

Experimental Study of the Effect of non-Submerged Rigid Vegetation on Flow Force in Symmetrical Rectangular Compound Channel by Direct Measurement Method

FOAD MATURI¹, MEHDI BEHDARVANDI ASKAR^{1*}, MOHAMMAD ANSARI GHOJGHAR², EHSAN PARSI³

1. Department of Offshore Structures, Faculty of Marine Engineering, University of Marine Sciences and Technology, Khorramshahr, Iran.

2. Department of Irrigation and Reclamation Engineering, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran.

3. Arvand Water and Energy Consulting Engineers Company, Ahvaz, Iran.

(Received: Nov. 16, 2020- Revised: Dec. 31, 2020- Accepted: Jan. 18, 2021)

ABSTRACT

In this research, using direct measurement method, the flow pressure in the composite channel with vegetation has been measured. The vegetation used in this study was made of PVC. Five different diameters with values of 20, 25, 30, 40 and 50 mm, two longitudinal distances of 12 and 15 cm and two transverse distances of 6 and 8 cm according to the regular and irregular arrangement and the location of vegetation as the proposed variables were used in this study. For direct measurement of force, a special type of hydraulic flume called "knife edge hydraulic flume" was used. Based on the results of the experiment, it was found that with increasing vegetation diameter, the flow force increases, which is due to increasing the volume and reduction of the cross-sectional area of the vegetation. In addition, due to the effect of longitudinal and transverse distances of vegetation, it can be said by increasing these distances, the flow force rate showed a decreasing trend. This is due to the reduction of vegetation volume and the secondary flows caused by vegetation cover.

Keywords: Composite Channel, Direct Measurement Method, Flow Force, Knife Edge Flume, Vegetation.

بررسی آزمایشگاهی اثر پوشش گیاهی صلب غیر مستغرق بر انتقال اندازه حرکت در طول کانال مرکب به روش اندازه‌گیری مستقیم

فؤاد مطوری^۱، مهدی بهدارروندی عسکر^{۱*}، محمد انصاری قوجقار^۲، احسان پارسی^۳

۱. گروه سازه‌های دریایی، دانشکده مهندسی دریا، دانشگاه علوم و فنون دریایی، خرمشهر، ایران.
 ۲. گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران.
 ۳. شرکت مهندسی مشاور آب و انرژی اروند، اهواز، ایران.
- (تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۸/۲۶ - تاریخ بازنگری: ۱۳۹۹/۱۰/۱۱ - تاریخ تصویب: ۱۳۹۹/۱۰/۲۹)

چکیده

در این پژوهش با استفاده از روش اندازه‌گیری مستقیم، نیروی جریان در کانال مرکب با پوشش گیاهی سنجیده شده است. پوشش گیاهی مورد استفاده در این تحقیق از جنس PVC در نظر گرفته شد. پنج قطر متفاوت با مقادیر ۲۰، ۲۵، ۳۰، ۴۰ و ۵۰ میلی‌متر، دو فاصله طولی ۱۲ و ۱۵ سانتی‌متر و دو فاصله عرضی ۶ و ۸ سانتی‌متر با توجه به چیدمان‌های منظم و نامنظم و محل قرارگیری پوشش گیاهی به‌عنوان متغیرهای مورد بررسی در این پژوهش استفاده گردید. جهت اندازه‌گیری مستقیم نیرو از نوع خاصی از فلوم هیدرولیکی به نام فلوم هیدرولیکی لبه چاقویی استفاده شد. بر اساس نتایج حاصل از آزمایش‌ها مشخص گردید با افزایش قطر پوشش گیاهی مقدار نیروی جریان بیشتر شده که این امر به علت افزایش حجم پوشش گیاهی و کاهش سطح مقطع عرضی جریان بوده است. به‌علاوه در ارتباط با اثر فواصل طولی و عرضی پوشش گیاهی می‌توان گفت با افزایش این فواصل مقدار نیروی جریان روندی کاهشی داشت که علت این امر را می‌توان کاهش حجم پوشش گیاهی و جریان‌های ثانویه ناشی از آن را عنوان نمود.

واژه‌های کلیدی: پوشش گیاهی، روش اندازه‌گیری مستقیم، کانال مرکب، فلوم با قسمت میانی متحرک، نیروی جریان.

مقدمه

مقطع مرکب به مقطعی گفته می‌شود که سطح آن دارای چند زیر مقطع با صفحات متفاوت جریان نظیر زبری، عمق و غیره باشد. یک رودخانه طبیعی هنگام وقوع سیل از روی زمین‌های سواحل اطراف خود عبور می‌کند که این امر مثالی ساده و روشن از کانال‌های مرکب است (Behdarvandi askar et al., 2013). اهمیت جریان در کانال‌های مرکب به این دلیل است که اختلاف خصوصیات جریان در زیر مقاطع این کانال‌ها، سبب ایجاد جریان‌های ثانویه در فصل مشترک بین سیلاب‌دشت و کانال اصلی می‌گردد. علاوه بر این امر قابلیت تعمیم نتایج این نوع کانال به کانال‌های طبیعی اهمیت این نوع مقاطع را دوچندان نموده است.

پوشش گیاهی در بسیاری از جریان‌ها وجود دارد، این پوشش موجب تغییر ساختار جریان، افزایش مقاومت کلی جریان و کاهش دبی سیلاب می‌شود (Mohsen et al., 2011). علاوه بر این وجود پوشش گیاهی در کانال اصلی و سیلاب‌دشت‌ها سبب پیچیدگی شرایط جریان می‌شود، به همین علت مطالعات زیادی بر این پدیده انجام شده است (Hamidifar and Omid, 2013).

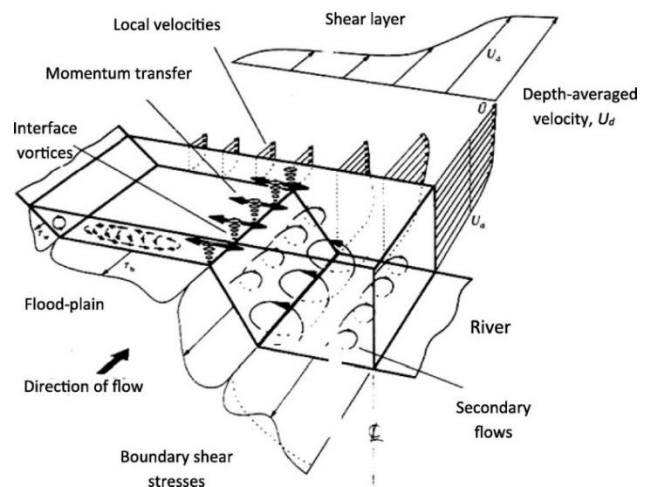
به‌طورمعمول، حضور پوشش گیاهی در دشت سیلابی توسط مهندسی رودخانه، به‌عنوان یک مشکل که مانع انتقال حداکثر ظرفیت جریان در کانال می‌گردد، محسوب می‌شود. همچنین وجود پوشش گیاهی در سواحل، موجب اضافه شدن پیچیدگی تجزیه و تحلیل جریان در کانال مرکب می‌شود. با این حال، نقش زیست‌محیطی پوشش گیاهی ساحلی بسیار شناخته شده است تا حدی که امروزه مهندسان رودخانه به حفاظت از پوشش گیاهی موجود در رودخانه‌ها و سیلاب‌دشت‌ها تشویق می‌شوند (Terrier, 2010). در کانال‌های مرکب، مانند کانال‌های ساده و مستقیم، جریان ثانویه توسط تلاطم ناهمسان‌گرد تولید و ویژگی‌های آنان توسط عوامل بسیاری مانند هندسه مقطع کانال و نسبت ابعاد، عمق نسبی و فعالیت آشفستگی تحت تأثیر قرار می‌گیرد (Shinio and Knight, 1991). شکل (۱) ساختار جریان در کانال‌های مرکب، همچنین جریان‌های ثانویه دایره‌ای که در جهت طولی کانال اصلی دیده می‌شود را نشان می‌دهد. این جریان‌های ثانویه دایره‌ای به تغییر شتاب بین کانال اصلی و سیلاب‌دشت‌ها کمک می‌کنند (Shiono and Knight, 1991). تنش برشی مرزی در بستر کانال اصلی معمولاً با مقداری کوچک‌تر از $\rho g H S_0$ و با مقدار

(Askar, 2019) که در آن، تنش برشی در حضور پوشش گیاهی صلب غیرمستغرق در کانال مستطیلی اندازه‌گیری شد، با توجه به اصلاحات لازم برای کاربردی کردن روش اندازه‌گیری مستقیم در کانال‌های مرکب، نیروی جریان اندازه‌گیری شد. اندازه‌گیری نیروی جریان معمولاً به وسیله روش‌های غیرمستقیم مانند روش‌های انرژی که وابسته به سرعت هستند، انجام می‌گیرد. در زمان حضور زبری‌های درشت اندازه‌گیری سرعت جریان عموماً امکان‌پذیر نیست و یا معمولاً دستگاه‌های سرعت‌سنج خود به‌عنوان مانع اضافی درون جریان عمل کرده و محاسبه نیرو را دچار خطا می‌نمایند. در این تحقیق سعی شد با استفاده از روش اندازه‌گیری مستقیم نیروی جریان برای پوشش گیاهی که به‌صورت تقریباً فشرده در کانال مرکب تعبیه شده است، اندازه‌گیری شود (Barbosa, 2010). در روش اندازه‌گیری مستقیم مقدار نیروی جریان با نوع خاصی از فلوم هیدرولیکی، به نام فلوم لبه چاقویی، اندازه‌گیری با استفاده از لودسل و کالیبراسیون آن بوسیله وزنه انجام می‌شود. صحت‌آزمایی این روش توسط Behdarvandi askar *et al.* (2013) با مقایسه روش‌های مختلف انرژی و روش اندازه‌گیری مستقیم صورت پذیرفت. White and Nepf (2007) با استفاده از سرعت‌سنج داپلر لیزری در یک کانال تک پوشش گیاهی با ۶ میلی‌متر شاخه‌چوبی که به صورت نامتقارن قرار داده شده بودند، اندازه‌گیری‌های خود را انجام دادند. این میله‌ها عرض ۴۰ سانتی‌متری از عرض ۱۲۰ سانتی‌متر فلوم را تحت پوشش قرار داده بودند. Ikeda and McEwan, (2009) روش‌های مختلف مدل‌سازی را که توانایی مدل‌سازی جریان کانال مرکب را داشته باشد، موردبررسی قرار داده‌اند. روش Shinio and Knight (SKM) به‌عنوان یک روش قوی شناخته شده است که می‌تواند برای پیش‌بینی توزیع جانبی سرعت متوسط عمقی و تنش برشی بستر در کانال مرکب مستقیم استفاده گردد. Rameshwaran and Shiono, (2007) مدل SKM را اصلاح نمودند. این موضوع با استفاده از ترکیب نیروی درگ در معادلات انجام گرفت. در این مدل با فرض جریان آشفتنه یکنواخت، معادله اندازه حرکت قسمتی از جریان طولی و ترکیب آن با معادله پیوستگی رابطه ۱ حاصل شد.

$$\rho \left[\frac{\partial UV}{\partial y} + \frac{\partial UW}{\partial z} \right] = \rho g S_0 + \frac{\partial(-\rho \overline{uv})}{\partial y} + \frac{\partial(-\rho \overline{uw})}{\partial z} \quad (\text{رابطه ۱})$$

در رابطه ۱، x, y, z جهت جریان، U, V, W سرعت‌های متوسط، u, v, w سرعت‌های ناشی از آشفتگی، ρ چگالی آب، g شتاب گرانشی و S_0 شیب بستر است. جهت بررسی و اثر دهی ضریب درگ در معادلات اندازه حرکت بر اساس اصلاح مدل

بزرگ‌تر در سیلاب‌دشت مشاهده می‌شود (Tominaga and Nezu, 1991).



شکل ۱- ساختار جریان در یک کانال مرکب (Shinio and Knight, 1991)

پوشش گیاهی در دشت سیلابی رودخانه معمولاً به پوشش گیاهی سفت و سخت (معمولاً درختان) و پوشش گیاهی انعطاف‌پذیر مانند چمن طبقه‌بندی می‌شود. ساقه گیاه انعطاف‌پذیر می‌تواند با جریان تغییر شکل داده شود، درحالی‌که ساقه‌های گیاهی سفت و سخت در حالت اصلی خود در جریان باقی می‌مانند (Terrier, 2010). Liu *et al.* (2016a, 2016b) روشی را برای ارزیابی دبی در کانال مرکب پیچان ارائه دادند. آن‌ها همچنین در این سال ویژگی‌های جریان در کانال مرکب پیچان را تحت اثر سیلاب‌دشت پوشیده با چمن مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که وجود چمن در سیلاب‌دشت روی انتقال کانال تأثیر قابل توجهی دارد و میزان دبی عبوری آن را نسبت به حالت کانال صاف ۳۰ درصد کاهش می‌دهد. Vojoudi Mehrabani (2020) ساختار جریان در آبراهه غیرمنشوری با سیلاب‌دشت‌های همگرا و پوشش گیاهی مستغرق را مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که به ازای عمق نسبی بیشتر و با افزایش زاویه همگرایی، سیلاب‌دشت‌ها در مقطع میانی نسبت به مقطع ابتدایی، تمایل کمتری به مشارکت در گذردهی دبی دارند. بیشینه سرعت جریان که در محور میانی آبراهه اصلی رخ می‌دهد، با افزایش عمق نسبی و گسترش جریان‌های ثانویه، به سمت میانه آبراهه جابه‌جا می‌شود. با افزایش زاویه همگرایی میزان زبری در آبراهه اصلی و سیلاب‌دشت افزایش می‌یابد. توزیع میانگین انرژی جنبشی جریان نشان می‌دهد که با افزایش عمق نسبی، میزان آن در مقطع‌های میانی، در هر دو زاویه همگرایی کاهش می‌یابد. در این پژوهش با استفاده از روش ارائه شده توسط (Maturi and Behdarvandi)

SKM به ازای نیروی درگ وارده بر حجم سیال از پوشش گیاهی رابطه زیر ارائه گردید:

$$F_i = \frac{1}{2} \rho U_a^2 (C_D S_f A_p)_i \quad (\text{رابطه ۲})$$

در رابطه ۲، C_D ضریب درگ، S_f شیب خط انرژی، A_p مساحت تصویر پوشش گیاهی در واحد حجم و F_i نیروی درگ ناشی از پوشش گیاهی بر حجم سیال است. Sun and Shiono (2009) اثر پوشش گیاهی استوانه‌ای در سیلاب‌دشت‌های یک کانال مرکب دوزنقه‌ای را در فلوم آزمایشگاهی مورد بررسی قرار دادند و به این نتیجه رسیدند که این پوشش اثر قابل توجهی بر مشخصات جریان دارد. همچنین آن‌ها در اظهارنظری مقدار نسبت فاصله ($\frac{L}{D}$) (که در آن L : فواصل پوشش‌ها و D : قطر این پوشش‌ها) را ۱۲ تا ۱۶ عنوان کردند. در تحقیقی دیگر Terrier (2010) با انجام پژوهش در همان فلوم با پوشش گیاهی شبیه به علف هرز به این نتیجه رسیدند که این نوع پوشش، باعث افزایش دانسیته پوشش گیاهی شده و دبی جریان را کاهش می‌دهد. آن‌ها مشاهده کردند که تنش برشی مرزی از سرعت متوسط عمقی پیروی می‌کند. همچنین مقادیر نسبت فاصله را مقداری بین ۸ تا ۱۶ عنوان کردند. Ebrahimi *et al.* (2008) با انجام آزمایشاتی در کانال با شیب کم به بررسی ضریب زبری مانینگ و سرعت برشی و اثرات آن‌ها بر سرعت جریان در حضور پوشش گیاهی مستغرق پرداخت و به این نتیجه رسیدند که زبری مانینگ و سرعت برشی حساسیت زیادی در اعداد فرود پایین دارند. Fathi-Moghadam (2011) *et al.* در مطالعات خود، تغییر مقدار زبری مانینگ با شرایط جریان و پوشش گیاهی برای پوشش گیاهی غوطه‌ور در بستر رودخانه‌ها، سواحل و دشت‌های سیلاب را بررسی کردند. Fernandes (2013) تمامی نتایج آزمایشات قبلی را مورد تحلیل و بررسی قرار داد. وی نتایج مربوط به سرعت‌ها، تنش‌های رینالدزی، شدت‌های آشفتگی و تنش‌های برشی مرزی در اعماق نسبی متفاوت را به دست آورد و پس از بررسی‌های متفاوت به این نتیجه رسید که تنش برشی مرزی یک کاهش در کانال اصلی و یک افزایش در سیلاب‌دشت در نزدیکی لبه فصل مشترک در سیلاب‌دشت‌های زبر دارد که این امر تأییدی بر اثر معنی‌دار قدرت تنش‌های برشی رینالدزی در نزدیکی فصل مشترک است. Arman and Fathi-Moghadam (2012) تغییرات تنش برشی را در مقطع مرکب مستطیلی مورد بررسی قرار دادند. نتایج پژوهش آن‌ها نشان داد با افزایش عمق جریان میزان تنش برشی افزایش می‌یابد. همچنین نتایج این تحقیق نشان داد با افزایش نسبت شکل، میزان تنش برشی به صورت معنی‌داری افزایش می‌یابد. Lashkar-Ara and Fathi-Moghadam (2014) تنش برشی را به

روش مستقیم در کانال‌های مستطیلی مورد بررسی قرار دادند. در این تحقیق مقایسه نتایج حاصل از اندازه‌گیری تنش برشی به روش مستقیم و غیرمستقیم به ترتیب دارای حداکثر ۴ درصد و ۸ درصد خطا نسبت به نتایج حاصل از معادله تئوریک می‌باشد. هدف از انجام این پژوهش اندازه‌گیری مستقیم اندازه حرکت، در غالب نیروی جریان در زمان حضور پوشش گیاهی است. در روش‌های غیر مستقیم اندازه‌گیری نیرو، امکان اندازه‌گیری مستقیم این پارامتر وجود ندارد. به همین علت باید بعد از محاسبه سرعت و تبدیل این پارامتر به تنش برشی توسط روابط انرژی، نیروی جریان محاسبه شود که این محاسبات همراه با خطای زیاد می‌باشد. علاوه بر این، جهت اندازه‌گیری سرعت به روش غیر مستقیم باید جسمی خارجی در جریان آب وارد شود که طبیعتاً بر هیدرولیک جریان تأثیر گذار خواهد بود. در این تحقیق با استفاده از تکنیک جذب ممنتوم که مبتنی بر استفاده از فلوم لبه چاقویی می‌باشد، کوشش گردیده است نیروی وارده به کانال مرکب و پوشش گیاهی درون آن بطور مستقیم و بدون ورود جسم خارجی به جریان اندازه‌گیری گردد. نوآوری این تحقیق در استفاده از تکنیک جذب ممنتوم و فلوم لبه چاقویی در اندازه‌گیری مستقیم نیروی جریان می‌باشد. این روش پایه جهت اندازه‌گیری نیرو بدون ورود جسم خارجی به جریان و بدون استفاده از روابط سرعت و انرژی است. در حقیقت در این روش نیرو به طور مستقیم اندازه‌گیری می‌شود. این نیرو در پاره‌ای از موارد که در جریان مانعی وجود نداشته باشد (مثل پوشش گیاهی) تنش برشی می‌باشد. اما در مواردی که پوشش گیاهی وجود داشته باشد نیروها مجموع نیروی درگ و تنش برشی است. اندازه‌گیری نیرو به این روش می‌تواند مبنای اندازه‌گیری‌ها در آینده باشد. به‌طور مثال در بحث حفاظت از سواحل رودخانه‌ها که از دستک‌های کناره استفاده می‌شود، می‌توان با استفاده از این روش نیروی وارد بر جریان و تغییرات ممنتوم را محاسبه کرد.

مواد و روش‌ها

در این تحقیق، با استفاده از مدل‌سازی فیزیکی اثر پوشش گیاهی با تغییر در قطر، فواصل طولی و عرضی، چیدمان این پوشش بررسی شد. این امر با استفاده از ۱۲۱ آزمایش متفاوت با در نظر گرفتن متغیرهای عنوان شده در فلوم هیدرولیکی لبه چاقویی انجام گردید. پوشش گیاهی صلب مورد استفاده در این پژوهش از جنس PVC بود که در طول‌های ۴۰ سانتی‌متری (جهت عدم استغراق با توجه به عمق ۲۵ سانتی‌متری جریان) در محدوده یک متری حجم کنترل یا همان قسمت لبه چاقویی مستقر شدند. کلیه آزمایش‌ها در فلوم به طول ۱۴ متر، عرض ۱/۰۷ متر و ارتفاع

با مقادیر ۱۲ و ۱۵ سانتی‌متر و دو فاصله عرضی با مقادیر ۶ و ۸ سانتی‌متر جهت انجام آزمایش‌ها در این تحقیق انتخاب گردید. علاوه بر این موارد قرارگیری پوشش گیاهی در کانال اصلی، دشت سیلابی و قرارگیری هم‌زمان در کانال اصلی، دشت سیلابی به همراه یک آزمایش بدون پوشش گیاهی مجموعاً ۱۲۱ آزمایش این تحقیق را تشکیل می‌دهند. کانال مرکب مورد استفاده در این تحقیق با مشخصات نشان داده شده در شکل (۳)، از جنس پلکسی‌گلاس در فلوم ساخته شد.

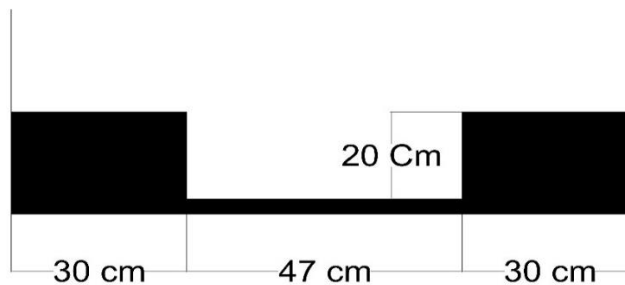
در شکل (۴) پلان قرارگیری پوشش گیاهی در مقابل جریان در دو حالت منظم و نامنظم ارائه شده است. در شکل (۵) نمایش قرارگیری پوشش گیاهی در کانال اصلی و دشت سیلابی نشان داده شده است.

۱/۰۵ متر با شیب بستر ۳-۱۰ انجام گردید. گردش جریان و تأمین دبی با استفاده از مخازن بالادست و پائین‌دست با ظرفیت جمعاً ۱۵۰۰۰۰ لیتر و پمپ ۴ اینچ با دبی مناسب جهت ایجاد گردش جریان در فلوم، بوده است. برای اندازه‌گیری نیرو به روش مستقیم، از نوع خاصی از فلوم هیدرولیکی به نام فلوم لبه چاقویی استفاده گردید که در شکل (۲) قسمت لبه چاقویی نمایش داده شده است. در این تحقیق قطر، فواصل و چیدمان پوشش گیاهی به‌عنوان متغیرهای اصلی در نظر گرفته شده‌اند. پوشش گیاهی موردنظر با توجه به صلب بودن، از لوله پولیکا با طول‌های ۴۰ سانتی‌متری به‌منظور عدم استغراق در جریان انتخاب شده و به طول ۱ متر در محل لبه چاقویی با توجه به فواصل طولی و عرضی و همچنین به صورت منظم و نامنظم چیده شدند. پنج قطر لوله پولیکا به قطرهای ۲۰، ۲۵، ۳۰، ۴۰ و ۵۰ میلی‌متر و تعداد دو فاصله طولی

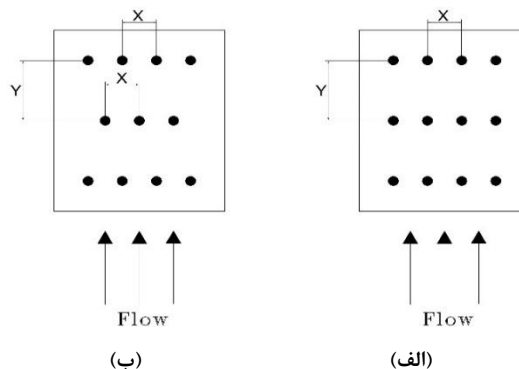
محل نصب لودسل



شکل ۲- نمای قسمت لبه چاقویی و اتصال آن به بالادست و پائین‌دست فلوم



شکل ۳- شماتیک کانال مرکب ساخته شده در این تحقیق



شکل ۴- شماتیک پوشش گیاهی (الف) منظم (ب) نامنظم



شکل ۵- استقرار پوشش گیاهی در کانال اصلی و سیلاب دشت

جریان با دبی، بار کل می‌باشد. حاصل تفریق بار کل و بار مرده، نیروی جریان و پارامتر اصلی این تحقیق است.

$$\frac{S_{m_i}}{m_i \times 9.81} = \frac{S_0}{F_{m_i}} \quad (\text{رابطه ۳})$$

با توجه به فرارگیری سرریز مثلثی با زاویه ۹۰ درجه در انتهای فلوم و با استفاده از رابطه دبی در سرریز مثلثی (رابطه ۴)، با توجه به عمق ۱۵ سانتی‌متری جریان عبوری از سرریز H_d (لبه سرریز از کف فلوم ۱۰ سانتی‌متر بالاتر است) میزان دبی ۲۰/۸۷ لیتر بر ثانیه محاسبه گردید.

$$Q = \frac{8}{15} \sqrt{2g} C_{d_e} (H_d + K_H)^{2.5} \quad (\text{رابطه ۴})$$

در رابطه ۵ مقدار K_H برابر با ۰/۰۰۰۸۲ و مقدار C_{d_e} برابر با ۰/۵۷۸ است (حسینی و همکاران، ۱۳۹۳). عدد فرود آزمایش‌ها برای تعیین نوع جریان، با استفاده از مشخصه‌های هیدرولیکی کانال و با استفاده از رابطه ۵ محاسبه شد. در این رابطه V سرعت متوسط، D عمق هیدرولیکی و g شتاب گرانش هستند.

$$F_r = \frac{V}{\sqrt{gD}} \quad (\text{رابطه ۵})$$

عدد فرود محاسبه شده برابر با ۰/۱۲۱ بوده و کمتر از ۱ است که نشان‌دهنده جریان زیربحرانی است. در شکل (۶) نمایی از نمایشگر لودسل، محل نصب لودسل در قسمت لبه چاقویی ارائه شده است. بر اساس تئوری پی باکینگهام، در صورتی که دانسیته، تنش برشی و قطر پوشش گیاهی به‌عنوان پارامترهای تکراری موردنظر قرار گیرند گروه‌های بی‌بعد به‌دست آمده به‌صورت رابطه ۶ خواهند بود.

$$f(F, V, D, g, \rho, \mu, S_0) = 0 \quad (\text{رابطه ۶})$$

نتایج آنالیز ابعادی به صورت رابطه ۷ ارائه می‌گردد.

$$f\left(\frac{F}{\rho V^2 D^2}, \frac{gD}{V^2}, \frac{\mu}{\rho V D}, S_0\right) = 0 \quad (\text{رابطه ۷})$$

در رابطه (۷) پارامترهای بیان شده به ترتیب بیانگر نیرو، عدد فرود، عدد رینولدز و شیب بستر کانال می‌باشند.

جهت سهولت در شناسایی هر آزمایش و داده‌های مربوط به آن از کدگذاری بر اساس قطر پوشش گیاهی، فاصله عرضی، فاصله طولی، محل قرارگیری و چیدمان پوشش گیاهی استفاده گردید. بدین‌صورت که نماد قطر D ، نماد فاصله عرضی X ، نماد فاصله طولی Y ، نمادهای محل قرارگیری به صورت: FP برای دشت سیلابی، MC برای کانال اصلی و B برای قرار گرفتن در دشت سیلابی و کانال اصلی به‌صورت هم‌زمان، نمادهای چیدمان به‌صورت: O برای چیدمان منظم و NO برای چیدمان نامنظم است. برای مثال:

D30-X6-Y15-MC-O

آزمایش مربوط به کد بیان شده عبارت است از، قطر ۳۰ میلی‌متر، فاصله عرضی ۶ سانتی‌متر، فاصله طولی ۱۵ سانتی‌متر، پوشش در کانال اصلی و چیدمان منظم. جهت اندازه‌گیری میزان نیرو و اندازه حرکت، ابتدا نیاز به انجام کالیبراسیون با استفاده از وزنه بود. این کالیبراسیون بدین‌صورت انجام شد که در مرحله اول، دریچه پائین‌دست فلوم بسته شده و عمق جریان به مقدار ۲۵ سانتی‌متر رسانده شد، سپس عدد نمایشگر لودسل با توجه به اندازه بدون وزنه و قرار دادن وزنه‌ها سه‌بار برداشت شد. سپس جهت تنظیم جریان و دبی دریچه پائین‌دست بازگردید و جریان با دبی موردنظر برقرار گردید. در این حالت نیز سه برداشت از لودسل انجام پذیرفت. با استفاده از تناسب و میانگین‌گیری مقدار نیروی هر قسمت محاسبه می‌شود. در رابطه ۳ نحوه استفاده از تناسب با توجه به وزن وزنه ارائه شده است. در رابطه ۳، S_{m_i} ضریب نشانگر لودسل با وزنه، m_i وزن وزنه، S_0 ضریب نشانگر لودسل بدون وزنه و F_{m_i} نیروی جریان با وزنه قرار داده شده، است. برای هر دو وزنه قرار داده شده، در دو حالت جریان ساکن و جریان با دبی موردنظر مقادیر نیرو محاسبه گردید. از این مقادیر به‌دست‌آمده برای جریان ساکن و جریان با دبی موردنظر، به‌صورت جدا میانگین گرفته شد. مقدار نیروی حاصل از برداشت‌های جریان بدون دبی بار مرده و مقدار نیروی به‌دست‌آمده در حالت

نتایج و بحث

در این بخش نتایج حاصل از آزمایش‌ها در غالب نمودارها جهت مقایسه نیروی جریان (اندازه حرکت) در حالت‌های مختلف ارائه شده است. ابتدا در جدول (۱) خلاصه نتایج بدست آمده از مدل فیزیکی بیان گردیده است و سپس در سه نمودار کلیه حالت‌های موجود به تفکیک شرایط هر آزمایش برحسب قطر پوشش گیاهی، تغییرات نیروی جریان نشان داده شده است (شکل‌های ۷ تا ۹).



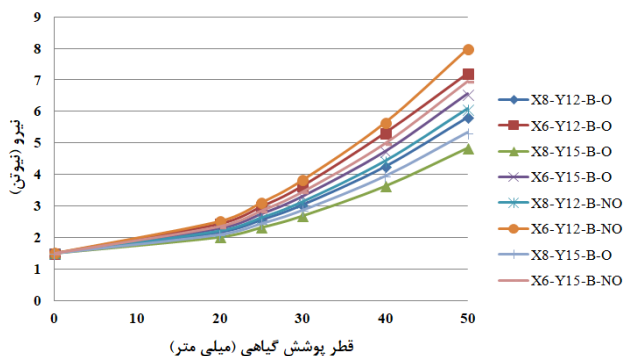
شکل ۶- محل قرارگیری لودسل و نشانگر آن در کنار قسمت لبه چاقویی

جدول ۱- خلاصه داده‌های اندازه‌گیری شده

N	Experiment Code	Fi (N)	N	Experiment Code	Fi (N)	N	Experiment Code	Fi (N)
0	No Vegetation	1.512	41	D40-X8-Y15-MC-O	2.560	82	D30-X6-Y12-FP-NO	2.289
1	D20-X8-Y12-FP-O	1.666	42	D40-X8-Y15-B-O	3.859	83	D30-X6-Y12-MC-NO	2.546
2	D20-X8-Y12-MC-O	1.793	43	D50-X8-Y15-FP-O	2.492	84	D30-X6-Y12-B-NO	3.917
3	D20-X8-Y12-B-O	2.172	44	D50-X8-Y15-MC-O	3.169	85	D40-X6-Y12-FP-NO	2.921
4	D25-X8-Y12-FP-O	1.773	45	D50-X8-Y15-B-O	5.200	86	D40-X6-Y12-MC-NO	3.377
5	D25-X8-Y12-MC-O	1.970	46	D20-X6-Y15-FP-O	1.740	87	D40-X6-Y12-B-NO	5.814
6	D25-X8-Y12-B-O	2.562	47	D20-X6-Y15-MC-O	1.861	88	D50-X6-Y12-FP-NO	3.733
7	D30-X8-Y12-FP-O	1.903	48	D20-X6-Y15-B-O	2.301	89	D50-X6-Y12-MC-NO	4.447
8	D30-X8-Y12-MC-O	2.187	49	D25-X6-Y15-FP-O	1.888	90	D50-X6-Y12-B-NO	8.254
9	D30-X8-Y12-B-O	3.040	50	D25-X6-Y15-MC-O	2.078	91	D20-X8-Y15-FP-NO	1.693
10	D40-X8-Y12-FP-O	2.235	51	D25-X6-Y15-B-O	2.765	92	D20-X8-Y15-MC-NO	1.806
11	D40-X8-Y12-MC-O	2.740	52	D30-X6-Y15-FP-O	2.069	93	D20-X8-Y15-B-NO	2.171
12	D40-X8-Y12-B-O	4.256	53	D30-X6-Y15-MC-O	2.342	94	D25-X8-Y15-FP-NO	1.815
13	D50-X8-Y12-FP-O	2.661	54	D30-X6-Y15-B-O	3.332	95	D25-X8-Y15-MC-NO	1.991
14	D50-X8-Y12-MC-O	3.451	55	D40-X6-Y15-FP-O	2.529	96	D25-X8-Y15-B-NO	2.562
15	D50-X8-Y12-B-O	5.820	56	D40-X6-Y15-MC-O	3.016	97	D30-X8-Y15-FP-NO	1.964
16	D20-X6-Y12-FP-O	1.784	57	D40-X6-Y15-B-O	4.775	98	D30-X8-Y15-MC-NO	2.217
17	D20-X6-Y12-MC-O	1.926	58	D50-X6-Y15-FP-O	3.149	99	D30-X8-Y15-B-NO	3.039
18	D20-X6-Y12-B-O	2.439	59	D50-X6-Y15-MC-O	3.905	100	D40-X8-Y15-FP-NO	2.343
19	D25-X6-Y12-FP-O	1.956	60	D50-X6-Y15-B-O	6.630	101	D40-X8-Y15-MC-NO	2.793
20	D25-X6-Y12-MC-O	2.178	61	D20-X8-Y12-FP-NO	1.737	102	D40-X8-Y15-B-NO	4.255
21	D25-X6-Y12-B-O	2.980	62	D20-X8-Y12-MC-NO	1.867	103	D50-X8-Y15-FP-NO	2.830
22	D30-X6-Y12-FP-O	2.167	63	D20-X8-Y12-B-NO	2.305	104	D50-X8-Y15-MC-NO	3.533
23	D30-X6-Y12-MC-O	2.487	64	D25-X8-Y12-FP-NO	1.883	105	D50-X8-Y15-B-NO	5.817
24	D30-X6-Y12-B-O	3.641	65	D25-X8-Y12-MC-NO	2.086	106	D20-X6-Y15-FP-NO	1.780
25	D40-X6-Y12-FP-O	2.705	66	D25-X8-Y12-B-NO	2.771	107	D20-X6-Y15-MC-NO	1.879
26	D40-X6-Y12-MC-O	3.272	67	D30-X8-Y12-FP-NO	2.061	108	D20-X6-Y15-B-NO	2.390
27	D40-X6-Y12-B-O	5.324	68	D30-X8-Y12-MC-NO	2.354	109	D25-X6-Y15-FP-NO	1.950
28	D50-X6-Y12-FP-O	3.427	69	D30-X8-Y12-B-NO	3.341	110	D25-X6-Y15-MC-NO	2.105
29	D50-X6-Y12-MC-O	4.310	70	D40-X8-Y12-FP-NO	2.516	111	D25-X6-Y15-B-NO	2.904
30	D50-X6-Y12-B-O	7.488	71	D40-X8-Y12-MC-NO	3.036	112	D30-X6-Y15-FP-NO	2.159
31	D20-X8-Y15-FP-O	1.639	72	D40-X8-Y12-B-NO	4.791	113	D30-X6-Y15-MC-NO	2.381
32	D20-X8-Y15-MC-O	1.747	73	D50-X8-Y12-FP-NO	3.101	114	D30-X6-Y15-B-NO	3.533
33	D20-X8-Y15-B-O	2.072	74	D50-X8-Y12-MC-NO	3.914	115	D40-X6-Y15-FP-NO	2.690
34	D25-X8-Y15-FP-O	1.730	75	D50-X8-Y12-B-NO	6.655	116	D40-X6-Y15-MC-NO	3.085
35	D25-X8-Y15-MC-O	1.900	76	D20-X6-Y12-FP-NO	1.838	117	D40-X6-Y15-B-NO	5.132
36	D25-X8-Y15-B-O	2.407	77	D20-X6-Y12-MC-NO	1.952	118	D50-X6-Y15-FP-NO	3.372
37	D30-X8-Y15-FP-O	1.842	78	D20-X6-Y12-B-NO	2.561	119	D50-X6-Y15-MC-NO	3.990
38	D30-X8-Y15-MC-O	2.086	79	D25-X6-Y12-FP-NO	2.041	120	D50-X6-Y15-B-NO	7.188
39	D30-X8-Y15-B-O	2.817	80	D25-X6-Y12-MC-NO	2.219			
40	D40-X8-Y15-FP-O	2.126	81	D25-X6-Y12-B-NO	3.171			

در کانال اصلی و قرارگیری این پوشش در کانال اصلی و دشت سیلابی به‌طور هم‌زمان، کمتر است. در حالت قرارگیری پوشش گیاهی در کانال اصلی و دشت سیلابی به‌طور هم‌زمان محدوده نیروی اندازه‌گیری شده، بالاترین مقدار نسبت به نمودارهای شکل‌های (۷ و ۸) را دارا است. این امر به علت کاهش سطح مقطع

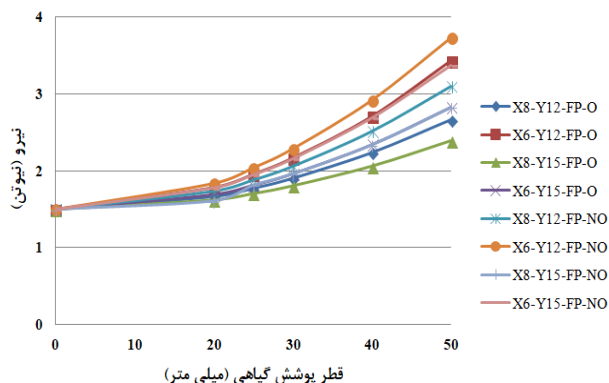
مطابق شکل‌های (۷ تا ۹)، نیروی جریان با افزایش قطر پوشش گیاهی افزایش یافته است که این امر نشان‌دهنده صحت نتایج حاصل از اندازه‌گیری نیرو به روش مستقیم است. بر این اساس در زمان قرارگیری پوشش گیاهی در سیلاب‌دشت، محدوده نیروی اندازه‌گیری شده نسبت به حالت قرارگیری پوشش گیاهی



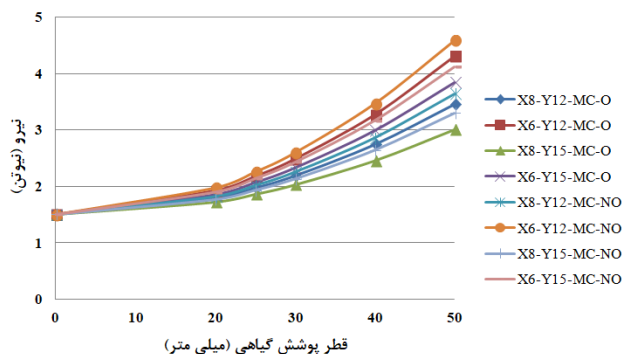
شکل ۹- نمودار نیروی جریان بر اساس قطر پوشش گیاهی در سیلابدشت

در شکل‌های (۱۰ تا ۱۲) که نمودارها با توجه به فاصله عرضی ۶ سانتی‌متری پوشش گیاهی ترسیم شده است، بالاترین سری داده در حالت چیدمان نامنظم و با قطر پوشش گیاهی ۵۰ میلی‌متر و پس‌از آن چیدمان منظم این قطر گرفته است. به همین ترتیب در قطرهای دیگر چیدمان نامنظم مقادیری بیشتر از چیدمان منظم آن قطر دارد. بیشتر بودن میزان نیروی جریان در فاصله طولی ۱۲ سانتی‌متر و بعداز آن کاهش مقدار نیروی جریان در فواصل ۱۵ سانتی‌متر به‌طور محسوس در این نمودارها به چشم می‌خورد. میزان تغییرات در قطرهای کمتر از ۴۰ میلی‌متر بسیار نزدیک به هم و در قطرهای ۴۰ و ۵۰ میلی‌متر میزان تغییرات بیشتری دارند که این امر با توجه به محل قرارگیری پوشش گیاهی تغییر خاصی ایجاد می‌کند، بدین‌صورت که در نمودارهای قطر ۴۰ و ۵۰ میلی‌متری، با چیدمان‌های منظم و نامنظم در حالت قرارگیری پوشش در سیلابدشت نسبتاً نزدیک به هم هستند و در حالت‌های قرارگیری پوشش گیاهی در کانال اصلی و قرارگیری هم‌زمان پوشش گیاهی در کانال اصلی و سیلابدشت میزان اختلاف به‌طور محسوسی بیشتر می‌شود.

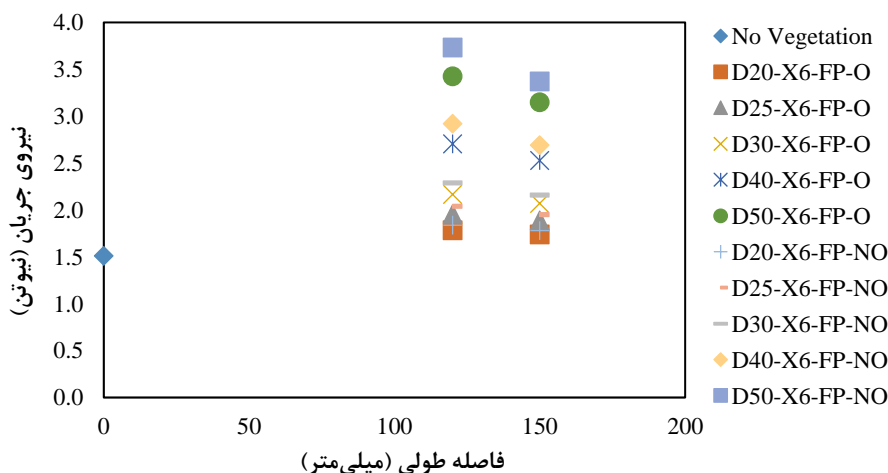
عرضی جریان در این حالت و افزایش تراکم پوشش گیاهی بوده است. مقدار نیروی جریان در حالت چیدمان نامنظم علاوه بر اینکه در آن حجم پوشش گیاهی کاهش می‌یابد، بالاتر است. علت این موضوع نوع چیدمان ضربدری در ردیف‌های متوالی است که باعث ایجاد مانع در مسیر جریان می‌شود و متعاقب آن نیروی اندازه‌گیری شده مقداری بالاتر است.



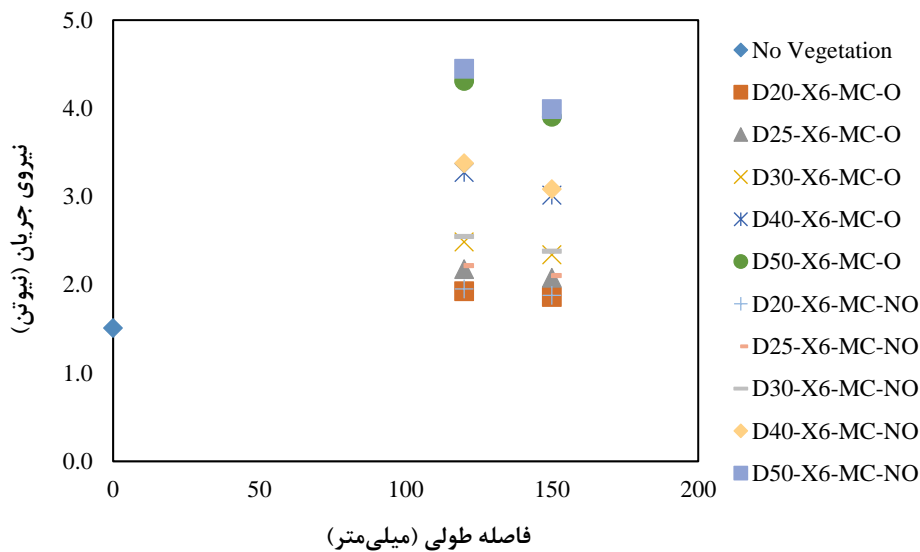
شکل ۷- نمودار نیروی جریان بر اساس قطر پوشش گیاهی در سیلابدشت



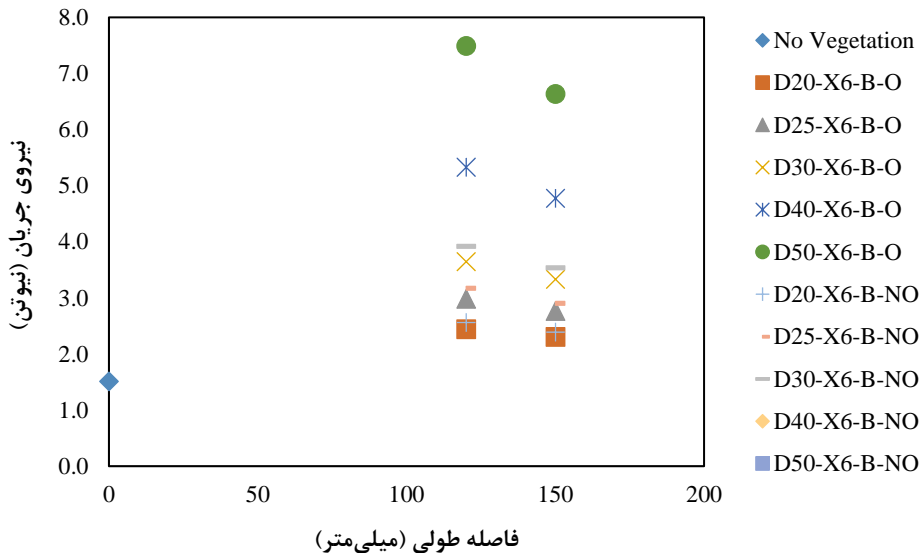
شکل ۸- نمودار نیروی جریان بر اساس قطر پوشش گیاهی در کانال اصلی



شکل ۱۰- نمودار نیروی جریان برای پوشش گیاهی بافاصله عرضی ۶ سانتی‌متری در سیلابدشت



شکل ۱۱- نمودار نیروی جریان برای پوشش گیاهی بافاصله عرضی ۶ سانتی متری در کانال اصلی

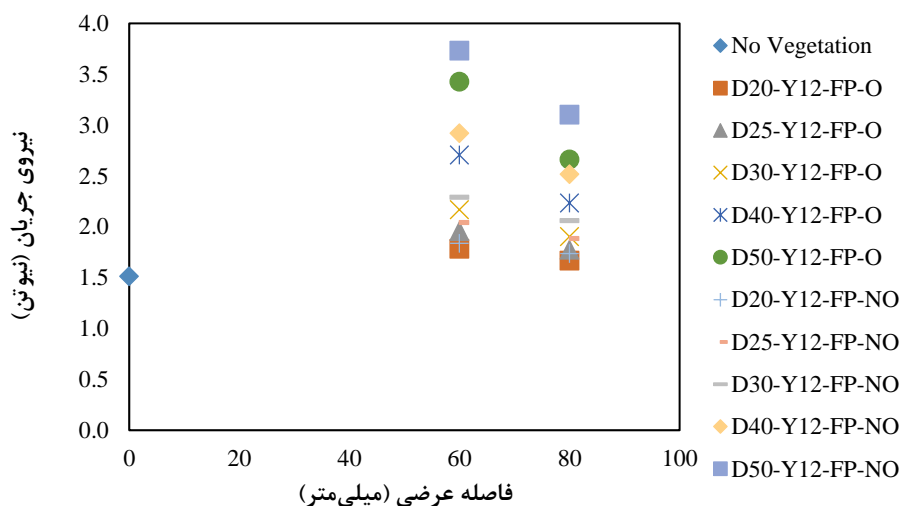


شکل ۱۲- نمودار نیروی جریان برای پوشش گیاهی بافاصله عرضی ۶ سانتی متری در سیلاب دشت

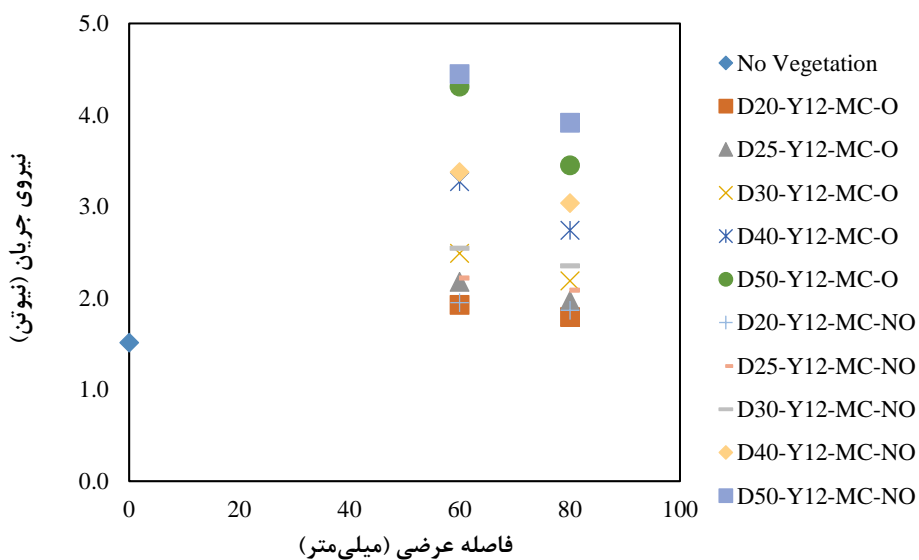
علت این موضوع را می توان اثر قابل ملاحظه قطر پوشش گیاهی در مشخص نمودن میزان تغییرات نیرو عنوان نمود. این اثر در قطرهای پوشش گیاهی کوچک تر نسبتاً کم رنگ بوده و با بالا رفتن قطر پوشش گیاهی اختلاف نیروی جریان در حالت های مختلف، ملموس تر است.

در شکل (۱۶) نمودار مقایسه تغییرات نیروی جریان در سیلاب دشت و کانال اصلی برای پوشش گیاهی با فاصله طولی ۱۲ و عرضی ۶ سانتی متری نشان داده شده است. این شکل یکی از حالت های چیدمان پوشش گیاهی است که بالاترین نیرو در این چیدمان مشاهده شده است.

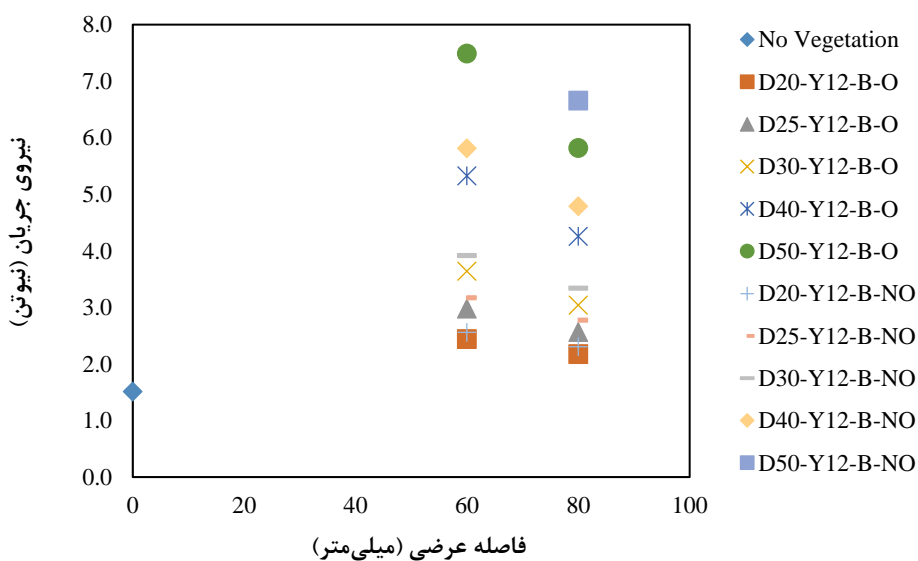
در شکل های (۱۳ تا ۱۵) نمودارهای مربوط به حالت های مختلف با فاصله طولی ۱۲ سانتی متر با توجه به محل قرارگیری پوشش گیاهی ارائه شده است. در این شکل ها سری داده، مربوط به نمودار قطر ۵۰ میلی متر با چیدمان نامنظم در تمامی حالت های قرارگیری پوشش گیاهی است. پس از آن قطر ۵۰ میلی متر با چیدمان منظم قرار دارد که این امر برای دیگر قطرهای پوشش گیاهی نیز به همین صورت هستند. در این نمودارها نزدیکی بین قطرهای کمتر در حالت های مختلف مشاهده می شود که با تغییر در محل قرارگیری، نمودارهای قطرهای ۴۰ و ۵۰ با چیدمان های منظم و نامنظم از نمودار قطرهای کمتر فاصله محسوس گرفته اند.



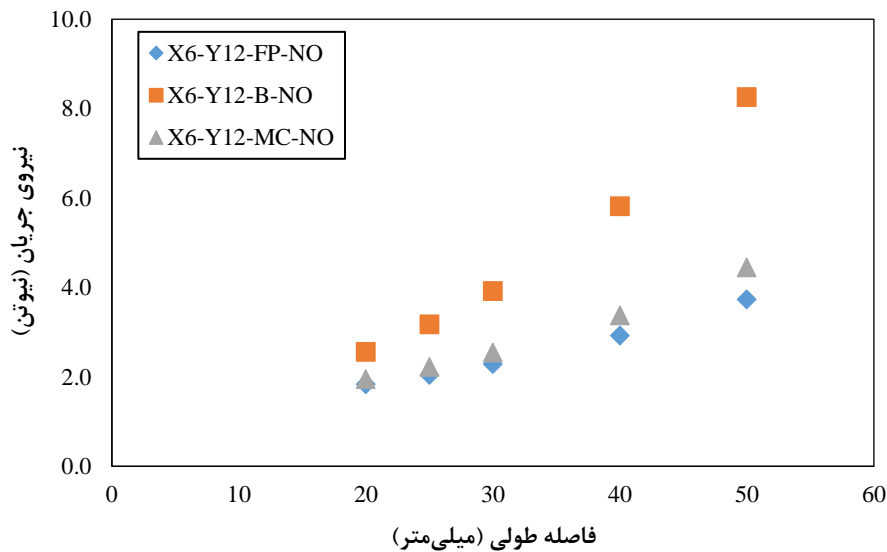
شکل ۱۳- نمودار نیروی جریان برای پوشش گیاهی بافاصله طولی ۱۲ سانتی متری در سیلابدشت



شکل ۱۴- نمودار نیروی جریان برای پوشش گیاهی بافاصله طولی ۱۲ سانتی متری در کانال اصلی



شکل ۱۵- نمودار نیروی جریان برای پوشش گیاهی بافاصله طولی ۱۲ سانتی متری در سیلابدشت



شکل ۱۶- نمودار مقایسه تغییرات نیروی جریان در سیلابدشت و کانال اصلی برای پوشش گیاهی با فاصله طولی ۱۲ و عرضی ۶ سانتی متری

با افزایش قطر پوشش گیاهی در هر یک از حالت‌های مورد بررسی مقدار نیروی جریان به علت کمتر شدن سطح مقطع عرضی عبور جریان، بیشتر شد. علت دیگر بیشتر شدن نیروی جریان، به وجود آمدن جریان ثانویه ناشی از پوشش گیاهی علاوه بر جریان ثانویه تشکیل شده در کانال مرکب پس از عبور جریان از این پوشش است. در بررسی دیگر مشخص گردید در چیدمان نامنظم به علت کاسته شدن سطح مقطع عرضی جریان (با توجه به چینش ضربدری پوشش گیاهی) مقدار نیروی جریان بیش از حالت قرارگیری منظم است. این کاهش سطح مقطع سبب افزایش فشار جریان به پوشش گیاهی جهت عبور از این پوشش، و متعاقب آن بالا رفتن نیروی جریان شده است. گستردگی آرایش پوشش گیاهی به صورت تصادفی و چیدمان در این حالت از جمله محدودیت‌های این پژوهش می‌باشد که پیشنهاد می‌گردد با رفع این محدودیت تحقیقات بیشتر در زمینه اثر چیدمان پوشش گیاهی بر اندازه‌گیری نیرو به روش مستقیم در کانال‌های مرکب انجام پذیرد. همچنین استفاده از مدل فیزیکی مقاطع رودخانه‌ای به جای کانال مرکب به علت همخوانی بیشتر با مقاطع رودخانه‌های طبیعی از دیگر پیشنهاد‌های این پژوهش است.

"هیچ‌گونه تعارض منافع بین نویسندگان وجود ندارد"

نتیجه‌گیری

در این تحقیق اثر پوشش گیاهی صلب غیر مستغرق در کانال مرکب، با تغییر در قطر، فواصل طولی و عرضی و چیدمان این پوشش مورد بررسی قرار گرفت. به منظور بررسی این اثرات مقدار نیروی جریان مورد اصلی در این پژوهش بوده که با استفاده از روش اندازه‌گیری مستقیم، اندازه‌گیری شد. پوشش گیاهی به هر نحوی که در کانال قرار داده شود سبب به وجود آمدن نیروی مضاعف جریان می‌گردد. این موضوع با توجه به اینکه نیروی جریان در حالت بدون پوشش گیاهی مقداری برابر با $1/501$ نیوتن اندازه‌گیری شد به‌وضوح قابل‌تشخیص است. در اندازه‌گیری‌های انجام شده کمترین نیروی جریان در صورت وجود پوشش گیاهی در حالت $D20-X8-Y15-FP-O$ (آزمایش با قطر ۲۰ میلی‌متر در فواصل عرضی ۸ سانتی‌متر، فواصل طولی ۱۵ سانتی‌متر با چیدمان منظم در سیلابدشت) با مقدار نیرویی معادل $1/612$ نیوتن، مشاهده شد. بالاترین نیرو در بین آزمایش‌ها، در حالت $D50-X6-Y12-B-NO$ (آزمایش با قطر ۵۰ میلی‌متر، فواصل عرضی و طولی به ترتیب ۶ و ۱۲ سانتی‌متر با چیدمان نامنظم در سیلابدشت و کانال اصلی به‌طور هم‌زمان) بود که مقدار آن $7/975$ نیوتن بود. مطابق نمودارهای ارائه شده،

REFERENCES

- Arman, A. Fathi-Moghadam, M. (2012). Study of Stress Distribution in a Compound Rectangular Section. *Journal of Irrigation Sciences and Engineering (JISE)*. Volume 36, Issue 3, Pages 55-66. (In Farsi)
- Barbosa B. S. B. (2010), *Influence of Vegetation in Compound Channels Under Uniform Flow*, Master Thesis, Instituto Superior Tecnico, University of Lisbon Portugal.
- Behdarvandi askar M., Fathi-Moghadam M. and Mousavi Jahromi S. H., (2013), Comparison of Energy method and Momentum in the study of Momentum transfer between sub-sections of a compound section, *Journal of Water Resources Engineering*, Year 6, Summer, 1-14.
- Ebrahimi, N.G., Kashefipour, M., Fathi-Moghadam, M., Ebrahimi, K., Sanei, M. (2008). Laboratory study

- of the effect of changing the density of branch vegetation on Manning roughness coefficient. *Iran-Watershed Management*. Vol. 2, No. 3.
- Fathi-Moghadam. M., Kashefipour. M., Ebrahimi. N., Emamgholizade S., (2011), Physical and Numerical Modeling of Submerged Vegetation Roughness in rivers and Flood Plains, *Journal Hydraulic Engineering ASCE*, November, 858-864
- Fernandes. J. (2013). *Compound channel uniform and non-uniform flows with and without vegetation in the floodplain*. PhD thesis, Ph. D. thesis Departamento de Engenharia Civil. Instituto Superior Técnico da Universidade Técnica de Lisboa.
- Hamidifar H. and Omid A. (2013), Investigation of the Effect of Submerged and Non-Submerged Vegetation of Flood Zone on Transverse Mixing Coefficient of Pollutants, *Scientific Magazine*, Volume 10, Number 1, Spring, 13-23.
- Ikeda S. and McEwan I., (2009), Flow and sediment transport in compound channels, *IAHR Monograph Series*.
- Lashkar-Ara, B. Fathi-Moghadam, M. (2014). Analysis of Shear Stress in Rectangular Open Channels Using Force Balance Method. *Journal of Hydraulics*. Volume 9, Issue 3, Pages 33-44.
- Liu C., Shan Y., Liu X. Yang K. (2016a) Method for assessing stage-discharge in meandering compound channels. *ICE-Water Manage*, 169(1), 17-29.
- Liu C., Shan Y., Liu X., Yang K. & Liu H. (2016b) The effect of floodplain grass on the flow characteristics of meandering compound channels. *Journal of Hydrology*, 542, 1-17.
- Maturi F. and Behdarvandi Askar m., (2019), Experimental Study of the Effects of Flow Discharge, Diameter and Depth on Shear Stress in a Rectangular Channel with Rigid Unsubmerged Vegetation, *Journal of Applied Engineering Sciences*, Volume 9(22), 155-160.
- Mohsen M., Vali Samani j. M. and Ayoub Zadeh S. A. (2011), Depth Average Velocity Distribution in Compound Channel Despite Vegetation in Floodplain, *Scientific Magazine*, Volume 8, Number 3, Fall, 63-75.
- Rameshwaran P. and Shiono K. (2007). Quasi two-dimensional model for straight overbank flows through emergent vegetation on floodplains, *Journal of Hydraulic Research*, 45, 302-315.
- Shiono K. and Knight D., (1991), Turbulent open channel flow with variable depth across the channel, *Journal of Fluid Mechanics*, 222, 617-646.
- Sun, X. and Shiono, K. (2009). Flow resistance of one-line emergent vegetation along the floodplain edge of a compound open channel, *Advances in Water Resources*, 32, 3: 430-438.
- Terrier B., (2010), *Flow characteristics in straight compound channels with vegetation along the main channel*, Phd Thesis, Department of Civil Engineering, Loughborough University, UK.
- Tominaga A. and Nezu I., (1991), Turbulent structure in compound open-channel flows, *Journal of Hydraulic Engineering*, 117, 21-41.
- Vojoudi Mehrabani, F., Mohammadi, M., Ayyoubzadeh, A., Fernandes, J., Ferreira, R., (2020). Flow behavior in Non-Prismatic Convergent Compound Channel with Submerged Vegetation on Floodplains. *Journal of Hydraulics*. Volume 15, Issue 1, Pages 97-111.
- White, B., and Nepf, H. (2007). Shear instability and coherent structures in shallow flow adjacent to a porous layer, *Journal of Fluid Mechanics*, 593, 1-32.