

Experimental Study of Vertical velocity profiles in compound channels with vegetation on floodplains

Fatemeh Tavakoli Nezhad Allah Abadi¹, Marzieh Mohseni^{2*}

1- M.Sc. Graduate student, Department of Civil Engineering, Sirjan University of Technology, Sirjan, Iran.

2- Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Sirjan University of Technology, Sirjan, Iran.

* mohseni_m@sirjantech.ac.ir

Received: 9 September 2020, Accepted: 24 November 2020  J. Hydraul. Homepage: www.jhyd.iha.ir

Abstract

Introduction: Vegetation has traditionally been viewed as a nuisance and obstruction to channel flow by increasing flow resistance and water depth. However, in recent years, vegetation has become a major component of erosion control and stream restoration. Most of research efforts focus on describing vegetation roughness, determining drag coefficients and empirical formulas for resistance under various vegetation configurations. While the development of experimental solutions for vegetative resistance is important, understanding the detailed characteristics of flow through vegetation is also important. Yang et al. (2007) conducted flume experiments with different types of vegetation, and found that, in the cases of non-vegetated floodplains, all measured streamwise velocity distributions followed the logarithmic distribution, but for vegetated floodplains, they followed an S-shaped profile. Nezu and Sanju (2008) studied turbulence structures and coherent motion in vegetated canopy open-channel flows. They divided the whole flow region into three sub-zones, i.e., the emergent zone, the mixing-layer zone and the log-law zone. In the present study, a set of experiments have been designed under different conditions to elucidate the flow structure. The main focus is to examine how the vertical velocities, are affected by simulated vegetation arranged in emergent and submerged conditions. In addition, the effect of dowel density, configuration, and relative depth are examined.

Methodology: The experiments were conducted in a fixed bed rectangular flume, 9 m long and 0.6 m high and 0.8 m wide. The slope of bed flume was 12×10^{-5} . The main channel and floodplain had widths of 24 and 28 cm, respectively, and the main channel had a side slope, s , of 0. The bankfull height, h , was 6 cm. Vegetation were simulated by wooden dowels. The wooden dowels were 140 mm tall and 7 mm in diameter. The dowels were attached to a PVC sheet bolted to the bottom of the flood plain in linear and staggered arrangement. The spacing of the dowels varies from 2.5-10 cm in both lateral and streamwise directions forming stem density of 0.41, 1.64%, 6.04%. The flume was operated under a uniform flow condition, and measurements of discharge, point velocity and flow depth were taken. Flow depths were measured by means of a pointer gauge, discharges were measured by a digital flowmeter, installed upstream of the channel, and a micro propeller current meter were used to velocity measurements. Within the measurement cross section, located at 5.6 m, the authors arranged ten verticals, where the lateral values of y from the first vertical to the last were 0, 4, 8, 12, 12.2, 26 and 34 cm. When the vertical distance from the measurement point to the bed was less than

175 mm, the measurement interval was 10 mm and 5mm in the main channel and floodplain, respectively.

Results and Discussion: The experimental results are presented in three parts, flow through non-vegetated floodplain first, flow through emergent vegetation second and followed by the submerged case. The effects of density and dowel configuration are included in each of the sections. Each section ends with a discussion on the effects of rigid dowels on logarithmic profile. In the cases of non-vegetated floodplains, all measured streamwise velocity distributions followed the logarithmic distribution, but for vegetated floodplains, they followed an S-shaped profile. It is seen that after implanting the vegetation over the floodplain, the velocity over the floodplain decreases whereas it increases in the main channel. Also, as the vegetation density, λ , increases, velocity increases in the main channel and decreases in the floodplain. In the presence of emergent vegetation on floodplain, logarithmic profile does not exist even in the main channel, however it seems that the formation of the S-shaped profile in the main channel is under the bankfull height and above the bankfull height the vertical velocity profile takes on a logarithmic profile again.

On the basis of the present experimental results, the whole flow region is divided into the following three sub-zones: (1) Emergent zone ($0 \leq z \leq h_p$), (2) Mixing-layer zone ($h_p < z \leq h_{log}$), (3) Log-law zone ($h_{log} < z \leq H$). In the present study, h_p was equal to 0.2 H and h_{log} was equal to 0.5 H. In the emergent zone ($0 \leq z \leq h_p$) the velocity is almost constant due to strong wake effects of vegetation stems although it may behave slightly in a counter-gradient fashion. In the second zone ($h_p \leq z \leq h_{log}$), the vertical velocity profile are similar in both submerged and emergent conditions, and the effect of bed roughness is completely eliminated and the velocity gradients are reduced and almost fixed. The velocity in the third zone ($h_{log} < z \leq H$) is significantly higher than the velocity in the second zone. In the log-law zone ($h_{log} < z \leq H$), the log-law of velocity distribution for rough beds is reasonably applied even to vegetated flows. Comparison the longitudinal velocity profiles for linear and staggered dowel arrangements indicates an increase in the resistance due to the linear arrangement compared to the staggered arrangement.

Conclusion: In the cases of non-vegetated floodplains, all measured streamwise velocity distributions followed the logarithmic distribution, but for vegetated floodplains, they followed an S-shaped profile. However, in the main channel, higher than the bankfull height the velocity profile is logarithmic. The results shows that as the vegetation density, λ , increases, the velocity increases in the main channel and decreases in the floodplain. Linear arrangement resulted higher resistance compared to staggered vegetation arrangement. The velocity profile at all locations above the dowel array are very well represented by the following semi logarithmic expression. In fully submerged vegetation, the whole flow region was divided into three sub-zones, i.e., the emergent zone, ($0 \leq z \leq h_p$) the mixing-layer zone ($h_p < z \leq h_{log}$), and the log-law zone ($h_{log} < z \leq H$). In the present study, h_p was equal to 0.2 H and h_{log} was equal to 0.5 H.

Keywords: vertical velocity profile, vegetation, compound channel, arrangement, density, submergence.

© 2020 Iranian Hydraulic Association, Tehran, Iran.



This is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0 license)

(<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

بررسی آزمایشگاهی نیمرخ عمقی سرعت در آبراهه مرکب با پوشش گیاهی در سیلابدشت

فاطمه توکلی نژاد الله آبادی^۱، مرضیه محسنی^{۲*}

۱- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد سازه‌های هیدرولیکی، دانشگاه صنعتی سیرجان.

۲- استادیار گروه مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی سیرجان، سیرجان.

* mohseni_m@sirjantech.ac.ir

دریافت: ۱۳۹۹/۰۶/۱۹، پذیرش: ۱۳۹۹/۰۹/۰۴ و ب‌گاه نشریه هیدرولیک: www.jhyd.iha.ir

چکیده: رودخانه‌ها اغلب به شکل یک آبراهه مرکب عمل می‌کنند، به دلیل شرایط مساعد رطوبتی، سیلابدشت‌ها نیز اغلب زیستگاه گیاهان مختلف با چیدمان و تراکم‌های متفاوت می‌باشند. درک بهتر نقش پوشش گیاهی در انتقال جریان، رسوب و آلاینده‌ها، نیازمند بررسی دقیق ساختار جریان در حضور پوشش گیاهی است. بنابراین در این بررسی آزمایشگاهی، تاثیر وجود پوشش گیاهی صلب در سیلابدشت در دو چیدمان خطی و شطرنجی، سه تراکم ۶/۰۴٪، ۱/۶۴٪ و ۰/۴۱٪ و پنج عمق نسبی ۰/۲۹، ۰/۴۵، ۰/۵، ۰/۶۷ و ۰/۷۵ بر نیمرخ عمقی سرعت بررسی شده است. در این بررسی، سرعت نقطه‌ای جریان توسط سرعت‌سنج پره‌ای در دو حالت پوشش گیاهی مستغرق و غیرمستغرق اندازه‌گیری شده است. نتایج نشان می‌دهد که نیمرخ عمقی سرعت در شرایط بدون پوشش گیاهی در همه عرض آبراهه مرکب به جز حدفاصل آبراهه اصلی و سیلابدشت از نیمرخ لگاریتمی پیروی می‌کند. در هنگام وجود پوشش گیاهی، نیمرخ عمقی سرعت در میانه آبراهه اصلی همانند الگوی رایج نیمرخ سرعت در آبراهه‌های بدون پوشش گیاهی است و با دور شدن از میانه آبراهه اصلی و نزدیک شدن به حدفاصل آبراهه اصلی و سیلابدشت، از شکل لگاریتمی خارج شده و S شکل می‌شود. با این حال، در آبراهه اصلی نیمرخ عمقی سرعت در ارتفاعی بالاتر از عمق لبریزی به شکل لگاریتمی می‌باشد. بررسی تاثیر تراکم بر نیمرخ عمقی سرعت نشان می‌دهد که با افزایش تراکم، سرعت در آبراهه اصلی افزایش و در سیلابدشت کاهش می‌یابد. همچنین در جریان با پوشش گیاهی به کلی مستغرق، نیمرخ عمقی سرعت را می‌توان به سه ناحیه دنباله، اختلاط و ناحیه لگاریتمی تقسیم نمود.

کلید واژگان: نیمرخ عمقی سرعت، پوشش گیاهی، آبراهه مرکب، چیدمان، تراکم، استغراق.

۱- مقدمه

به صورت پراکنده انجام شده است. افزون بر این، در اغلب بررسی‌های انجام گرفته، تاثیر پوشش گیاهی بر ویژگی‌های کلی جریان بررسی شده است. به عنوان مثال، بسیاری از محققان سعی کردند اثرات پوشش گیاهی بر عمق جریان را با استفاده از ضریب زبری، کمی کنند. تلاش‌های اولیه بر برآورد ضریب زبری مانینگ (Petryk and Bosmajian, n (1976) و ضریب اصطکاکی دارسی ویسباخ f متمرکز بودند (Chen, 1976). چنین روش‌هایی برآوردهای نادرستی از ویژگی‌های جریان ارائه می‌دهند زیرا عمق جریان در تالاب‌ها بسیار متغیر است و در نتیجه ضریب زبری مانینگ و دارسی ویسباخ نیز به صورت قابل توجهی تغییر می‌کند.

در گذشته و به طور سنتی پوشش گیاهی به عنوان یک مانع در مسیر جریان و عامل افزایش مقاومت و عمق آب شناخته شده و اغلب حذف می‌شد. اما در سال‌های اخیر، پوشش گیاهی به بخش مهمی از فرآیند مهار فرسایش و احیاء رودخانه‌ها تبدیل شده است (Simon et al., 2004). درک بهتر و ارزیابی کمی اثرگذاری پوشش گیاهی بر جریان، مستلزم آگاهی از جزئیات ساختار جریان است. جریان درون و بالای گیاهان کشاورزی و جنگلی به صورت گسترده‌ای بررسی شده است (Raupach and Thom, 1981)، اما تحقیقات در مورد جریان آب درون و بالای توده‌های گیاهی

مومنتم یا همان تنش رینولدزی به دلیل اثر شدید دنباله‌ها در پشت ساقه‌ها قابل صرف نظر کردن است و انتقال مومنتم در راستای طولی بسیار بیشتر از راستای قائم صورت می‌گیرد. در ناحیه اختلاط ($h_p < z < h_{log}$) به دلیل حضور انحنای در نیمرخ سرعت، گردابه‌هایی به وجود می‌آید که این گردابه‌ها موجب انتقال مومنتم به درون و بیرون منطقه گیاهی می‌شود. ناحیه لگاریتمی را می‌توان به صورت جریان در آبراهه باز فرض کرد که دارای بستری زبر و یا نرم می‌باشد (Nezu and Sanjo, 2008).

Liu et al. (2008) سرعت جریان درون پوشش گیاهی با دو ارتفاع و دو تراکم کم و زیاد را بررسی کردند. نتایج این بررسی نشان داد که سرعت جریان در قسمت پایینی پوشش گیاهی تا حدودی ثابت است و در قسمت‌های بالای پوشش گیاهی آغاز به افزایش می‌کند و با افزایش تراکم، سرعت در بین پوشش گیاهی کاهش می‌یابد (Liu et al., 2008).

Liu et al. (2012) رابطه (۱) را برای نیمرخ عمقی سرعت در بالای پوشش گیاهی مستغرق بررسی و به این نتیجه رسیدند که نیمرخ عمقی سرعت با رابطه نیمه لگاریتمی همخوانی دارد.

$$\frac{u(z)}{u_*} = k^{-1} \ln \frac{z - d_h}{k_s} + 5.8 \quad (1)$$

در اینجا k ثابت فن کارمن معادل 0.4 ، k_s زبری معادل دانه‌های شن نیکورادزه معادل 0.34 و d_h ارتفاع جابه‌جایی صفحه با سرعت صفر که معادل $d_h/h = 0.82$ در نظر گرفته شده است (Liu et al., 2012).

Nepf (2012) ویژگی‌های جریان در پوشش گیاهی مستغرق را بررسی کرد و نشان داد که جریان در منطقه دارای پوشش گیاهی را می‌توان به دو ناحیه تقسیم کرد: منطقه بالایی پوشش گیاهی که توسط جریان‌های گردابه‌ای کنترل می‌شود و منطقه پایینی که در آنجا شدت آشفتگی بسیار ناچیز است و سپس برای هر منطقه رابطه‌ای را برای محاسبه تبادل مومنتم ارائه نمود.

Huai et al. (2009) با مدل‌سازی پوشش گیاهی صلب، به این نتیجه رسیدند که جریان در آبراهه باز با پوشش گیاهی را می‌توان به سه لایه تقسیم کرد: ناحیه بالایی پوشش گیاهی، ناحیه مربوط به قسمت بالایی پوشش گیاهی و ناحیه مربوط

برای اصلاح رابطه‌های مقاومت، محققان پوشش گیاهی را در قالب زبری‌های مصنوعی و به صورت عنصرهای انعطاف‌پذیر و صلب، در آبراهه‌های آزمایشگاهی شبیه‌سازی کردند. برای مثال می‌توان به نتایج بررسی‌های Tsujimoto et al. (1992), Nepf (1999), Stone and Shen (2002), Garcia et al. (2004), James et al. (2004) اشاره کرد. اغلب این تحقیقات برای برآورد ضریب درگ و روابط تجربی برای تعیین مقاومت، در شرایط مختلف پوشش گیاهی انجام شده‌اند. با وجود اینکه ارائه رابطه‌های تجربی برای محاسبه ضرایب مقاومت اهمیت دارد، اما درک ویژگی‌های دقیق جریان درون پوشش گیاهی نیز بسیار با اهمیت است.

در برخی از تحقیقات ساختار جریان بر مبنای نیمرخ‌های سرعت و شدت آشفتگی در یک نقطه، تشریح شده است (Tsujimoto et al., 1992). در دیگر بررسی‌ها از میانگین مکانی سرعت‌های اندازه‌گیری شده در نقاط مختلف استفاده شده است مانند بررسی (Nepf (1999) و Garcia et al. (2004). چنین بررسی‌هایی بیان‌کننده ویژگی‌های کلی جریان می‌باشند. Yang et al. (2007) در یک بررسی آزمایشگاهی، نیمرخ عمقی سرعت در یک آبراهه مرکب را با انواع مختلف پوشش گیاهی (درخت، بوته، چمن) ارزیابی و به این نتیجه رسیدند که نیمرخ عمقی سرعت، هنگامی که در سیلاب‌دشت هیچگونه پوشش گیاهی وجود نداشته باشد به صورت لگاریتمی و در زمان حضور پوشش گیاهی در آبراهه اصلی همچنان لگاریتمی و در سیلاب‌دشت S شکل است (Yang et al., 2007).

Nezu and Sanjo (2008) نیمرخ جریان در میان گیاهان مستغرق و غیر مستغرق را بررسی کردند و به این نتیجه رسیدند که به دلیل اختلاف نیروی درگ در عمق، نیمرخ سرعت در راستای عمودی انحراف پیدا می‌کند در نتیجه این ناپایداری، گردابه‌های چسبنده (گردابه‌های کلونین هلمهولتز) ایجاد می‌شوند که موجب انتقال جرم و مومنتم به ناحیه بین و بیرون از پوشش گیاهی می‌شود. در این بررسی ناحیه‌ی جریان در میان پوشش گیاهی مستغرق در آبراهه باز به سه ناحیه دنباله ($0 < z < h_p$)، لایه اختلاط ($h_p < z < h_{log}$) و ناحیه لگاریتمی ($h_{log} < z < H$) تقسیم شده است. در ناحیه دنباله انتقال قائم

۲- شرح آزمایش‌ها

آزمایش‌ها در فلوم آزمایشگاهی با سطح مقطع مستطیلی با دیواره‌ها و کف پلکسی گلس انجام شده است. این فلوم به طول ۹، عرض ۰/۸ و ارتفاع ۰/۶ متر با شیب ثابت ۰/۰۰۱۲ می‌باشد. به منظور مرکب کردن فلوم از یونولیت و صفحه‌های پلی‌کربنات استفاده شده است. این صفحه‌ها در دو طرف فلوم، قرار داده شده تا آبراهه مرکب منشوری با مقطع مستطیلی ایجاد گردد. عرض هر سیلابدشت ۰/۲۸ متر و عمق لبریزی ۰/۰۶ متر در نظر گرفته شده است، در این حالت نسبت عرض آبراهه (نسبت عرض کل آبراهه به عرض آبراهه اصلی) برابر ۳/۳۳ و نسبت بعدهای آبراهه (نسبت عرض به عمق آبراهه اصلی) برابر ۴ می‌باشد که در این صورت می‌توان نتایج آن را به مقطع‌های واقعی رودخانه نیز تعمیم داد (Zahiri, 2006). به منظور مدلسازی پوشش گیاهی از چوب‌هایی به قطر ۷ میلی‌متر و طول ۱۴ سانتی‌متر استفاده شده است که ۲ سانتی‌متر از طول چوب‌ها به منظور محکم شدن آن‌ها بر روی صفحات پلی‌کربنات و یونولیت در نظر گرفته شده است. در ورودی فلوم روی مخزن بالادست به منظور کاهش آشفتگی از یک ورقه‌ی مشبک دایره‌ای و یک صفحه یونولیت استفاده شده است. یک تبدیل شامل دو رمپ هم‌عرض با سیلابدشت ایجاد شده است تا رقوم بستر در ابتدای فلوم به صورت تدریجی به رقوم کف سیلابدشت‌ها افزایش پیدا کند. عمق جریان، به وسیله دریچه کشویی در انتهای فلوم کنترل می‌شود. پوشش گیاهی در فاصله ۳/۶ متری از ابتدای فلوم و به طول ۳/۹ متر نصب شده است. پوشش گیاهی در دو چیدمان خطی و شطرنجی و در سه تراکم ($\lambda = 0.41\%, 1.64\%, 6.04\%$) قرار گرفته‌اند. تعریف تراکم در رابطه (۲) ارائه شده است:

در این رابطه D_v قطر پوشش گیاهی، N تعداد گیاهان، B و L طول و عرض منطقه دارای پوشش گیاهی می‌باشد. این سه تراکم برای هر دو چیدمان خطی و شطرنجی تکرار می‌شود. چیدمان و فاصله گیاهان از یکدیگر در شکل (۱) نشان داده شده است. با بررسی نیمرخ‌های سرعت در مقطع‌های مختلف و اطمینان از توسعه یافتگی جریان در فاصله ۵/۵ متری از ابتدای آبراهه، اندازه‌گیری سرعت در

به قسمت پایینی پوشش گیاهی.

(Yang and Choi, 2010) با مدلسازی پوشش گیاهی صلب مستغرق در یک آبراهه باز، جریان را به دو لایه تقسیم‌بندی کردند و به این نتیجه رسیدند که تغییرپذیری‌های سرعت در بین پوشش گیاهی به صورت یکنواخت و در بالای پوشش گیاهی لگاریتمی است.

(Lopez et al. 2011) با نصب پوشش گیاهی صلب نامستغرق در همه مقطع عرضی آبراهه به این نتیجه رسیدند که سرعت در بین پوشش گیاهی ثابت و به صورت یک خط عمودی است.

(Afzalimehr and Setayesh 2018) با بررسی نیمرخ سرعت جریان در تراکم‌های مختلف پوشش گیاهی غیرمستغرق به این نتیجه رسیدند که قانون لگاریتمی در بخش داخلی لایه مرزی در همه تراکم‌ها معتبر است. افزون بر این نویسندگان کاربرد قانون کولز در ناحیه بیرونی در شرایط وجود پوشش گیاهی را به دلیل توزیع نامتعارف نیمرخ سرعت و تشدید آشفتگی جریان نامعتبر دانستند.

(Li et al. 2020) آزمایش‌هایی را بر روی آبراهه‌ی با یک ردیف پوشش گیاهی غیرمستغرق بر دیواره جانبی آبراهه، انجام داده و ویژگی‌های جریان و ساختارهای آشفتگی را بررسی نمودند. آنان دریافتند که میدان جریان را می‌توان بر مبنای توزیع عرضی میانگین سرعت جریان و تنش رینولدز در منطقه تعادل به سه منطقه مختلف تقسیم کرد: یک منطقه تحت تأثیر مرز، یک لایه مختلط و یک منطقه یکنواخت.

با وجود اینکه پوشش گیاهی غالباً در سیلابدشت‌ها وجود دارد اما بررسی بسیار کمی در زمینه تأثیر پوشش گیاهی واقع در سیلابدشت بر نیمرخ عمقی سرعت در جاهای

$$\lambda = N \frac{\pi D_v^2}{4BL} \quad (2)$$

مختلف از عرض آبراهه مرکب و در شرایط مختلف (تراکم، چیدمان و عمق نسبی) انجام شده است لذا در بررسی حاضر، نیمرخ عمقی سرعت در جریان درون پوشش گیاهی در نقاط مختلف از یک آبراهه مرکب در حالت مستغرق و غیر مستغرق اندازه‌گیری شده و تغییرات آن در شرایط مختلف بررسی و با نیمرخ لگاریتمی مقایسه شده است.

داده شده است با فرض $y=0$ در میانه آبراهه اصلی، سرعت در $y=0, y=4, y=8, y=12$ سانتی متر در آبراهه اصلی و $y=12.2, y=26, y=34$ در سیلابدشت اندازه گیری شده است.

این مقطع انجام شده است. سرعت نقطه ای به علت متقارن بودن آبراهه، تنها در نیمی از عرض آبراهه و با استفاده از سرعت سنج پره ای نیکسون با دقت $\pm 1/5\%$ اندازه گیری شده است. موقعیت اندازه گیری نیمرخ سرعت در شکل (۲) نشان

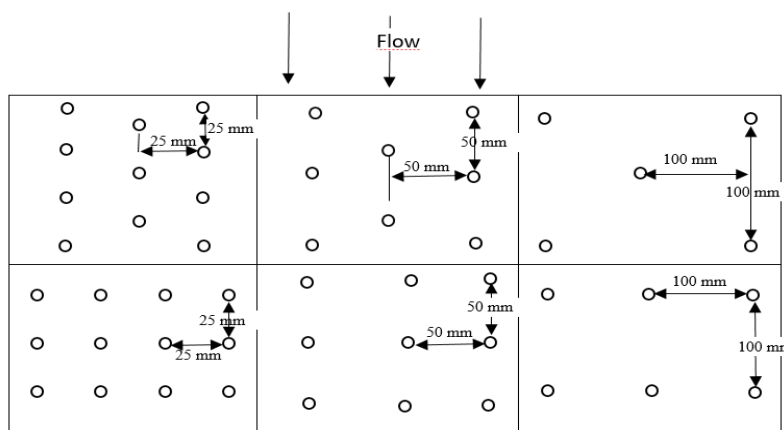


Fig. 1 Vegetation arrangement and density on floodplain
شکل ۱ چیدمان و تراکم پوشش گیاهی قرار گرفته در سیلابدشت

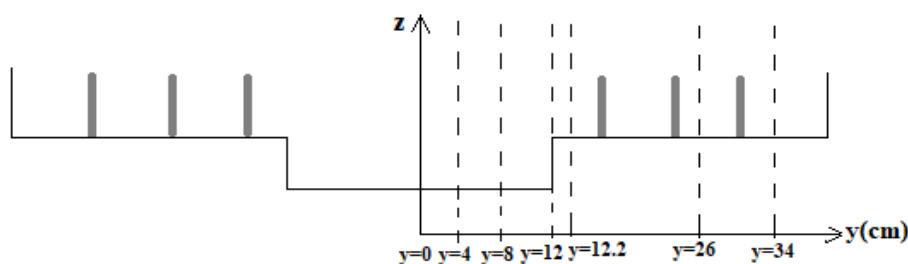


Fig. 2 Cross section of symmetric compound channel and measurement locations, Solid lines indicates vegetation
شکل ۲ مقطع آبراهه مرکب و موقعیت های اندازه گیری سرعت را نشان می دهد، خطوط توپر نشان دهنده پوشش گیاهی است.

(۱) نیمرخ عمقی سرعت در شرایط بدون پوشش گیاهی، (۲) نیمرخ عمقی سرعت در شرایط پوشش گیاهی غیرمستغرق، (۳) نیمرخ عمقی سرعت در شرایط پوشش گیاهی مستغرق. در هر بخش، تاثیر تراکم و چیدمان پوشش گیاهی به صورت جداگانه بررسی شده است. در نمودارها y نشان دهنده موقعیت و فاصله از مرکز آبراهه اصلی (شکل ۲)، S و L نوع چیدمان پوشش گیاهی، به ترتیب، خطی و شطرنجی می باشد. اعداد $0.4/6, 0.64/1, 0.41/0$ نشان دهنده تراکم پوشش گیاهی است.

در هر مرحله یک تراکم با چیدمان مشخص درون فلوم قرار داده می شود و با تغییر عمق نسبی توسط دریچه انتهایی و تنظیم دبی جریان، سرعت به صورت نقطه ای در عرض آبراهه اندازه گیری می شود؛ سپس همین عملیات برای دیگر تراکم ها و چیدمان ها تکرار می شود. در جدول (۱) ویژگی آزمایش ها ارائه شده است، در این جدول Dr نشان دهنده عمق نسبی یعنی نسبت عمق آب در سیلابدشت به عمق آب در آبراهه اصلی می باشد. در شکل (۳) منحنی دبی اشل مربوط به آزمایش ها ارائه شده است.

۳-۱- نیمرخ عمقی سرعت در شرایط بدون پوشش گیاهی

۳- نتایج و بحث

نتایج آزمایش ها در سه بخش اصلی ارائه و تحلیل می گردد:

جدول ۱ شرایط آزمایشها
Table 1 Experiment Conditions

Data Number	Arrangement	Submergence condition	Density (%)	Q(Lit/s)	(Relative Dr Depth)
Run 1,2,3	Linear	emergent	0.41	9.35,17.5,23.5	0.29, 0.45,0.5
Run 4,5	Linear	submerged	0.41	31.93,39.5	0.67,0.75
Run 6,7,8	Linear	emergent	1.64	9.35,17.5,23.5	0.29, 0.45,0.5
Run 9,10	Linear	submerged	1.64	31.93,39.5	0.67,0.75
Run 11,12,13	Linear	emergent	6.04	9.35,17.5,23.5	0.29, 0.45,0.5
Run 14,15	Linear	submerged	6.04	31.93,39.5	0.67,0.75
Run 16,17,18	staggered	emergent	0.41	9.35,17.5,23.5	0.29, 0.45,0.5
Run 19,20	staggered	submerged	0.41	31.93,39.5	0.67,0.75
Run 21,22,23	staggered	emergent	1.64	9.35,17.5,23.5	0.29, 0.45,0.5
Run 24,25	staggered	submerged	1.64	31.93,39.5	0.67,0.75
Run 26,27,28	staggered	emergent	6.04	9.35,17.5,23.5	0.29, 0.45,0.5
Run 29,30	staggered	submerged	6.04	31.93,39.5	0.67,0.75
Run 31,32,33,34,35	Non vegetated	-----	-----	9.35,17.5,23.5, 31.93,39.5	0.29,0.45,0.5, 0.67,0.75

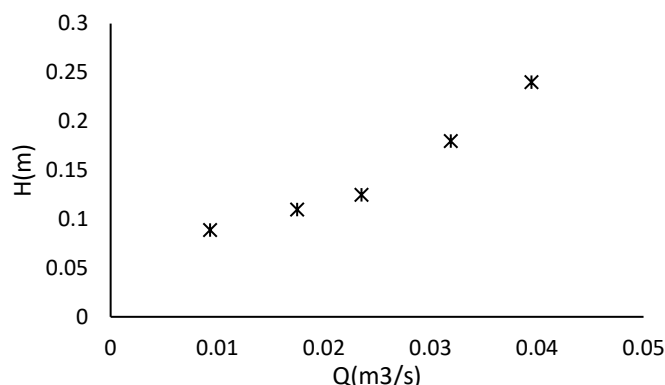


Fig. 3 stage-discharge rating curve

شکل ۳ منحنی دبی اشل

تبادل مومنتم، اختلاف سرعت در آبراهه اصلی و سیلابدشت به میزان قابل توجهی افزایش می‌یابد.

۳-۱-۱- توزیع لگاریتمی نیمرخ عمقی سرعت

در این بخش نیمرخ‌های عمقی سرعت در شرایط بدون پوشش گیاهی با رابطه لگاریتمی ارائه شده توسط Yang et al. (2007) (رابطه ۳) مقایسه شده است (شکل ۶ و ۷).

$$\frac{U}{u_*} = C \ln(Hr) + D \quad (3)$$

در رابطه (۳)، U ، سرعت نقطه‌ای، $u_* = \sqrt{gRS}$ سرعت برشی، S شیب آبراهه و R شعاع هیدرولیکی است که برای آبراهه اصلی و سیلابدشت محاسبه شده است، مقدار Hr در آبراهه اصلی به صورت $Hr = z/H$ و در سیلابدشت $Hr = (z-h)/(H-h)$ می‌باشد. مقدار فراسنجه‌های C و D با

در شکل (۴) نیمرخ عمقی سرعت در آبراهه اصلی و سیلابدشت در عمق‌های نسبی مختلف در شرایط بدون پوشش گیاهی نشان داده شده است. نتایج نشان‌دهنده تفاوت قابل توجه سرعت در آبراهه اصلی و سیلابدشت در عمق نسبی ۰/۵ می‌باشد. با افزایش عمق نسبی، اختلاف سرعت در آبراهه اصلی و سیلابدشت کاهش می‌یابد به طوری که در عمق نسبی ۰/۷۵ سرعت در آبراهه اصلی و سیلابدشت تقریباً یکسان می‌شود، در شکل (۵) نیمرخ عرضی سرعت متوسط عمقی ارائه و تاثیر عمق نسبی بررسی شده است. در واقع در عمق نسبی بالا، اثر تبادل مومنتم در حدفاصل آبراهه اصلی و سیلابدشت کاهش می‌یابد که موجب نزدیک شدن اندازه سرعت در آبراهه اصلی و سیلابدشت می‌شود و با کاهش عمق نسبی به دلیل افزایش

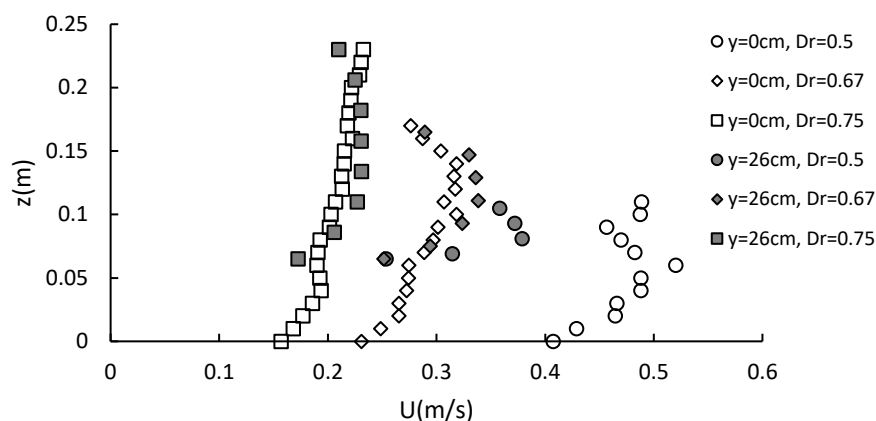


Fig. 4 Vertical distributions of point velocity at different locations in non-vegetated case
 شکل ۴ نیمرخ عمقی سرعت در موقعیت‌های مختلف در شرایط بدون پوشش گیاهی

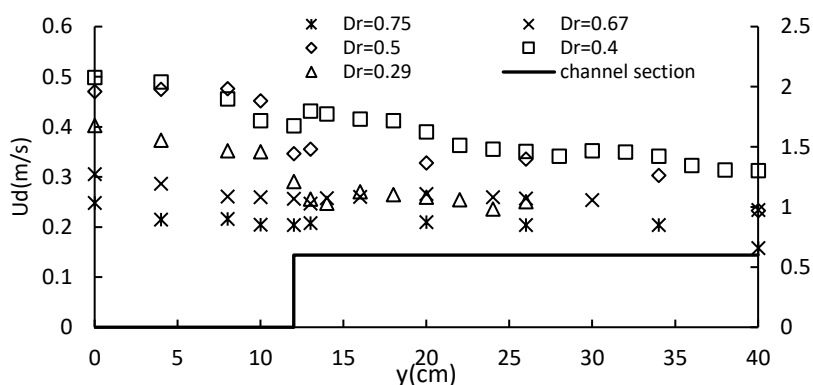


Fig. 5 Lateral profiles of the depth averaged velocity in non-vegetated case
 شکل ۵ توزیع عرضی سرعت متوسط گیری شده در عمق در شرایط بدون پوشش گیاهی

موجب کاهش سرعت در سیلابدشت و افزایش سرعت در آبراهه اصلی نسبت به شرایط بدون پوشش گیاهی می‌گردد. با افزایش تراکم پوشش گیاهی در سیلابدشت، سرعت در همه جای آبراهه اصلی و در همه عمق، افزایش می‌یابد. شکل نیمرخ عمقی سرعت در میانه آبراهه اصلی مشابه الگوی رایج نیمرخ سرعت در آبراهه‌های بدون پوشش گیاهی است و با دور شدن از میانه آبراهه اصلی و نزدیک شدن به حدفاصل آبراهه اصلی و سیلابدشت ($y=12\text{cm}$) با فاصله گرفتن از بستر، سرعت جریان به دلیل کاهش تنش برشی بستر تا حدودی افزایش می‌یابد اما با توجه به افزایش نیروی کشانه ناشی از وجود پوشش گیاهی، سرعت بار دیگر کاهش می‌یابد که در نتیجه نیمرخ عمقی S شکل می‌شود. با افزایش عمق نسبی و افزایش تراکم پوشش گیاهی، میزان تغییر شکل بیشتر می‌شود. در شکل (۹) نیمرخ عمقی سرعت در دو موقعیت $y=12.2$

برازش داده‌ها با رابطه (۳) برآورد و در جدول (۲) ارائه شده است؛ نتایج نشان داد که در آبراهه مرکب بدون پوشش گیاهی، نیمرخ عمقی سرعت در آبراهه اصلی و در سیلابدشت، با ضریب همبستگی قابل توجهی، شکل لگاریتمی دارد اما اندازه C و D به موقعیت نقطه و فاصله از مرکز آبراهه وابسته است. کمترین ضریب همبستگی در $y=12$, $y=12.2$ مشاهده می‌شود که علت آن تبادل شدید مومنتم در این منطقه (حدفاصل آبراهه اصلی و سیلابدشت) است.

۳-۲- نیمرخ عمقی سرعت در شرایط پوشش گیاهی نامستغرق

در شکل (۸)، نیمرخ‌های عمقی سرعت در عرض آبراهه مرکب، در تراکم و عمق‌های نسبی مختلف در چیدمان خطی ارائه شده است. وجود پوشش گیاهی در سیلابدشت،

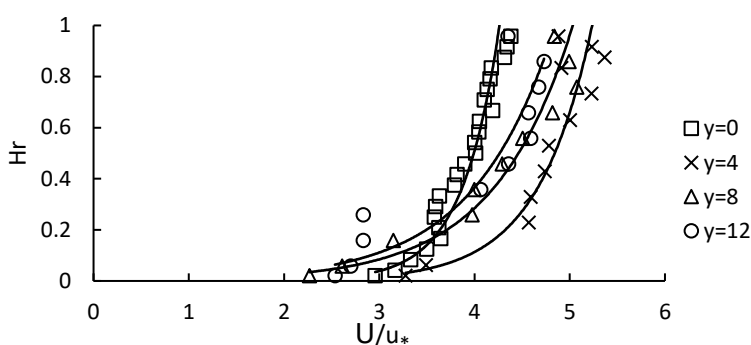


Fig. 6 Comparison of vertical velocity profiles with logarithmic velocity profile in the main channel in non-vegetated case

شکل ۶ مقایسه نیمرخ عمقی سرعت با نیمرخ لگاریتمی سرعت در آبراهه اصلی در حالت بدون پوشش گیاهی و $Dr=0.75$

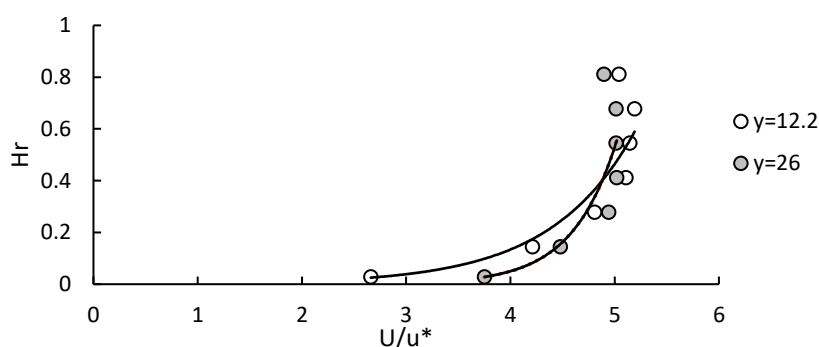


Fig. 7 Comparison of vertical velocity profiles with logarithmic velocity profile in floodplain in non-vegetated case, $Dr=0.75$

شکل ۷ مقایسه نیمرخ عمقی سرعت با نیمرخ لگاریتمی سرعت در سیلابدشت در حالت بدون پوشش گیاهی و $Dr=0.75$

جدول ۲ ضریب‌های C و D و ضریب همبستگی R2 در رابطه (۲) در شرایط بدون پوشش گیاهی

Table 2 Coefficients C and D in Eq. 2 for the Case of non- vegetated floodplain

y(cm)	C	D	R2
0	0.28	4.16	0.953
4	0.64	5.25	0.923
8	0.94	5.09	0.97
12	0.82	4.74	0.84
12.2	0.597	5.19	0.84
26	0.31	5.05	0.9

۳-۲-۱- تاثیر چیدمان بر نیمرخ عمقی سرعت

تاثیر چیدمان خطی و شطرنجی بر نیمرخ عمقی سرعت در دو موقعیت مختلف، در آبراهه اصلی ($y=0$) و سیلابدشت ($y=16$) در شکل (۱۰) با یکدیگر مقایسه شده است، لازم به یادآوری است که در $y=16$ cm، سرعت سنج در منطقه جریان آزاد (بین دو پوشش گیاهی) قرار گرفته است و هیچ‌گاه پوشش گیاهی در مقابل سرعت سنج قرار نداشته است. همان‌گونه که مشخص است در این نقطه‌های مشخص الگوی نیمرخ عمقی سرعت در هر دو چیدمان همانند است اما میزان‌های سرعت در چیدمان خطی، در همه جای آبراهه

و $y=26$ در سیلابدشت نشان داده شده است همان‌گونه که ملاحظه می‌شود. سرعت در سیلابدشت‌ها با افزایش تراکم کاهش می‌یابد. با افزایش عمق نسبی، سرعت در این منطقه افزایش می‌یابد اما تاثیر عمق نسبی در مقایسه با شرایط بدون پوشش گیاهی بسیار کمتر است. افزون بر این در $y=12.2$ (لبه سیلابدشت) بیشترین تغییر سرعت در عمق مشاهده می‌شود و با فاصله گرفتن از لبه سیلابدشت، این تغییرپذیری کاهش یافته و نیمرخ یکنواخت‌تری مشاهده می‌شود.

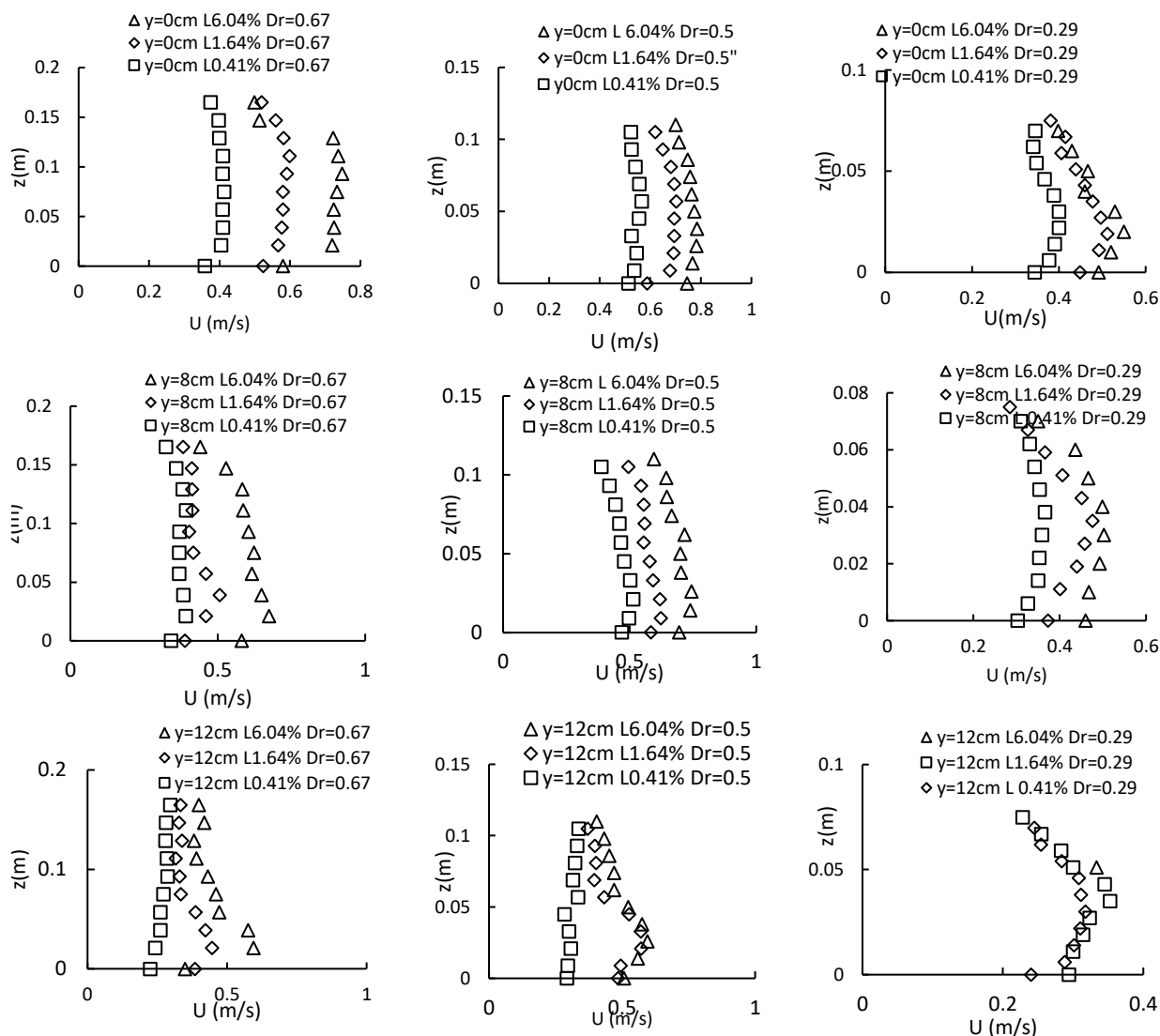


Fig. 8 Comparison of the longitudinal velocity profiles under various depth ratio and density conditions in linear arrangement

شکل ۸ نیمرخ عمقی سرعت در نقاط مختلف از عرض آبراهه مرکب در عمق نسبی و تراکم‌های مختلف در چیدمان خطی

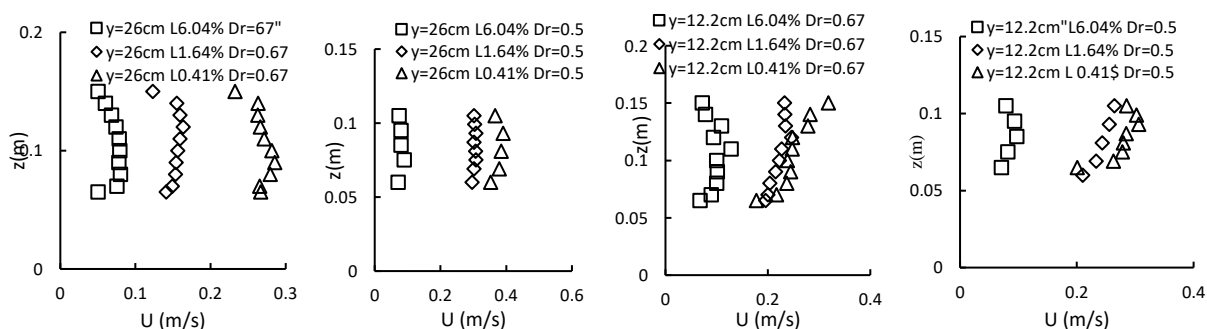


Fig. 9 Comparison of the longitudinal velocity profiles in floodplain under various depth ratio and density conditions.

شکل ۹ نیمرخ عمقی سرعت در سیلابدشت در عمق نسبی و تراکم‌های مختلف به صورت خطی

تنها در سیلابدشت وجود دارد، این نتیجه به دور از محل قرارگیری سرعت سنخ قابل قبول می‌باشد. با این وجود در سیلابدشت سرعت در چیدمان خطی کمتر از چیدمان

اصلی و در عمق نسبی‌های مختلف بیشتر از چیدمان شطرنجی است که این مطلب نشان‌دهنده ایجاد مقاومت بیشتر در چیدمان خطی می‌باشد، از آنجا که پوشش گیاهی

می یابد به گونه ای که در تراکم ۶/۰۴٪ تفاوت ناچیز است.

شظرنجی است البته میزان اختلاف سرعت در دو چیدمان مختلف با افزایش تراکم به میزان قابل توجهی کاهش

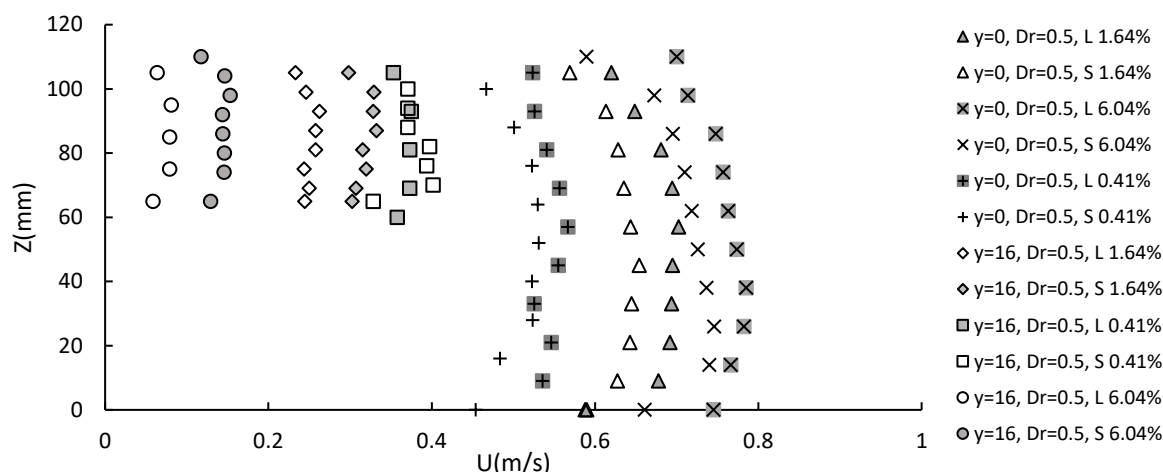


Fig. 10 The longitudinal velocity profiles under emergent flow conditions for linear and staggered dowel arrangements
 شکل ۱۰ نیمرخ عمقی سرعت در دو چیدمان خطی و شظرنجی در شرایط جریان غیرمستغرق

(شکل ۱۱). در سیلابدشت نیز این بررسی انجام شده و مشخص گردید در هر دو چیدمان و در همه تراکمها از $Hr=0.4$ به بالا، نیمرخ عمقی سرعت شکل لگاریتمی به خود می گیرد (شکل ۱۲).

۳-۲-۲- نیمرخ لگاریتمی سرعت

در این بخش نیمرخ عمقی سرعت در نقاط مختلف آبراهه مرکب در حالت وجود پوشش گیاهی غیرمستغرق در سیلابدشت برای عمق نسبی و تراکمهای مختلف با نیمرخ لگاریتمی مقایسه شده است، چنین سازگاری تنها در میانه آبراهه اصلی قابل مشاهده است و با نزدیک شدن به حدفاصل آبراهه اصلی و سیلابدشت، نیمرخ به کلی S شکل می شود، با این حال در بررسی انجام شده به نظر می رسد که شکل گیری نیمرخ S شکل در آبراهه اصلی، تا ارتفاع لبریزی سیلابدشت است و بالاتر از ارتفاع لبریزی، نیمرخ عمقی سرعت بار دیگر شکل لگاریتمی به خود می گیرد

۳-۳- نیمرخ عمقی سرعت در شرایط پوشش گیاهی به کلی مستغرق

نیمرخ عمقی سرعت در نقاط مختلف از آبراهه مرکب در شرایط پوشش گیاهی به کلی مستغرق ($Dr=0.75$) در شکل (۱۳) نشان داده شده است. در حالت کلی می توان نیمرخ عمقی سرعت را برای حالت مستغرق به سه ناحیه

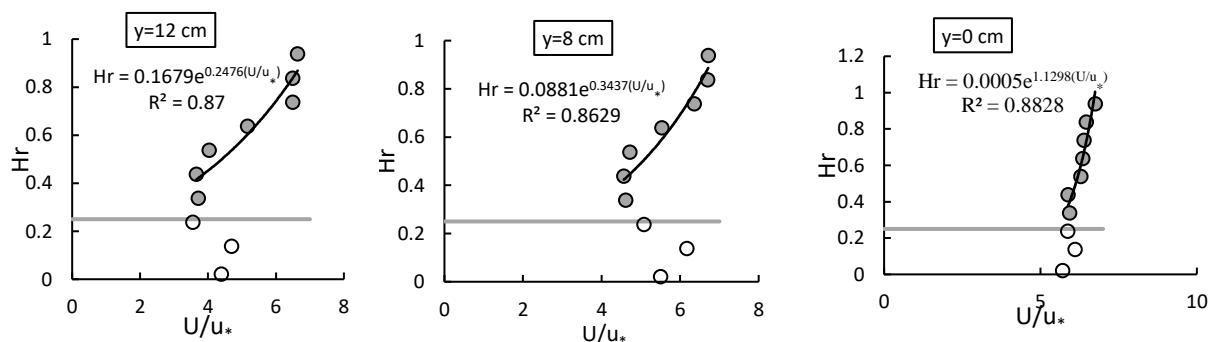


Fig. 11 Comparison of vertical velocity profiles with logarithmic velocity profile in the main channel in emergent-vegetation case, $Dr=0.67$ and density 1.64%. Horizontal line indicates bankfull height.

شکل ۱۱ مقایسه نیمرخ عمقی سرعت در آبراهه اصلی در چیدمان شظرنجی برای $Dr=0.67$ و تراکم ۱/۶۴٪ با نیمرخ لگاریتمی - خط افقی نشان دهنده ارتفاع لبریزی سیلابدشت می باشد.

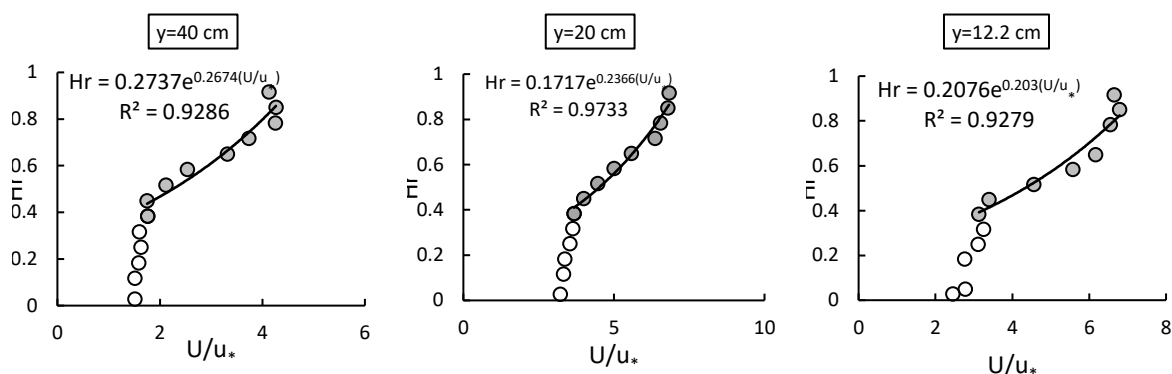


Fig. 12 Comparison of vertical velocity profiles with logarithmic velocity profile in the floodplain in non-vegetated case under $Dr=0.67$ and density 1.64% condition

شکل ۱۲ مقایسه نیمرخ عمقی سرعت در سیلابدشت در چیدمان شطرنجی برای $Dr=0.67$ با تراکم ۱/۶۴٪ با نیمرخ لگاریتمی

ناحیه سوم با رابطه (۱) مقایسه شده است همان گونه که مشخص است این ناحیه از ارتفاعی در حدود بالای پوشش گیاهی آغاز می شود در حالی که در بررسی Nezu & Sanjou (2008) ناحیه لگاریتمی از ارتفاعی خیلی بالاتر از ارتفاع پوشش گیاهی شروع می شود، این پدیده در نتایج بررسی Liu et al. (2008) نیز نشان داده شده است.

۳-۱-۳ تاثیر چیدمان بر نیمرخ عمقی سرعت

نیمرخ عمقی سرعت در شرایط استغرق کامل، در شکل (۱۵) برای دوچیدمان خطی و شطرنجی، ارائه شده است. همانند شرایط نبود استغرق، سرعت در آبراهه اصلی در چیدمان خطی بیشتر از سرعت در چیدمان شطرنجی است و با افزایش تراکم این اختلاف افزایش می یابد این مسئله نشان دهنده افزایش مقاومت ناشی از چیدمان خطی نسبت به چیدمان شطرنجی است. در سیلابدشت، در چیدمان خطی در مقایسه با چیدمان شطرنجی، سرعت در حداقل بستر تا ارتفاع پوشش گیاهی به مراتب کمتر است اما در ارتفاع بالاتر از پوشش گیاهی به دلیل تبادل مومنتم عمودی بیشتر، سرعت جریان در چیدمان شطرنجی کمتر از سرعت در چیدمان خطی است.

۴- نتیجه گیری

در این بررسی تاثیر وجود پوشش گیاهی صلب در سیلابدشت بر نیمرخ عمقی سرعت در شرایط مختلف (تراکم، چیدمان و عمق نسبی) بررسی شده است. نتایج

تقسیم کرد این سه ناحیه بر مبنای بررسی های Nezu & Sanjou (2008) به ناحیه دنباله $(0 \leq z \leq hp)$ ، ناحیه اختلاط $(hp < z \leq hlog)$ و ناحیه لگاریتمی $(hlog < z \leq H)$ تقسیم می شود. در این بررسی hp معادل $0.2H$ و $hlog$ معادل H به دست آمده است. ناحیه نخست، منطقه نزدیک بستر می باشد این محل به علت حضور در ناحیه درون لایه مرزی زبری بیشتری دارد پس تنش در این نقطه زیاد است و به علت وجود نیروی درگ، نیمرخ سرعت در این ناحیه به شکل نعل اسبی ظاهر می شود. در ناحیه دوم (از لایه مرزی تا ارتفاع پوشش گیاهی) ویژگی های جریان و نیمرخ عمقی سرعت در هر دو حالت مستغرق و غیر مستغرق مشابه است و تاثیر زبری بستر به طور کامل از بین می رود و تغییرپذیری های سرعت کاهش می یابد و تا حدودی ثابت می شود. سرعت در ناحیه سوم (بالای پوشش گیاهی)، به میزان قابل توجهی بیشتر از سرعت در ناحیه دوم می باشد. همان گونه که مشخص است با افزایش تراکم، سرعت در فاصله میان بستر تا ارتفاع گیاه، کاهش می یابد ولی در منطقه بالای ارتفاع گیاه افزایش می یابد. افزون بر این در تراکم های مختلف، اختلاف سرعت در ارتفاع بالاتر از ارتفاع گیاه کم می شود و به صورت یک جریان آزاد روی بستر زبر عمل می کند. هر چه تراکم پوشش گیاهی بیشتر باشد سرعت در ناحیه بالای پوشش گیاهی بیشتر می شود و تبادل مومنتم شدیدتری رخ می دهد. برای همه تراکم ها، نیمرخ سرعت بالای پوشش گیاهی در تمام نقطه های نیمه لگاریتمی می باشد. در شکل (۱۴) نیمرخ سرعت در

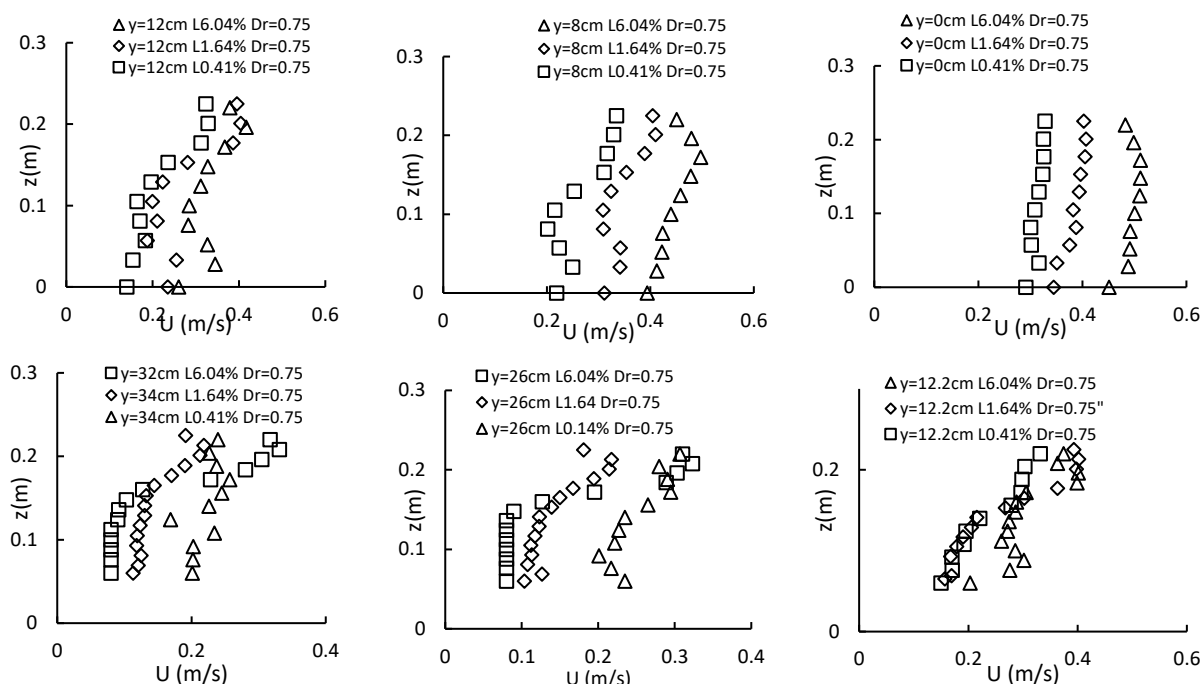


Fig. 13 Vertical velocity profile in main channel ($y=0,8,12$ cm) and floodplain ($y=12.2,26, 32$ cm) under fully submerged flow conditions

شکل ۱۳ نیمرخ عمقی سرعت در موقعیت‌های مختلف در آبراهه اصلی ($y=0,8,12$) و در سیلابدشت ($y=12.2,26, 32$) در شرایط وجود پوشش گیاهی به کلی مستغرق

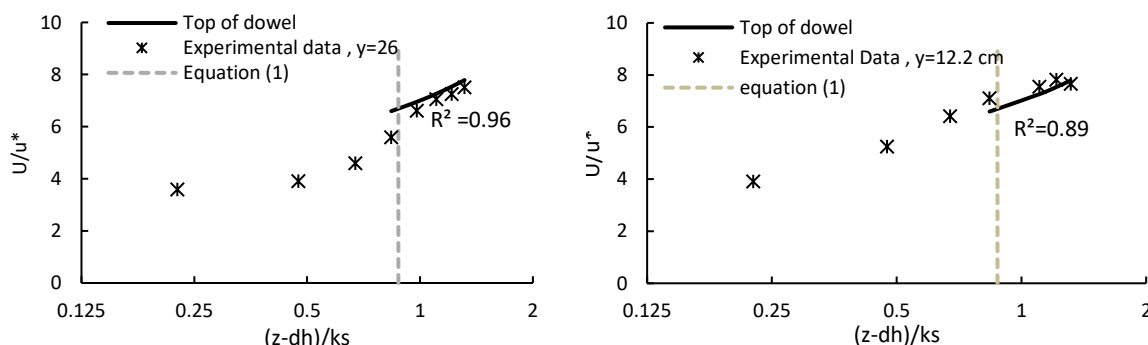


Fig. 14 The velocity profile of Exp (1) at two locations on floodplain has the logarithmic profile. Vertical line indicates top of dowel array.

شکل ۱۴ نیمرخ عمودی سرعت بالای پوشش گیاهی در همه سیلابدشت از توزیع لگاریتمی رابطه (۱) پیروی می‌کند. خط عمودی نشان دهنده بالای پوشش گیاهی است.

لگاریتمی بیرون و S شکل می‌شود. در این حالت افزایش تراکم موجب افزایش سرعت در آبراهه اصلی و کاهش سرعت در سیلابدشت می‌شود. با بررسی تاثیر چیدمان خطی و شطرنجی مشخص شد که چیدمان خطی مقاومت بیشتری در مقایسه یا چیدمان شطرنجی ایجاد می‌کند. در شرایط پوشش گیاهی غیرمستغرق، نیمرخ عمقی سرعت در آبراهه اصلی از $Hr > 0.4$ شکل لگاریتمی دارد. در شرایط پوشش گیاهی مستغرق (عمق نسبی 0.75)، نیمرخ عمقی

نشان داد که در حالت عدم وجود پوشش گیاهی، نیمرخ عمقی سرعت در تمام عرض آبراهه اصلی از نیمرخ لگاریتمی سرعت پیروی می‌کند. افزایش عمق نسبی در این حالت، موجب کاهش اختلاف سرعت در آبراهه اصلی و سیلابدشت می‌شود، به گونه‌ای که در عمق نسبی 0.75 تفاوتی میان سرعت در آبراهه اصلی و سیلابدشت وجود ندارد. در شرایط وجود پوشش گیاهی در سیلابدشت، شکل نیمرخ عمقی سرعت به میزان قابل توجهی تغییر کرده و از شکل

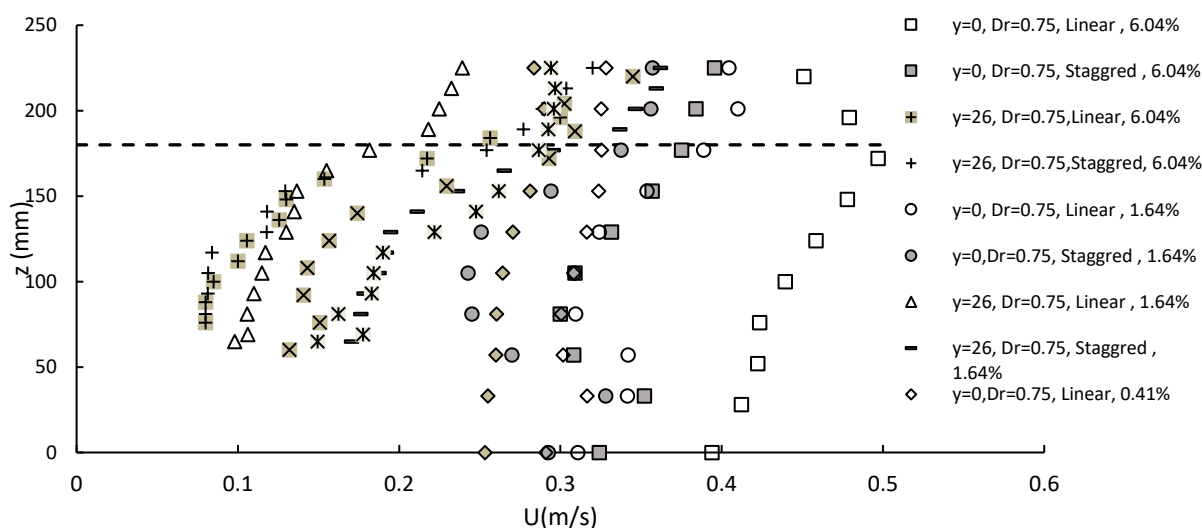


Fig. 15 The longitudinal velocity profiles under submerged flow conditions for linear and staggered dowel arrangements

شکل ۱۵ نیمرخ‌های سرعت برای جریان کاملاً مستغرق در دو چیدمان شطرنجی و خطی

Chen, C. (1976). Flow Resistance in Broad Shallow Grassed Channels, J. Hydraul. Div. Am. Soc. Civ. Eng., 102(HY3), 307– 322.

Garcia, M.H., Lopez, F., Dunn, C. and Alonso, C.V. (2004). Flow, turbulence, and Resistance in a Flume with Simulated Vegetation, in Riparian Vegetation and Fluvial Geomorphology, edited by S. J. Bennett & A. Simon, AGU, Washington, D.C., 11 –27

James, C.S., Birkhead, A.L., Jordanova, A.A. and Sullivan, J.J.O. (2004). Flow Resistance of emergent vegetation, J. Hydraul. Res., 42(4), 390– 398.

Huai, W.X., Zeng, Y.H., Xu, Z.G. and Yang, Z.H. (2009). Three-layer model for vertical velocity distribution in open channel flow with submerged rigid vegetation. Adv water resour, 32(4), 487–92.

Li, D., Huai, W.X. and Liu, M.Y. (2020). Investigation of the flow characteristics with one-line emergent canopy patches in open channel, Journal of Hydrology, 590, 1-13.

Liu, D.P., Diplas, J.D., Fairbanks, C. and Hodges, C. (2008). An experimental study of flow through rigid vegetation. J. Geophys. Res., 113, F04015.

Liu, D.P., Diplas, J.D., Fairbanks, C. and Hodges, C. (2008). An experimental study of flow through rigid vegetation. J. Geophys. Res., 113, F04015, doi:10.1029/2008JF001042.

Liu, Z.W., Chen, Y.C., Zhu, D.J., Hui, E.Q. and Jiang, C.B. (2012). Analytical model for vertical velocity profiles in flows with submerged shrub-like vegetation. Environ fluid mech, 12(4), 341–346.

Nepf, H.M. (2012). Flow and transport in regions with aquatic vegetation. Annu rev fluid mech, 44,

سرعت را می توان به سه ناحیه تقسیم کرد که در عمق $0.5H < z \leq H$ نیمرخ از رابطه نیمه لگاریتمی پیروی می کند.

۵- فهرست نشانه‌ها

B	عرض منطقه دارای پوشش گیاهی
C,D	ضریب‌های معادله لگاریتمی سرعت
d_h	ارتفاع جابه‌جایی صفحه با سرعت صفر
Dr	عمق نسبی
D_v	قطر پوشش گیاهی
Hr	نسبت فاصله عمودی به عمق جریان
κ	ثابت فن کارمن
k_s	زبری معادل دانه‌های شن نیکورازده
L	طول منطقه دارای پوشش گیاهی
λ	تراکم پوشش گیاهی
N	شمار عنصرها
u_*	سرعت برشی
U	سرعت نقطه‌ای
U_d	میانگین سرعت عمقی

۶- منبع‌ها

Afzalimehr, H. and Setayesh, P. (2018). Investigation on Logarithmic and Coles Laws under Different Emergent Vegetation Patches. Journal of Hydraulics, 13(1), 47-62. (in Persian).

Problems and opportunities, in *Riparian Vegetation and Fluvial Geomorphology*, edited by S.J. Bennett & A. Simon, 1– 10.

Stone, B.M. and Shen, H.T. (2002), Hydraulic resistance of flow in channels with cylindrical roughness, *Journal of hydraulic engineering*. 128(5), 500 – 506.

Yang, W. and Choi, S.U. (2010). A two-layer approach for depth-limited open-channel flows with submerged vegetation. *Journal of hydraulic resource*. 48(4), 466–75.

Yang, K., Cao, SH. and Knight, D.W. (2007). Flow patterns in compound channels with Vegetated Floodplains. *Journal of hydraulic engineering*, 133(2), 194-225.

Zahiri, A. (2006). Numerical modeling of water surface profiles and hydraulic flood routing in compound channels using finite differences method, PhD thesis, Tarbiat Modares University, 187p. (in Persian).

123–142.

Nepf, H.M. (1999). Drag, turbulence, and diffusion in flow through emergent vegetation, *Water Resour. Res.*, 35(2), 479 – 489.

Nezu, I. and Sanjou, M. (2008). Turbulence Structure and Coherent Motion in Vegetated Canopy Open-channel Flows. *Journal of hydro-environment research*, 2(2), 62-90.

Petryk, S. and Bosmajian, G. (1975). Analysis of flow through vegetation, *J. Hydraul. Div. Am. Soc. Civ. Eng.*, 101(HY7), 871– 884.

Raupach, M.R. and Thom, A.S. (1981). Turbulence in and around plant canopies, *Annu. Rev. Fluid Mech.*, 13, 97 – 129.

Tsujimoto, T., Shimizu, Y., Kitamura, T. and Okada T. (1992). Turbulent open-channel flow over bed covered by rigid vegetation, *J. Hydrosoci. Hydraul. Eng.*, 10(2), 13–25.

Simon, A., Bennett, S.J. and Neary, V.S. (2004), *Riparian vegetation and fluvial geomorphology:*