concentration measurements. 4th International Symposium on Particle Image Velocimetry, Göttingen, Germany, September 2001. 10 p.
 13. Shiono K. and Knight D. W. 1991. Turbulent open channel flows with variable depth across the channel. *Journal Fluid Mech.* 222: 617-646.
 14. Soulsby R. L. 1997. Dynamics of marine sands. Thomas Telford. London. 272 p.
 15. Sun X. K. and Shiono K. 2008. Modelling of velocity and boundary shear stress for one-line vegetation along the edge of floodplain in compound channel. *ICHE.* Nagoya.
 16. Tabatabaei S. Heidarpour M. Ghasemi M. and Hoseinipour E. 2013. Transverse Mixing Coefficient on Dunes with Vegetation on a Channel Wall. *World Environmental and Water Resources Congress.* 2013: 1903-1911.
 17. Tang X. N. and Knight D. W. 2009. Lateral distributions of streamwise velocity in

