

بررسی اثر پوشش گیاهی مستغرق و غیرمستغرق پهنه سیلابی بر ضریب اختلاط عرضی آلاینده‌ها

حسین حمیدی¹، محمدحسین امید^{2*}، علیرضا کشاورزی¹

1- استادیار، بخش مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شیراز

2- استاد، گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران

3- استاد، بخش مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شیراز

* momid@ut.ac.ir

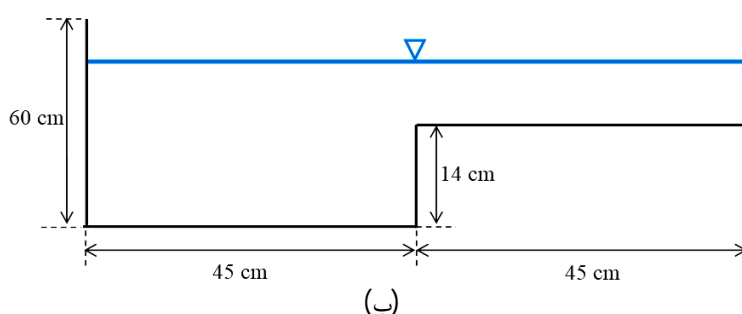
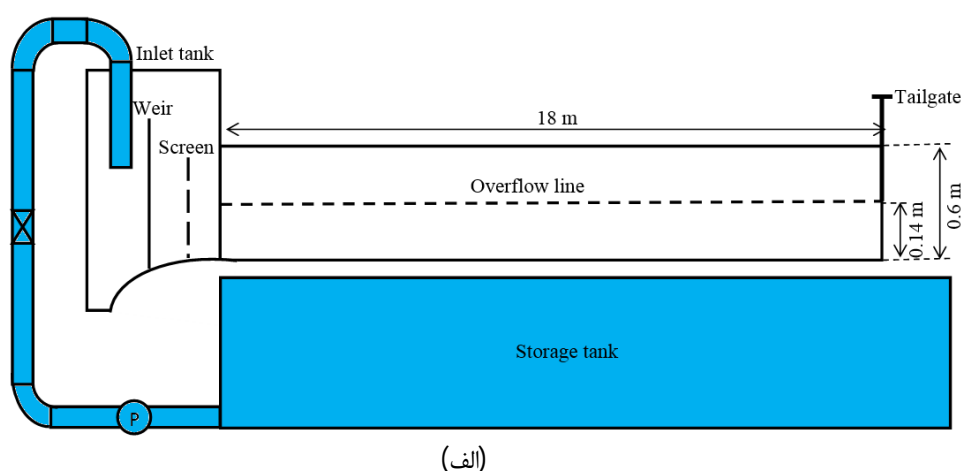
چکیده - یکی از عوامل تأثیرگذار بر هیدرولیک جریان و انتقال آلاینده در آبراهه‌ها، پوشش گیاهی سیلاب‌دشت‌ها می‌باشد. در این تحقیق، به بررسی آزمایشگاهی تأثیر استغراق پوشش گیاهی بر ضریب اختلاط عرضی آلودگی در یک کانال با مقطع مرکب نامتقارن پرداخته شد. آزمایش‌ها برای سه تراکم مختلف پوشش گیاهی و سه عمق نسبی (نسبت عمق جریان در سیلاب‌دشت به عمق جریان در کانال اصلی) مختلف انجام گردید. با استفاده از روش پردازش تصویر و در محیط نرم‌افزار متلب، غلظت ردیاب در سه مقطع مختلف در پایین‌دست محل تزریق اندازه‌گیری شد. ضریب اختلاط عرضی با روش تبادل ممان استاندارد و با توجه به واریانس منحنی تغییرات غلظت ردیاب محاسبه گردید. نتایج نشان داد که ضریب اختلاط عرضی در حالت پوشش گیاهی غیرمستغرق تا 114 درصد نسبت به شرایط بدون پوشش گیاهی افزایش می‌یابد. این در حالی است که در مورد پوشش گیاهی مستغرق، میزان افزایش ضریب اختلاط عرضی در کانال اصلی و در سیلاب‌دشت به ترتیب 43 و 37 درصد می‌باشد. همچنین با افزایش عمق نسبی از 0/15 به 0/25، ضریب اختلاط عرضی تا 97 و 45 درصد در مورد پوشش گیاهی مستغرق و تا 91 و 42 درصد در مورد پوشش گیاهی غیرمستغرق به ترتیب در سیلاب‌دشت و در کانال اصلی افزایش می‌یابد. به ازای یک عمق نسبی مشخص، با افزایش تراکم پوشش گیاهی ضریب اختلاط عرضی در حالت پوشش گیاهی غیرمستغرق در مقایسه با پوشش گیاهی مستغرق افزایش بیشتری می‌یابد. همچنین با افزایش تراکم پوشش گیاهی، اختلاف بین مقادیر ضریب اختلاط عرضی در حالت پوشش گیاهی مستغرق و غیرمستغرق بیشتر می‌شود. به طور کلی نتایج نشان‌دهنده تأثیر قابل توجه پوشش گیاهی پهنه‌ی سیلابی بر ضریب اختلاط عرضی است.

کلیدواژگان: ضریب اختلاط عرضی، پوشش گیاهی، کانال مرکب، روش پردازش تصویر، سیلاب‌دشت.

1- مقدمه

جنبه از جریان در رودخانه‌های طبیعی، شرایط خاص هیدرولیکی است که پس از ورود جریان به خارج از مقطع معمول رودخانه در دشت‌های آبرفتی ایجاد می‌شود و در مراجع عموماً جریان در کانال‌های مرکب نامیده می‌شود. کانال‌های مرکب مقاطع هیدرولیکی می‌باشند که از دو بخش کانال اصلی و سیلاب‌دشت تشکیل شده‌اند (شکل 1).

در دهه‌های اخیر توجه به مسائل زیست‌محیطی به دلیل کاربرد آنها در مباحث مربوط به مدل‌سازی کیفیت آب، بسیار بیشتر شده است. بیشتر روش‌هایی که تاکنون برای پیش‌بینی نحوه انتقال آلاینده‌ها در آبراهه‌ها ارائه شده‌اند، با فرض ساده بودن مقطع کانال معتبر هستند (Fischer et al., 1979; Rutherford, 1994; Chau, 2002) مهمترین



شکل 1 الف- تصویر شماتیک از نیمرخ طولی کانال آزمایشگاهی مورد استفاده و ب- مقطع عرضی کانال مرکب

و همچنین اکولوژی آبراهه بر جای می‌گذارد. حضور پوشش گیاهی علاوه بر تأثیری که بر هیدرولیک جریان دارد (حمیدی فر و امید، 2013) بر سازوکار انتشار یک آلاینده در آبراهه‌ها نیز تأثیرگذار است (حمیدی فر و همکاران، 2015). به طور کلی می‌توان سه مرحله برای اختلاط آلاینده‌ها در رودخانه‌ها معرفی کرد (Fischer et al., 1979). در مرحله اول، مواد آلاینده از منبع نقطه-ای خارج شده و وارد جریان رودخانه می‌شوند. مومنت اولیه و شناوری جریان دو عاملی هستند که در این مرحله نرخ رقیق‌سازی آلاینده‌ها را تعیین می‌کنند. در مرحله دوم در حالی که آلاینده‌ها در حال گسترش در عرض و رقیق شدن هستند، مومنت اولیه و شناوری به تدریج محو شده و آشفتگی و جریان‌های ثانویه ناشی از آن، منجر به پخش و اختلاط می‌شوند. در مرحله پایانی، هنگامی که آلاینده‌های ورودی به طور کامل در عرض کانال اختلاط پیدا کردند، جریان‌های برشی طولی باعث محو کامل تغییرات طولی غلظت در مجاری روباز می‌شوند و در پایان

سیلاب‌دشت عموماً دارای پوشش گیاهی قابل توجه است و در نتیجه از نظر هیدرولیکی، زبری به مراتب بیشتری نسبت به کانال اصلی دارد. شدت تأثیر تعامل بین جریان در کانال اصلی و پهنه (های) سیلابی در پارامتر عمق نسبی (D_r) بیان می‌گردد که عبارت است از نسبت عمق آب در پهنه سیلابی $(H-h)$ به عمق آب در کانال اصلی (H) که h عمق لبریزی نامیده می‌شود.

گیاهان موجود در مسیر جریان ممکن است باعث افزایش و یا کاهش مقاومت جریان شوند (Folkard, 2011). پوشش گیاهی می‌تواند خودرو و یا بصورت مصنوعی توسط انسان و برای بهبود زیستگاه‌های گیاهی و جانوری، جلوگیری از فرسایش و همچنین زیباسازی محیط کاشته شده باشد. در گذشته نه چندان دور به منظور افزایش ظرفیت کانال برای عبور سیلاب‌ها، پوشش گیاهی موجود در آبراهه‌ها عمدتاً حذف می‌گردید، اما با گذشت زمان مشخص شد که این‌گونه دستکاری‌های انسان در طبیعت، اثرات نامطلوبی بر کیفیت آب، پایداری

عمق جریان را مشاهده کردند. شرایط خاص جریان در مقاطع مرکب، منجر به پیچیده‌تر شدن مباحث مدل‌سازی کیفی آب در این‌گونه مقاطع می‌شود. از طرف دیگر، حضور پوشش گیاهی بر روی دشت سیلابی می‌تواند بر این پیچیدگی‌ها بیافزاید. اگرچه تحقیقات اندکی نیز بر روی سازوکار پخش و انتقال آلاینده‌ها در مقاطع مرکب انجام گرفته است، اما هنوز هم تأثیر پوشش گیاهی دشت سیلابی بر پدیده اختلاط عرضی به‌طور کامل بررسی و تبیین نشده است. با توجه به اینکه سیلاب‌دشت‌ها در اغلب رودخانه‌ها دارای پوشش گیاهی می‌باشند، در این پژوهش تأثیر پوشش گیاهی سیلاب‌دشت در دو حالت مستغرق و غیرمستغرق بر ضریب اختلاط عرضی در یک مقطع مرکب نامتقارن مورد بررسی قرار گرفته است.

2- مواد و روش‌ها

2-1- فلوم آزمایشگاهی

کانال مرکب مورد استفاده در تحقیق حاضر متشکل از کانال اصلی به عرض 0/45 متر و ارتفاع 0/6 متر و یک سیلاب‌دشت به عرض 0/45 متر، واقع در آزمایشگاه مرکزی تحقیقات آب، خاک و هوا، گروه مهندسی آبیاری و آبادانی دانشگاه تهران می‌باشد که تراز کف آن به میزان 0/14 متر بالاتر از کف کانال اصلی می‌باشد. دیواره‌ها و کف کانال از جنس پلکسی‌گلاس و دیواره و شیب جانبی کف سیلاب‌دشت به ترتیب به صورت عمودی و افقی می‌باشند. طول کل و شیب کف فلوم به ترتیب 18 متر و 0/00088 می‌باشد. دو دستگاه پمپ گریز از مرکز با دبی اسمی $150(=75 \times 2)$ لیتر بر ثانیه جریان مورد نظر را تأمین می‌کردند. دبی عبوری از فلوم بوسیله یک سرریز مثلثی لبه‌تیز واسنجی شده که در ابتدای کانال قرار دارد، اندازه‌گیری می‌شد. به منظور برقراری جریان یکنواخت در آزمایش‌های این تحقیق از یک دریچه پروانه‌ای انتهایی هم عرض فلوم استفاده گردید. اندازه‌گیری عمق جریان با استفاده از یک عمق‌سنج با دقت $\pm 0/1$ میلی‌متر انجام شد. این عمق‌سنج بر روی یک ارابه نصب شده است که قابلیت جابجایی در سه راستای طولی، عرضی و عمقی را داشت.

این مرحله، غلظت در تمام سطح مقطع به یک مقدار ثابت رسیده و اختلاط کامل انجام شده است. هر چند که تحقیقات نشان داده است که ضریب اختلاط عرضی بسیار بزرگتر از ضریب اختلاط عمقی است، اما در بیشتر رودخانه‌ها، اختلاط عمقی بسیار سریعتر از اختلاط عرضی اتفاق می‌افتد؛ زیرا در اغلب رودخانه‌ها نسبت عرضی به عمق بسیار بزرگ است. ضریب اختلاط عرضی (ϵ_i) در یک کانال عریض نامحدود را می‌توان با استفاده از روابط تجربی که به وسیله محققان مختلف مانند Fischer et al. (1979)، Rutherford (1994) و Deng et al. (2002) ارائه شده است، تعیین کرد.

در تحقیقی که توسط چائو (2000) بر روی تأثیر زبری کف بر ضریب اختلاط عرضی صورت پذیرفت، مشاهده شد که در دامنه مقادیر زبری مورد بررسی، ضریب اختلاط عرضی چندان تحت تأثیر زبری کف نیست. زنگ و همکاران (2008) ضریب اختلاط عرضی را در یک کانال مرکب با مقطع دوزنقه‌ای مورد بررسی قرار دادند و مشاهده کردند که مقدار این ضریب در عرض کانال متغیر است. به عبارت دیگر مقدار ضریب اختلاط عرضی برای سیلاب‌دشت و کانال اصلی یکسان نیست. همچنین فرامرز و همکاران (1384) انتشار آلودگی در مقاطع رودخانه‌ای با سیلاب‌دشت را به صورت عددی شبیه‌سازی کردند. سلیمانی (1387) و پورمقدم (1388) به بررسی انتشار ماده محلول در کانال با مقطع مرکب پرداختند و تأثیر شیب طولی کانال و عمق نسبی را مورد بررسی قرار دادند. این محققین چنین نتیجه گرفتند که افزایش هر دو عامل یاد شده باعث افزایش طول اختلاط کامل می‌شود. پورآبادی (1386) تأثیر زبری موضعی بر اختلاط عرضی آلودگی در یک کانال مستطیلی را مورد بررسی قرار داد. وی نتیجه گرفت که حضور بلوک‌ها می‌تواند تا 24 درصد طول اختلاط کامل را کاهش دهد. قاسمی و همکاران (1390) به بررسی اثر ارتفاع تاج تلماسه بر اختلاط عرضی در یک کانال مستطیلی پرداختند و گزارش کردند که تلماسه می‌تواند تأثیر زیادی در افزایش ضریب اختلاط عرضی داشته باشند. سعادت‌پور و همکاران (1390) نیز در تحقیق خود، افزایش ضریب اختلاط عرضی با افزایش

2-2- پوشش گیاهی

آزمایش‌های تحقیق حاضر در دو حالت پوشش گیاهی مستغرق و غیرمستغرق انجام شدند. از استوانه‌های از جنس پی‌وی‌سی با قطر خارجی یک سانتی‌متر به عنوان پوشش گیاهی استفاده گردید. چیدمان در نظر گرفته شده برای پوشش‌های گیاهی به صورت ردیفی می باشد (شکل‌های 2 و 3) که در سه تراکم مختلف مورد بررسی قرار گرفتند، به گونه‌ای که در برگزیده تراکم‌های زیاد، متوسط و کم باشند. سه شبکه‌بندی با ابعاد 10×10 ، 5×5 و 20×20 سانتی‌متر (فاصله در راستای طولی \times فاصله در راستای عرضی) مورد بررسی قرار گرفت که بر این اساس تراکم‌های موردنظر به ترتیب برابر $3/14$ ، $0/88$ و $0/26$ درصد می‌باشند که به ترتیب معادل با 400، 111 و 33 المان در مترمربع است.

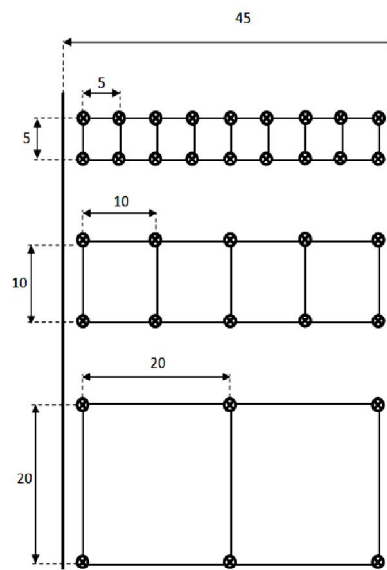
آزمایش‌های با پوشش گیاهی غیرمستغرق ارتفاع پوشش گیاهی به اندازه‌ای در نظر گرفته شد که استوانه‌ها به صورت برآمده از آب باشند. اما در آزمایش‌های با پوشش گیاهی مستغرق ارتفاع استوانه‌ها ثابت و برابر 2 سانتی‌متر در نظر گرفته شد.



شکل 3 نمایش از المان‌های پوشش گیاهی غیرمستغرق بر روی سیلاب‌دشت و مجموعه اندازه‌گیری سرعت

2-3- اندازه‌گیری سرعت

در تحقیق حاضر برای اندازه‌گیری سرعت جریان از یک دستگاه ADV ساخت شرکت نور تک استفاده شد که قابلیت نصب هر دو نوع سنجنده رو به پایین و سنجنده جانبی را دارد. این دستگاه قابلیت برداشت نمونه‌های سرعت تا فرکانس 200 هرتز را فراهم می‌کند. اندازه‌گیری‌ها به مدت دو دقیقه و در شبکه‌ای از نقاط در بیست و پنج مقطع عمقی شامل چهارده مقطع در کانال اصلی و یازده مقطع بر روی سیلاب‌دشت انجام شدند. در آزمایش‌های با پوشش گیاهی، داده‌برداری سرعت در چندین مقطع عرضی در اطراف یک ردیف از پوشش گیاهی انجام می‌شد تا بتوان برآورد دقیقی از شرایط جریان بدست آورد. در هر مقطع عمقی، مقادیر سرعت در نقاط مختلف اندازه‌گیری شدند. فاصله بین نقاط اندازه‌گیری در $2/5$ سانتی‌متری نزدیک کف برابر $0/5$ سانتی‌متر و پس از آن تا رسیدن به سطح آب برابر دو سانتی‌متر در نظر گرفته شد. به منظور فیلترینگ داده‌ها از نرم‌افزار WinADV که توسط دفتر عمران ایالات متحده (USB) توسعه داده شده است (Wahl, 2002)، استفاده گردید. داده‌های با



شکل 2 چیدمان پوشش گیاهی به صورت ردیفی (ابعاد بر حسب سانتی‌متر)

تراکم پوشش گیاهی (ϕ) به صورت مساحت اشغال شده توسط پوشش گیاهی در واحد سطح بستر سیلاب‌دشت تعریف می‌شود. میزان تراکم‌های انتخاب شده با مقادیر بکار رفته به وسیله محققان پیشین از قبیل نف (1999) همخوانی داشته و به خوبی می‌تواند دامنه‌ی وسیعی از تراکم پوشش گیاهی در طبیعت را شامل شود. در

به منظور حصول داده‌های با دقت بالا از چگونگی گسترش و پخش ابر ردیاب، از یک سامانه تصویربرداری متشکل از سه عدد دوربین دیجیتال فوجی فیلم مدل JX420 استفاده شد. غلظت ماده ردیاب در سه ایستگاه مختلف در طول فلوم در فواصل 4/00، 6/44 و 8/88 متری پایین دست محل تزریق ماده ردیاب اندازه‌گیری شد. بنابراین، غلظت ماده ردیاب در تمامی عرض فلوم، همزمان و به صورت پیوسته قابل اندازه‌گیری می‌باشد که این قابلیت در مقایسه با سایر روش‌های تعیین غلظت ماده ردیاب از جمله نمونه‌برداری مستقیم یک مزیت به حساب می‌آید. زیرا در روش نمونه‌برداری مستقیم، غلظت فقط در یک نقطه مشخص اندازه‌گیری می‌شود و برای برداشت نمونه در نقاط دیگر بایستی یک شبکه بسیار ریز انتخاب شود که امری بسیار زمان‌بر است. به منظور واسنجی سامانه تصویربرداری، اقدام به نمونه‌برداری مستقیم از ردیاب شد که اطلاعات کامل در این خصوص توسط حمیدی‌فر (1392) ارائه شده است.

برای تعیین ضریب اختلاط عرضی از روش تبادل ممان ساده (استاندارد) استفاده شد (فیشر و همکاران، 1979؛ رادرفورد، 1994). بنابراین با داشتن توزیع عرضی غلظت و محاسبه واریانس آن می‌توان با استفاده از رابطه زیر مقدار ضریب اختلاط عرضی را محاسبه کرد:

$$\varepsilon_t = \frac{U_{ave}}{2} \frac{d\sigma_y^2}{dx} \quad (1)$$

در این رابطه، U_{ave} و σ_y^2 به ترتیب واریانس توزیع غلظت در عرض مقطع و سرعت متوسط جریان در مقطع و x نشاندهنده فاصله از محل تزریق در راستای طولی فلوم است. خلاصه‌ای از پارامترهای هیدرولیکی و پوشش گیاهی تحقیق حاضر در جدول 1 آورده شده است.

3- نتایج و بحث

نکته قابل توجه در آزمایش‌های با تراکم کم ($\varphi=0/26\%$) و متوسط ($\varphi=0/88\%$) آن است که در ایستگاه‌های اندازه‌گیری دوم و سوم (واقع در 6/44 و 8/88 متری پایین دست محل تزریق) تغییرات عرضی غلظت کاهش می‌یابد.

کیفیت پایین، بر اساس معیار آستانه فاز- مکان از سری زمانی حذف شدند (Goring and Nikora (2002)). همچنین معیارهای نسبت سیگنال به نویز (SNR) و همبستگی (COR) برای حذف داده‌های نامناسب استفاده شد. بدین ترتیب که داده‌های با SNR کمتر از 15 و COR کمتر از 70 در تجزیه و تحلیل‌ها مورد استفاده قرار نگرفتند.

2-4- تزریق و پخش ردیاب

برای بررسی پخش عرضی، لازم است که ردیاب به صورت نقطه‌ای تزریق شود. بدین منظور، از یک نازل L-شکل به قطر داخلی 2 میلی‌متر، که در دو میلی‌متری زیر سطح آب قرار می‌گرفت، استفاده شد. به منظور ثابت نگه‌داشتن دبی تزریق ردیاب، از یک سامانه تزریق متشکل از یک مخزن پلاستیکی به حجم 75 لیتر در بالا و یک مخزن پلاستیکی به حجم 15 لیتر در پایین استفاده گردید. سطح سیال در مخزن کوچکتر توسط دو عدد شناور همواره در یک تراز ثابت نگه‌داشته می‌شد. دبی تزریق ردیاب توسط دو شیر کوچک که بر روی لوله انتقال ردیاب از مخزن کوچکتر به نازل تعبیه شده بودند، تنظیم می‌شد. از آنجا که فرض اولیه برای بررسی اختلاط عرضی و انتشار طولی، کامل شدن اختلاط عمقی است، لازم است که اولین مقطع اندازه‌گیری غلظت در پایین دست به گونه‌ای انتخاب شود که ماده ردیاب بطور کامل در عمق جریان پخش شده باشد. با توجه به شفاف بودن دیواره‌های فلوم، این امکان وجود داشت که با نگاه کردن از دیواره فلوم، چگونگی پخش ردیاب در عمق را به وضوح مشاهده کرد. بر روی دشت سیلابی، با توجه به عمق کم جریان، ماده ردیاب در فاصله بسیار کوتاهی در پایین دست (حدود 0/5 متری از محل تزریق)، در تمام عمق جریان پخش می‌شد. اما در کانال اصلی با توجه به عمق بیشتر جریان، فاصله بیشتری برای پخش لازم بود که مشاهدات اولیه نشان داد که در فاصله تقریبی دو متری از محل تزریق، ماده ردیاب در عمق جریان پخش می‌شود. برای اطمینان از پخش کامل عمقی، اولین ایستگاه اندازه‌گیری غلظت در فاصله 4 متری از محل تزریق انتخاب شد.

جدول 1 محدوده تغییرات پارامترهای هیدرولیکی و پوشش گیاهی

دبی (m^3/s)	عمق نسبی	تراکم پوشش گیاهی (%)	سرعت متوسط جریان (m/s)	عدد فرود
0/0234-0/0567	0/15-0/35	0/26-3/14	0/27-0/43	0/28-0/36



شکل 4 تغییرات ضریب اختلاط عرضی در سیلابدشت در مقابل عمق نسبی، پوشش گیاهی

البته انتظار می‌رود با توجه به افزایش تراکم پوشش گیاهی و افزایش میزان برخورد ذرات ردیاب با المان‌های پوشش گیاهی، پخش عرضی نیز تقویت شود. این امر باعث گردید که در آزمایش‌های با عمق نسبی متوسط و زیاد (0/35 و 0/25) در تراکم زیاد پوشش گیاهی ($\rho=3/14\%$) ماده ردیاب در فاصله کوتاهی در پایین‌دست محل تزریق در تمام عرض پخش شده و عملاً امکان محاسبه ضریب اختلاط عرضی بر اساس نمودار تغییرات عرضی غلظت در ایستگاه‌های اندازه‌گیری وجود نداشت. به همین دلیل، در آزمایش‌های با پوشش گیاهی غیر مستغرق و تراکم زیاد، فقط عمق نسبی برابر 0/15 مورد بررسی قرار گرفت.

در شکل‌های 4- الف تا ج، به ترتیب ضریب اختلاط عرضی در سیلابدشت مربوط به آزمایش‌های با پوشش گیاهی مستغرق و غیر مستغرق با تراکم کم، متوسط و زیاد آورده شده است. مشاهده می‌شود که با افزایش عمق نسبی، ضریب اختلاط عرضی هم در مورد پوشش گیاهی مستغرق و هم پوشش گیاهی غیرمستغرق افزایش می‌یابد. همچنین مقدار ضریب اختلاط عرضی در پوشش گیاهی غیرمستغرق همواره بیشتر از مقدار متناظر در پوشش گیاهی مستغرق است و اختلاف بین این دو مقدار با افزایش عمق نسبی افزایش می‌یابد. این مسأله را می‌توان این‌گونه توجیه کرد که در پوشش گیاهی غیرمستغرق به علت آنکه پوشش گیاهی تمامی عمق جریان را در بر می‌گیرد، ناحیه‌ای از جریان که تحت تأثیر حضور پوشش گیاهی است در مقایسه با پوشش گیاهی مستغرق بیشتر است. بنابراین ذرات آلودگی برخوردهای بیشتری را با پوشش گیاهی تجربه می‌کنند که این امر منجر به بهبود اختلاط آلودگی در عرض می‌شود. به طور مثال، در عمق نسبی کم (0/15) پوشش گیاهی مستغرق بخش قابل توجهی از عمق جریان را در بر می‌گیرد و بنابراین مقادیر ضریب اختلاط عرضی در دو حالت پوشش گیاهی مستغرق و غیر مستغرق اختلاف چندانی با یکدیگر ندارند.

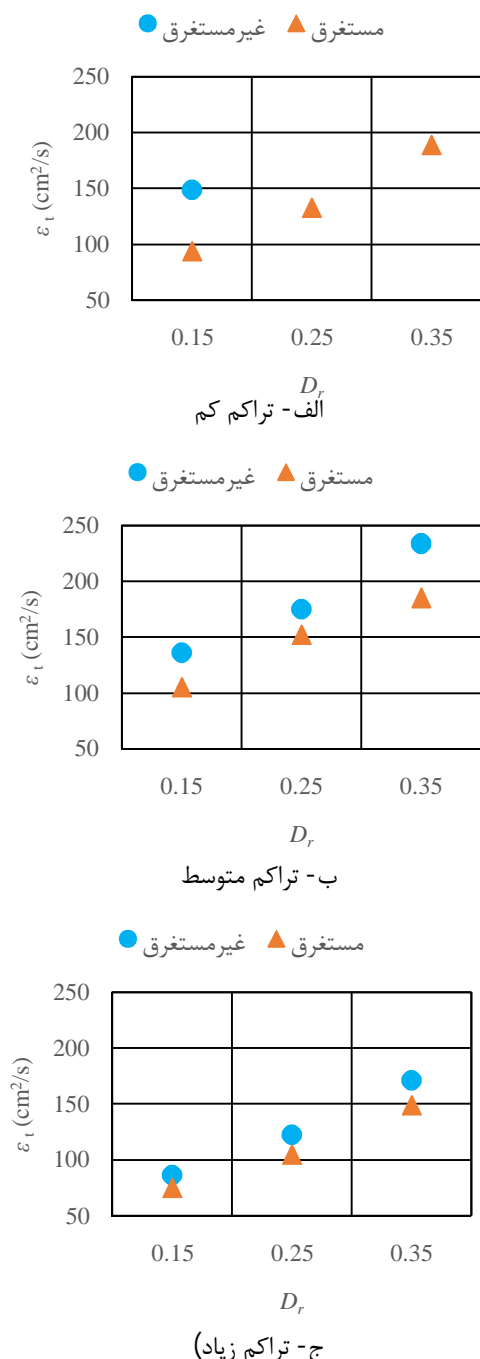
با افزایش عمق نسبی از 0/15 به 0/25، ضریب اختلاط عرضی در مورد پوشش گیاهی مستغرق تا 97 و 45 درصد و در مورد پوشش گیاهی غیرمستغرق تا 91 و 42 درصد به ترتیب در سیلابدشت و در کانال اصلی افزایش می‌یابد. این روند افزایشی برای افزایش عمق نسبی از 0/25 تا 0/35 نیز مشاهده شد. علاوه بر نقش مستقیم پوشش گیاهی که به عنوان یک مانع در مسیر ذرات آلاینده‌ها عمل می‌کند، شکل‌گیری گردابه‌ها در پشت المان‌های پوشش گیاهی که منجر به تشکیل امواج عرضی (عزیزی و قمشی، 1387؛ حاجی‌علی‌گل و همکاران، 1388)، افزایش آشفستگی و اختلاط بیشتر آلاینده‌ها می‌شود را می‌توان به عنوان یک عامل غیرمستقیم در نظر گرفت. با افزایش عمق نسبی در مورد پوشش گیاهی غیرمستغرق، حجمی از سیال که تحت تأثیر این گردابه‌ها قرار می‌گیرد، افزایش یافته که منجر به افزایش ضریب اختلاط عرضی می‌شود.

به منظور بررسی دقیقتر این موضوع، درصد تغییرات ضریب اختلاط عرضی در مقایسه با حالت بدون پوشش گیاهی ($\Delta \varepsilon$)، با استفاده از رابطه (2) برای هر آزمایش محاسبه و نتایج آن در جدول 2 آورده شده است.

$$\Delta \varepsilon = \frac{\varepsilon_v - \varepsilon_n}{\varepsilon_n} \times 100 \quad (2)$$

که در این رابطه، ε_v و ε_n به ترتیب ضریب اختلاط عرضی در حالت با پوشش گیاهی و بدون پوشش گیاهی می‌باشد. با توجه جدول 2 ملاحظه می‌شود که با توجه به مثبت بودن درصد تغییرات به دست آمده در آزمایش‌های مختلف، می‌توان چنین نتیجه گرفت که حضور پوشش گیاهی چه از نوع مستغرق و چه از نوع غیرمستغرق منجر به افزایش ضریب اختلاط عرضی هم در سیلابدشت و هم در کانال اصلی در مقایسه با حالت بدون پوشش گیاهی می‌شود. همچنین به ازای یک تراکم مشخص پوشش گیاهی، با افزایش عمق نسبی، درصد تغییرات ضریب اختلاط عرضی هم بر روی سیلابدشت و هم بر روی کانال اصلی در مقایسه با حالت بدون پوشش گیاهی کاهش می‌یابد. این روند هم در مورد پوشش گیاهی مستغرق و هم در مورد پوشش گیاهی غیرمستغرق صدق می‌کند.

با مقایسه ضریب اختلاط عرضی در سیلابدشت (شکل 4) با مقادیر متناظر در کانال اصلی (شکل 5) ملاحظه می‌شود که مقدار ضریب اختلاط عرضی در کانال اصلی به مراتب بزرگتر از سیلابدشت می‌باشد.



شکل 5 تغییرات ضریب اختلاط عرضی در کانال اصلی در مقابل عمق نسبی، پوشش گیاهی

جدول 2 تغییرات ضریب اختلاط عرضی در سیلابدشت و

کانال اصلی در مقایسه با حالت بدون پوشش گیاهی

شماره آزمایش	$\Delta\varepsilon$ (%)	
	سیلابدشت	کانال اصلی
0.15-L-T-E	29/14	31/60
0.25-L-T-E	18/08	26/86
0.35-L-T-E	6/93	20/84
0.15-M-T-E	80/15	107/94
0.25-M-T-E	38/25	81/87
0.35-M-T-E	28/65	65/19
0.15-H-T-E	114/75	127/44
0.25-H-T-E	-	-
0.35-H-T-E	-	-
0.15-L-T-Sub	15/99	14/38
0.25-L-T-Sub	8/93	8/37
0.35-L-T-Sub	1/46	4/94
0.15-M-T-Sub	45/76	60/55
0.25-M-T-Sub	15/65	58/18
0.35-M-T-Sub	5/94	30/78
0.15-H-T-Sub	37/45	42/89
0.25-H-T-Sub	17/18	37/86
0.35-H-T-Sub	10/89	33/40

مرکب است. در مقاطع مرکب و در اعماق نسبی کم، اندرکنش بین کانال اصلی و سیلابدشت منجر به شکل‌گیری نوع خاصی از جریان می‌شود که با تبادل شدید جرم و مومنتوم همراه است. حضور پوشش گیاهی نیز با ایجاد مقاومت اضافی در برابر جریان، به ویژه در سیلابدشت، منجر به کاهش بیشتر سرعت در سیلابدشت و افزایش اختلاف سرعت بین کانال اصلی و سیلابدشت می‌شود.

تحقیقات قبلی نشان داده است که ضریب اختلاط عرضی با سرعت جریان رابطه مستقیم دارد (رابطه 1). بنابراین، افزایش سرعت در کانال اصلی باعث می‌شود که درصد افزایش ضریب اختلاط عرضی در کانال اصلی در مقایسه با سیلابدشت بیشتر باشد. از طرفی دیگر، در اثر برخورد جریان با المان‌های گیاهی در ناحیه نزدیک به مرز مشترک کانال اصلی و سیلابدشت، امواج عرضی در کانال اصلی مشاهده می‌شدند. این امواج عرضی که بوضوح در سطح جریان قابل مشاهده بودند، منجر به ایجاد و تقویت جریان های ثانویه در کانال اصلی و در نتیجه بهبود اختلاط در عرض می‌شدند. لازم به ذکر است که با افزایش عمق نسبی، از شدت این امواج عرضی کاسته می‌شد.

از جدول 2 چنین نتیجه می‌شود که مستغرق بودن یا نبودن پوشش گیاهی سیلابدشت تأثیر زیادی بر ضریب اختلاط عرضی دارد. بطور مثال به ازای تراکم زیاد پوشش گیاهی و در عمق نسبی 0/15، ضریب اختلاط عرضی در حالت پوشش گیاهی غیرمستغرق در کانال اصلی تا 127 درصد و در سیلابدشت تا 114 درصد نسبت به شرایط بدون پوشش گیاهی بزرگتر است. این در حالی است که در مورد پوشش گیاهی مستغرق این مقادیر به ترتیب حدود 43 و 37 درصد می‌باشد. به منظور بررسی دقیق‌تر تأثیر تراکم پوشش گیاهی مستغرق و غیرمستغرق بر ضریب اختلاط عرضی آلودگی در مقاطع مرکب، تغییرات ضریب اختلاط عرضی در سیلابدشت در مقابل تراکم پوشش گیاهی به ازای اعماق نسبی مختلف در شکل 6 نشان داده شده‌اند. ملاحظه می‌شود که به ازای یک عمق نسبی مشخص، با افزایش تراکم پوشش گیاهی ضریب اختلاط عرضی افزایش می‌یابد. با افزایش تراکم پوشش

از نکات قابل توجه دیگر در این جدول آن است که درصد تغییرات در برخی موارد به بیش از 100% رسیده است که نشان می‌دهد وجود پوشش گیاهی می‌تواند در برخی موارد، ضریب اختلاط عرضی را بیش از دو برابر افزایش دهد. بنابراین، می‌توان علاوه بر ویژگی‌هایی مانند جذب آلاینده‌ها که در تحقیقات قبلی به اثبات رسیده است (کادلچ و نایت، 1993؛ ویندام و همکاران، 2003؛ چوی و لی، 2012)، به نقش قابل توجه پوشش گیاهی در پخش و رقیق‌سازی آلودگی نیز اشاره کرد.

نکته مهم دیگری که در جدول 2 دیده می‌شود آن است که با وجود اینکه پوشش گیاهی روی سیلابدشت استفاده شده است، اما تأثیر آن در افزایش ضریب اختلاط عرضی، در کانال اصلی بیشتر از سیلابدشت می‌باشد. این مسأله اگر چه در نگاه اول یک تضاد به نظر می‌آید، اما بایستی توجه داشت که کانال مورد بررسی از نوع مقطع

بر ضریب اختلاط عرضی کاهش می‌یابد؛ به گونه‌ای که در آزمایش‌های با پوشش گیاهی مستغرق، با افزایش تراکم از مقدار کم (0/26 درصد) به زیاد (3/14 درصد)، ضریب اختلاط عرضی تنها هشت درصد افزایش یافته است. علت آن است که در عمق نسبی زیاد، عمق جریان روی سیلاب‌دشت افزایش یافته و تأثیر مرکب بودن کانال بر هیدرولیک جریان در مقایسه با اعماق نسبی کم تا حد زیادی کاهش می‌یابد.

4- نتیجه‌گیری

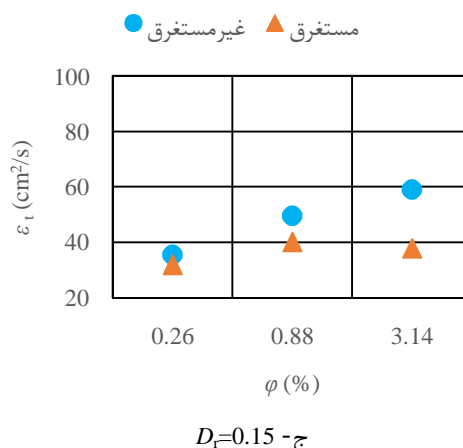
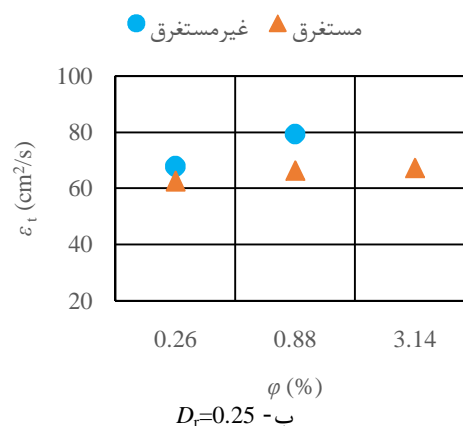
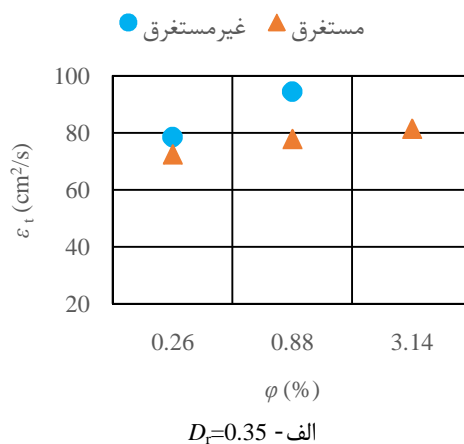
وجود پوشش گیاهی در سیلاب‌دشت‌ها باعث پیچیده‌تر شدن شرایط جریان و انتقال آلاینده‌ها می‌شود. به دلیل همین پیچیدگی، این موضوع تاکنون چندان توسط محققان مورد بررسی قرار نگرفته است. در این تحقیق، تأثیر وجود پوشش گیاهی سیلاب‌دشت به صورت مستغرق و غیرمستغرق، بر ضریب اختلاط عرضی در یک کانال مرکب به صورت آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفته است. با تصویربرداری از ابر آلودگی و استفاده از روش پردازش تصویر در نرم‌افزار متلب، غلظت ماده ردیاب در ایستگاه‌های مختلف در طول فلوم اندازه‌گیری و با کمک گرفتن از روش تبادل ممان استاندارد، ضریب اختلاط عرضی در هر آزمایش محاسبه شد. نتایج نشان داد که:

- حضور پوشش گیاهی چه از نوع مستغرق و چه از نوع غیرمستغرق منجر به افزایش ضریب اختلاط عرضی هم در سیلاب‌دشت و هم در کانال اصلی، در مقایسه با حالت بدون پوشش گیاهی می‌شود.

- با افزایش عمق نسبی، ضریب اختلاط عرضی هم در مورد پوشش گیاهی مستغرق و هم پوشش گیاهی غیرمستغرق افزایش می‌یابد. به‌طور مثال، با افزایش عمق نسبی از 0/15 به 0/25، ضریب اختلاط عرضی در مورد پوشش گیاهی مستغرق تا 97 و 45 درصد و در مورد پوشش گیاهی غیرمستغرق تا 91 و 42 درصد به ترتیب در سیلاب‌دشت و در کانال اصلی افزایش می‌یابد.

- مقدار ضریب اختلاط عرضی در پوشش گیاهی غیرمستغرق در سیلاب‌دشت و کانال اصلی به ترتیب به طور متوسط 11 و 16 درصد بیشتر از مقدار متناظر در

گیاهی، اختلاف بین مقادیر ضریب اختلاط عرضی در حالت پوشش گیاهی مستغرق و غیرمستغرق بیشتر می‌شود.



شکل 6 تغییرات ضریب اختلاط عرضی در سیلاب‌دشت در مقابل تراکم پوشش گیاهی

در عمق نسبی 0/35 که بیشترین عمق نسبی مورد بررسی در تحقیق حاضر است، تأثیر تراکم پوشش گیاهی

آبیاری و آبادانی، دانشگاه تهران.
پورمقدم، م. (1388). "پخش ماده محلول زوال ناپذیر در مجرای با مقطع مرکب"، پایان نامه کارشناسی ارشد سازه-های آبی، گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشگاه تهران.
حاجی علی گل، ز.، کاشفی پور، م. و قمشی، م. (1388). "رابطه دبی جریان و تعداد ردیف‌های موانع استوانه‌ای موجود در مسیر جریان با ماکزیمم جابجایی امواج عمود بر جریان"، هشتمین کنفرانس هیدرولیک ایران، دانشکده فنی دانشگاه تهران، تهران.

حمیدی فر، ح. (1392). "بررسی آزمایشگاهی تأثیر پوشش گیاهی سیلاب‌دشت بر انتقال آلاینده‌ها در مقاطع مرکب"، رساله دکتری سازه‌های آبی، گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشگاه تهران.

سعادت پور، ع.، حیدرپور، م. و طباطبائی، س.ح. (1390). "انتخاب روش مناسب برای کاهش طول اختلاط کامل در جریان آشفتنه در یک کانال مستطیلی"، مجله پژوهش آب ایران، سال 5، شماره 9، ص.ص. 11-18.

سلیمانی، م. (1387). "بررسی انتشار ماده محلول در کانال مرکب"، پایان نامه کارشناسی ارشد سازه‌های آبی، گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشگاه تهران، تهران.

فرامرزی، م.، ایوب‌زاده، ع. و محمدی، ک. (1384). "شبیه-سازی عددی انتشار و انتقال آلودگی در مقاطع رودخانه‌ای با سیلاب‌دشت"، پنجمین کنفرانس هیدرولیک ایران 17-19 اردیبهشت، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان.

عزیزی، ر. و قمشی، م. (1387). "تشکیل امواج عمود بر جریان ناشی از موانع استوانه‌ای در مسیر مجاری روباز"، هفتمین کنفرانس هیدرولیک ایران، دانشگاه صنعت آب و برق، تهران.

قاسمی، م.، منوچهر ح.، افضلی‌مهر، ح. و خوشروش، م. (1390). "اثر برهم‌کنش پوشش گیاهی و شکل بستر بر ضریب اختلاط عرضی در یک کانال مستطیلی"، دهمین کنفرانس هیدرولیک ایران، رشت، دانشگاه گیلان.

Chau, K.W. (2000). "Transverse mixing coefficient measurements in an open rectangular channel",

پوشش گیاهی مستغرق است و اختلاف بین این دو مقدار با افزایش عمق نسبی افزایش می‌یابد.
- به ازای یک تراکم مشخص پوشش گیاهی، با افزایش عمق نسبی، درصد تغییرات ضریب اختلاط عرضی، هم بر روی سیلاب‌دشت و هم بر روی کانال اصلی در مقایسه با حالت بدون پوشش گیاهی کاهش می‌یابد.
در نهایت می‌توان چنین نتیجه‌گیری کرد که وجود پوشش گیاهی در سیلاب‌دشت، چه از نوع مستغرق و چه غیرمستغرق، تأثیر زیادی بر ضریب اختلاط عرضی دارد. بطور مثال به ازای تراکم زیاد پوشش گیاهی و در عمق نسبی 0/15، ضریب اختلاط عرضی در سیلاب‌دشت در حالت پوشش گیاهی غیرمستغرق و مستغرق به ترتیب تا 114 و 37 درصد نسبت به شرایط بدون پوشش گیاهی بزرگتر است.

4- فهرست علائم

COR	همبستگی
D_f	عمق نسبی
H	عمق آب در کانال اصلی
h	عمق لبریزی
SNR	نسبت سیگنال به نویز
U_{ave}	سرعت متوسط جریان در مقطع
x	فاصله از محل تزریق
$\Delta \varepsilon$	درصد تغییرات ضریب اختلاط عرضی
ε_n	ضریب اختلاط عرضی در حالت بدون پوشش گیاهی
ε_t	ضریب اختلاط عرضی
ε_v	ضریب اختلاط عرضی در حالت با پوشش گیاهی
σ_y^2	واریانس توزیع غلظت در عرض مقطع
ϕ	تراکم پوشش گیاهی

5- منابع

پورآبادی، م. (1387). "بررسی تأثیر زبری موضعی بر ضریب اختلاط عرضی آلودگی در یک کانال مستطیلی"، پایان نامه کارشناسی ارشد سازه‌های آبی، گروه مهندسی

- Hamidifar, H., Omid, M. H., and Keshavarzi, A. (2015). "Longitudinal dispersion in waterways with vegetated floodplain". *Ecological Engineering*, 84, 398-407.
- Kadlec, R.H. and Knight, R.L. (1996). *Treatment wetlands*. CRC Press Boca Raton, Florida. 893p.
- Nepf, H. (1999). "Drag, turbulence, and diffusion in flow through emergent vegetation", *Water Resources Research*, 35(2): 479-489.
- Rutherford, J.C. (1994). *River mixing*. New York: John Wiley & Sons, p. 347.
- Wahl, T.L. (2000). "Analyzing ADV data using WinADV", ASCE Joint Conference on Water Resources Engineering and Water Resources Planning and Management, Minneapolis, Minnesota, USA, July 30-August 2.
- Windham, L., Weis, J.S., and Weis, P. (2003). "Uptake and distribution of metals in two dominant salt marsh macrophytes". *Estuarine Coastal Shelf Science*, 56: 63-72.
- Zeng, Y.H., Huai, W.X. and Guymer, I. (2008). "Transverse mixing in a trapezoidal compound open channel", *Journal of Hydrodynamics, Series B* (20): 645-649.
- Advances in Environmental Research, 4: 287-294.
- Choi, S. and Lee, J. (2012). "Impact of vegetation on contaminant transport in partly-vegetated open-channel flows", *Proceedings of the 9th International Symposium on Ecohydraulics*. 17th to 21st September, Vienna, Austria
- Deng, Z.Q., Bengtsson, L., Singh, V.P. and Adrian, D. (2002). "Longitudinal dispersion coefficient in single-channel streams", *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, 128(10): 901- 916.
- Fischer, H.B., List, E.J., Koh, R.C.Y., Imberger, J. and Brooks, N.H. (1979). *Mixing in inland and coastal waters*, Academic Press.
- Folkard, A.M. (2011). "Vegetated flows in their environmental context: a review", *Proceedings of Institute of Civil Engineering*, 164(EM1): 3-24.
- Goring, D.G. and Nikora, V.I. (2002). "Despiking acoustic doppler velocimeter data", *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, 128(1): 117-126.
- Hamidifar, H., and Omid, M. H. (2013). "Floodplain vegetation contribution to velocity distribution in compound channels". *Journal of Civil Engineering and Urbanism*, 3(6), 357-361.