

بررسی عددی تأثیر پوشش گیاهی در سیلابدشت واگرا بر الگوی جریان در کانال مرکب

فاطمه محمودی منفرد^۱، معصومه رستم آبادی^{۲*}، حجت الله یونسی^۳

^۱ دانشجوی کاشناسی ارشد سازه های آبی، گروه مهندسی آب، دانشگاه لرستان، خرم آباد، ایران

^{۲*} استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد بوئین زهرا، بوئین زهرا، ایران

^۳ دانشیار، گروه مهندسی آب، دانشگاه لرستان، خرم آباد، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۶/۰۳ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۷/۰۱

چکیده

در رودخانه های طبیعی، گسترش جریان سیلابی در سیلابدشت ها و تشکیل مقطع مرکب امری معمول است. پوشش گیاهی بر ظرفیت انتقال جریان در سیلابدشت و آبراهه اصلی اثرگذار است. هدف از پژوهش حاضر، مطالعه عددی جریان در کانال مرکب واگرا با پوشش گیاهی و بررسی تغییر عمق نسبی بر مکانیزم جریان و مقدار انتقال جریان در کانال اصلی و سیلابدشت است. بدین منظور میدان جریان در کانال مرکب نامتقارن دارای سیلابدشت واگرا در دو حالت با پوشش گیاهی و بدون آن در اعماق نسبی متفاوت با مدل Flow3D شبیه سازی شده است. نتایج بررسی ها نشان داد در هر دو حالت بدون پوشش گیاهی و با پوشش گیاهی، با افزایش عمق نسبی، بیشینه سرعت در کانال اصلی کاهش یافته است. در سیلابدشت بدون پوشش گیاهی، در ابتدای واگرایی سرعت متوسط عمقی در سیلابدشت حدود ۸۰ درصد سرعت در کانال اصلی است و با پیشروی به سمت انتهای واگرایی این نسبت به تدریج افزایش یافته است، اما با وجود پوشش گیاهی و مقاومت آن در مقابل جریان، این نسبت حدود ۳۰ تا ۶۰ درصد است. پوشش گیاهی با افزایش عمق مقاومت بیشتری در مقابل جریان ایجاد می کند و اثر مقاومتی پوشش گیاهی بر اثر عمق نسبی غالب است. مقدار کاهش متوسط عمقی سرعت در سیلابدشت به دلیل پوشش گیاهی نسبت به حالت بدون پوشش برای اعماق نسبی ۰/۱۵، ۰/۲۵ و ۰/۳۵ به ترتیب ۸۵، ۸۲ و ۸۴ درصد بوده است و به تبع آن مقدار افزایش متوسط عمقی سرعت در کانال اصلی به دلیل پوشش گیاهی به ترتیب ۱۲، ۲۵ و ۳۰ درصد بوده است. در حالت فقدان پوشش گیاهی، از ابتدا تا انتهای ناحیه واگرایی عمق جریان حدود ۳/۷ افزایش یافته است، اما با وجود پوشش گیاهی و ممانعت از ورود جریان به ناحیه سیلابدشت، افزایش عمق جریان در ناحیه واگرایی بسیار تدریجی و حدود ۰/۷ درصد بوده است. حدود ۸۰ درصد دبی از کانال اصلی و ۲۰ درصد آن از سیلابدشت عبور کرده است. با افزایش عمق نسبی، دبی عبوری از سیلابدشت به ۳۸ درصد رسیده است. وجود پوشش گیاهی در سیلابدشت، بین ۴ تا ۹ درصد دبی عبوری از کانال اصلی را افزایش داده است.

واژه های کلیدی: پوشش گیاهی، سیلابدشت واگرا، عمق نسبی، Flow3D

مقدمه

سیلابدشت ها پوشیده از گیاهان هستند و پوشش گیاهی بر ظرفیت انتقال جریان در سیلابدشت و نیز در آبراهه اصلی اثرگذار است. خاک حاصلخیز سیلابدشت ها کاربری های مختلف تفریحی، تجاری، کشاورزی و مسکونی را موجب شده است. آگاهی از شرایط هیدرولیک جریان و اندرکنش جریان بین کانال اصلی و سیلابدشت و برای حفاظت از جان انسان ها و تأسیسات موجود در آن ها لازم خواهد بود.

کانال های مرکب مقاطع هیدرولیکی هستند که از دو بخش کانال اصلی و سیلابدشت ها تشکیل شده اند. در رودخانه های طبیعی، گسترش جریان سیلابی در سیلابدشت ها و تشکیل مقطع مرکب امری معمول است؛ زیرا در زمان وقوع سیلاب بخشی از دبی رودخانه توسط سیلابدشت ها حمل می شود. در طبیعت معمولاً

در کانال‌های مرکب غیر منشوری دارای پوشش گیاهی مطالعات آزمایشگاهی و عددی بسیاری در دسترس است. میرز و همکاران (Meyers *et al.*, 2001) با مطالعه آزمایشگاهی کانال مرکب دارای دو سیلاب‌دشت با بستر و جداره زبر و صاف در کانال اصلی، روابطی را برای توزیع سرعت و دبی ارائه دادند. حسینی (Hosseini, 2004) با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی، به تخمین دبی در کانال‌های مرکب مستقیم با زبری یکنواخت پرداخت. کانگ و چوی (Kang & Choi, 2006) با استفاده از مدل تنش رینولدز، جریان کانال باز مرکب با پوشش گیاهی در سیلاب‌دشت را شبیه‌سازی عددی کردند و تحلیل میانگین عمقی را برای بررسی تبادل مومنتم به‌انجام رساندند. هوآی و همکاران (Huai *et al.*, 2009) با موفقیت یک مدل تحلیلی دوبعدی را بر اساس تأثیر پوشش گیاهی بر ساختار جریان آب کانال باز مرکب با پوشش گیاهی سیلاب‌دشت توسعه دادند. پروست و همکاران (Proust *et al.*, 2013) اثر غیریکنواختی جریان را روی شار مومنتم در کانال مرکب مستقیم با دیواره قائم و شیب‌دار بررسی کردند.

حمیدی‌فر و همکاران (Hamidifar *et al.*, 2013) در مطالعات آزمایشگاهی، جریان و پارامترهای آشفستگی در کانال مرکب مستقیم منشوری با پوشش گیاهی را بررسی کردند و به این نتیجه دست یافتند که ظرفیت انتقال جریان در حضور پوشش گیاهی دشت سیلابی، نسبت به شرایط فقدان پوشش گیاهی، تا ۳۱ درصد کمتر است. یونسی و همکاران (Yonesi *et al.*, 2015) با بررسی تأثیر زبری سیلاب‌دشت بر هیدرولیک جریان در مقاطع منشوری و غیرمنشوری کانال‌های مرکب واگرا نشان دادند با افزایش زبری سیلاب‌دشت اختلاف سرعت جریان بین کانال اصلی و سیلاب‌دشت‌ها، در هر دو کانال منشوری و غیر منشوری افزایش می‌یابد. تئوهاریس و پاناگیوتیس (Theoharris & Panagiotis, 2016) به مطالعه عددی کانال مرکب دوزنقه‌ای و پوشش گیاهی در سیلاب‌دشت و بررسی انتقال مومنتم بین

کانال اصلی و سیلاب‌دشت پرداختند. در مطالعات آزمایشگاهی حمیدی‌فر و همکاران (Hamidifar *et al.*, 2016) اثر هفت عمق نسبی و چهار تراکم پوشش گیاهی بر ضرایب انرژی جنبشی و اصلاح مومنتم در کانال مرکب غیر متقارن بررسی شده است. کومار و همکاران (Cumar *et al.*, 2016) به مقایسه مدل‌سازی دوبعدی و سه‌بعدی به‌منظور پیش‌بینی توزیع سرعت متوسط عمقی در کانال مرکب غیرمنشوری با سیلاب‌دشت همگرا و واگرا با مدل عددی Ansys-fluent پرداختند. شانکار و کومار (Shankar & Kumar, 2018) روابط مقاومت جریان را در کانال مرکب متقارن با سیلاب‌دشت واگرا و همگرا با تغییر عمق نسبی بررسی کردند. صمدی رحیم و همکاران (Samadi Rahim *et al.*, 2019) در مطالعه آزمایشگاهی آبراهه مرکب نامتقارن با سیلاب‌دشت واگرا، توزیع سرعت و شکل‌گیری جریان ثانویه را تحت تأثیر تراکم پوشش گیاهی سیلاب‌دشت بررسی کردند.

دولتی مهتاج و رضایی (Dovlati Mehtaj & Rezaei, 2021) در آزمایشگاه، توزیع سرعت و تنش برشی کانال مرکب را بررسی کردند و نشان دادند اندرکنش جریان بین کانال اصلی و سیلاب‌دشت همگرا عموماً بیشتر از اندرکنش جریان بین کانال اصلی و سیلاب‌دشت واگراست. شکری و مهدی‌پور (Shokri & Mehdipour, 2021) با استفاده از مدل سه‌بعدی Ansys-Fluent، هیدرولیک جریان را در مقاطع مرکب با سیلاب‌دشت‌های واگرا شبیه‌سازی کردند و نشان دادند هر چه زاویه واگرایی بیشتر شود، سرعت کمتر می‌شود. مطالعات احمدی ده‌رشید و همکاران (Ahmadi Dehrashid *et al.*, 2023, a & b) در بررسی عددی اثر پوشش گیاهی سیلاب‌دشت بر ساختار جریان و خصوصیات آشفته کانال مرکب نشان دادند گرادیان سرعت در فصل مشترک کانال اصلی و سیلاب‌دشت، منجر به توسعه جریان‌های ثانویه و انتقال جرم و مومنتم در این ناحیه می‌شود.

نسبی بر مکانیزم جریان است. بدین منظور میدان جریان در کانال مرکب نامتقارن دارای سیلابدشت واگرا در دو حالت با پوشش گیاهی و بدون آن در عمق‌های نسبی متفاوت (نسبت عمق جریان در سیلابدشت به عمق جریان در کانال اصلی) شبیه‌سازی سه‌بعدی شده است. برای شبیه‌سازی سه‌بعدی از نرم‌افزار Flow3D استفاده شد و پس از صحت‌سنجی مدل عددی، برای بررسی سازوکار جریان، الگوی جریان شامل منحنی‌های هم سرعت در مقاطع عرضی و عمقی، پروفیل‌های سرعت و تغییرات دبی در سیلابدشت و کانال اصلی برای دو حالت بود یا نبود پوشش گیاهی و در سه عمق نسبی مقایسه و تحلیل شد.

مواد و روش‌ها

معرفی مدل عددی

یکی از مدل‌های CFD با کاربرد گسترده، نرم‌افزار Flow3D است. این مدل برای شبیه‌سازی جریان‌های دارای سطح آزاد، به‌ویژه در هندسه‌های پیچیده، کاربرد دارد. معادلات گسسته شده حاکم بر جریان سیال را می‌تواند در دو مختصات کارتیزین و استوانه‌ای با الگوریتم‌های تفاضل محدود و حجم محدود گسسته و حل کند. Flow3D می‌تواند از شبکه محاسباتی ساختار یافته استفاده کند، سطح آزاد را با روش TruVOF تعیین کند و موانع مانند پل‌ها، دریچه‌ها و ... را با روش FAVOR می‌شناسد. (Flow3D User Manual, 2016). معادلات حاکم بر جریان سیال قانون بقای جرم و بقای مومنوم هستند و برای سیال نیوتنی تراکم‌ناپذیر به‌صورت معادلات دیفرانسیل جزئی (۱) و (۲) هستند.

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\rho \frac{\partial u_i}{\partial t} + \rho u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial t_{ji}}{\partial x_j} \quad (2)$$

در مطالعات زنگ و همکاران (Zeng. et al., 2022) یک روش شبیه‌سازی گردابی بزرگ با مدل دیوار (WMLLES) برای شبیه‌سازی جریان کانال باز مرکب با پوشش گیاهی سیلابدشت استفاده و سرعت جریان و تبادل حرکت عرضی بررسی شد. در مطالعات آزمایشگاهی صمدی رحیم و همکاران (Samadi Rahim et al., 2023) اثر تراکم پوشش گیاهی بر ویژگی‌های هیدرولیکی و آشفتگی جریان در کانال مرکب نامتقارن با سیلابدشت همگرا و واگرا بررسی شد.

اکثر مطالعات پیشین در باره کانال‌های مرکب مستقیم بوده است و مطالعه عددی کانال‌های مرکب نامتقارن با سیلابدشت‌های واگرای دارای پوشش گیاهی به‌ندرت مورد توجه بوده است. در مطالعات هیدرولیکی روش‌های میدانی، آزمایشگاهی و عددی استفاده می‌شوند. هزینه بسیار بالا و گاهی ناممکن بودن بررسی جزئیات میدان جریان، محققان را در مطالعات میدانی دچار محدودیت‌هایی کرده است. مطالعات آزمایشگاهی در بررسی پدیده‌های هیدرولیکی با اینکه دقت بالایی دارد؛ اما صرف هزینه‌های بالا، محدودیت فضای آزمایشگاهی و اثرهای مقیاسی نیز محققان را به استفاده از روش‌های عددی متمایل کرده است. روش‌های عددی می‌توانند با صرف هزینه و زمان کمتر، جزئیات دقیقی از کل میدان جریان را ارائه دهند و برای بررسی اثر پارامترهای مختلف مؤثر بر پدیده بسیار کارآمد باشند مشروط بر اینکه نتایج مدل عددی صحت‌سنجی شوند. برای نمونه، در پژوهش حاضر پارامترهایی مانند تغییرات عرض کانال اصلی و ناحیه واگرایی، تغییرات آرایش و تراکم پوشش گیاهی، بررسی اثر هم‌زمان رسوب و پوشش گیاهی و ... می‌توانند بر الگوی جریان اثرگذار باشند. یک‌بار صحت‌سنجی مدل عددی راه را برای شبیه‌سازی سناریوهای مختلف بررسی پارامترهای مؤثر باز می‌کند و محققان را در تحلیل جریان یاری می‌دهد.

هدف از پژوهش حاضر، مطالعه عددی سازوکار جریان در کانال مرکب واگرا با پوشش گیاهی و نیز بررسی تغییر عمق

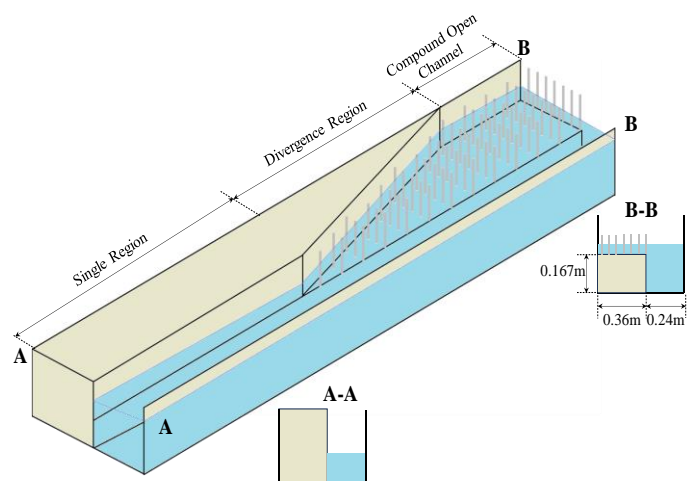
که در آن: u_i و X_i به ترتیب بردارهای سرعت و موقعیت، t زمان، p فشار، ρ دانسیته سیال، t_{ij} تانسور تنش ویسکوز (در رابطه (۳) معرفی شده است). μ لزوجت مولکولی، و s_{ij} تانسور مقدار کرنش رابطه (۴) است:

$$t_{ij} = 2\mu s_{ij} \quad (3)$$

$$s_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (4)$$

معرفی میدان حل و تنظیمات مدل عددی

برای صحت‌سنجی مدل عددی در پژوهش حاضر از داده‌های آزمایشگاهی صمدی رحیم و همکاران (Samadi

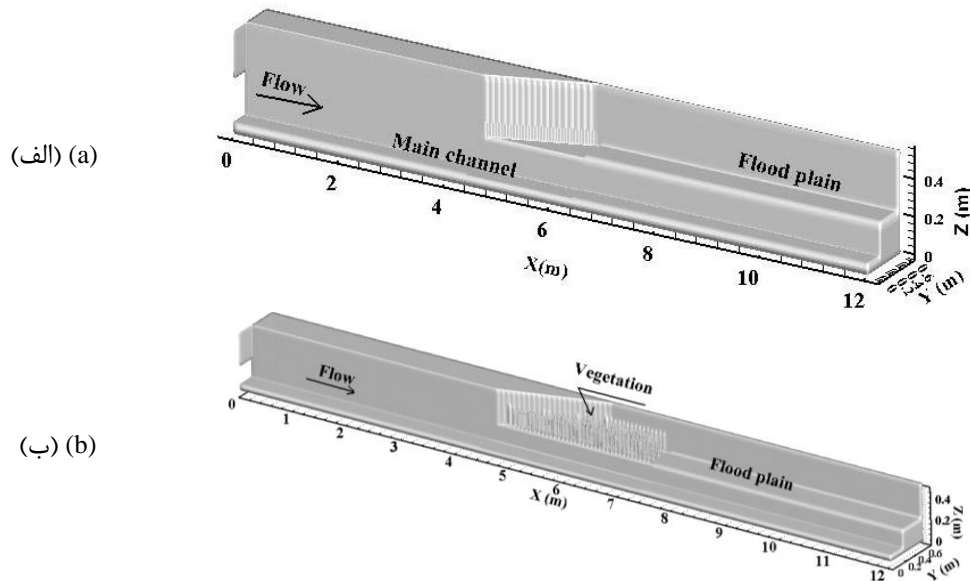


شکل ۱- فلوم تحقیق آزمایشگاهی صمدی رحیم و همکاران (Samadi Rahim *et al.*, 2019)

Fig. 1- The flume in experimental research of Samadi Rahim *et al* (2019)

واگرایی را مقطع انتهایی و حد واسط مقطع ابتدایی و انتهایی، مقطع میانی نامیده می‌شود. برای شبیه‌سازی عددی، علاوه بر تولید هندسه، شرایط مرزی و شبکه‌بندی نیز باید تعریف شود. در ورودی کانال اصلی از شرط مرزی دبی $25/65$ لیتر بر ثانیه، در خروجی کانال اصلی و سیلاب‌دشت از شرط مرزی فشار با ارتفاع مشخص آب در کانال، برای دیواره‌های جانبی مدل و کف آن از شرط مرزی دیواره با عدم لغزش و در سطح آزاد جریان از شرط مرزی تقارن استفاده شده است. در شبکه‌بندی میدان حل از دو بلوک شبکه‌بندی استفاده شده است.

در آزمایشگاه از میله‌های پلاستیکی استوانه‌ای صلب به قطر ۱۰ میلی‌متر برای پوشش گیاهی استفاده شد. میله‌ها از بخش ابتدایی ناحیه واگرایی تا یک متر بعد از انتهای ناحیه واگرایی روی سیلاب‌دشت به صورت منظم با فاصله طولی و عرضی به ترتیب ۷۵ و ۱۰۰ میلی‌متر نصب شدند. مدل هندسی کانال فوق با استفاده از نرم‌افزار AutoCAD ساخته شد و با فرمت *.stl به نرم‌افزار Flow3D معرفی شد. در شکل (۲)، هندسه تعریف شده کانال اصلی و سیلاب‌دشت در دو حالت با پوشش گیاهی و بدون پوشش گیاهی نشان داده شده است. از این پس، ابتدای محل واگرایی را مقطع ورودی، انتهای قسمت

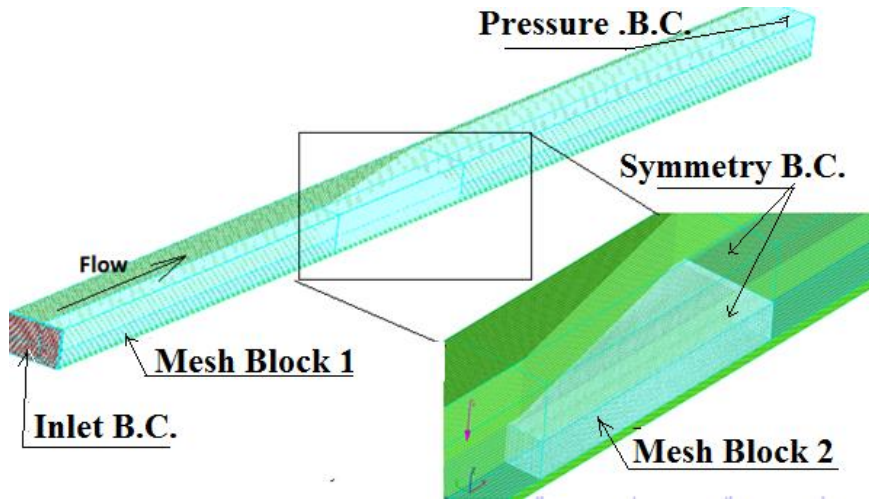


شکل ۲- نمای سه بعدی از مدل هندسی کانال مرکب واگرا (الف) بدون پوشش گیاهی، (ب) با پوشش گیاهی
 Fig. 2- 3D view of Geometric divergent compound channel, a without vegetation, and b) with vegetation

محاسباتی، زمانی است که سیستم با پردازشگر مزبور نیاز دارد تا برای هر شبیه‌سازی به همگرایی برسد. معیار همگرایی، تغییر ناچیز باقی‌مانده متغیرهایی مانند فشار و میزان استهلاک انرژی جنبشی آشفتگی است. پروفیل سرعت به‌دست‌آمده از مدل‌سازی عددی با سه شبکه مذکور با نتیجه آزمایشگاهی صمدی رحیم و همکاران (Samadi Rahim *et al.*, 2019) در مقطع میانی محدوده واگرایی در شکل (۴) مقایسه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، روند کلی پروفیل‌های سرعت برای هر سه شبکه‌بندی تقریباً مشابه یکدیگر است. از $y=0/3$ تا $y=0/45$ نتایج هر سه شبکه مشابه است؛ اما نتایج شبکه ۳ انطباق بیشتری با نتایج آزمایشگاهی دارد. در مرز مشترک کانال اصلی و سیلابدشت ($y=0/24$) شبکه ۳ نسبت به دو شبکه دیگر انطباق بیشتری با نتایج آزمایشگاهی دارد. در کانال اصلی ($y=0$ تا $y=0/24$)، نتایج شبکه ۲ و ۳ نزدیک یکدیگر است و باز هم شبکه ۳ تطابق بهتری با نتایج آزمایشگاهی دارد. مقایسه کمی نتایج نشان داد. خطای مدل عددی سه شبکه مذکور نسبت به مدل آزمایشگاهی با استفاده از فرمول خطای نسبی^۱ به ترتیب برابر ۴، ۶/۵ و ۴ درصد است.

بلوک اصلی کل هندسه مدل را در بر گرفته است و بلوک دوم با هدف افزایش دقت نتایج و در عین حال زیاد نشدن تعداد سلول‌های محاسباتی کل، فقط در اطراف پوشش گیاهی در نظر گرفته شده است. مرز بین این دو بلوک با شرط مرزی تقارن به هم وصل شده است. (شکل ۳)، نمایی از شرایط مرزی اعمال شده در کانال اصلی و شرایط مرزی بلوک میانی اطراف پوشش گیاهی را نمایش می‌دهد. بر اساس مطالعات رضایی و سیف (Rezaei & Seif, 2022) و رضایی و صفرزاده (Rezaei & Safarzade, 2016) که نشان دادند مدل آشفتگی $k-\varepsilon$ قادر است به خوبی میدان جریان را در کانال مرکب مدل‌سازی کند، مدل $k-\varepsilon$ در این تحقیق برای مدل‌سازی آشفتگی استفاده شده است. به منظور دریافت نتایج عددی مستقل از شبکه که لازمه هر مدل‌سازی عددی است، سه شبکه‌بندی متفاوت به شرح جدول (۱) در نظر گرفته شد. در جدول (۱) علاوه بر اندازه سلول‌های به‌کار رفته برای بلوک ۱ و بلوک ۲، تعداد کل سلول‌های محاسباتی و مدت‌زمان شبیه‌سازی هر شبکه آمده است که با پردازشگر مرکزی Core (TM) i7 با قدرت 3.60 GHz و حافظه ۱۶ GB حل شده است. منظور از مدت زمان

¹ (Exp. - Num.) / Exp.



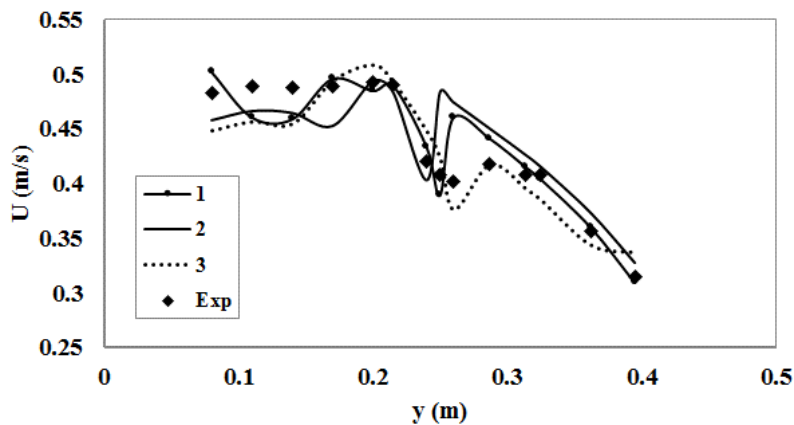
شکل ۳- شرایط مرزی اتخاذ شده در مدل سازی کانال مرکب

Fig. 3- Boundary conditions for simulating the compound channel

جدول ۱- جزئیات شبکه بندی مدل عددی

Table 1- details of numerical modeling meshing

زمان محاسباتی (دقیقه) Computational time (min)	تعداد کل سلولها Total cells	اندازه سلول بلاک ۲ (متر) Cell size of block 2 (m)	اندازه سلول بلاک ۱ (متر) Cell size of block 1 (m)	شبکه Mesh
۴۳	۵۲۰۰۶۲	۰/۰۱۱۵	۰/۰۲۳	۱
۵۰	۶۶۶۳۴۵	۰/۰۱۰۵	۰/۰۲۱	۲
۷۵	۹۲۵۴۴۶	۰/۰۰۹۵	۰/۰۱۹	۳



شکل ۴- تاثیر اندازه سلولهای متفاوت بر پروفیل سرعت در مقطع میانی مدل بدون پوشش گیاهی

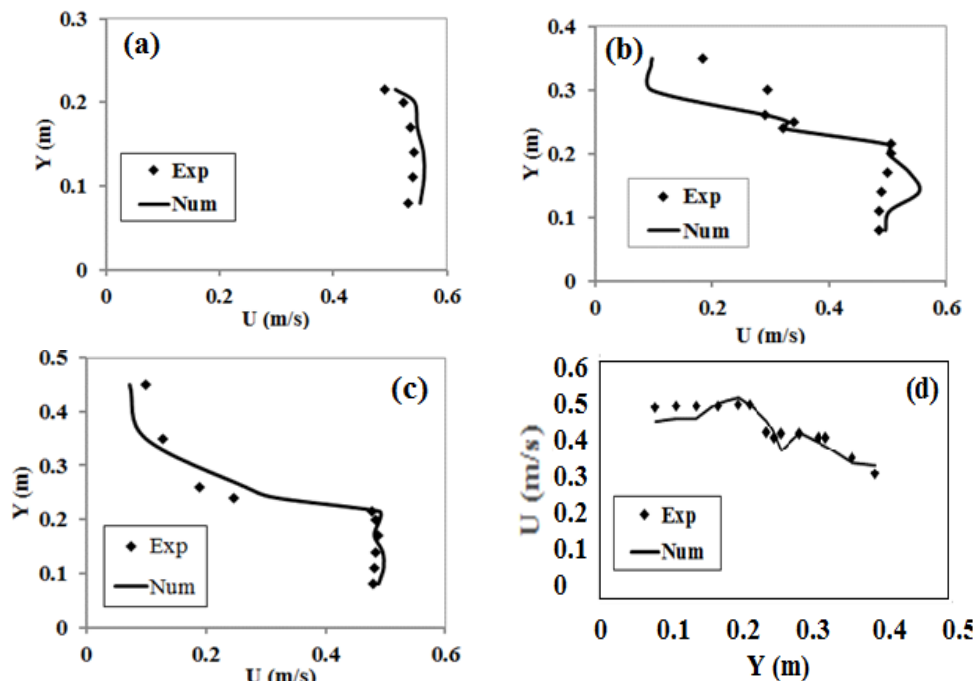
Fig. 4- The effect of cell sizes on the velocity profile at middle section of the model without vegetation

پس از تعیین نتایج مستقل از شبکه، به منظور صحت سنجی نتایج مدل عددی در دو حالت بود یا نبود پوشش گیاهی، پروفیل های سرعت به دست آمده از مدل عددی و آزمایشگاهی در مقاطع مختلف در شکل (۵) نمایش داده شده

از این رو به رغم اینکه شبکه ۳ همخوانی بیشتری با نتایج آزمایشگاهی دارد، با تغییر شبکه نتایج عددی تحت تاثیر چندانی قرار نگرفته است. با توجه به توضیحات فوق، در ادامه مطالعات شبکه بندی ۳ در نظر گرفته شد.

تطابق بسیار خوبی بین نتایج عددی با نتایج آزمایشگاهی وجود دارد و مقدار سرعت تقریباً یکنواخت است.

است. روند کلی پروفیل‌های سرعت به دست آمده از مدل عددی در تطابق با پروفیل‌های آزمایشگاهی هستند. در مقطع ابتدایی واگرایی که فقط پروفیل سرعت در کانال اصلی دیده می‌شود،



شکل ۵- مقایسه پروفیل سرعت شبیه‌سازی شده با نتایج آزمایشگاهی صمدی رحیم و همکاران (Samadi Rahim *et al.*, 2019) در (a) مقطع ابتدایی، (b) میانی و (c) انتهایی مدل با پوشش گیاهی و (d) مقطع انتهایی مدل بدون پوشش گیاهی

Fig. 5- Comparison of simulated velocity profile with experimental results of Samadi Rahim *et al.*, (2020) at (a) first section, (b) middle section, (c) end section with vegetation, and (d) end section of no vegetation

به دست آمده است که نشان دهنده دقت مناسب مدل عددی در شبیه‌سازی جریان در کانال مرکب مذکور است.

به منظور مقایسه کمی نتایج، خطای مدل عددی نسبت به مدل آزمایشگاهی با استفاده از فرمول خطای نسبی محاسبه شد. نتایج بررسی‌ها نشان داد خطای میانگین نسبی در تخمین پروفیل سرعت در مقاطع ابتدایی، میانی و انتهایی به ترتیب برابر ۳/۵، ۱۳ و ۱۳ درصد و در مدل بدون پوشش گیاهی برابر ۲/۸ درصد است. با توجه به دقت قابل قبول نتایج مدل عددی، جریان در کانال مرکب با تنظیمات اشاره شده با در نظر گرفتن سه عمق نسبی (عمق جریان در سیلابدشت به عمق جریان در کانال اصلی) $Dr=0/35$ ، $Dr=0/25$ و $Dr=0/15$ و در دو حالت وجود پوشش گیاهی در سیلابدشت و بدون پوشش گیاهی شبیه‌سازی شد و نتایج آن در ادامه ارائه شده است.

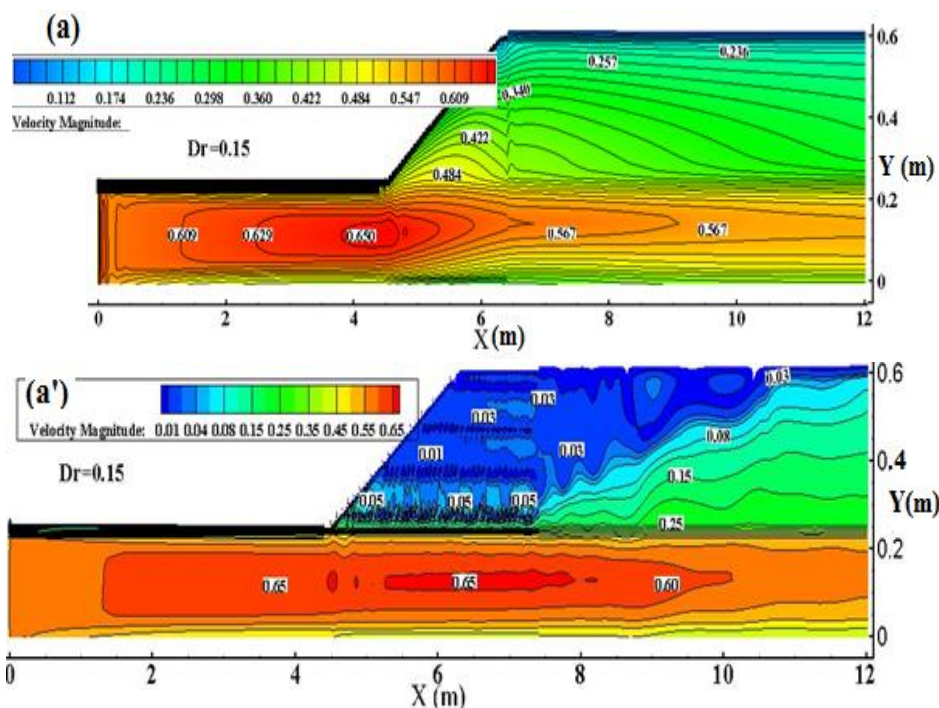
در مقطع میانی، در قسمت کانال اصلی، پروفیل سرعت آزمایشگاهی یکنواخت است؛ اما مدل عددی بیشینه سرعت را در خط مرکزی کانال اصلی نشان داده است. در مرز کانال اصلی و سیلابدشت مدل عددی پروفیل سرعت را منطبق بر مقدار آزمایشگاهی پیش‌بینی کرده است. مقدار سرعت در قسمت سیلابدشت (از $y=0/24$ به بعد) بسیار کم شده است که مدل عددی این کاهش سرعت را پیش‌بینی کرده است. در مقطع انتهایی واگرایی، نتایج مدل عددی تطابق مناسبی با نتایج آزمایشگاهی دارد، پروفیل سرعت در کانال اصلی در هر دو مدل عددی و آزمایشگاهی به صورت یکنواخت مشاهده می‌شود و کاهش شدید سرعت در سیلابدشت در مدل عددی و در مدل آزمایشگاهی مانند یکدیگر است. در مدل بدون پوشش گیاهی نیز تطابق خوبی میان نتایج مدل عددی و نتایج آزمایشگاهی

نتایج و بحث

بررسی سرعت برآیند

کانال اصلی پیش از ناحیه واگرایی، در هر دو حالت وجود پوشش گیاهی و بدون آن، الگوی جریان یکسان است و سرعت جریان در خط مرکزی بیشتر و در نزدیکی دیواره ها کمتر است. با تغییر عمق نسبی این الگو تغییر نداشته است، صرفاً مقدار بیشینه سرعت با افزایش عمق نسبی به دلیل افزایش سطح مقطع جریان کاهش یافته است.

شکل های (۶ تا ۸) توزیع سرعت در کل میدان جریان را در نزدیکی سطح آزاد در دو حالت بدون پوشش گیاهی (a) و با پوشش گیاهی (a') با تغییر عمق نسبی نشان می دهند. در

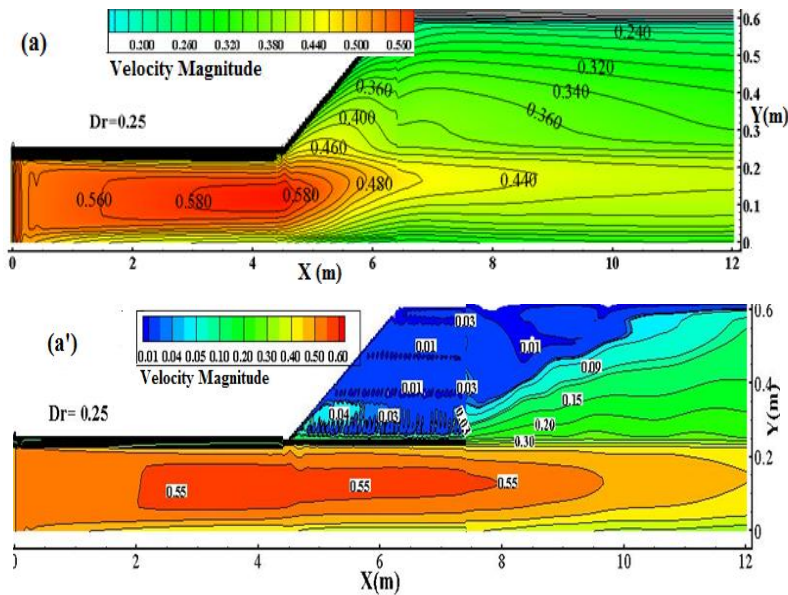


شکل ۶- منحنی های هم مقدار سرعت کل در عمق نسبی $Dr=0.15$: (a) بدون پوشش گیاهی، (a') با پوشش گیاهی
Fig. 6- Total velocity contour at $Dr=0.15$, (a) No vegetation, and (a') Vegetation

محدوده واگرایی و به سمت پایین دست، که سطح مقطع جریان منشوری می شود، اختلاف سرعت جریان در کانال اصلی و سیلاب دشت کمتر می شود، اما همواره در عمق نسبی کمتر، اختلاف سرعت جریان در کانال اصلی و سیلاب دشت بیشتر است. در واقع، هرچه عمق نسبی بیشتر باشد، اثر کانال سیلاب دشت و مقاومت بستر آن در مقابل جریان کمتر می شود بنابراین توزیع سرعت در کل عرض به سمت یکنواختی پیش می رود و اختلاف سرعت در کانال اصلی و سیلاب دشت کمتر خواهد شد.

در کانال بدون پوشش گیاهی مقایسه شکل های (۶ تا ۸) (a) با شروع محدوده واگرایی و ورود جریان به سیلاب دشت از بیشینه سرعت در کانال اصلی کاسته می شود. به رغم اینکه سطح مقطع جریان در سیلاب دشت کوچکتر از سطح مقطع جریان در کانال اصلی است، اما سرعت جریان در کانال اصلی همواره از سرعت جریان در کانال سیلاب دشت بیشتر است. دلیل این امر را می توان مومنتم کمتر جریان در سیلاب دشت نسبت به کانال اصلی دانست. برخلاف کانال اصلی، بیشینه سرعت در کانال سیلاب دشت در مرکز نیست، بلکه در نزدیکی مرز کانال اصلی و سیلاب دشت است. با نزدیک شدن به انتهای

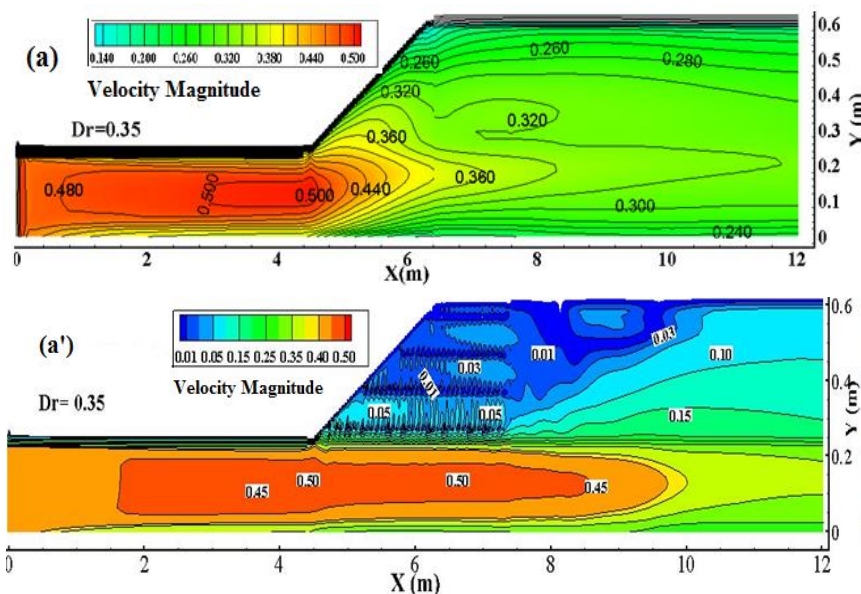
بررسی عددی تاثیر پوشش گیاهی در سیلابدشت واگرا بر الگوی جریان در کانال مرکب



شکل ۷- منحنی‌های هم‌مقدار سرعت کل در عمق نسبی $Dr=0.25$ بدون پوشش گیاهی، (a) و با پوشش گیاهی (a')
 Fig. 7- Total velocity contour at $Dr=0.25$, (a) No vegetation, and (a') Vegetation

سیلابدشت مشاهده می‌شود و پس از آن به تدریج سرعت جریان در سیلابدشت بیشتر می‌شود. اثر پوشش گیاهی بر مقاومت در مقابل جریان و جلوگیری از ورود جریان به سیلابدشت تا پایین‌دست ادامه دارد و ناحیه کم‌سرعت به صورت مثلثی در پایین‌دست پوشش گیاهی مشاهده می‌شود.

در حالت وجود پوشش گیاهی (شکل‌های ۶ تا ۸) (a') با شروع محدوده واگرایی و برخورد جریان در سیلابدشت با پوشش گیاهی متراکم، اجازه عبور مقدار کمی از جریان در سیلابدشت داده شده است. با توجه به اینکه پوشش گیاهی تا حدود یک متر پس از انتهای ناحیه واگرایی وجود دارد، اما تا انتهای ناحیه دارای پوشش گیاهی ناحیه کم‌سرعت در



شکل ۸- منحنی‌های هم‌مقدار سرعت کل در عمق نسبی $Dr=0.35$ بدون پوشش گیاهی، (a) و با پوشش گیاهی (a')
 Fig. 8- Total velocity contour at $Dr=0.35$, (a) No vegetation, and (a') Vegetation

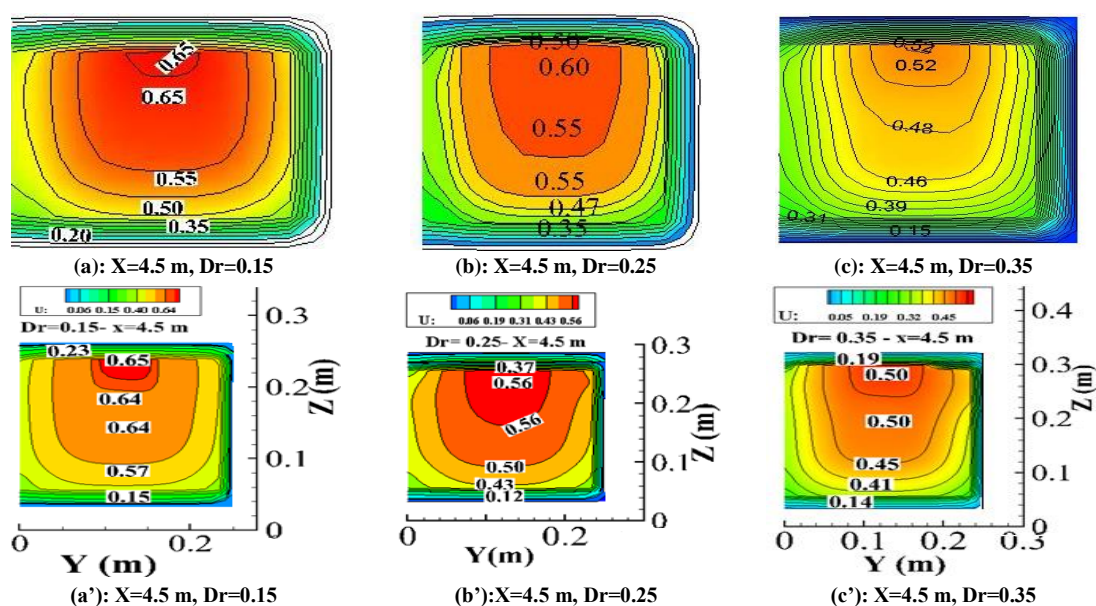
اصلی و سیلابدشت به طور پیوسته توزیع شده‌اند و با افزایش عمق نسبی هستهٔ پرسرعت جریان از وسط کانال اصلی به سمت کانال سیلابدشت کشیده شده است و این توزیع روند یکنواخت‌تری را نشان می‌دهد. در حالت پوشش گیاهی، همچنان هستهٔ پرسرعت جریان در کانال اصلی است و مقدار سرعت در کانال سیلابدشت بسیار کم است. وجود پوشش گیاهی مانعی در برابر عبور جریان در سیلابدشت و عامل مقاومت جریان در سیلابدشت است. عمق نسبی هم تأثیری بر این پدیده نداشته است. با توجه به اینکه قسمت عمدهٔ جریان در کانال اصلی دیده می‌شود، سرعت جریان کانال اصلی در حالت پوشش گیاهی بیشتر از حالت بدون پوشش است. مقایسهٔ هر یک از شکل‌های a، b و c در شکل‌های (۱۰ و ۱۱) نشان می‌دهد سرعت در مقطع میانی ناحیهٔ واگرایی بیشتر از سرعت در انتهای ناحیهٔ واگرایی است، دلیل آن همان افزایش سطح مقطع جریان در انتها نسبت به مقطع میانی و به تبع آن کاهش سرعت است. در مطالعات فیزیکی و عددی نجفیان و همکاران (Najafyan, et al., 2016) که به مطالعه واگرایی سیلابدشت روی توزیع مؤلفهٔ طولی سرعت پرداختند، نیز اشاره شده که سرعت در مقطع میانی محدوده واگرایی بیشتر از سرعت در مقطع انتهایی محدوده واگرایی است.

بررسی منحنی‌های هم سرعت در مقاطع مختلف عرضی با تغییر عمق نسبی

در شکل‌ها (۹ تا ۱۱) منحنی‌های هم سرعت طولی در سه مقطع ابتدا، وسط و انتهای ناحیهٔ واگرایی با تغییر عمق نسبی در دو حالت بدون پوشش گیاهی (a, b, c) و با پوشش گیاهی (a', b', c') نشان داده شده است.

مطابق شکل (۹)، پیش از ناحیهٔ واگرایی در هر دو حالت بدون پوشش گیاهی و با پوشش گیاهی، در هر مقطع با افزایش عمق نسبی، بیشینهٔ سرعت در کانال اصلی کاهش یافته است، در واقع با افزایش عمق نسبی سطح مقطع جریان افزایش و سرعت کاهش می‌یابد. هستهٔ پرسرعت جریان در وسط عرض کانال اصلی و در تراز پایین‌تر از سطح آزاد رخ داده است. در مطالعات فیزیکی و عددی نجفیان و همکاران (Najafyan, et al., 2016) که به مطالعه واگرایی سیلابدشت روی توزیع مؤلفهٔ طولی سرعت پرداختند، نتایج به‌دست‌آمده حاکی از آن بود که بیشینهٔ سرعت کانال اصلی در مرکز آن و پایین‌تر از سطح آب اتفاق می‌افتد.

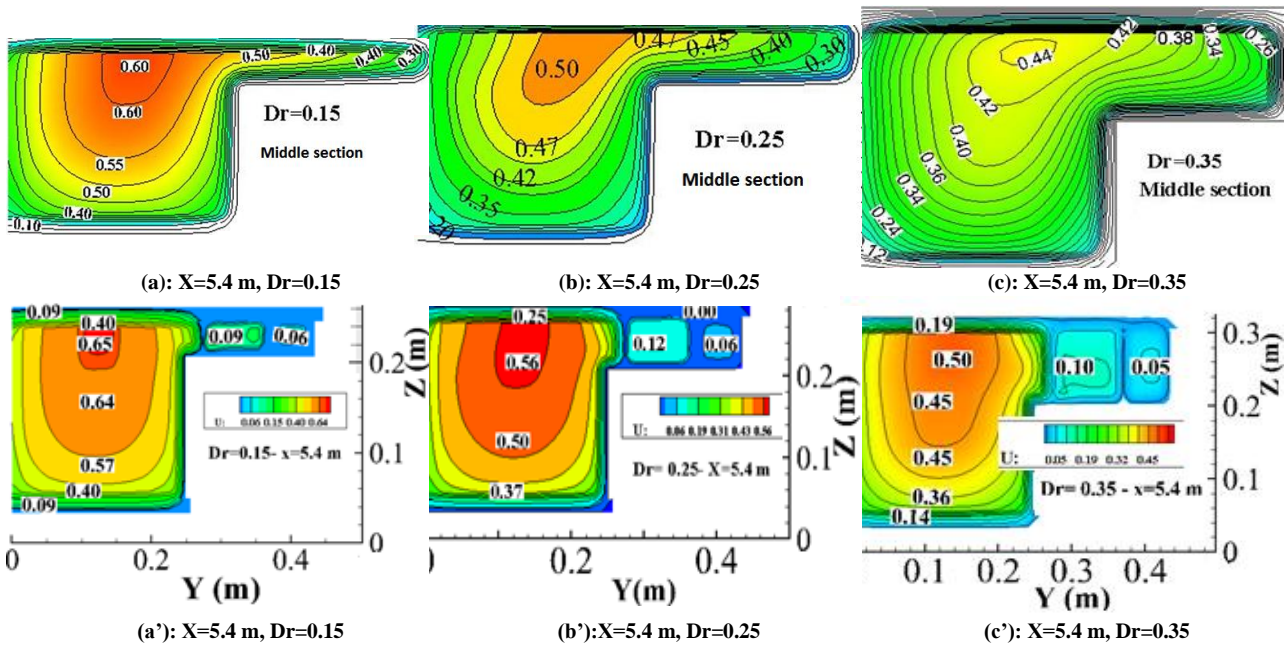
در وسط و انتهای ناحیهٔ واگرایی، شکل‌های (۱۰ و ۱۱)، در حالت بدون پوشش گیاهی منحنی‌های هم سرعت در کانال



شکل ۹- منحنی‌های هم سرعت در مقطع ابتدایی واگرایی

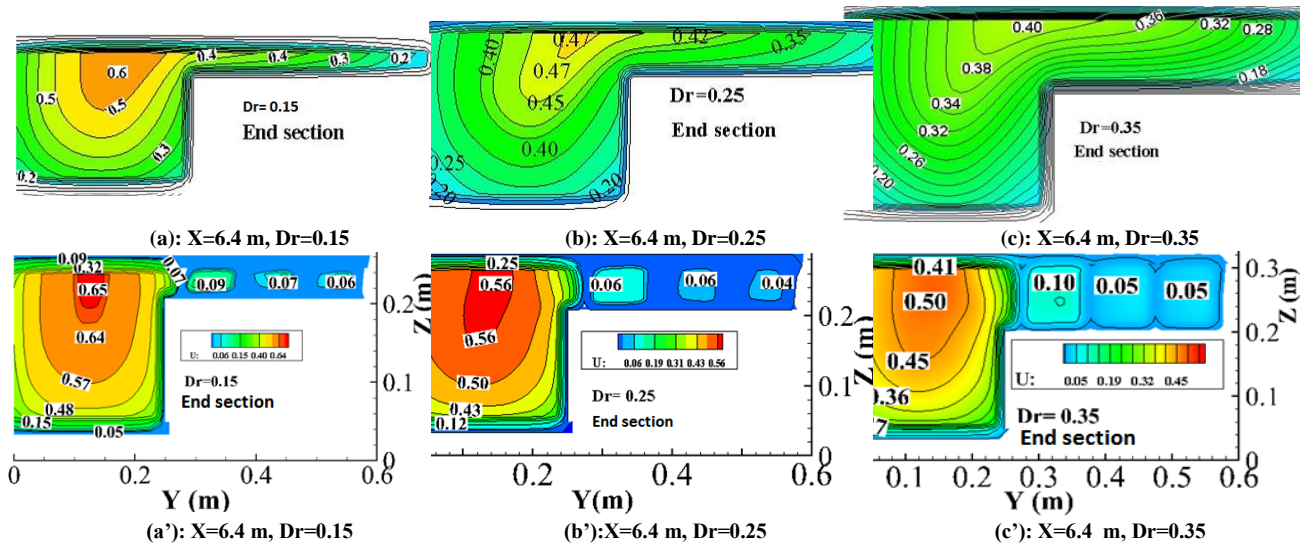
Fig. 9- Velocity contours at first section

بررسی عددی تاثیر پوشش گیاهی در سیلابدشت واگرا بر الگوی جریان در کانال مرکب



شکل ۱۰- منحنی‌های هم سرعت در مقطع میانی واگرایی

Fig. 10- Velocity contours at middle section



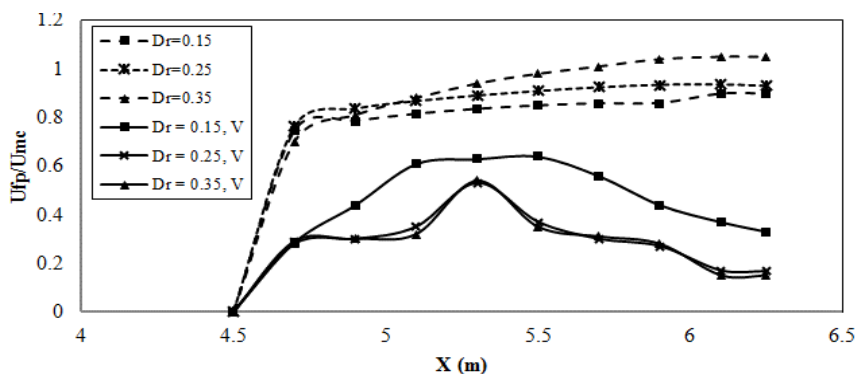
شکل ۱۱- منحنی‌های هم سرعت در مقطع انتهایی واگرایی

Fig. 11- Velocity contours at end section

تغییرات نسبت سرعت میانگین در کانال سیلابدشت به کانال اصلی
به‌منظور بررسی کمی مقدار سرعت، در شکل (۱۲) نمودار تغییرات نسبت سرعت میانگین عمقی در کانال سیلابدشت به کانال اصلی در دو حالت وجود پوشش گیاهی و بدون پوشش گیاهی در طول ناحیه واگرایی نشان داده شده است. مطابق این شکل، در حالت بدون پوشش گیاهی درابتدای واگرایی تغییرات نسبت سرعت میانگین در کانال سیلابدشت به حدود ۸۰ درصد سرعت در کانال اصلی است و با پیشروی به سمت انتهایی واگرایی (x=6.25 m) این نسبت به تدریج افزایش یافته است که نشان دهنده انتقال تدریجی هسته پسرعت به سمت سیلابدشت و نیز کم شدن سرعت در کانال اصلی است. با افزایش عمق نسبی نیز با توجه به کم شدن سرعت عمقی در کانال اصلی، نسبت سرعت میانگین عمقی سیلابدشت به

تغییرات نسبت سرعت میانگین در کانال سیلابدشت به کانال اصلی
به‌منظور بررسی کمی مقدار سرعت، در شکل (۱۲) نمودار تغییرات نسبت سرعت میانگین عمقی در کانال سیلابدشت به کانال اصلی در دو حالت وجود پوشش گیاهی و بدون پوشش گیاهی در طول ناحیه واگرایی نشان داده شده است. مطابق این شکل، در حالت بدون پوشش گیاهی درابتدای واگرایی تغییرات نسبت سرعت میانگین در کانال سیلابدشت به حدود ۸۰ درصد سرعت در کانال اصلی است و با پیشروی به سمت انتهایی واگرایی (x=6.25 m) این نسبت به تدریج افزایش یافته است که نشان دهنده انتقال تدریجی هسته پسرعت به سمت سیلابدشت و نیز کم شدن سرعت در کانال اصلی است. با افزایش عمق نسبی نیز با توجه به کم شدن سرعت عمقی در کانال اصلی، نسبت سرعت میانگین عمقی سیلابدشت به

کانال اصلی افزایش یافته است. اما در حالت وجود پوشش گیاهی، روند تغییرات نسبت سرعت میانگین عمقی در کانال سیلابدشت به کانال اصلی ابتدا افزایشی و سپس کاهش است، در ابتدای ناحیه واگرایی نسبت متوسط عمقی سیلابدشت به کانال اصلی حدود ۳۰ درصد است، در میانه ناحیه واگرایی این نسبت به حدود ۵۰ تا ۶۰ درصد رسیده و مجدداً روند کاهش داشته است و با افزایش عمق نسبی به کمترین مقدار یعنی حدود ۲۰ درصد رسیده است.



شکل ۱۲- تغییرات نسبت سرعت میانگین عمقی در طول ناحیه واگرایی در کانال سیلابدشت به کانال اصلی در دو حالت با پوشش گیاهی (V) و بدون آن با تغییر عمق نسبی

Fig. 12- Variation of the ratio of vertical averaged velocity of floodplain to the main channel for to cases of vegetation and no vegetation with changing the depth ratio

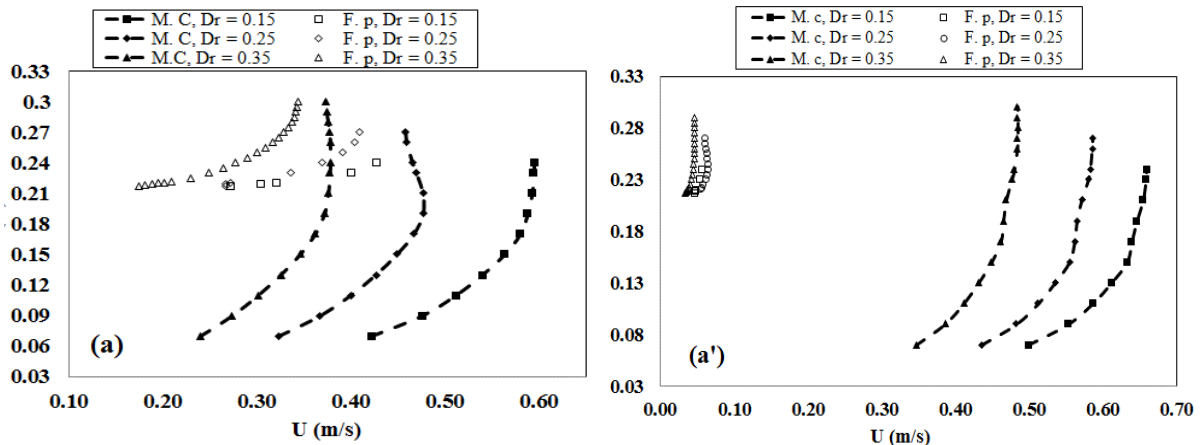
سرعت بیشتر است و با افزایش عمق نسبی، مقدار سرعت کاهش یافته است. این پدیده در سیلابدشت بدون پوشش گیاهی نیز کاملاً مشهود است. اما در سیلابدشت دارای پوشش گیاهی، به دلیل مقاومت زیاد پوشش گیاهی در مقابل جریان، سرعت در سیلابدشت بسیار کم و با تغییر عمق نسبی نمی توان تفاوت معنی داری را برای مقدار سرعت در سیلابدشت قائل شد. یعنی اثر پوشش گیاهی بر تأثیر عمق نسبی غالب است و پوشش گیاهی مقاومت زیادی در مقابل جریان ایجاد کرده و سرعت جریان در سیلابدشت را به شدت کاهش داده است. مقدار کمی اختلاف سرعت متوسط عمقی در کانال اصلی و سیلابدشت در حالت بدون پوشش گیاهی در عمق های نسبی ۰/۱۵، ۰/۲۵ و ۰/۳۵ به ترتیب ۲۲، ۳۶ و ۲۰ درصد است، یعنی با افزایش عمق نسبی، اختلاف سرعت متوسط عمقی در سیلابدشت و کانال اصلی کمتر شده است. این پارامتر در حالت پوشش گیاهی به ترتیب ۹۱، ۸۹ و ۹۰ درصد بوده است، یعنی تغییر عمق نسبی، منجر به اختلاف سرعت متوسط عمقی در سیلابدشت و کانال اصلی نشده است، بلکه اختلاف سرعت ناشی از وجود پوشش گیاهی است.

پوشش گیاهی، با افزایش عمق، مقاومت بیشتری در مقابل سرعت نزدیک سطح ایجاد می کند که بیشینه است. در واقع با افزایش عمق، سرعت در کانال اصلی کاهش می یابد، اما پوشش گیاهی ممانعت بیشتری در مقابل سرعت جریان دارد و نسبت را به شدت کاهش می دهد. طبق نمودار، نمی توان تفاوت معنی داری بین عمق نسبی ۱/۲۵ و ۰/۳۵ در حالت وجود پوشش گیاهی قائل شد و اثر مقاومتی پوشش گیاهی بر اثر عمق نسبی غالب است.

بررسی پروفیل سرعت قائم

به منظور مقایسه دقیق تر، در شکل (۱۳) پروفیل قائم سرعت در فاصله ۶ متری از ابتدای کانال در محور مرکزی کانال اصلی و سیلابدشت برای سه عمق نسبی متفاوت در دو حالت بدون پوشش گیاهی (a) و با پوشش گیاهی (a') نمایش داده شده است. همان طور که در شکل ۱۳ مشاهده می شود در کلیه عمق های نسبی تفاوت محسوسی در سرعت کانال اصلی و سیلابدشت وجود دارد. در هر دو حالت در کانال اصلی، در عمق نسبی کم، سطح مقطع جریان کمتر و از این رو مقدار

بررسی عددی تاثیر پوشش گیاهی در سیلابدشت واگرا بر الگوی جریان در کانال مرکب

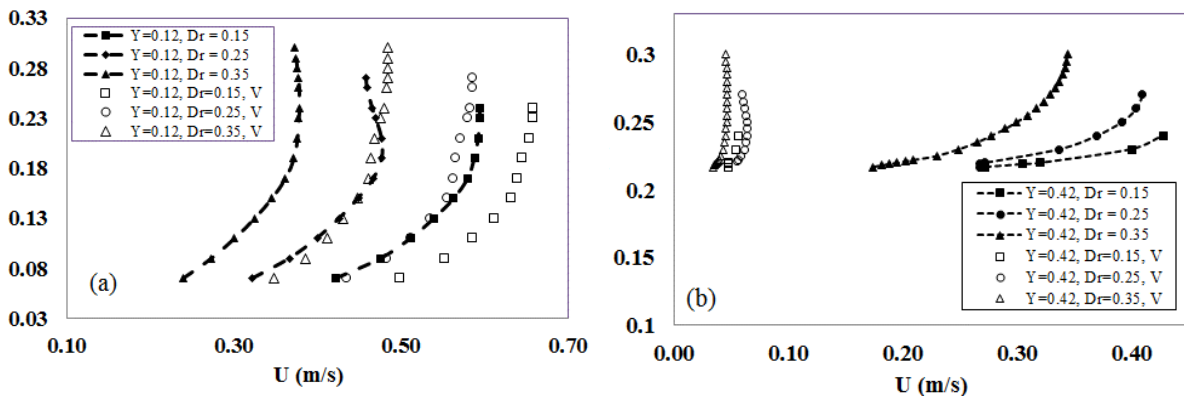


شکل ۱۳- پروفیل قائم سرعت در عمق‌های نسبی متفاوت در کانال اصلی و سیلابدشت در حالت (a) بدون پوشش گیاهی و (a') پوشش گیاهی

Fig. 13- Vertical velocity profile for different depth ratio at main channel and floodplain for (a) no vegetation, (a') vegetation

سیلابدشت در اثر پوشش گیاهی، افزایش سرعت در کانال اصلی به وجود آید. این پدیده در شکل ۱۴ (a) مشاهده می‌شود. مقدار افزایش متوسط عمقی سرعت در کانال اصلی به دلیل پوشش گیاهی برای عمق‌های نسبی ۰/۱۵، ۰/۲۵ و ۰/۳۵ به ترتیب ۱۲، ۲۵ و ۳۰ درصد بوده است.

پروفیل سرعت مذکور در کانال اصلی (شکل a) و سیلابدشت (شکل b) در دو حالت در شکل (۱۴) نشان داده شده است. مقدار کاهش متوسط عمقی سرعت در سیلابدشت به دلیل پوشش گیاهی نسبت به حالت بدون پوشش گیاهی برای عمق‌های نسبی ۰/۱۵، ۰/۲۵ و ۰/۳۵ به ترتیب ۸۵، ۸۲ و ۸۴ درصد بوده است. انتظار می‌رود با کاهش سرعت در



شکل ۱۴- پروفیل قائم سرعت برای عمق‌های نسبی متفاوت در دو حالت با پوشش گیاهی و بدون پوشش گیاهی در (a) کانال اصلی و (b) سیلابدشت

Fig. 14- Vertical velocity profile of two cases for different depth ratio at (a) main channel, and (b) floodplain

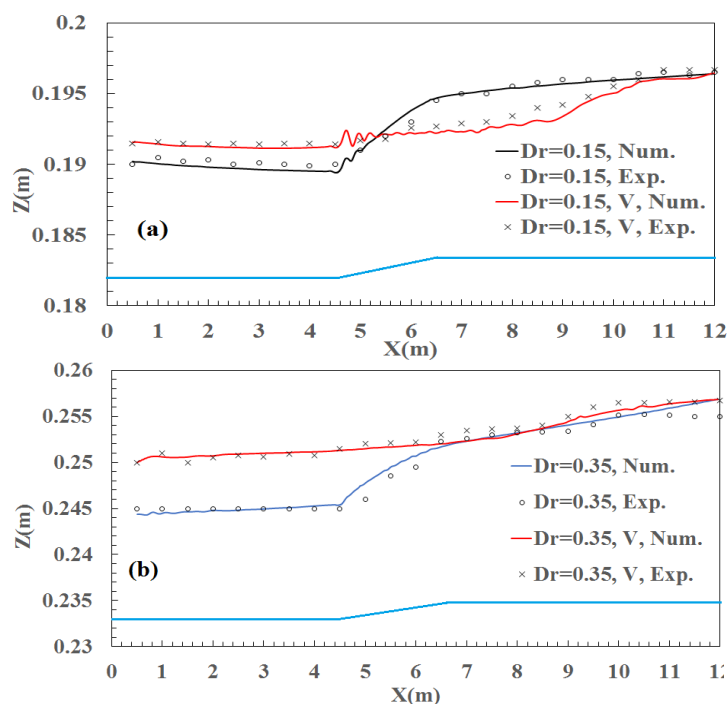
در مطالعات زنگ و همکاران (Zeng. et al., 2022) یک روش شبیه‌سازی گردابی بزرگ با مدل دیوار (WMLES) برای شبیه‌سازی جریان کانال باز مرکب با پوشش گیاهی سیلابدشت استفاده شده است. نتایج تحقیق نشان داده است با افزایش تراکم پوشش گیاهی، سرعت جریان در کانال اصلی،

در مقایسه با حالت بدون پوشش گیاهی، افزایش می‌یابد. در حالی که سرعت در سیلابدشت کاهش خواهد یافت. نتیجه تحقیق حاضر با نتیجه مطالعات زنگ و همکاران (Zeng. et al., 2022) همخوانی دارد.

بررسی تغییرات سطح آب

افزایش عمق جریان رخ داده است. بررسی کمی اثر سیلابدشت و پوشش گیاهی بر تغییرات عمق جریان نشان داد در عمق نسبی ۰/۱۵ در محدوده ابتدا تا انتهای ناحیه واگرایی، وجود سیلابدشت بدون پوشش گیاهی منجر به افزایش ۳/۷ درصد در عمق جریان در کانال اصلی شده است، اما وجود پوشش گیاهی در سیلابدشت مانع از افزایش سریع عمق جریان شده و افزایش عمق حدود ۰/۷ درصد در عمق جریان به صورت تدریجی تا فاصله حدود ۲ برابر طول ناحیه واگرایی رخ داده است و پس از آن ۱/۵ درصد افزایش عمق وجود دارد. در $Dr=0.35$ نیز حدود ۴/۵ درصد افزایش عمق جریان در کانال اصلی رخ داده است، اما با وجود پوشش گیاهی، به صورت تدریجی عمق جریان ۱/۷ درصد افزایش یافته است. در شکل (۱۵)، علاوه بر نتایج عددی، نتایج آزمایشگاهی صمدی رحیم و همکاران (Samadi Rahim et al., 2019) نیز نشان داده شده است. مدل عددی به خوبی توانسته است تغییرات عمق جریان را در حین عبور از کانال مستطیلی و ورود آن را به مقطع مرکب با پوشش گیاهی و بدون آن پیش بینی کند.

در خط مرکزی کانال اصلی ($y=0.12\text{ m}$)، تغییرات عمق جریان از ابتدا تا انتهای کانال در دو عمق نسبی ۰/۱۵ و ۰/۳۵ در شکل (۱۵) نشان داده شده است. در حالت نبود پوشش گیاهی، از ابتدا تا انتهای ناحیه واگرایی عمق جریان با شیب تند افزایش یافته است. دلیل این پدیده را می توان با تحلیل انرژی مخصوص یافت. در عمق نسبی ۰/۱۵، مقدار عدد فرود حدود ۰/۴ و جریان زیر بحرانی است. با افزایش تدریجی عرض مقطع در ناحیه واگرایی و کاهش دبی در واحد عرض، عمق بحرانی کاهش می یابد و منحنی انرژی مخصوص به سمت چپ حرکت می کند، از این رو در شاخه زیر بحرانی عمق جریان افزایش می یابد. در واقع، با افزایش عرض مقطع و کاهش سرعت جریان، انتظار افزایش عمق برای ثابت ماندن انرژی مخصوص نیز پدیده فوق را توجیه می کند. با افزایش عمق نسبی نیز این پدیده همچنان رخ داده است. اما با وجود پوشش گیاهی و جلوگیری از ورود جریان به ناحیه سیلابدشت، افزایش عمق جریان در ناحیه واگرایی بسیار تدریجی است و در پایین دست

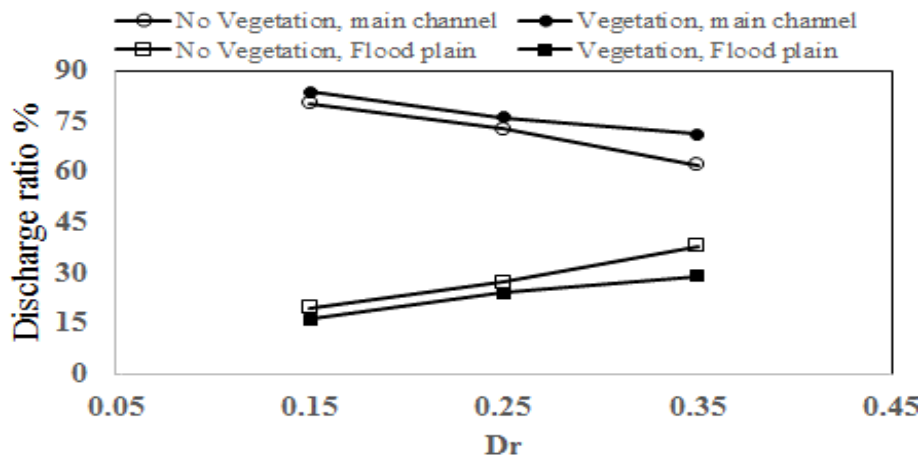


شکل ۱۵- تغییرات عمق جریان در خط مرکزی کانال اصلی در عمق های نسبی $Dr=0.15$ و $Dr=0.35$: (a) در دو حالت وجود پوشش گیاهی بدون آن

Fig. 15- Variation of flow depth at center line of main channel for depth ratio $Dr= 0.15$, and 0.35 , for two cases

بررسی تغییرات دبی عبوری از سیلابدشت و کانال اصلی

- به منظور بررسی اثر پوشش گیاهی و نیز عمق نسبی بر میزان دبی عبوری از کانال اصلی و سیلابدشت، در خروجی میدان جریان ($x=11.8$ m)، صفحه‌ای در کانال اصلی و سیلابدشت تعریف شد و در هر شش مدل شبیه‌سازی شده مقدار دبی عبوری با رابطه $Q=V*A$ محاسبه شد. در شکل (۱۶) مقدار دبی محاسبه شده نشان داده شده است. مطابق شکل (۱۶):
- دبی در کانال اصلی همواره بیشتر از دبی در سیلابدشت است؛
 - بیشترین مقدار دبی از کانال اصلی عبور می‌کند که در سیلابدشت آن پوشش گیاهی وجود دارد؛
 - کمترین مقدار دبی از سیلابدشت دارای پوشش گیاهی رد شده است؛
 - با افزایش عمق نسبی، مقدار دبی عبوری از سیلابدشت افزایش می‌یابد، دلیل آن مقاومت کمتر سیلابدشت در مقابل جریان با افزایش عمق نسبی است؛
 - در حالت بدون پوشش گیاهی، حدود ۸۰ درصد دبی از کانال اصلی و ۲۰ درصد آن از سیلابدشت عبور کرده و با افزایش عمق نسبی این درصدها به ۶۲ و ۳۸ درصد رسیده است. با وجود پوشش گیاهی، این دو نسبت به ترتیب یکی ۸۴ و ۱۶ و دیگری ۷۱ و ۲۹ درصد است؛
 - با افزایش عمق نسبی، مقدار دبی عبوری از کانال اصلی کاهش می‌یابد، دلیل آن بیشتر شدن دبی در سیلابدشت است.
- در مطالعه آزمایشگاهی صمدی رحیم و همکاران (Samadi Rahim et al., 2019) در یک آبراهه مرکب نامتقارن با سیلابدشت واگرای دارای پوشش گیاهی مشاهده شد که مقدار انتقال دبی جریان از طریق کانال اصلی در حضور پوشش گیاهی بسیار بیشتر است تا از طریق سیلابدشت. نتیجه به دست آمده از مدل عددی حاضر با نتیجه مطالعات آزمایشگاهی همخوانی دارد.



شکل ۱۶- تغییرات دبی در کانال اصلی و سیلابدشت در دو حالت وجود پوشش گیاهی و بدون آن با تغییر عمق نسبی
 Fig. 16- Variation of discharge in main channel and floodplain for two cases with changing the depth ratio

صحت‌سنجی مدل عددی و مقایسه با نتایج آزمایشگاهی نشان داد مدل عددی به خوبی توانسته است الگوی جریان را در مقطع مرکب با پوشش گیاهی و بدون آن پیش‌بینی کند. نتایج مدل‌سازی عددی نشان داد هسته پرسرعت جریان در وسط عرض کانال اصلی و در تراز پایین‌تر از سطح آزاد رخ داده است. مقدار کمی اختلاف سرعت متوسط عمقی در کانال اصلی

نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر به منظور بررسی تغییر عمق نسبی و پوشش گیاهی سیلابدشت بر مقدار انتقال جریان، میدان جریان در کانال مرکب نامتقارن دارای سیلابدشت واگرا در دو حالت با پوشش گیاهی و بدون آن در عمق‌های نسبی متفاوت، با استفاده از نرم‌افزار Flow3D شبیه‌سازی سه‌بعدی شده است.

و سیلابدشت در عمق‌های نسبی ۰/۱۵، ۰/۲۵ و ۰/۳۵ در حالت بدون پوشش گیاهی به ترتیب ۳۶، ۲۲ و ۲۰ درصد و با وجود پوشش گیاهی به ترتیب ۹۱، ۸۹ و ۹۰ درصد بوده است، یعنی با افزایش عمق نسبی، اختلاف سرعت متوسط عمقی در سیلابدشت و کانال اصلی کمتر شده است، اما در حالت پوشش گیاهی تغییر عمق نسبی منجر به اختلاف سرعت متوسط عمقی در سیلابدشت و کانال اصلی نشده است؛ بلکه اختلاف سرعت ناشی از وجود پوشش گیاهی است. تغییرات عمق جریان در خط مرکزی کانال اصلی از ابتدا تا انتهای کانال در دو عمق نسبی ۰/۱۵ و ۰/۳۵ نشان داد در حالت بدون پوشش گیاهی، از ابتدا تا انتهای ناحیه واگرایی عمق جریان با شیب تند افزایش یافته است. در واقع، با افزایش عرض مقطع و کاهش سرعت جریان، افزایش عمق برای ثابت ماندن انرژی مخصوص قابل توجه است. با افزایش عمق نسبی نیز این پدیده همچنان رخ داده است. وجود پوشش گیاهی و جلوگیری از ورود جریان به ناحیه سیلابدشت منجر به افزایش تدریجی عمق جریان در ناحیه واگرایی شده است. محاسبه دبی نشان داد دبی در سیلابدشت همواره کمتر از دبی در کانال اصلی است و کمترین مقدار دبی از سیلابدشت دارای پوشش گیاهی عبور کرده است. افزایش عمق نسبی منجر به افزایش مقدار

دبی عبوری از سیلابدشت و کمتر شدن دبی عبوری از کانال اصلی شده است.

مقایسه رفتار جریان در کانال مرکب با رفتار جریان در کانال ساده می‌توان به روشنی گفت که حضور جریان‌های ثانویه در محل صفحه برخورد کانال اصلی و سیلابدشت و همچنین زبری‌های موجود روی بستر سیلابدشت باعث ایجاد مقاومت اضافه شده است و در نتیجه در شرایط دبی برابر، جمع جریان در مقاطع مرکب بیشتر از جمع جریان در مقاطع ساده خواهد بود. به دلیل بیشتر بودن سطح مقطع جریان در کانال‌های مرکب، نسبت به کانال‌های ساده، ظرفیت انتقال دبی در مقاطع مرکب نسبت به ظرفیت انتقال دبی در مقاطع ساده بیشتر است.

وجود سیلابدشت منجر به کاهش دبی در واحد عرض می‌شود، از این رو منحنی انرژی مخصوص کانال مرکب در سمت چپ منحنی کانال ساده قرار می‌گیرد. در شرایط سیلابی که جریان فوق‌بحرانی است، در شاخه فوق‌بحرانی منحنی انرژی مخصوص، عمق جریان کاهش می‌یابد؛ بنابراین، در مقایسه کانال مرکب با کانال ساده، افزایش ظرفیت انتقال دبی از یک سو و کاهش عمق جریان از سوی دیگر به لحاظ حفظ پایداری سازه‌ها و امنیت ساکنان و تأسیسات مجاور آبراهه‌ها با اهمیت است.

مراجع

- Ahmadi Dehrashid, F., Yasi, M. & Heidari, M. (2023, a). Flow characteristics in a compound channel with double-layer vegetated floodplains: a numerical study. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 53(11), 2515-2531. doi: 10.22059/ijswr.2022.348361.669356
- Ahmadi Dehrashid, F., Heydari, M., Yasi, M. & khoshkonesh, A. (2023, b). Flow and Turbulence Characteristics in a Compound Channel with Partially Layered Vegetated Floodplains. *Iranian Journal of Irrigation & Drainage*, 17(3), 479-491.
- Dovlati Mehtaj, & M., Rezaei, B. (2021). Laboratory study of balance of forces and flow interaction between the main channel and floodplains in diagonal compound channel with sloping floodplains. *Ferdowsi Civil Engineering Journal*, 34 (2). pp. 87-102. (In Persian).
- Flow Science Inc., (2016). FLOW-3D V 11.2 User's Manual. Santa Fe, New Mexico.
- Hamidifar, H., Omid, M., H., & Keshavarzi, A. (2013). Mean Flow and Turbulence in Compound Channels with Vegetated Floodplains. *journal of Agricultural Engineering Research*, 14 (3), 51-66. (In Persian).
- Hamidifar, H., Omid, M., H., & Keshavarz, A. (2016). Kinetic energy and momentum correction coefficients in straight compound channels with vegetated floodplain. *Journal of hydrology*, 537. 10-17.

- Hosseini, M., (2004). Equations for discharge calculation in compound channels having homogeneous roughness. *Iranian journal of science and technology (B: Engineering)*, 28(8), 537-546.
- Huai, W.X., Gao, M. Zeng, Y.H. & Li., D. (2009). Two-dimensional analytical solution for compound channel flows with vegetated flood plain. *Applied mathematics and mechanics*. 30, 1121-1130
- Kang, H., & Choi, S.U. (2006). Turbulence modeling of compound open-channel flows with and without vegetation on the floodplain using the Reynolds stress model. *Adv. Water. Resource*. 29, 1650–1664.
- Kumar, A. Kumar Singh, P. & Kumar Khatua, K. (2016). Comparison of 2D and 3D modeling of converging and diverging floodplains. *21st International Conference on Hydraulics, Water Resources and Coastal Engineering (HYDRO 2016 International)*, Central Water & Power Research Station (CWPRS). Pune, India.
- Myers, W.R.C., Lyness, J. F., & Cassells, J. (2001). Influence of boundary roughness on velocity and discharge in compound river channels. *International journal of hydraulic research*. 39(3).
- Najafyan, S., Yonesi, H., Parsai, A. & Torabi-Poude, H. (2016). Physical and Numerical Modeling of Flow in Heterogeneous Roughness Non-Prismatic Compound Open Channel. *Irrigation and Drainage Structures Engineering Research*, 17(66), 87-104. doi: 10.22092/aridse.2016.106408. (In Persian).
- Proust, S., Fernands, J. N., Peltier, J. B., Riviere, N., & Cardoso, A. H. (2013). Turbulent non-uniform flows in straight compound open-channels. *Journal of hydraulic research*, 51(6).
- Rezaei, B., & Seif, M., M. (2022). Numerical study of flow in skewed compound channel using k-ε turbulence model. *Iranian journal of science and technology, transactions of civil engineering*. 46, 3919-3929.
- Rezaei, B., & Safarzade, A. (2016). Numerical modeling of flow field in prismatic compound channels with different floodplain widths.. *Journal of applied research in water and wastewater*. 6, 260-270.
- Samadi Rahim, A., Yonesi, H., Rahimi, H. R., Shahinejad, B., Torabi Poteh, H., & Hazi Mohammad Azamathulla. (2023). Effect of vegetation on flow hydraulics in compound open channels with non-prismatic floodplains. *AQUA - Water Infrastructure, Ecosystems and Society*, 72 (5): 781–797.
- Samadi Rahim, A., Younesi, H., Shahinejad, B., & Torabipour, H. (2019). Laboratory evaluation of the effect of floodplain vegetation on flow hydraulics in divergent compound channel. *Journal of Hydraulic*, 16(1), pp. 111-130. (In Persian).
- Shankar, B., & Kumar, K. (2018). Flow resistance in a compound channel with diverging and converging floodplains. *Journal of hydraulic engineering*, 144(8).
- Shokri, M., & Mehdipour, R. (2021). Numerical modeling of the effect of different opening angles of floodplains on shear stress distribution and fluid velocity in non-prismatic compound channels. *Irrigation and Drainage Journal of Iran*. 15 (2). pp. 270-280. (In Persian).
- Theoharris, K., & Panagiotis, P. (2016). Reynolds stress modelling of flow in compound channels with vegetated floodplains. *Journal of applied water engineering and research*. p. 1-11.
- Yonesi, H., Omid, M. H. & Ayyoub zadeh, S. A. (2015). The effect of floodplain roughness on hydraulics of flow in compound channels with non-prismatic floodplains. *Iranian Water Researches Journal*, 9(2), 63-72. (In Persian).
- Zeng, C., Bai, Y., Zhou, J., Qiu, F., Ding, S., Hu, Y. & Wang, L. (2022). Large Eddy Simulation of Compound Open Channel Flows with Floodplain Vegetation. *Water*, 14, 3951. <https://doi.org/10.3390/w1423395>.

Original Research**Numerical investigation of the effect of vegetation in divergent floodplain on the flow pattern in compound channel****F. Mahmoodi Monfared, M. Rostamabadi*, H. Younesi*****Corresponding Author:** Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Islamic Azad University, Buin Zahra Branch, Buin Zahra, Iran.**Received:** 24 August 2024, **Accepted:** 22 September 2024**Email:** Rostamabadi@iau.ac.ir**https://doi.org/** 10.22092/IDSER.2024.366730.1589**Extended Abstract****Introduction**

Compound channels are hydraulic sections consisting of the main channel and flood plains. In natural rivers, the formation of a compound cross-section is common because, during floods, a part of the river discharge is carried by the flood plains. In nature, flood plains are usually covered with vegetation that affects the flow transfer capacity in the flood plain and the main channel. Knowing the hydraulic flow conditions and the interaction of the main channel and the floodplain is necessary to protect human lives and facilities.

Many experimental and numerical studies have been carried out in compound channels with vegetation (Myers et al., 2001., Hosseini, 2004., Kang and Choi, 2006., Huai et al., 2009, Proust et al., 2013., Hamidifar et al., 2013., Yonesi et al., 2014., Theoharris and Panagiotis, 2016., Hamidifar et al., 2016., Kumar et al., 2016., Shankar and Kumar, 2018., Samadi Rahim et al., 2020., Dovlati and Rezaei, 2021., Shokri and Mehdipour, 2021., Zang et al., 2022., and Samadi Rahim et al., 2023). According to the review of previous studies, most of them have been done in straight compound channels, but the numerical study of asymmetric compound channels with divergent floodplains covered by vegetation has rarely been of interest. Despite the high accuracy of laboratory studies in investigating hydraulic phenomena, high costs, limited laboratory space, and scale effects have also inclined researchers to use numerical methods. Numerical methods can be very efficient for investigating the effects of different parameters on a phenomenon by spending less time and money, provided that the numerical model results have been validated.

The current research aim is to study the flow mechanism numerically in a diverging compound channel with vegetation and to investigate the relative depth change in the flow mechanism.

Methodology

For the purpose of this research, the 3D flow field in a compound channel with a divergent floodplain in two cases, with and without vegetation, at three relative depths (the ratio of the flow depth in the floodplain to the flow depth in the main channel) has been simulated. Flow3D was used and validated. Then, velocity contours, velocity profiles, flow depth, and discharge in the flood plain and the main channel for the two mentioned states were compared and analyzed.

Results and Discussion

Validation of the numerical model and comparison with the laboratory results showed that the numerical model was able to predict the flow pattern. The results showed that in both cases, by the increase in relative depth, the maximum velocity in the main channel decreased. In floodplains without vegetation, at the beginning of the divergence, the depth-averaged velocity is about 80% of the main channel one. And as it progresses towards the end of the divergence, this ratio gradually increases. The vegetation and its resistance

to the flow caused a decrease in this ratio of 30 to 60 percent. By increasing depth, vegetation creates more resistance to the flow, and the resistance vegetation effect dominated by the effect of relative depth. The amount of depth-averaged velocity reduction in floodplain due to vegetation compared to the condition without vegetation for the relative depths of 0.15, 0.25, and 0.35 was 85, 82 and 84%, respectively. Accordingly, the depth-averaged velocity increase in the main channel was 12, 25, and 30%. The investigation of the changes in the flow depth from the beginning to the end of the channel showed that for $Dr=0.15$, floodplain without vegetation have led to an increase of 3.7% in the flow depth in the main channel from the beginning to the end of the divergence area. The vegetation has prevented the rapid increase in flow depth, and an increase of about 0.7% occurred gradually up to a distance of about two times the length of the divergence area, and then there is a 1.5% increase in depth. At $Dr=0.35$, about 4.5% increase in flow depth has occurred in the main channel, but despite vegetation, the flow depth has gradually increased by 1.7%. Investigating the effect of vegetation and relative depth on the amount of flow passing through the main channel and floodplain showed that the flow in the main channel is always higher than the flow in the floodplain, and the highest amount of flow passes through the main channel in the case of vegetation. With the increase in relative depth, the amount of flow passing through the floodplain has increased while the amount of flow passing through the main channel has decreased. About 80% of the discharge has passed through the main channel and 20% through the floodplain. With the increase in relative depth, the flow through the floodplain has reached 38%. The vegetation has increased the flow through the main channel between 4 and 9 percent.

Conclusions

In this research, the flow field is simulated in an asymmetric compound channel with a diverging floodplain. The simulation is carried out at different relative depths for two cases, with vegetation and without vegetation, using Flow3D. Numerical modeling results showed that in both cases, with the increase in the relative depth, the velocity decreased. Also, the high-velocity core of the flow occurred in the center line of the main channel and below the free surface. The quantitative value of the depth-averaged velocity difference in the main channel and the flood plain in the relative depths of 0.15, 0.25, and 0.35 in the case of no vegetation is 36%, 22%, and 20%, respectively, and with vegetation is 91%, 89%, and 90%. That is, with the increase in relative depth, the difference in depth-averaged velocity in the floodplain and the main channel has decreased, but in the case of vegetation, relative depth changing has not led to depth-averaged velocity difference, and the difference is due to the presence of vegetation. By increasing the cross-section's width and decreasing the flow velocity, increasing the depth can be justified to keep the specific energy constant. This phenomenon continued to occur with increasing relative depth. The vegetation and preventing the flow from entering the floodplain has led to a gradual increase in flow depth at divergence region. The discharge in floodplain is always lower than that in the main channel.

Key words: Divergent Floodplain, Flow3D, Relative Depth, Vegetation