

Experimental investigation of the effect of non-submerged rigid vegetation in floodplain of rectangular compound channel on friction factors and flow force

Fouad Maturi¹ and Mehdi Behdarvandi Askar^{2*}

Extended Abstract

Introduction:

A compound channel is a channel that its cross-section has several sub-sections with different flow profiles and distinct characteristics such as roughness, depth, etc. A natural river that flows over the land on its banks during a flood is a simple example of a compound channel. Flooding accounts for approximately one-third of the financial losses associated with natural disasters worldwide and more than half of the fatalities from these disasters. This research was conducted to physically simulate rigid vegetation (made of PVC) in the floodplain of a compound channel and to investigate its effects on the drag coefficient, friction factor, and flow force ratio. The direct measurements carried out in this research were much more accurate than energy methods and conventional methods of force investigation which were discussed in previous researches. In energy methods, the force value usually differs from the actual values, due to existing errors. The errors were partially compensated by using direct measurement. This research led to development of experimental relationships through which the drag coefficient and friction factor were directly calculated based on the vegetation parameter.

Materials and Methods:

This research investigated the effect of vegetation cover on the flow force ratio, drag coefficient, and friction factor using physical modeling of the flow in a knife-edge hydraulic flume with a length of 14 meters, a width of 107 centimeters, and a longitudinal slope of 10^{-3} . The experimental setup was located in the Hydraulic and Sediment Laboratory of the Basic Studies Center for Khuzestan Water and Power Authority, Iran. Five diameters of vegetation cover (20, 25, 30, 40 and 50 mm) made of PVC were considered as rigid non-submerged vegetation covers. The height of this cover was determined to be non-submerged in all cases. In order to use these covers, plexiglass sheets with a length of 1 meter (the length of the knife edge part) and the width equal to that of the floodplain were installed in the flume, according to different arrangement of vegetation cover and its placement within the flow. Five longitudinal distances (8, 10, 12, 15 and 20 cm), three transverse distances (6, 8 and 10 cm, and two types of arrangement (regular and irregular) were implemented to investigate different cases. Due to the different variables, the total number of runs in this study was 151 different experiments. In this study, for data analysis, a dimensionless parameter that included variables such as distances and number of vegetation, cross-section changes and depth difference between the main channel and floodplain (relative depth) was used as the vegetation parameter.

Results and Discussions:

The results of the experiments were presented in the form of various graphs which illustrated the changes in the flow force ratio, friction coefficient, and friction factor based on the vegetation parameter. The ratio of flow force in the case of vegetated conditions to the flow force without vegetation in all experimental conditions was graphed with respect to the vegetation parameter. An equation with a suitable correlation coefficient ($R^2=0.9198$) was fitted to the data trend. According the results of this study, the decreasing trend of the drag coefficient with increasing vegetation parameter was clear. The main difference between the two arrangement types (regular and irregular) was the range of the drag coefficient. The changes in the drag coefficient in the range of 0-0.5 of the vegetation parameter were between 2 and 10, which was relatively higher compared with the regular vegetation arrangement. The drag coefficient obtained in this study was also

1- Graduated of Hydraulic Structures, Department of Offshore Structures, Faculty of Marine Engineering, Khorramshahr University of Marine Science and Technology and Responsible for the Measurement and Estimation of the Supervisory Department of Abadan Oil Refining Company

2- Associate Professor, Department of Offshore Structures, Faculty of Marine Engineering, Khorramshahr University of Marine Science and Technology, Iran

* Corresponding Author: m.behdarvandi@kmsu.ac.ir , sazehenteghal@yahoo.com

Received: 2025/12/30

Accepted: 2026/02/08

compared with the results of research conducted by Tanino and Neff (2008) and Tinoco and Cowen (2013) and their equilibrium equations. It was revealed that the drag coefficient values in the current study had a relatively similar trend to the drag coefficient obtained from the force equilibrium equation, which indicated the suitability of the proposed method and equations for calculating the drag coefficient in the studied area. To investigate the effect of vegetation on changes in the total friction factor calculated based on presented equation, two graphs were presented for regular and irregular vegetation arrangements. Trend lines with relatively good correlation coefficients were also obtained. Accordingly, related equations were presented to calculate these parameters. Considering the change in the type of arrangement, a ratio between the drag coefficient and the vegetation parameter was also defined.

Conclusion:

In this study, the flow force was measured using the direct measurement method and the drag coefficient, and total friction factor were calculated through the provided equations and presented in different diagrams based on the vegetation parameter in the compound channel with the presence of vegetation in the floodplain. According to the results of the diagrams, it was determined that the flow force ratio had a decreasing trend with increasing vegetation parameter, which was consistent with the drag coefficient regardless of the type of arrangement. It is suggested that the investigation of non-rigid (flexible) vegetation cover in compound channels be conducted using this type of flume and measurement method, and the results be compared with other researches.

Keywords: Vegetation Parameter, Flood, Compound Channel, Laboratory Model, Knife-Edge Flume, Compound Channel

Citation: Maturi. F., Behdarvandi Askar. M., 2026. Experimental investigation of the effect of non-submerged rigid vegetation in floodplain of rectangular compound channel on friction factors and flow force. . Iranian Water Research Journal, 20(61), pp. 49-60 <https://dx.doi.org/10.22034/iwrj.2026.14847.2621>

Copyright: © Authors, Published by Iranian Water Research Journal. This is an open-access article distributed under the CC-BY 4.0 (license <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).



بررسی آزمایشگاهی اثر پوشش گیاهی صلب غیر مستغرق واقع در سیلابدشت کانال مرکب مستطیلی بر فاکتورهای اصطکاکی و نیروی جریان

فواد مطوری^۱ و مهدی بهداروندی عسکر^{۲*}

چکیده

کانال‌های مرکب به دلیل شباهت هیدرولیکی با رودخانه‌های طبیعی در شرایط سیلابی، اهمیت ویژه‌ای در مطالعات هیدرولیکی دارند. در این پژوهش، اثر پوشش گیاهی صلب غیرمستغرق مستقر در سیلابدشت یک کانال مرکب مستطیلی بر نیروی جریان، ضریب درگ و فاکتور اصطکاک به صورت آزمایشگاهی بررسی شد. آزمایش‌ها با استفاده از شبیه‌سازی فیزیکی جریان در فلوم هیدرولیکی لبه‌چاقویی و به روش اندازه‌گیری مستقیم نیروی جریان انجام گرفت. پوشش گیاهی با میله‌های PVC در پنج قطر مختلف، فواصل طولی و عرضی متفاوت و در دو آرایش منظم و نامنظم مدل‌سازی شد. تحلیل نتایج بر اساس پارامتر بی‌بعد پوشش گیاهی (λ^*) نشان داد که با افزایش مقدار این پارامتر، نسبت نیروی جریان در حضور پوشش گیاهی به حالت بدون پوشش و همچنین ضریب درگ کاهش می‌یابد، در حالی که فاکتور اصطکاک کل روندی افزایشی دارد. همچنین مشخص شد در مقادیر یکسان λ^* ، آرایش نامنظم پوشش گیاهی مقادیر بزرگ‌تری از ضریب درگ و فاکتور اصطکاک را نسبت به آرایش منظم ایجاد می‌کند.

واژه‌های کلیدی: پارامتر پوشش گیاهی، سیلاب، کانال مرکب، مدل آزمایشگاهی، فلوم لبه‌چاقویی، کانال مرکب، نیروی جریان

ارجاع: مطوری، ف.، بهداروندی عسکر، م.، ۱۴۰۵. بررسی آزمایشگاهی اثر پوشش گیاهی صلب غیر مستغرق واقع در سیلابدشت کانال مرکب مستطیلی بر فاکتورهای اصطکاکی و نیروی جریان. مجله پژوهش آب ایران، ۲۰(۶۱)، صص. ۴۹-۶۰. <https://dx.doi.org/10.22034/iwrj.2026.14847.2621>

۱- دانش آموخته کارشناسی ارشد دانشکده مهندسی دریا دانشگاه علوم و فنون دریایی خرمشهر و کارشناسی ارشد مسئول اندازه‌گیری و برآورد اداره نظارت شرکت پالایش نفت آبادان
۲- دانشیار گروه عمران سازه‌های دریایی دانشکده مهندسی دریا دانشگاه علوم و فنون دریایی خرمشهر
نویسنده مسئول: m.behdarvandi@kmsu.ac.ir , sazehenteghal@yahoo.com

مقدمه

کانال 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 از کانال‌های مرکب است. وقوع سیلاب، تقریباً یک‌سوم از زیان‌های مالی مرتبط با بلایای طبیعی در سراسر جهان و بیش از نیمی از تلفات این بلایا را شامل می‌شود. به‌طور معمول، وجود پوشش گیاهی در دشت سیلابی، توسط مهندسين رودخانه، به‌عنوان یک مشکل که مانع انتقال ظرفیت جریان حداکثر در کانال می‌گردد، در نظر گرفته می‌شود. با این حال، نقش زیست‌محیطی پوشش گیاهی ساحلی بسیار حائز اهمیت است (Maturi, 2018).

مقدار نیروی درگ وارده توسط جریان، به گیاهان، بدین گونه است که عموماً نمی‌تواند اثرات کلی را هنگام مدل‌سازی در کانال اصلی و سیلاب‌دشت‌ها، در برگیرد. مشاهدات سواحل رودخانه نشان می‌دهد که یک خط پوشش گیاهی در حال رشد در امتداد لبه سیلاب برای کنترل این پدیده به‌عنوان یک توافق مرسوم شناخته شده است. این پوشش گیاهی ممکن است درختان و یا بوته‌ها از گونه‌های مختلف باشد و ممکن است به‌روش‌های مختلف فاصله داده شده باشند (Terrier, 2010). در شکل ۱، کاشت پوشش گیاهی در سیلاب‌دشت ارائه شده است.



شکل ۱- نمایی از قرارگیری پوشش گیاهی در سیلاب‌دشت و جریان سیلابی

Tsujimoto (1992) آشفتگی را در یک کانال مستطیلی دارای پوشش گیاهی، که در آن سیلندر عمودی برای نشان گیاهی مورداستفاده قرار گرفته بود، اندازه‌گیری نمود. وی بیان کرد که در عمق آب کمتر از ۴/۵ سانتی‌متر، سرعت متوسط بیش از ۳۰ درصد کاهش و تنش‌های رینولدزی عرضی در حدود ۴۰ درصد بیشتر از زمانی بود که دانسیته پوشش گیاهی ۶ برابر افزایش یافته بود. همچنین نتایج ایشان نشان داد که اختلاف سرعت بین دو منطقه دارای پوشش گیاهی و بدون پوشش گیاهی به دلیل افزایش تراکم پوشش گیاهی افزایش یافته است. Naot et al. (1996) پاسخ هیدرودینامیکی جریان آشفته را در یک کانال مرکب مستطیلی با سیلاب‌دشت دارای پوشش

گیاهی را بررسی کردند. در این بررسی، تراکم به‌عنوان N با رابطه $N = 100nHD$ در نظر گرفته شد، که در آن n متوسط تراکم گیاه (میلها در واحد سطح)، H عمق آب و قطر میله D است. همچنین در این تحقیق برای محاسبه نیروی درگ ناشی از پوشش گیاهی، مدل تنش جبری استفاده شد. آن‌ها علاوه بر این یک مقیاس طولی l_v را معرفی نمودند که منطقه گیاهی را در ساختار مدل آشفتگی تنش جبری آن‌ها، که مربوط به وقوع ناآرامی تشکیل شده در پشت میله‌هاست، مشخص می‌کند.

Jarvela (2004) مقاومت جریان پوشش گیاهی غیر مستغرق چوبی بدون برگ را بررسی و پیشنهاد کرد که برای در نظر گرفتن ساختار شاخه‌ای گیاه باید یک ضریب درگ افزایش یافته تا ۱/۵ استفاده شود. بنابراین، درحالی‌که به‌طور متداول توصیه به یک مقدار ثابت C_D نزدیک به واحد شده، برای پوشش گیاهی طبیعی با شاخه یا شاخ و برگ این مقادیر می‌توانند بیش از واحد در نظر گرفته شوند. (Armanini et al. 2005) توصیه نمودند که یک مقدار ضریب درگ نزدیک به واحد برای طیف وسیعی از جریان‌های تجربی مورد آزمایش با پوشش گیاهی بید امرجنت، به‌عنوان مثال در محدوده عدد رینولدز از ۲۰۰۰ تا ۲۰۰۰۰ می‌تواند انتخاب معقولی باشد.

Kang and Choi (2006) یک مدل تنش رینولدزی سه‌بعدی را که بر اساس مجموعه داده‌های آزمایشگاهی برای شرایط بدون پوشش گیاهی تایید شده بود، ایجاد کردند، سپس این مدل را برای تأثیر پوشش گیاهی با اضافه کردن یک ترم درگ به معادلات اندازه حرکت توسعه دادند. White and Nepf (2007) با استفاده از سرعت‌سنج داپلر لیزری در یک کانال تک پوشش گیاهی با ۶ میلی‌متر شاخه‌چوبی که به‌صورت نامتقارن قرار داده شده بودند، اندازه‌گیری‌های خود را انجام دادند. این میله‌ها ۴۰ سانتی‌متری از عرض ۱۲۰ سانتی‌متری فلوم را تحت پوشش قرار داده بودند.

James et al. (2008) مقادیر ضریب درگ گیاه را برای یک ساقه‌ی نی با درجه‌های مختلف شاخسار بررسی کردند. در این تحقیق عنوان گردید، برای عدد رینولدز پوشش گیاهی در منطقه ۸۵۰ تا ۹۰۰، ضریب درگ گیاه از حدود ۵/۴ برای یک ساقه دارای ۶ برگ و ۷/۵ برای یک ساقه با شاخ و برگ کامل افزایش می‌یابد. Vojudi Mehrabani et al. (2009) به بررسی ظرفیت انتقال تنش برشی در مرز اتصال کانال اصلی و سیلاب‌دشت پرداختند. در این تحقیق هیدرولیک جریان در کانال غیرمنشوری با سیلاب‌دشت‌های همگرا و دارای پوشش گیاهی برای دو عمق نسبی ۰/۲۱ و ۰/۳۱ و زوایای همگرایی ۷/۲۵ و ۱۱/۳ مطالعه شد. نتایج نشان داد تنش برشی رینولدزی در مرز اتصال، به‌طور

جریان، قطر پوشش گیاهی و عمق جریان بر تنش برشی مطالعه و مشخص شد که در دبی ثابت با افزایش عمق جریان میزان تنش برشی و نسبت بی‌بعد τ/τ_0 کاهش می‌یابد. همچنین مشخص شد با افزایش قطر پوشش گیاهی مقدار تنش برشی روندی افزایشی داشت که این امر به علت افزایش تراکم پوشش گیاهی در مقابل جریان بود.

Hassani and Tavakoli (2020) پوشش گیاهی در کانال مرکب را با هدف ارائه مدلی جهت تخمین سطح آب در کانال مرکب با وجود پوشش گیاهی صلب در سیلاب‌دشت، به صورت فیزیکی مدل‌سازی کردند. به این منظور تاثیر پارامترهای مختلفی از جمله چیدمان، تراکم، عمق نسبی و فاصله نسبی بر پروفیل سطح آب به صورت آزمایشگاهی بررسی شد. آزمایش‌ها در دو چیدمان مربعی و شطرنجی، سه تراکم مختلف و پنج عمق نسبی مختلف انجام و وابستگی پروفیل بدون بعد سطح آب به تغییر این چهار پارامتر بی‌بعد بررسی گردید.

نیروی درگ که توسط یک سیلندر تنها در آب قرار می‌گیرد، معمولاً به دو جزء تقسیم می‌شود: نیروی درگ اصطکاک و نیروی درگ فشار (Schlichting and Gersten, 1986). نیروی درگ اصطکاک ناشی از اصطکاک بین سیال و سطوحی است که در آن جریان دارد و همراه با توسعه لایه‌های مرزی است. از سوی دیگر، نیروی درگ فشاری ناشی از حرکات چرخشی آشفتگی متصل شده در سیال است. نیروی درگ اصطکاک و فشاری توسط پدیده‌های مختلف جریان ایجاد می‌شود (Terrier, 2010).

برای تعیین ضریب درگ پوشش گیاهی تحقیقات مختلفی توسط پژوهشگران انجام شده است. از جمله این تحقیقات می‌توان به پژوهش‌های (Kang, Stoesser et al. (2010), (Wu and Defina and Bixio (2005), and Choi (2006) et al. (2005) اشاره کرد (Kim and Stoesser, 2011). (2009) با استفاده از معادلات تعادل نیرو در جریان داری پوشش گیاهی مقدار ضریب درگ را برای پوشش گیاهی با قطر ۱۰ میلی‌متر با اعداد رینولدز متفاوت محاسبه کردند.

Jia et al. (2025) با تمرکز بر ارتباط بین نیروی دینامیکی سیال و حرکت پوشش گیاهی بسیار منعطف، به این نتیجه رسیدند که تغییر شکل پوشش گیاهی منعطف در بستر کانال شدت بیشتری دارد و تغییرات چشم‌گیری در پارامترهای هیدرولیکی نظیر سرعت و انرژی آشفتگی دارد.

این تحقیق با هدف شبیه‌سازی فیزیکی پوشش گیاهی صلب (از جنس PVC) در سیلاب‌دشت کانال مرکب و بررسی اثر این پوشش بر ضریب درگ، فاکتور اصطکاک و نسبت نیروی جریان

چشمگیری تحت تاثیر زوایای همگرایی بوده است. همچنین به دلیل جریانات ثانویه ایجاد شده در مقطع عرضی کانال، موقعیت حداکثر سرعت جریان نیز در فاصله دوری از سطح آب رخ داد. (Hamidifar and Omid (2019) به بررسی آزمایشگاهی تأثیر عمق جریان، چیدمان پوشش گیاهی و همچنین اندرکنش جریان بین کانال اصلی و سیلاب‌دشت بر ضریب انتشار طولی K ، در یک کانال مرکب پرداختند. نتایج حاکی از آن بود که مقدار ضریب K در کانال اصلی از مقدار مربوطه روی سیلاب‌دشت بزرگ‌تر است. به‌طور کلی، با افزایش عمق نسبی از ۰/۱۵ به ۰/۳۵، ضریب انتشار طولی نیز روند افزایشی را دنبال می‌کند.

(Maturi and Behdarvandi Askar (2019) به‌عنوان محققین فعال در زمینه اندازه‌گیری مستقیم نیرو با استفاده از فلوم هیدرولیکی لبه چاقویی، در تحقیقات مختلف با شبیه‌سازی فیزیکی پوشش گیاهی در کانال مستطیلی و کانال مستطیلی مرکب به تحلیل و بررسی پارامترهای مختلف پرداختند. این محققین ابتدا با شبیه‌سازی پوشش گیاهی غیر مستغرق در کانال مستطیلی روش اندازه‌گیری مستقیم را بررسی و مشاهده کردند که با افزایش دانسیته پوشش گیاهی مقدار تنش برشی افزایش می‌یابد و در دبی ثابت با افزایش عمق مقدار تنش برشی و نسبت بی‌بعد تنش برشی کاهش می‌یابد. ایشان در تحقیقی دیگر با انجام ۴۵۱ آزمایش اثر سطح مقطع عرضی بر نیروی جریان در کانال مرکب دارای پوشش گیاهی را بررسی کردند. در این تحقیق این محققین با ارائه روابطی برای محاسبه سرعت در محدوده عبور جریان از پوشش گیاهی و پارامتری به نام پارامتر پوشش گیاهی به بررسی اثر کاهش سطح مقطع عرضی جریان بر درصد تغییرات نیروی جریان در کانال مرکب پرداختند. علاوه بر این با اصلاح عدد رینولدز پوشش گیاهی، اثر آن بر نسبت نیروی جریان مورد بررسی قرار گرفت. در این تحقیق مشخص شد در درصد حجم پوشش گیاهی ثابت مقادیر درصد نیرو در چیدمان نامنظم پوشش گیاهی بالاتر از درصد نیروی جریان در چیدمان منظم است.

در دیگر تحقیق (Maturi et al. (2020) با انجام ۱۲۱ آزمایش، با استفاده از روش اندازه‌گیری مستقیم، نیروی جریان در کانال مرکب دارای پوشش گیاهی را اندازه‌گیری نمودند و به بررسی اثر انتقال حرکت پرداختند. در این تحقیق مقادیر نیروی جریان در حالت مختلف ارائه شد و نمودارهایی بر اساس اثرات قطر، فواصل طولی و عرضی و نوع چیدمان بر این مقدار نیرو ارائه شد. (Maturi and Behdarvandi Askar (2019) در تحقیقی به بررسی مقدار تنش برشی در کانال مستطیلی دارای پوشش گیاهی صلب غیر مستغرق پرداختند. در این تحقیق اثر دبی

منظم و نامنظم ارائه شده است در شکل ۵ نحوه قرارگیری پوشش گیاهی صلب در سیلابدشت ارائه شده است. با توجه متغیرهای مختلف تعداد کل اجراهای انجام شده در این تحقیق ۱۵۱ آزمایش متفاوت است.

در این تحقیق برای تحلیل داده‌ها، از پارامتر بی‌بعدی که در بردارنده تغییرات نظیر فواصل و تعداد پوشش گیاهی، تغییر در سطح مقطع و اختلاف عمق در کانال اصلی و دشت سیلابی (تغییرات عمق نسبی) باشد به‌عنوان پارامتر پوشش گیاهی (λ^*) استفاده شد که این پارامتر به‌صورت رابطه ۱ تعریف می‌شود (Maturi and Behdarvandi Askar, 2021).

$$\lambda^* = \frac{HA_{v1}}{A_F S_x S_y} (N_{FP} B_{FP} D_r + N_{MC} B_{MC}) \quad (1)$$

در رابطه ۱، λ^* پارامتر پوشش گیاهی، H عمق جریان، A_{v1} سطح مقطع یک ساقه پوشش گیاهی، A_F سطح مقطع عرضی جریان، S_x فواصل عرضی بین پوشش گیاهی، S_y فواصل طولی بین پوشش گیاهی، N_{FP} تعداد پوشش گیاهی در سیلابدشت، B_{FP} عرض سیلابدشت، D_r عمق نسبی، N_{MC} تعداد پوشش گیاهی در کانال اصلی و B_{MC} عرض کانال اصلی هستند. عمق نسبی در کانال مرکب به‌صورت رابطه ۲ که نشان‌دهنده ارتباط بین عمق جریان در کانال اصلی و سیلابدشت است تعریف می‌شود:

$$D_r = \frac{H_{FP}}{H_{MC}} \quad (2)$$

در رابطه ۲، H_{FP} عمق جریان در سیلابدشت و H_{MC} عمق جریان در کانال اصلی است.

پارامتر پوشش گیاهی استفاده شده در این تحقیق به علت عدم وجود پوشش گیاهی در کانال اصلی با استفاده از رابطه ۱ و به‌صورت زیر (رابطه ۳) اصلاح گردید.

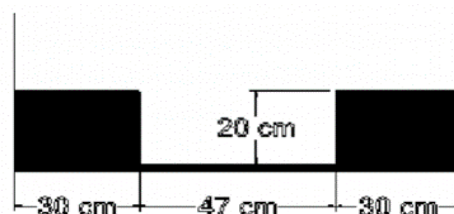
$$\lambda^* = \frac{HA_{v1}}{A_F S_x S_y} (N_{FP} B_{FP} D_r) \quad (3)$$

رابطه ۳، نحوه محاسبه پارامتر پوشش گیاهی با استفاده از رابطه ارائه شده توسط Maturi and Behdarvandi Askar (2021) است. در این تحقیق، نسبت نیروی جریان دارای پوشش گیاهی به نیروی جریان بدون پوشش گیاهی به‌صورت $\frac{F_i}{F_0}$ استفاده شد. F_i نشان‌دهنده مقادیر نیروی اندازگیری شده در حالات مختلف قرارگیری پوشش گیاهی در بدنه جریان است و F_0 نشان‌دهنده مقدار نیروی اندازگیری شده در حال بدون پوشش گیاهی است.

انجام شد. اندازه‌گیری مستقیم انجام شده در این تحقیق با دقت بسیار بالاتر نسبت به روش‌های انرژی و روش‌های معمول بررسی نیرو است که این امر در تحقیقات مختلف انجام شده توسط Maturi and Behdarvandi Askar (2021) مطرح شده است. در روش‌های انرژی با توجه به خطاهای موجود مقدار نیرو معمولاً با مقادیر واقعی تفاوت دارند که این موضوع با توجه به استفاده از اندازه‌گیری مستقیم تا حدودی جبران شد. انجام این تحقیق منجر به ارائه روابطی بر پایه آزمایشات شد که در آن امکان محاسبه ضریب درگ و فاکتور اصطکاک بر پایه پارامتر پوشش گیاهی، به صورت مستقیم فراهم گردید.

مواد و روش‌ها

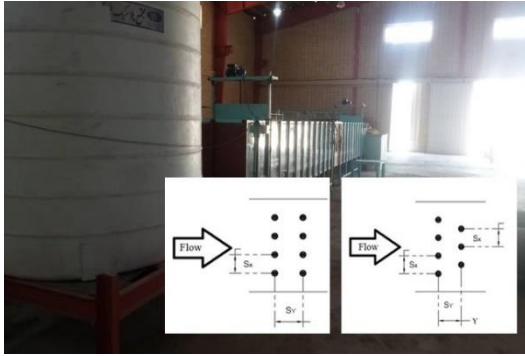
این پژوهش با استفاده از مدل‌سازی فیزیکی جریان در فلوم هیدرولیکی لبه چاقویی به طول ۱۴ متر، عرض ۱۰۷ سانتی‌متر، ارتفاع ۱۰۵ سانتی‌متر و شیب طولی 10^{-3} (۱/۱۰۰۰) مستقر در آزمایشگاه هیدرولیک و رسوب مرکز مطالعات پایه سازمان آب و برق استان خوزستان، اثر پوشش گیاهی بر نسبت نیروی جریان، ضریب درگ و فاکتور اصطکاک بررسی شد. در شکل ۲ شماتیک کانال مرکب ساخته شده در فلوم نمایش داده شده است.



شکل ۲- شماتیک کانال مرکب

۵ قطر پوشش گیاهی شامل ۲۰، ۲۵، ۳۰، ۴۰ و ۵۰ میلی‌متری از جنس PVC به‌عنوان پوشش‌های گیاهی صلب غیر مستغرق در نظر گرفته شد. ارتفاع این پوشش به نحوی در نظر گرفته شد که در تمامی حالات به‌صورت غیر مستغرق باشند. برای به کار بردن این پوشش‌ها در فلوم، پلکسی گلس‌هایی به طول ۱ متر (طول قسمت لبه چاقویی) و عرض سیلابدشت تهیه و با استفاده از چسب حرارتی با توجه به حالات مختلف اتصال پوشش گیاهی درون آن قرار گرفتند.

۵ فاصله طولی شامل ۸، ۱۰، ۱۲، ۱۵ و ۲۰ سانتی‌متر، ۳ فاصله عرضی شامل ۶، ۸ و ۱۰ سانتی‌متر همچنین دو نوع چیدمان منظم و نامنظم برای بررسی حالات مختلف اجرا شد. در شکل ۳ قسمت لبه چاقویی و نشانگر مقدار نیرو نمایش داده شده است. در شکل ۴ نمایی از فلوم، قسمت لبه چاقویی و تفاوت چیدمان



شکل ۴- نمای فلوم آزمایشگاهی و شماتیک چیدمان منظم و نامنظم پوشش گیاهی

$$f_{bFP} = \left[-2 \log \left(\frac{3.02v}{\sqrt{128gH^3S_0}} + \frac{K_S}{1.2H} \right) \right]^{-2} \quad (8)$$

$$f_{bMC} = \left[-2 \log \left(\frac{3.02v}{\sqrt{128gH^3S_0}} + \frac{K_S}{12.3H} \right) \right]^{-2} \quad (9)$$

$$f_{VFP} = \frac{4H_{FP}D_V}{S_X S_Y} C_D \quad (10)$$

در روابط ۸، ۹ و ۱۰، f_{bFP} و f_{VFP} به ترتیب فاکتور اصطکاک در بستر و فاکتور اصطکاک پوشش گیاهی، f_{bMC} فاکتور اصطکاک بستر کانال اصلی، v لزجت سینماتیک، g شتاب گرانش، H عمق جریان، S_0 شیب بستر و K_S ارتفاع زبری بستر (که در بستر صاف برابر $0.3/0.3$ سانتی متر می باشد) است.

در نهایت مقدار فاکتور اصطکاک از رابطه ۱۱ محاسبه می شود:

$$f_T = f_{bFP} + f_{VFP} + f_{bMC} \quad (11)$$

نتایج حاصل از انجام آزمایش ها در قالب نمودارهای مختلف ارائه شد. در این نمودارها تغییرات مربوط به نسبت نیروی جریان، ضریب اصطکاک و فاکتور اصطکاک بر اساس پارامتر پوشش گیاهی برای بررسی تغییرات ارائه شده است. در شکل ۶ نسبت نیروی جریان در حالت قرارگیری پوشش گیاهی به نیروی جریان بدون پوشش گیاهی در تمامی حالات انجام آزمایش ها با توجه به پارامتر پوشش گیاهی نشان داده شده است.

$$\rho g S_0 (1 - \phi) = \frac{1}{2} \rho C_D a V_c^2 \quad (12)$$

رابطه ۱۲ که به عنوان رابطه تعادل نیز شناخته می شود، روش محاسبه تئوری ضریب درگ با توجه به تراکم پوشش گیاهی و سرعت عبور جریان در محدوده پوشش گیاهی است. در این رابطه، ρ دانسیته، g شتاب گرانش، S_0 شیب بستر، ϕ تراکم پوشش گیاهی، C_D ضریب درگ، a سطح مقطع تصویر پوشش

برای محاسبه ضریب درگ در این پژوهش با استفاده از تئوری نیروی درگ و معادله آن، از رابطه ۴ استفاده شده است.

$$C_D = \frac{2F_D}{\rho A_P V_C^2} \quad (4)$$

در این رابطه، C_D ضریب درگ، F_D نیروی درگ، ρ دانسیته سیال، A_P سطح مقطع تصویر عرضی پوشش گیاهی و V_C سرعت عبور جریان از پوشش گیاهی است.

سرعت جریان در محل وجود پوشش گیاهی با استفاده از رابطه های ۵ و ۶ و با توجه به تعداد پوشش گیاهی قرار گرفته در مسیر عبور جریان براساس قانون پیوستگی محاسبه شد. این روابط بر اساس نوع چیدمان پوشش گیاهی (منظم و نامنظم) تفکیک شدند.

$$V_{CO} = \frac{Q}{A_F - (D_V H (N_{rFP} D_r))} \quad (5)$$

$$V_{CNO} = \frac{Q}{A_F - (D_V H (N'_{rFP} D_r))} \quad (6)$$

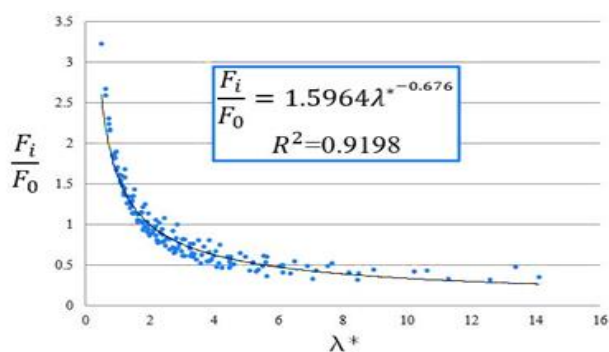
در روابط ۵ و ۶، Q دبی جریان، V_{CO} و V_{CNO} به ترتیب سرعت جریان در محدوده پوشش گیاهی منظم و نامنظم، D_V قطر پوشش گیاهی و N_{rFP} و N'_{rFP} به ترتیب تعداد پوشش گیاهی منظم و نامنظم در عرض جریان، هستند. مقدار A_P با توجه به تعداد پوشش گیاهی قرار داده شده در جریان به صورت زیر محاسبه می شود:

$$A_P = N_{FP} D_V H_{FP} \quad (7)$$

برای محاسبه فاکتور اصطکاک از روابط ارائه شده توسط Sun (2007) برای بستر کانال مرکب استفاده شد. همچنین، فاکتور اصطکاک پوشش گیاهی قرار داده شده در جریان بر اساس رابطه ارائه شده توسط Helmino (2002) محاسبه شد. فاکتور اصطکاک بستر (Sun, 2007) براساس روابط ۸ و ۹ و فاکتور اصطکاک برای پوشش گیاهی (Helmino, 2002) طبق رابطه ۱۰ محاسبه شدند.



شکل ۳- نمای قسمت لبه چاقویی

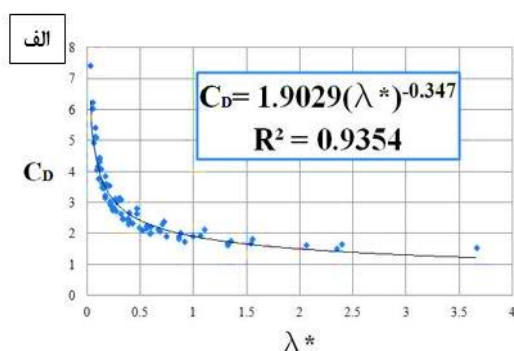


شکل ۶- تغییرات نسبت نیروی جریان به پارامتر پوشش گیاهی در تمام آزمایش‌ها

خط روندیابی داده‌ها با ضریب تبیین مناسب ($R^2=0.9198$) با رابطه ارائه شد در شکل ۶ نشان داده شده است. رابطه ۱۴، معادله ارائه شده در شکل ۶ است که در آن F_i و F_0 به ترتیب نیروی جریان بدون پوشش گیاهی و نیروی جریان با قرارگیری پوشش گیاهی هستند.

$$\frac{F_i}{F_0} = 1.5964\lambda^{*-0.676} \quad (14)$$

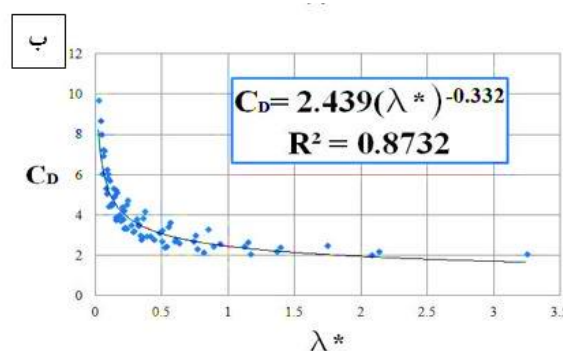
شکل ۷، نشان‌دهنده تغییرات ضریب درگ محاسبه شده از رابطه ۴ است که مقدار نیرو در این رابطه با استفاده از روش اندازه‌گیری مستقیم به دست آمده است. در این شکل دو نمودار برای دو حالت چیدمان منظم (۷-الف) و نامنظم (۷-ب) ارائه شده است. در شکل ۷-الف تغییرات ضریب درگ در محدوده ۰ تا ۰/۵ پارامتر پوشش گیاهی دارای روند نزولی نسبتاً شدید (از ۲ تا ۸) و در محدوده ۰/۵ تا ۳/۵ تغییرات ضریب درگ دارای روند نسبتاً خطی است.



شکل ۵- نمای قرارگیری پوشش گیاهی در فلوم

نتایج و بحث

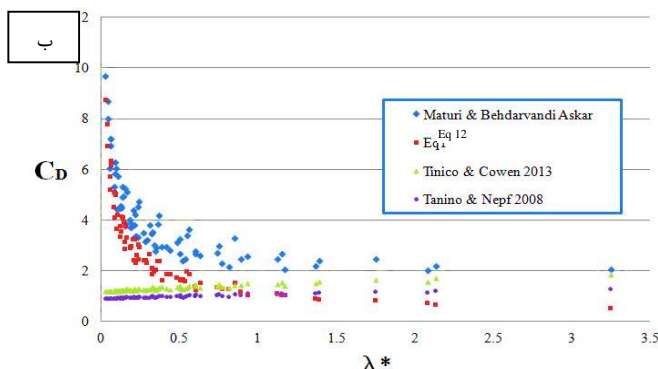
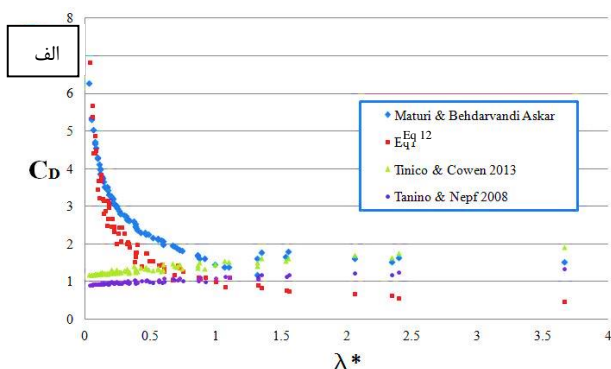
همانطور که در شکل ۶ نشان داده شده است، نسبت نیروی جریان با افزایش مقدار پارامتر پوشش گیاهی کاهش می‌یابد. بالاترین نسبت نیروی جریان در محدوده ۰ تا ۲ پارامتر پوشش گیاهی وجود دارد و روند نزولی از ۱ تا ۳/۵ است. در محدوده ۲ تا ۶ پارامتر پوشش گیاهی تغییرات نسبت نیروی جریان در محدوده ۰/۵ تا ۱ است و پس از این محدوده تغییرات نسبت نیروی جریان با روند نسبتاً خطی در محدوده ۰ تا ۰/۵ قرار گرفت.



شکل ۷-الف- تغییرات ضریب درگ نسبت به پارامتر پوشش گیاهی در حالت چیدمان منظم پوشش گیاهی و ب- تغییرات ضریب درگ نسبت به پارامتر پوشش گیاهی در حالت چیدمان نامنظم پوشش گیاهی

در شکل ۸، مقایسه ضریب درگ به دست آمده در این پژوهش با تحقیقات انجام شده توسط (Tanino and Nepf (2008 و Tinico and Cowen (2013) همچنین با معادله تعادل نیز (رابطه ۱۲) انجام شده است. در این نمودارها مشخص است که مقادیر ضریب درگ ارائه شده در این مقاله دارای روند نسبتاً یکسانی با ضریب درگ حاصل از معادله تعادل نیرو است.

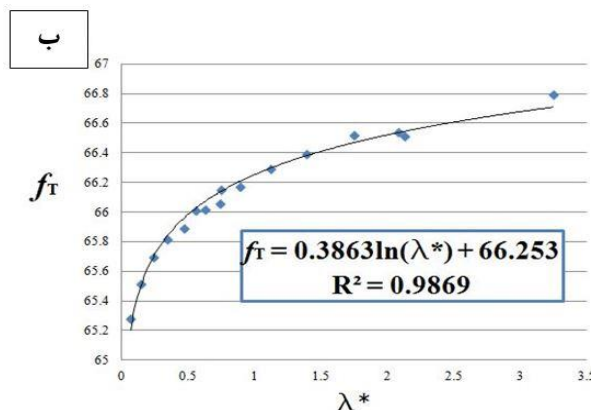
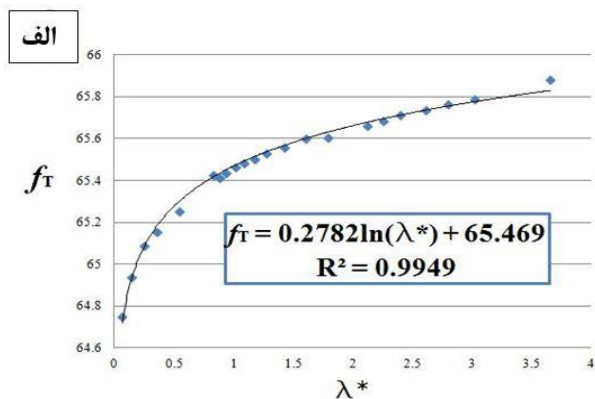
در شکل ۷-ب روند کاهشی ضریب درگ با افزایش پارامتر پوشش گیاهی مشخص است. در این شکل تفاوت عمده دو حالت چیدمان منظم و نامنظم مربوط به محدوده ضریب درگ است. در شکل ۷-ب تغییرات ضریب درگ در محدوده ۰ تا ۰/۵ پارامتر پوشش گیاهی بین ۲ تا ۱۰ است که نسبت به چیدمان منظم پوشش گیاهی مقداری بالاتر است.



شکل ۸-الف- مقایسه مقادیر ضریب درگ در روش‌های مختلف در حالت چیدمان منظم پوشش گیاهی و ب- مقایسه مقادیر ضریب درگ در روش‌های مختلف در حالت چیدمان نامنظم پوشش گیاهی

نشان دهنده تغییرات فاکتور اصطکاک کل در چیدمان نامنظم پوشش گیاهی است. در شکل ۹، مقدار فاکتور اصطکاک کل با افزایش مقدار پارامتر پوشش گیاهی روندی صعودی دارد. تفاوت بین چیدمان منظم و نامنظم پوشش گیاهی تنها در مقدار فاکتور اصطکاک کل است. بدین صورت که در مقدار ثابت پارامتر پوشش گیاهی، میزان فاکتور اصطکاک در چیدمان نامنظم پوشش گیاهی بالاتر از چیدمان منظم است.

از مقایسه این روش‌ها می‌توان نتیجه گرفت که روش ارائه شده در این مقاله روندی مشابه و مقادیر نزدیک‌تری به معادله تعادل (رابطه ۱۲) دارد که این امر نشان دهنده مناسب بودن روش و رابطه‌های پیشنهادی برای محاسبه ضریب درگ در محدوده مورد بررسی است. در شکل ۹ دو نمودار برای بررسی اثر پوشش گیاهی بر تغییرات فاکتور اصطکاک کل که بر اساس رابطه ۱۰ محاسبه شده، ارائه شده است. شکل ۹-الف نشان دهنده تغییرات فاکتور اصطکاک کل در چیدمان منظم پوشش گیاهی و شکل ۹-ب



شکل ۹-الف- تغییرات فاکتور اصطکاک کل نسبت به پارامتر پوشش گیاهی در حالت چیدمان منظم پوشش گیاهی و ب- تغییرات فاکتور اصطکاک کل نسبت به پارامتر پوشش گیاهی در حالت چیدمان نامنظم پوشش گیاهی

مقدار ضریب درگ در چیدمان نامنظم بالاتر از حالت منظم است که این امر به علت قرارگیری پوشش گیاهی در مقابل جریان به صورتی که مانع حرکت آزادانه جریان می‌شود، است. برای نمونه در مقدار پارامتر پوشش گیاهی برابر با ۱، مقدار ضریب درگ در چیدمان منظم برابر ۲ و مقدار این ضریب در حالت نامنظم برابر ۲/۳ است.

در بررسی فاکتور اصطکاک کل که در بردارنده اصطکاک در بستر و اصطکاک ناشی از پوشش گیاهی است، مشخص گردید با افزایش مقدار پارامتر پوشش گیاهی، مقدار فاکتور اصطکاک کل بالا می‌رود. بر همین اساس مشخص گردید در مقدار ثابت پارامتر پوشش گیاهی، مقدار فاکتور اصطکاک کل در حالت چیدمان منظم کمتر از حالت چیدمان نامنظم است. با مقایسه روش‌های محاسبه ضریب درگ و معادله تعادل مشخص گردید روش ارائه شده در این پژوهش روند نزدیک‌تری به معادله تعادل دارد که این امر نشان‌دهنده مناسب بودن روش و روابط موجود در محاسبه ضریب درگ در محدوده انجام این پژوهش است.

با توجه به نمودارهای ارائه شده و خطوط روند یابی معادلاتی برای محاسبه پارامترهای مورد مطالعه در این تحقیق ارائه شد. این خطوط روندیابی دارای ضرایب تبیین نسبتاً مناسبی هستند که استناد به این روابط در محدوده انجام پژوهش را ممکن می‌سازد. در این تحقیق پارامتر پوشش گیاهی که در بردارنده مشخصات هندسی پوشش گیاهی (نظیر قطر، فواصل طولی و عرضی)، عمق و عرض جریان و عمق نسبی است، به عنوان کلیدی‌ترین پارامتر سنجش و ارائه معادلات استفاده شد.

پیشنهاد می‌گردد بررسی پوشش غیر صلب (منعطف) در کانال‌های مرکب با استفاده از این نوع فلوم و روش اندازه‌گیری انجام شود و نتایج با دیگر پژوهش‌های انجام شده مقایسه شود.

تقدیر و تشکر

نویسندگان از دانشگاه علوم و فنون دریایی خرمشهر و شرکت پالایش نفت آبادان برای همکاری در اجرای این تحقیق تشکر و قدردانی می‌نمایند.

تضاد منافع نویسندگان

در این مقاله هیچ‌گونه تضاد منافی وجود ندارد و این مسئله مورد تایید همه نویسندگان است

خطوط روندیابی با ضریب تبیین نسبتاً مناسب در این نمودارها ارائه شده است. بر همین اساس می‌توان از روابط ارائه شده برای محاسبه پارامترها استفاده نمود. با توجه به تغییر نوع چیدمان و با استفاده از رابطه ۱۵ می‌توان نسبتی بین ضریب درگ و پارامتر پوشش گیاهی تعریف کرد.

$$C_D = \psi \lambda^{*-n} \quad (15)$$

در این رابطه ψ و n دو متغیر هستند که با توجه به نوع چیدمان (منظم یا نامنظم) از طریق جدول ۱ به دست می‌آیند.

جدول ۱- پارامترهای موثر در محاسبه ضریب درگ پوشش گیاهی

با توجه به نوع چیدمان پوشش گیاهی		
نوع چیدمان	ψ	n
منظم	۱/۹۰۲۹	۰/۳۴۷
نامنظم	۲/۴۳۹	۰/۳۳۲

برای ارائه معادله محاسبه فاکتور اصطکاک کل با توجه به پارامتر پوشش گیاهی و نمودارهای ارائه شده در شکل ۹ رابطه ۱۶ ارائه شد.

$$f_T = a(\ln(\lambda^*)) + b \quad (16)$$

در رابطه ۱۶ مقادیر a و b بر اساس نوع چیدمان از جدول ۲ قابل استخراج هستند.

جدول ۲- پارامترهای موثر در محاسبه فاکتور اصطکاک کل بر اساس چیدمان پوشش گیاهی

نوع چیدمان	a	b
منظم	۰/۲۷۸۲	۶۵/۴۹۶
نامنظم	۰/۳۸۶۳	۶۶/۲۵۳

نتیجه‌گیری

در این پژوهش با استفاده از روش اندازه‌گیری مستقیم نیروی جریان اندازه‌گیری و از طریق معادلات ارائه شده ضریب درگ و فاکتور اصطکاک کل محاسبه و بر اساس پارامتر پوشش گیاهی در کانال مرکب با وجود پوشش گیاهی در سیلاب‌دشت در نمودارهای مختلف ارائه شد. بر اساس نتایج حاصل از نمودارها مشخص شد نسبت نیروی جریان با افزایش مقدار پارامتر پوشش گیاهی روندی کاهشی دارد که این امر در ارتباط با ضریب درگ فارغ از نوع چیدمان صدق می‌کند. با افزایش پارامتر پوشش گیاهی مقدار ضریب درگ دارای روند نزولی است. علاوه بر این موضوع در یک مقدار ثابت پارامتر پوشش گیاهی،

- 7- Hassani, M. and Tavakoli, F., 2020. Estimation of water level profile in compound channel despite vegetation cover in floodplain. *Iranian Journal of Irrigation and Water Engineering*, (3)11, pp.1-19. [InPersian]. <https://doi.org/10.3390/w14233951>
- 8- Helmio, T., 2002. Unsteady 1D flow model of compound channel with vegetated floodplains. *Journal of Hydrology*, 269(1-2), pp.89-99. [https://doi.org/10.1016/s0022-1694\(02\)00197-x](https://doi.org/10.1016/s0022-1694(02)00197-x)
- 9- James, C., Goldbeck, U., Patini, A. and Jordanova, A., 2008. Influence of foliage on flow resistance of emergent vegetation, *Journal of Hydraulic Research*, 46, pp.536-542. <https://doi.org/10.3826/jhr.2008.3177>
- 10-Jarvela, J., 2004. Determination of flow resistance caused by non submerged woody vegetation. *International Journal of River Basin Management*, 2, pp.61-70. <https://doi.org/10.1080/15715124.2004.9635222>
- 11-Kang, H. and Choi, S., 2006. Turbulence modelling of compound open-channel flows with and without vegetation on the floodplain using the Reynolds stress model. *Advances in Water Resources*, 29, pp.1650-1664. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2005.12.004>
- 12-Kim, S. J. and Stoesser, T., 2011. Closure modeling and direct simulation of vegetation drag in flow through emergent vegetation. *Journal of Water Resources Research*, 47(10), W10511. <https://doi.org/10.1029/2011wr010561>.
- 13-Maturi, F., 2018. Investigation of the effect of non-submerged rigid vegetation on the transfer of motion size in a symmetric rectangular composite channel by direct measurement method. Khorramshahr University of Marine Sciences and Technology. Master Thesis, September [InPersian].
- 14-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*, 9(22), pp.155-160. <https://doi.org/10.2478/jaes-2019-0021>.
- 15-Maturi, F. and Behdarvandi Askar, M., Direct Measurement of the Effect of Non-Submerged Rigid Vegetation-Induced Flow Cross-Section Area Variations on Flow Force in Compound Channel, *Flow Measurement and Instrumentation*, 78,10185. <https://doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2020.101884>.
- 16-Maturi, F., Behdarvandi Askar M., Ansari Qojar., M. and Parsi, A., 2020. Laboratory study of the

دسترسی به داده‌ها

همه اطلاعات و نتایج در متن مقاله ارائه شده است.

اصول اخلاقی

نویسندگان اصول اخلاقی را در انجام و انتشار این اثر علمی رعایت نموده‌اند و این موضوع مورد تایید همه آنها می‌باشد.

مشارکت نویسندگان

نویسنده اول: جمع‌آوری و تحلیل داده‌ها، انجام مراحل

آزمایشگاهی و ویرایش و بازبینی مقاله

نویسنده دوم: تحلیل داده‌ها، راهنمایی، ویرایش و بازبینی مقاله،

کنترل نتایج

منابع

- 1- Armanini, A., Righetti, M. and Grisenti, P., 2005. Direct measurement of Vegetation Resistance in Prototype Scale. *Journal of Hydraulic Research*, 43, pp.481-487. <https://doi.org/10.1080/00221680509500146>.
- 2- Choi, S.U. and Kang, H., 2004. Reynolds stress modeling of vegetated open-channel flows. *Journal of Hydraulic Research*, 42(1), pp.3-11. <https://doi.org/10.1080/00221686.2004.9641178>.
- 3- Defina, A. and Bixio, A.C., 2005. Mean flow and turbulence in vegetated open channel flow. *Journal of Water Resource Research*, 41, W07006. <https://doi.org/10.1029/2004wr003475>.
- 4- Jia F., Han, Y., Wang, W., Li, J. and Du, J., 2025, Flow structure and spectral characteristics in regions with highly flexible vegetation, *Journal of Hydrology*, 2025, 660,133357. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2025.133357>.
- 5- Ferreira, R.M.L., Ricardo, A.M. and Franca, M.J., 2009, Discussion of Laboratory investigation of mean drag in a random array of rigid, emergent cylinders by Yukie Tanino and Heidi M. Nepf. *Journal of Hydraulic Engineering*, 135(8), pp.690-693. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)hy.1943-7900.0000021](https://doi.org/10.1061/(asce)hy.1943-7900.0000021).
- 6- Hamidifar, H. and Omid, M. H., 2019. The effect of vegetation arrangement and interaction of the main canal and floodplain on changes in longitudinal diffusion coefficient in compound channel, *Iranian Soil and Water Research*, (2)51, pp.479-488. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2015.09.048>

- 26-Tsujimoto, T., 1992. Spectral analysis of velocity and water surface fluctuations appearing in an open channel with vegetated and non vegetated regions in a crosssection. In Proceedings of the Sixth IAHR International Symposium on Stochastic Hydraulics, Taipei, pp.361-368.
- 27-Vojudi Mehrabani, F., Mohammadi, M. A. and Ayubzadeh, S. A., 2019. Hydraulic flow in composite canal with vegetation and converging floodplains. 18th Iranian Hydraulic Conference, Tehran [InPersian].
- 28-White, B. and Nepf, H. 2007. Shear instability and coherent structures in shallow flow adjacent to a porous layer. *Journal of Fluid Mechanics*, 593, pp.1-32, <https://doi.org/10.1017/s0022112007008415>.
- 29-Wu, W., Shields, F. D. Jr., Bennett, S. J. and Wang, S.S.Y., 2005. A depth averaged two-dimensional model for flow sediment transport and bed topography curved channels with riparian vegetation, *Journal of Water Resource.research*, 41, W03015, <https://doi.org/10.1029/2004wr003730>
- effect of non-submerged rigid vegetation on the transfer of motion size along the compound Channel by direct measurement method. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 52(2), pp.439-450. [InPersian] <https://dx.doi.org/10.22059/ijswr.2021.313776.668803>.
- 17-Maturi, F. and Behdarvandi Askar, M., 2021. Laboratory Investigation of the Effect of Flow Rate, Diameter and Flow Depth on Shear Stress in a Rectangular Channel with Non-Submerged Rigid Vegetation. 20th Iranian Hydraulic, Gorgan, [InPersian].
- 18-Naot, D., Nezu, I. and Nakagawa, H., 1996. Hydrodynamic behavior of partly vegetated open channels. *Journal of Hydraulic Engineering*, 122, 625-633. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)07339429\(1996\)122:11\(625\)](https://doi.org/10.1061/(asce)07339429(1996)122:11(625))
- 19-Schlichting, H. and Gersten, K., 1968. Boundary-layer Theory. 6th Ed, McGraw-Hill, New York. p.307.
- 20-Sonnenwald, F.C, Stovin, V. and Guymer, I., 2018. Estimating drag coefficient for arrays of rigid cylinders representing emergent vegetation. *Journal of Hydraulic Research*. <https://doi.org/10.1080/00221686.2018.1494050>.
- 21-Stoesser, T., Kim S.J. and Diplas, P., 2010. Turbulent flow through idealized emergent vegetation, *ASCE Journal of Hydraulic. Engineering*, 136(12), pp.1003-1017, [https://doi.org/10.1061/\(asce\)hy.19437900.0000153](https://doi.org/10.1061/(asce)hy.19437900.0000153).
- 22-Sun, X., 2007. Flow characteristics in compound channels with and without vegetation, Ph.D. thesis, Civil Engineering Department, Loughborough University, UK. [Doctoral Thesis].
- 23-Tanino, Y. and Nepf, H.M., 2008. Laboratory investigation of mean drag in a random array of rigid", emergent cylinders. *Journal of Hydraulic Engineering*, 134(1), pp.34-41, [https://doi.org/10.1061/\(asce\)07339429\(2008\)](https://doi.org/10.1061/(asce)07339429(2008)).
- 24-Terrier, B., 2010. Flow characteristics in straight compound channels with vegetation along the main channel. Phd Thesis, Department of Civil Engineering, Loughborough University, UK, [Doctoral Thesis].
- 25-Tinoco, R.O. and Cowen, E.A., 2013. The direct and indirect measurement of boundary stress and drag on individual and complex arrays of elements. *Exp Fluids*, 54, 1509, <https://doi.org/10.1007/s00348-013-1509-3>.