

# The Effect of Pressure Flow Conditions on Bridge Pier Scour in Compound Open Channels with Vegetation

Ali Dankoo<sup>1</sup>, Hojjat Allah Yonesi<sup>2\*</sup>, Hassan Torabipodeh<sup>3</sup>, Mojtaba Saneie<sup>4</sup>


1- Ph.D. Student, Department of water Eng., Agriculture faculty, Lorestan University.

2- Assistant Prof., Dep. of Water Eng. Agriculture faculty, Lorestan University.

3- Associate Prof., Dep. of Water Eng. Agriculture faculty, Lorestan University.

4- Associate Prof., River and coastal Eng., Soil Conservation and Watershed Management Research Institute.

\* [yonesi.h@lu.ac.ir](mailto:yonesi.h@lu.ac.ir)

Received: 10 September 2021, Accepted: 19 September 2021  J. Hydraul. Homepage: [www.jhyd.iha.ir](http://www.jhyd.iha.ir)

## Abstract

**Introduction:** Bridges are one of the most important structures built on rivers and are considered as a structure connecting the two parts of the road. One of the most important reasons for the destruction of bridges is the scouring of its piers. New bridge design challenges, due to climate change and human intervention, as well as uncertainties associated with maximum events, may not adequately lead to accurate hydraulically design of bridges and may therefore as a result, in some floods, the bridge deck submerged. Under these conditions, the flow can be converted to a pressurized. This pressurized flow passes at high velocity in the region of bridge piers. As a result, it can increase the erosion potential of bed materials near bridge piers. Up to now, many studies have been performed to determine the relationship between estimating the rate of scouring of bridge piers in laboratory conditions with clear water and living bed, Such as: CSU equation.

Under pressurized flow condition, researchers such as Umbrel et al., Richardson and Davis, Zehi, and Karankina et al. Have developed relationships to determine the amount of scouring of bridge piers in simple channels. Due to the difference in flow velocity in the main channel and floodplains in the compound open channels, the important changes occur in the kinetic structure of the flow near the connection line between the main channel and floodplains. These changes also cause vortices as a result of excess energy loss in the flow. In addition, the presence of vegetation on floodplains complicates the hydraulic analysis of the flow in such sections. Up to now, many studies have been performed to explain the hydraulic conditions of the flow in compound channels with and without vegetation, including Shiono knight (1991), Rameshwaran and Shiono (2007), Zarati et al. (2008), Yu-qi Shan et al. (2016), Tanino et al. (2008). and Sonnenwald et al. (2019).

In previous studies, the amount of scouring of bridge piers in the conditions of pressurized flow under the deck in compound channels with vegetation has not been investigated.

The aim of this study was to investigate the effects of vegetation density, pressurized flow under the bridge deck with different geometric and hydraulic conditions on the scour depth of bridge piers in a compound channel.

**Methodology:** Experiments of this research was performed in a laboratory channel with a width of 1.5 meters and a length of 10 meters. The experiments in this study were performed with 3 geometric ratios of cross section ( $\chi=B/b$ ), 3 relative depths ( $Dr$ ) and 3 vegetation densities ( $\phi$ ). It should be noted that the experiments are designed in such a way that in all of relative depths, the bridge deck is submerged and the flow pressurized.

The maximum depth of scouring under the flow pressurized passing under the bridge can be expressed as a simple and dimensionless equation (1):

$$\frac{Z_{\max}}{h_a} = f\left(\frac{U}{U_c}, \frac{h_a}{h_b}, \frac{B}{b}, \frac{y_f}{h_a}, T\right) = f(\kappa, \psi, \chi, Dr, T) \quad (1)$$

Considering the control volume from the upstream of the bridge deck to the downstream of it, the momentum equation can be written to calculate the apparent shear stress as follows:

$$\left(F_{p1mc} - F_{p2mc+backwater}\right) - \rho g \bar{A}_{mc} L S_0 + (2SF_3 + SF_4)L + \rho(\beta_{2mc} U_{2mc} Q_{2mc} - \beta_{1mc} U_{1mc} Q_{2mc}) + 2ASF_v = 0 \quad (2)$$

**Results and Discussion: A: Depth averaged velocity:** In vegetation densities used in this study, the average velocity on floodplains with vegetation is relatively constant in most cases. This shows that except in the interface of the main channel and floodplains, the flow distribution on floodplains can be considered two-dimensional. As the vegetation density increases, the depth averaged velocity difference between the main channel and the floodplain increases between 50%-80%.

**B: Shear stress:** Due to the presence of vegetation, the reduction of the average flow velocity on the floodplain occurred as a result of shear stress has also decreased. The transverse changes of shear stress downstream of the bridge, due to the behavior of the pressurized flow passing in the deck, have more fluctuations and are on average about 25% more than the average values upstream of the bridge.

**C: Local friction factor:** The Darcy–Weisbach friction factor in the floodplain area increases significantly due to the presence of vegetation elements. The pattern of variability of Darcy–Weisbach friction factor on the floodplain also causes a sinusoidal pattern due to the reduction of flow velocity and the presence of skin friction on the surface of the rods.

**D: Apparent shear stress:** Due to the resistance due to increasing vegetation density, the amount of apparent shear stress at higher densities increases. On the other hand, with increasing relative depth and decreasing of secondary current, the amount of apparent shear stress decreases.

**E: Equation for predicting maximum scour depth:** Based on determining the effective parameters in the amount of scour rate and using the data of this study, the following equation is presented to estimate the amount of scour of the bridge pier under pressurized flow conditions.

$$Z_{\max} = -16.012 + 0.298(\chi) + 19.078(Dr) - 0.494(T) + 13.406(\psi) + 0.509(\kappa) \quad (3)$$

**Conclusion:** - Increasing the density of vegetation increases the longitudinal velocity in the main canal and decreases it in the floodplain.

-Bridge pier scouring develops faster in pressurized flow than in free surface flow.

-With the exception of the height of the dune in the pressurized flow, the depth of scour hole on a small laboratory scale is less than 50% of the depth of the upstream of the bridge deck.

-The position of the maximum scouring depth quickly reaches its equilibrium position near the downstream edge of the bridge deck.

**Keywords:** Bridge pier scour, Pressurized flow, Compound channel, Clear water.

© 2022 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/>)

# تأثیر جریان تحت فشار بر آبستگي پایه پل در مقاطع مرکب با پوشش گیاهی

علی دانکوا<sup>۱</sup>، حجت الله یونسی<sup>۲\*</sup>، حسن ترابی پوده<sup>۳</sup>، مجتبی صانعی<sup>۴</sup>

۱- دانشجوی دکتری سازه های آبی، دانشگاه لرستان.

۲- استادیار گروه مهندسی آب دانشگاه لرستان.

۳- دانشیار گروه مهندسی آب دانشگاه لرستان.

۴- دانشیار سازه های آبی، مرکز حفاظت خاک و آبخیزداری جهاد کشاورزی استان تهران.

\* yonesi.h@lu.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۰/۰۶/۱۹، پذیرش: ۱۴۰۰/۰۶/۲۸، وبگاه نشریه هیدرولیک: [www.jhyd.iha.ir](http://www.jhyd.iha.ir)

**چکیده:** در زمان بروز پدیده سیلاب در رودخانه‌ها و افزایش تراز سطح آب، اکثراً عرشه پل‌ها مستغرق خواهد شد. در این شرایط جریان عبوری از زیر عرشه بصورت تحت فشار رفتار خواهد کرد. میزان آبستگي بستر در محدوده پایه‌های پل متأثر از وجود جریان تحت فشار خواهد شد. در این تحقیق به بررسی آزمایشگاهی هیدرولیک جریان نزدیک شونده به عرشه پل در مقاطع مرکب با وجود پوشش گیاهی در سیلابدشت و اثرات جریان تحت فشار در زیر عرشه پل پرداخته شده است. آزمایش‌ها با پوشش گیاهی صلب غیرمستغرق و با سه عرض مختلف سیلابدشت و چهار تراکم مختلف پوشش گیاهی با سه عمق نسبی متفاوت انجام شده است. با استفاده از نتایج آزمایش‌ها و آنالیز ابعادی رابطه تخمین میزان آبستگي پایه پل تبیین شده است. نتایج نشان می‌دهد که نسبت عمق جریان نزدیک شونده به ارتفاع پل و عمق نسبی جریان با ضریب همبستگی پیرسون ۰/۹ موثرترین عوامل در میزان حداکثر عمق آبستگي می‌باشند. اگرچه انتظار می‌رود که به ازای یک عمق نسبی معین، با زبر شدن سیلابدشت، در مقایسه با سیلابدشت صاف، مقدار تنش برشی افزایش یابد اما در تحقیق حاضر بدلیل نوع زبری پوشش های گیاهی در داخل سیلابدشت، با افزایش تراکم پوشش گیاهی (کاهش فاصله ردیف‌های پوشش گیاهی)، تنش برشی ۲۰ درصد کاهش می‌یابد.

**کلیدواژه‌گان:** آبستگي پایه پل، جریان تحت فشار، کانال مرکب، آب زلال

## ۱- مقدمه

است در بعضی از سیل‌ها، عرشه پل به حالت مستغرق در آید. جریان تحت فشار با کاهش عمق آب در عرشه پل و تندتر شدن سرعت جریان نسبت به حالت بدون عرشه معرفی می‌شود، که باعث افزایش تنش برشی و شدت آشفستگی و در نهایت منجر به آبستگي می‌شود. (Kumcu, 2016). این جریان باعث افزایش تنش برشی و شدت آشفستگی و در نهایت منجر به آبستگي می‌شود (Umbrell et al., 1998). در مقایسه با جریان آبراهه باز، جریان تحت فشار دارای توان بالقوه فرسایشی بیشتری می‌باشد (Guo et al., 2009). آغاز فرآیند آبستگي تحت فشار، از انقباض عمودی سطح

پل‌ها یکی از مهم‌ترین سازه‌های بنا شده بر روی رودخانه‌ها بوده و به‌عنوان سازه اتصال دهنده دو بخش جاده به‌شمار می‌آیند. یکی از مهم‌ترین علت‌های تخریب پل‌ها، آبستگي پایه‌های آن می‌باشد. در ۵۲٪ موارد، شکست پل‌ها به‌طور عمده به‌دلیل آغاز آبستگي است (Cook et al., 2015). چالش‌های جدید طراحی پل، به علت تغییر اقلیم و دخالت‌های بشری و همچنین عدم قطعیت‌هایی که در ارتباط با رخدادهای پیشین‌های وجود دارد، به اندازه کافی نمی‌تواند باعث طراحی دقیق هیدرولیکی پل‌ها شود و در نتیجه ممکن

می‌باشد (شکل ۱). (Arneson (1997) سرعت بحرانی  $U_c$  مربوط به حرکت اولیه رسوبات را بر مبنای  $h_a$  به صورت زیر تعریف کرده است.

$$U_c = 1.52 \sqrt{g(s-1)d_{50}} \left( \frac{h_a}{d_{50}} \right)^{\frac{1}{6}} \quad (3)$$

که در آن  $s$  و  $g$  و  $d_{50}$  به ترتیب وزن مخصوص مواد رسوبی، شتاب ثقل و قطر میانگین ذرات رسوبی است.

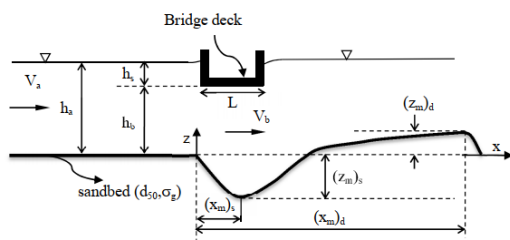


Fig. 1 Longitudinal profile of the channel bed with pressurized flow conditions (Kumcu, 2016)

شکل ۱ نیمرخ طولی آبراهه در شرایط رخداد جریان تحت فشار (Kumcu, 2016)

(Guo et al., 2008) تاثیر تیغه‌های فلزی در زیر عرشه پل بر هیدرودینامیک جریان تحت فشار و محل بیشینه عمق آبستنگی در زیر پل برای شرایط آب زلال و جریان تحت فشار را به صورت تحلیلی و آزمایشگاهی بررسی کردند. نتایج تحقیق ایشان نشان داد که بیشینه عمق آبستنگی در فاصله‌ای به طول ۱۵ درصد عرض عرشه از لبه پایین دست عرشه رخ می‌دهد. انباشتگی رسوبات نیز تا حدودی از ۲/۵ برابر عرض عرشه از پایین دست پل آغاز می‌شود. (Kumcu (2016) معادله زیر را بر مبنای داده‌های آزمایش‌های (Arneson (1997), Umbrell et al., (1998) بیشینه عمق آبستنگی تحت فشار با شرایط آب زلال در حالت جریان دائمی پیشنهاد داد.

$$\frac{(h_b + Z_{max})}{h_a} = 0.65 + 0.5 \left( \frac{U_b}{U_c} \right) \quad 0.5 \leq \frac{U_b}{U_c} < 1 \quad (4)$$

$$\frac{(h_b + Z_{max})}{h_a} = 1.025 + 0.125 \left( \frac{U_b}{U_c} \right) \quad 1 \leq \frac{U_b}{U_c} < 1.8$$

که در این رابطه  $U_b$  سرعت اولیه جریان (پیش از آبستنگی) می‌باشد.

مقطع عرضی بسیاری از رودخانه‌ها در بازه‌های مجاور منطقه‌های مسکونی و زراعی به صورت آبراهه مرکب است. در بیشتر این ناحیه‌ها پوشش گیاهی نیز بر روی

جریان توسط عرشه پل، کاهش سطح مقطع عرضی و افزایش سرعت جریان متناظر در میان بازشدگی می‌باشد. با حرکت مواد بستر به بیرون از منطقه انقباض، مساحت مقطع عرضی افزایش می‌یابد و تا زمان کاهش سرعت ادامه می‌یابد. در نهایت سرعت جریان به کمتر از سرعت آستانه حرکت مواد بستر می‌رسد و تعادل آبستنگی به دست می‌آید (Kumcu, 2016). تاکنون بررسی‌های فراوانی به منظور تعیین رابطه‌هایی برای برآورد میزان فرسایش پایه‌های پل در شرایط آزمایشگاهی با آب زلال و بستر زنده انجام شده است. به طور مثال می‌توان به معادله دانشگاه ایالتی کلرادو (CSU) برای جریان‌های آزاد اشاره کرد (Richardson and Davis, 2001). طبق این رابطه آبستنگی پایه پل در شرایط بستر زنده و آب زلال به صورت زیر محاسبه می‌شود.

$$\frac{Z_{max}}{h_a} = 2.0 \left[ K_1 K_2 K_3 K_4 \left( \frac{t}{h_a} \right)^{0.65} \right] Fr^{0.43} \quad (1)$$

که در آن  $Z_{max}$ ،  $h_a$ ،  $K_1$ ،  $K_2$ ،  $K_3$ ،  $K_4$ ،  $t$  و  $Fr$  به ترتیب عمق آبستنگی پایه، عمق جریان در بالادست پایه، ضریب شکل دماغه پایه، ضریب زاویه برخورد جریان، ضریب مربوط به وضعیت بستر، ضریب پنهان شدگی ذرات بستر، عرض پایه، عدد فرود بالادست پایه می‌باشد.

(Abed (1991) بر مبنای داده‌های آزمایش‌های انجام شده در شرایط آب زلال، بیان می‌کند که بیشینه عمق گودال آبستنگی پایه پل در جریان تحت فشار بین ۲/۳ - ۱۰ برابر میزان آبستنگی در جریان آزاد باشد.

(Umbrell et al., (1998) آزمایش‌هایی را با عمق ثابت ۰/۳۰۵ متر در یک آبراهه مستطیلی انجام دادند. اغلب آزمایش‌های آنها در شرایط آب زلال، بدون پایه و برای هر دو حالت عرشه‌ی مستغرق و غیرمستغرق انجام دادند. آنها رابطه شماره (۲) را برای محاسبه آبستنگی تحت فشار ارائه دادند:

$$\frac{Z_{max} + h_b}{h_a} = \left\{ 1.102 \left[ \left( 1 - \frac{w_e}{h_a} \right) \frac{U}{U_c} \right]^{0.603} \right\} \quad (2)$$

در این رابطه  $U$  و  $w_e$ ،  $U$  و  $h_b$  به ترتیب فاصله اولیه (پیش از آبستنگی) بین لبه پایین پل و کف ناحیه دست نخورده در محل پل؛ سرعت میانگین جریان در بالادست پل، تراز آب روی لبه بالای عرشه پل و سرعت بحرانی مواد بستر

میانگین سرعت جریان در بین المان ها می باشد. Tanino and Nepf (2008) نشان دادند که ضریب کشانه  $Cd$  با افزایش عدد رینولدز کاهش می یابد، و برای کسر حجمی انسداد  $\phi < 0.09$  و  $Re_{rod} > 1000$ ، تا حدود  $1-1/0.5$  می باشد. در بررسی های پیشین بررسی میزان آبشستگی پایه های پل در شرایط جریان تحت فشار در مقاطع ساده مستطیلی و مقاطع مرکب مورد بررسی اجمالی قرار گرفته است. با توجه به پیچیدگی هیدرولیک جریان در مقاطع مرکب با سیلابدشت پوشیده از پوشش گیاهی به خاطر تولید افت انرژی مازاد از یک سو و ایجاد شرایط جریان تحت فشار در زیر عرشه پل از سوی دیگر، شرایط میدان جریان برای ایجاد آبشستگی به کلی می تواند متفاوت از جریان آزاد باشد. لذا در این تحقیق به بررسی اثرگذاری تراکم پوشش گیاهی، بروز جریان تحت فشار در زیر عرشه پل با عمق های نسبی مختلف در یک آبراهه مرکب با سه نسبت مختلف عرض بر روی میزان عمق آبشستگی پایه های پل پرداخته شده است.

## ۲- مواد و روش ها

آزمایش های این تحقیق در یک آبراهه آزمایشگاهی با طول و عرض به ترتیب ۱۰ و ۱/۵ متر در پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری جهاد کشاورزی استان تهران انجام شده است. این آبراهه از یک مجرای اصلی با هندسه دوزنقه ای با عرض کف تقریبی ۰/۳ متر و شیب جانبی ۱:۱ با عمق لبریزی ۱۵۰ میلی متر و دو سیلابدشت متقارن با عرض ۰/۴۵ متر تشکیل شده است. عرشه پل مستطیل شکل به طول ۱/۵ متر و عرض ۰/۳ متر بر روی پایه استوانه ای شکل به قطر ۰/۰۵ متر در فاصله ۶ متری از بالادست آبراهه و در وسط آبراهه اصلی قرار گرفته شده است. برای برقراری جریان در آغاز توسط سه دستگاه پمپ سانتریفوژ با دبی بیشینه ۱۵۰ لیتر در ثانیه از یک منبع زیرزمینی به مخزن هوایی منتقل شده و پس از گزینش دبی مورد نظر، توسط یک شیرفلکه، دبی عبوری تنظیم می شد. مابقی دبی توسط یک لوله برگشتی وارد مخزن زیرزمینی می شد. برای استهلاک تلاطم ناشی از عبور جریان از روی سرریز، دو ردیف آرام کننده در بالادست آبراهه نصب شد تا

سیلابدشت های پیرامون وجود دارد. به دلیل وجود اختلاف سرعت جریان در آبراهه اصلی و سیلابدشت ها در مقطع مرکب رودخانه، تغییر پذیری مهمی در ساختار جنبشی جریان در نزدیک خط اتصال بین آبراهه اصلی و سیلابدشت ها به وجود می آید. این تغییر پذیری هائیز باعث ایجاد گردابه هایی در نتیجه بروز افت انرژی اضافی در مسیر جریان می شود. تاکنون بررسی های زیادی در زمینه تبیین شرایط هیدرولیکی جریان در مقاطع مرکب با و بدون پوشش گیاهی انجام شده است که از آن جمله می توان به (Shiono and Knight (1991), Rameshwaran, Shan et al., Zarrati et al. (2008), and Shiono (2007), Sonnenwald et al. و Tanino and Nepf (2008), (2016) (2019) اشاره نمود (Samadi Rahim et al., 2021). به طور مثال، Shiono and Knight (1991) با کاربرد معادله ناویر-استوکس در شرایط دائمی و یکنواخت و در شرایط بدون پوشش گیاهی ارائه کردند.

$$\rho g H S_{0x} + \frac{\partial}{\partial y} \left( \rho \lambda \sqrt{\frac{f}{8}} H^2 U_d \frac{\partial U_d}{\partial y} \right) - \quad (5)$$

$$\frac{\rho f}{8} \sqrt{1 + S_{0y}^2} U_d^2 = \Gamma$$

$$U_d = \frac{1}{H} \int_0^H u_d z, \quad u_* = \sqrt{\frac{\tau_b}{\rho}}, \quad \Gamma = \frac{\partial}{\partial y} (H(\rho U V)_d)$$

که در آن  $H, \rho, S_{0x}, S_{0y}, f, \lambda, \Gamma, U_d$  و  $u_*$  به ترتیب چگالی سیال، عمق جریان در آبراهه اصلی (معادل  $h_a$ )، شیب کف آبراهه، شیب دیواره جانبی آبراهه، ضریب بدون بُعد لزجت گردابه ای، ضریب زبری دارسی-ویسباخ، ترم جریان ثانویه، سرعت میانگین گیری شده در عمق و سرعت برشی می باشد.  $x, y$  به ترتیب راستای طولی و عرضی جریان و  $U, V$  نیز سرعت در راستای  $x, y$  می باشد. Sonnenwald et al. (2019) با اضافه کردن پارامتری جدید بر مبنای قطر المان و تراکم پوشش گیاهی، رابطه ۶ را برای برآورد ضریب کشانه ارائه کردند.

$$C_D = 2 \left( \frac{6475 d}{Re_{rod}} + 17d + 3.2\phi + 0.50 \right) \quad (6)$$

$$\phi = \frac{\pi d}{4}, \quad Re_{rod} = \frac{U_p d}{\nu}$$

که در این رابطه  $Re_{rod}$ ،  $\phi$ ،  $\nu$  و  $U_p$  به ترتیب عدد رینولدز میله، کسر حجمی انسداد، لزجت سینماتیکی و



در این تحقیق از شرایط هیدرولیکی آب زلال استفاده شده است. به منظور بررسی میزان فشار جریان در زیر عرشه پل، پیزومترهایی در سه ردیف در راستای مرکز و منتهی الیه دوطرف آبراهه اصلی، بر روی عرشه نصب شده است. اندازه‌گیری سرعت جریان در فاصله‌های عرضی ۰/۰۵ متر و فاصله‌های عمقی ۰/۲۵ متر و مقاطع مختلف توسط یک سرعت‌سنج دوبعدی ساخت شرکت دلف هیدرولیک اندازه‌گیری شده است. عمق آبشستگی و پروفیل طولی بستر در پیرامون پایه پل با استفاده از دستگاه برداشت بستر به صورت خودکار اندازه‌گیری شده است. در شکل ۳ نگاره‌های این ابزار نشان داده شده است.



Fig. 3 a: 2-D Velocimeter, b: Bed profiler  
شکل ۳ a: سرعت سنج دو بُعدی، b: عمق سنج

به دلیل تقارن کامل آبراهه، اندازه‌گیری‌های سرعت نقطه‌ای و میانگین‌گیری شده در عمق تنها برای نصف مقطع عرضی انجام شده است. همچنین برای محاسبه تنش برشی بستر، از رابطه لگاریتمی سرعت عمقی استفاده

جریان پس از عبور از آنها به صورت آرام وارد آبراهه شود. در آزمایش‌های این پژوهش، از ۳ نسبت هندسی از مقطع مرکب ( $\chi=B/b=2.5, 2.17, 1.83$ )، عمق نسبی ( $Dr=y/h_a=0.3, 0.4, 0.5$ )، تراکم پوشش گیاهی ( $T_1, T_2, T_3$ ) و آزمایش‌های بدون پوشش گیاهی ( $T_0$ ) استفاده شده است. برای شبیه‌سازی پوشش گیاهی از المان‌های استوانه‌ای از جنس پلاستیک با قطر ۱ سانتی‌متر استفاده شده است. در جدول شماره ۱ ویژگی‌های سه نوع تراکم پوشش گیاهی ارائه شده است. در شکل ۲ نیز نمای سه بعدی آبراهه و مقطع عرضی نشان داده شده است.

جدول ۱ ویژگی‌های تراکم‌های مختلف پوشش گیاهی

Table 1 Characteristics of different vegetation densities

Type of density	T <sub>1</sub>	T <sub>2</sub>	T <sub>3</sub>
Percentage of density	0.65	1.31	2.61
Number of elements per m <sup>2</sup>	83	167	333
Space of the elements (cm×cm)	8×15	4×15	2×15

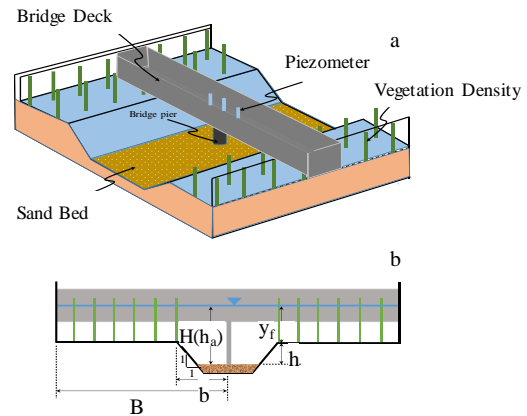


Fig. 2 a,c: General view of the compound open channel  
b: Symetric channel cross section

شکل ۲ a و c: نمای کلی آبراهه مرکب، b: مقطع عرضی متقارن آبراهه

(شکل ۴). با در نظر گرفتن دو مقطع عرضی در بالادست پل، معادله اندازه حرکت به صورت معادله شماره (۸) نوشته می شود.

$$\begin{aligned} & (F_{p1mc} - F_{p2mc+backwater}) - \rho g \bar{A}_{mc} L S_0 + \\ & (2SF_3 + SF_4)L + \rho(\beta_{2mc} U_{2mc} Q_{2mc} - \beta_{1mc} U_{1mc} Q_{1mc}) + \\ & 2ASF_v = 0 \end{aligned} \quad (8)$$

که در آن  $SF_4$ ،  $SF_3$ ،  $L$ ،  $\beta$ ،  $Q_{mc}$ ،  $U_{mc}$ ،  $W_{mc}$ ،  $F_p$  به ترتیب نیروی فشاری، وزن آب در آبراهه اصلی، سرعت میانگین جریان در آبراهه اصلی، دبی عبوری از آبراهه اصلی، ضریب تصحیح اندازه حرکت، طول بازه حجم کنترل و نیروی برشی دیوار و کف آبراهه اصلی می باشد. نمایه های ۱ و ۲ نیز به مقطع های بالادست و پایین دست حجم کنترل و  $l$  و  $r$  به سیلابدشت چپ و راست اشاره دارد. پس از ساده سازی معادله بالا به معادله زیر درخواهد آمد:

$$\begin{aligned} & - \underbrace{(F_{p1mc} - F_{p2mc+backwater})}_I - \underbrace{\rho g \bar{A}_{mc} L S_0}_{II} + \\ & \underbrace{(2SF_3 + SF_4)L}_{III} + \\ & \underbrace{\rho(\beta_{2mc} U_{2mc} Q_{2mc} - \beta_{1mc} U_{1mc} Q_{1mc})}_{IV} + \underbrace{2ASF_v}_V = 0 \end{aligned} \quad (9)$$

که در آن ترم های (۱) تا (۵) به ترتیب بیانگر نیروی ناشی از فشار هیدرواستاتیک، وزن آب، نیروی برشی دیواره و کف آبراهه اصلی، شار اندازه حرکت و نیروی برشی ظاهری می باشد.

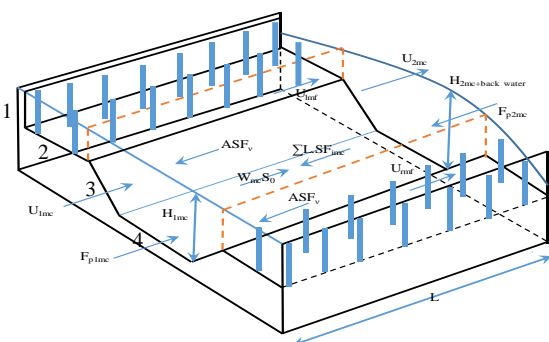


Fig. 4 Perspective view of control volume in compound channels

شکل ۴ نمای سه بُعدی حجم کنترل مقطع مرکب

### ۳- بحث و نتیجه گیری

۳-۱- پراکنش سرعت میانگین گیری شده در عمق در شکل ۵ پروفیل سرعت میانگین عمقی در عرض آبراهه در حالت های مختلف آزمایش نشان داده شده است.

شده است. کف آبراهه اصلی از مصالح فرسایش پذیر غیرچسبنده با ضخامت ۰/۱۵ متر و قطر میانگین ۰/۰۱۳ متر پوشیده شده است. ویژگی های این مصالح به صورت زیر می باشد.

$$D_{50}=0.0013m, C_u=1.7, D_g=1.16, \sigma_g=1.5$$

بر مبنای چگونگی کارگذاری و تراکم المان های پوشش گیاهی، منحنی های دبی- اشل برای هر چهار حالت پوشش گیاهی استخراج شد. سپس بر مبنای این منحنی ها و عمق نسبی مورد نظر، میزان دبی ورودی به آبراهه تنظیم شد.

### ۲-۱- تحلیل ابعادی

برای تعیین عامل های موثر در میزان آبستنگی پایه پل در شرایط تحت فشار و بر مبنای تحلیل عدم قطعیت پارامترها، درصد ضریب تغییرات پارامترهای موثر از جمله پارامترهای  $\chi, Dr, T, \psi, \kappa$  به ترتیب ۱۲/۶۲، ۲۰/۴۱، ۸/۴۵ و ۱۲/۹۶ درصد محاسبه و سپس رابطه بدون بُعد زیر با استفاده از روش  $\pi$  باکینگهام استخراج شده است.

$$\frac{Z_{max}}{h_a} = f\left(\frac{U}{U_c}, \frac{h_a}{hb}, \frac{B}{b}, \frac{y_f}{h_a}, T\right) = f(\kappa, \psi, \chi, Dr, T) \quad (7)$$

که در آن  $\kappa$  نسبت سرعت میانگین جریان به سرعت بحرانی و  $\psi$  نسبت ارتفاع کل جریان در آبراهه اصلی به تراز عرشه پل تا بستر آبراهه می باشد.

در جدول ۲ نیز دامنه تغییرات پارامترهای مورد آزمایش نشان داده شده است.

جدول ۲ دامنه تغییرپذیری پارامترهای مورد بررسی

Table 2 Domain of changes of the examined parameters

Parameter	Zmax	$\chi$	Dr	T	$\psi$	$\kappa$
Min	3.4	1.83	0.3	0	1.11	0.51
Max	15	2.5	0.5	2.61	1.535	0.73

### ۲-۲- تنش برشی ظاهری

تنش برشی ظاهری بین آبراهه اصلی و سیلابدشت ها بر مبنای موازنه نیروهای مؤثر در محل اتصال آبراهه اصلی و سیلابدشت در شرایط جریان دائمی محاسبه شده است

ناحیه چرخشی پشت میله بسیار کوچک است. در این حالت به دلیل کمتر شدن فاصله میان المان‌ها، مسیر گردابه تشکیل شده در پشت آنها با یکدیگر تداخل داشته و باعث تضعیف حرکت سینوسی مقادیر سرعت جریان می‌شود.

با افزایش تراکم پوشش گیاهی، اختلاف سرعت میانگین عمقی میان آبراهه اصلی و سیلابدشت بین ۵۰ تا ۸۰ درصد افزایش می‌یابد. همچنین نتایج آزمایش‌ها نشان می‌دهد که کاهش عرض سیلابدشت تاثیر چندانی در اختلاف سرعت بین آبراهه اصلی و سیلابدشت ندارد. این موضوع با نتایج کار Hamidifar et al. (2013) و Mohseni (2017) هم‌خوانی دارد.

همان‌گونه که مشخص است میزان سرعت در آبراهه اصلی در حالت‌های وجود و عدم پوشش گیاهی در بالادست و پایین‌دست پل، همواره از سرعت سیلابدشت بیشتر است. همان‌گونه که در این شکل مشخص است در حالت بدون پوشش گیاهی، با افزایش عمق نسبی، اختلاف سرعت میان آبراهه اصلی و سیلابدشت کم بوده و رفتار آبراهه مرکب به رفتار آبراهه ساده نزدیک می‌شود. در حالی‌که در عرض‌های مختلف سیلابدشت، با افزایش تراکم پوشش گیاهی، اختلاف سرعت شایان توجهی میان آبراهه اصلی و سیلابدشت مشاهده می‌شود که گویای اثرگذاری زیاد پوشش گیاهی بر هیدرولیک جریان است. در آزمایش‌های با پوشش گیاهی متراکم، جدایی جریان کُندتر رخ داده و

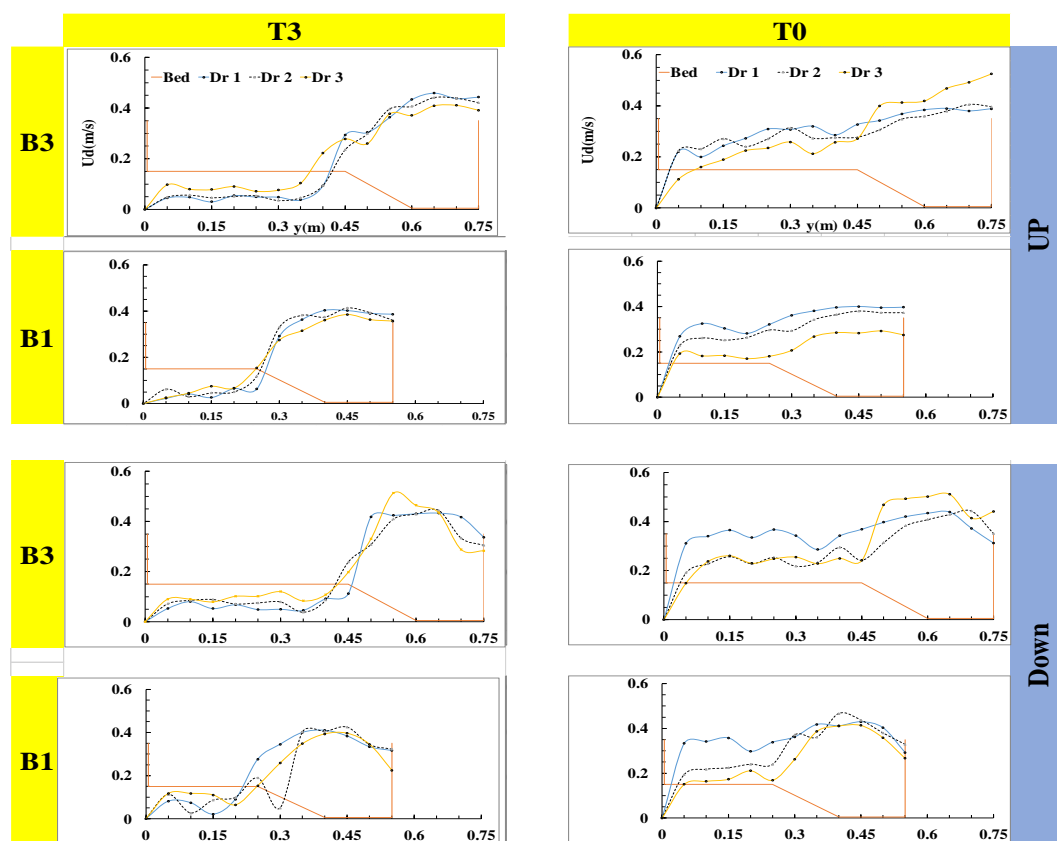


Fig. 5 Lateral distributions of depth-averaged velocity (Dr1=0.3, Dr2=0.4, Dr3=0.5)

شکل ۵ پراکنش عرضی سرعت میانگین‌گیری شده در عمق (Dr1=0.3, Dr2=0.4, Dr3=0.5)

پل نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد که در عمق‌های نسبی مختلف، با دور شدن از آبراهه اصلی به سمت سیلابدشت، تنش برشی بستر حدود ۸۰ درصد کاهش می‌یابد و برای همه‌ی حالت‌ها، در مرز مشترک

### ۳-۲- تنش برشی

در شکل ۶ تنش برشی بستر در آبراهه اصلی و سیلابدشت در حالت‌های مختلف تراکم پوشش گیاهی و عرض‌های سیلابدشت و در دو مقطع عرضی بالادست و پایین‌دست



نشان می دهد که پراکنش تنش برشی مرزی در سیلابدشت پوشیده از گیاه به عامل‌هایی از جمله تراکم پوشش گیاهی، هندسه آبراهه و عمق جریان بستگی دارد (Kang and Choi, 2006).

حال می توان اذعان کرد که با افزایش تراکم پوشش گیاهی، دبی عبوری و در نتیجه سرعت جریان کاهش شدیدی داشته و در نهایت تنش برشی کاهش می یابد. لازم به یادآوری است که الگوی جریان در اطراف هرکدام از المان‌های پوشش گیاهی بسیار پیچیده بوده و ممکن است در برخی موارد تنش برشی در اطراف المان‌ها افزایش یابد که برای بررسی دقیق آن می بایست از ADV استفاده نمود.

آبراهه اصلی و سیلابدشت یک جهش ناگهانی در تنش برشی بستر رخ می دهد که ناشی از انتقال مومنتم بین آبراهه اصلی و سیلابدشت می باشد. همچنین اگرچه انتظار می رود که به ازای یک عمق نسبی معین، با زبرشدن سیلابدشت، در مقایسه با سیلابدشت صاف، میزان تنش برشی افزایش یابد.

اما نیروی دراگ ناشی از حضور پوشش گیاهی موجب جذب اندازه حرکت از سیال و در نتیجه کاهش تنش برشی بستر می شود. به عبارت دیگر، تنش برشی مرزی در سیلابدشت دارای پوشش گیاهی به دلیل کاهش سرعت جریان ناشی از نیروی مقاومت در برابر جریان، اغلب کمتر از آبراهه بدون پوشش گیاهی است. بررسی‌های پیشین

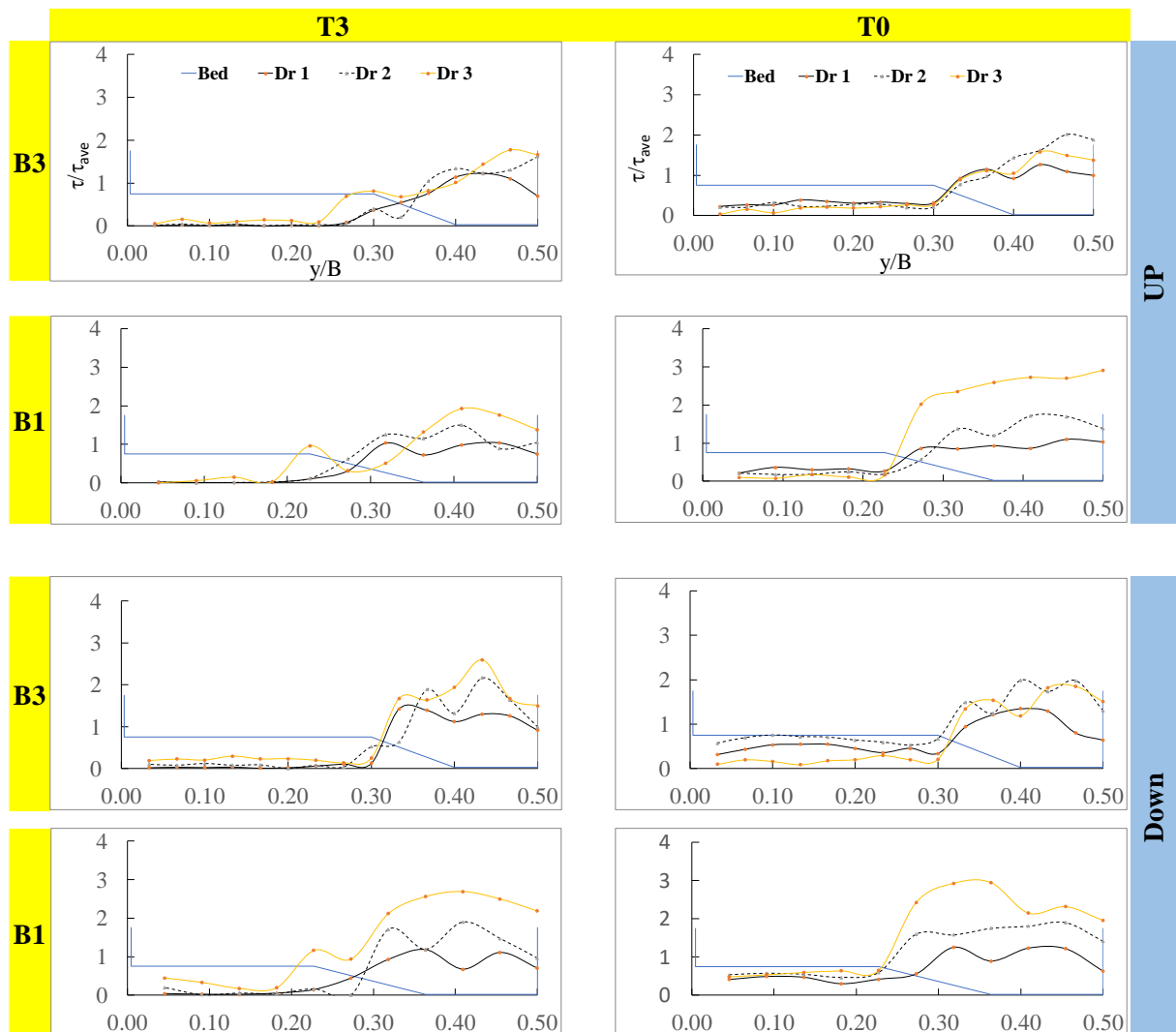


Fig. 6 Lateral distributions of shear stress (Dr1=0.3, Dr2=0.4, Dr3=0.5)

شکل ۶ پراکنش‌های عرضی تنش برشی (Dr1=0.3, Dr2=0.4, Dr3=0.5)

## ۳-۳- ضريب زبري موضعي

در شكل ۷، تغييرپذيري ضريب زبري موضعي در چهار نوع تراكم پوشش گياهي با عمق‌هاي نسبي متفاوت در عرض سيلابدشت (B3) نشان داده شده است. همان‌طور كه انتظار مي‌رود، با افزايش عمق نسبي و در پي آن افزايش دبي و سرعت جريان به ميزان اين ضريب افزوده مي‌شود. ضريب اصطكاك در ناحيه سيلابدشت به دليل حضور المان‌هاي پوشش گياهي افزايش شايد ملاحظه‌اي دارد. اين موضوع در تحقيقات (Musleh and Cruise 2006) نيز

بيان شده است. الگوي تغييرپذيري ميزان ضريب اصطكاك بر روي سيلابدشت نيز به دليل کاهش سرعت جريان و وجود اصطكاك پوسته‌اي بر روي سطح ميله‌ها باعث الگوي سينوسي مي‌شود. در شكل ۸، تغييرپذيري ضريب زبري كلي (سراسري) در تراكم‌هاي مختلف پوشش گياهي با عمق‌هاي نسبي متفاوت در مقاطع بالادست و پايين دست پل نشان داده شده است. به‌طور كلي به دليل سرعت جريان تحت فشار در مقطع پايين دست پل، مقادير ضريب زبري و همچنين غيريكنواختي آنها بيشتر مشاهده مي‌شود.

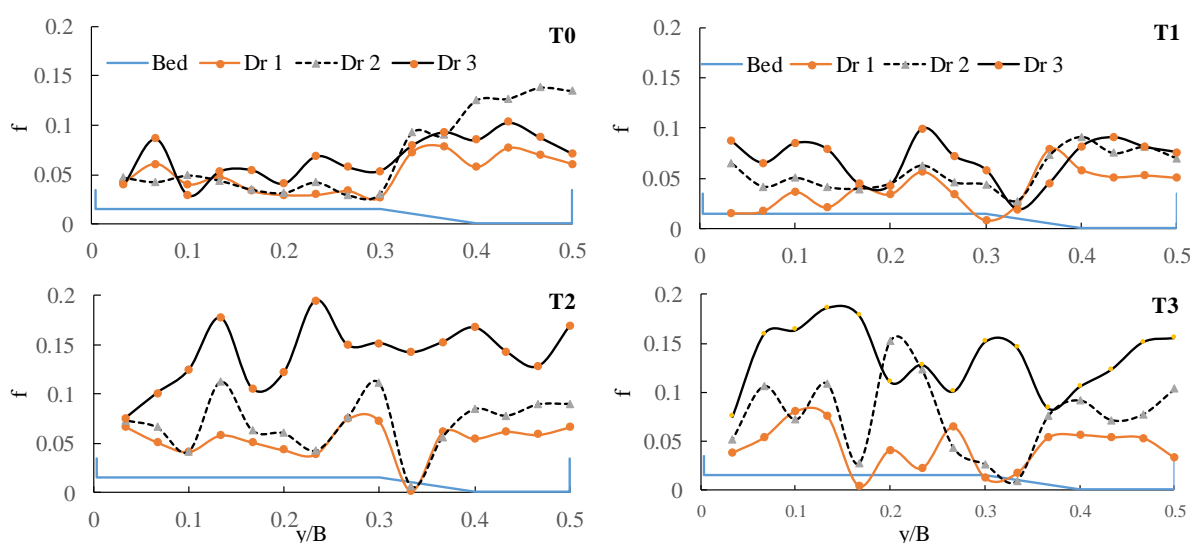


Fig. 7 Darcy Wiesbach friction factor distribution

شكل ۷ توزيع ضريب زبري دارسي- ويسباخ

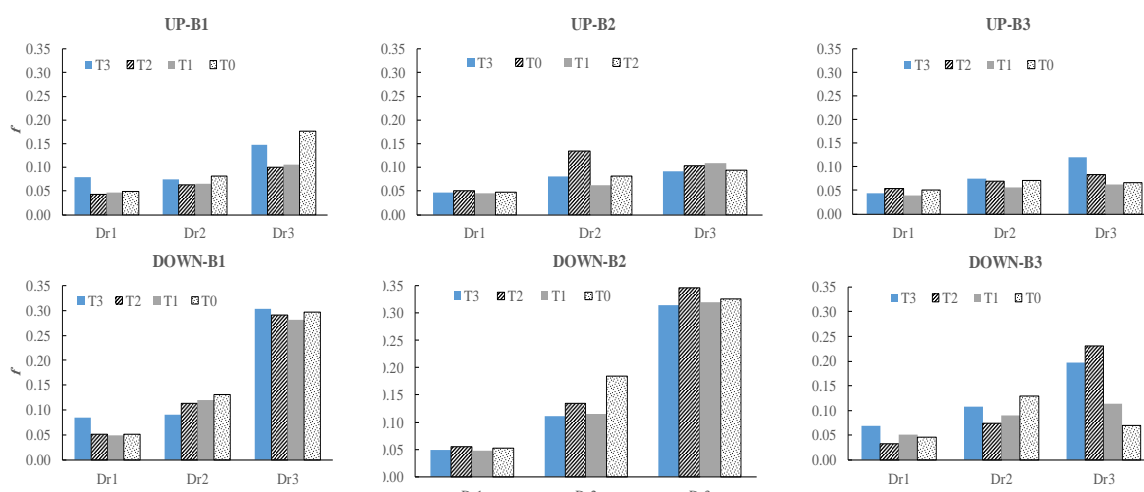


Fig. 8 Global Darcy Wiesbach friction factor

شكل ۸ توزيع ضريب زبري سراسري دارسي- ويسباخ

## ۳-۴- تنش برشي ظاهري

با استفاده از معادله (۸) مقادير نيروي برشي ظاهري

محاسبه شده است. پس از تعيين اين پارامتر، تنش برشي ظاهري نيز با در نظر گرفتن سطح مقطع صفحه مشترك

تراکم پوشش گیاهی و کاهش سرعت جریان در نزدیکی بستر، از میزان فرسایش بستر کاسته می شود. بدیهی است در یک حالت عرض سیلابدشت و تراکم پوشش گیاهی ثابت، افزایش عمق نسبی منجر به افزایش فشار جریان عبوری از زیر عرشه پل و در نتیجه افزایش عمق آبشستگی می شود. در یک عرض سیلابدشت و عمق نسبی یکسان، افزایش تراکم پوشش گیاهی به طور میانگین باعث کاهش ۱۵ درصدی عمق آبشستگی خواهد شد.

در جدول ۳ میزان بیشینه عمق آبشستگی در آزمایش های مختلف و آزمایش های شاهد نشان داده شده است. ارتباط بین شش متغیر بیشینه عمق آبشستگی ( $Z_{max}$ )، نسبت عرض آبراهه به عرض سیلابدشت ( $\lambda$ )، عمق نسبی ( $Dr$ )، تراکم پوشش گیاهی ( $\phi$ )، نسبت عمق جریان نزدیک شونده به ارتفاع پل ( $\psi$ ) و نسبت سرعت جریان

قائم در محل اتصال آبراهه اصلی و سیلابدشت ها محاسبه شده است. شکل ۹ تغییرپذیری تنش برشی ظاهری در صفحه مشترک قائم بین آبراهه اصلی و سیلابدشت را نشان داده است. به دلیل مقاومت ناشی از افزایش تراکم پوشش گیاهی، مقدار تنش برشی ظاهری در تراکم های بالاتر، افزایش می یابد. همچنین از طرفی با افزایش عمق نسبی و ضعیف تر شدن جریان های ثانویه، مقدار تنش برشی ظاهری کاهش می یابد. با افزایش عرض سیلابدشت و قوی تر شدن جریان های ثانویه، تنش برشی ظاهری بطور میانگین ۴۰ درصد افزایش پیدا می کند.

### ۳-۵- عمق آبشستگی پایه پل

نیمرخ طولی آبشستگی اطراف (بالادست و پایین دست) پایه پل در شکل ۱۰ نشان داده شده است. با افزایش

جدول ۳ بیشینه میزان آبشستگی در آزمایش های مختلف

Table 2 Maximum amount of scouring in different experiments

B/b=2.5				
Dr	T1	T2	T3	T0
Dr=0.3	0.054	0.056	0.034	0.052
Dr=0.4	0.08	0.088	0.089	0.11
Dr=0.5	0.147	0.14	0.134	0.15
B/b=2.17				
Dr	T1	T2	T3	T0
Dr=0.3	0.047	0.058	0.052	0.046
Dr=0.4	0.101	0.087	0.086	0.096
Dr=0.5	0.149	0.147	0.134	0.15
B/b=1.83				
Dr	T1	T2	T3	T0
Dr=0.3	0.055	0.052	0.044	0.059
Dr=0.4	0.09	0.082	0.079	0.099
Dr=0.5	0.145	0.148	0.133	0.15

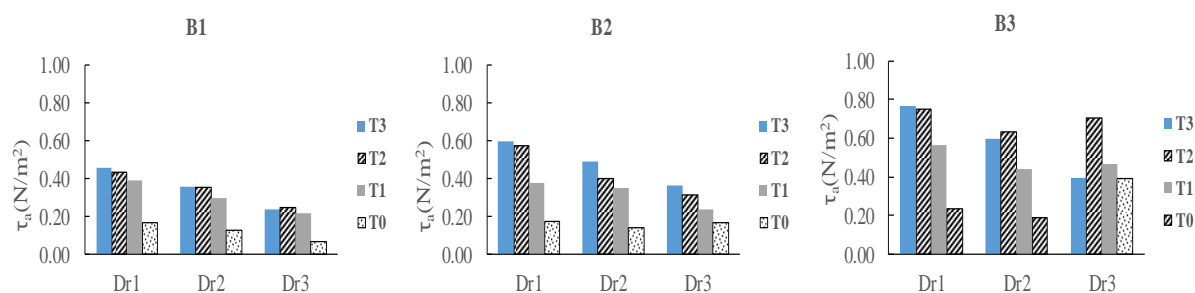


Fig. 9 Apparent shear stress at the Main channel and Floodplain interface

شکل ۹ تنش برشی ظاهری در صفحه اتصال آبراهه اصلی و سیلابدشت

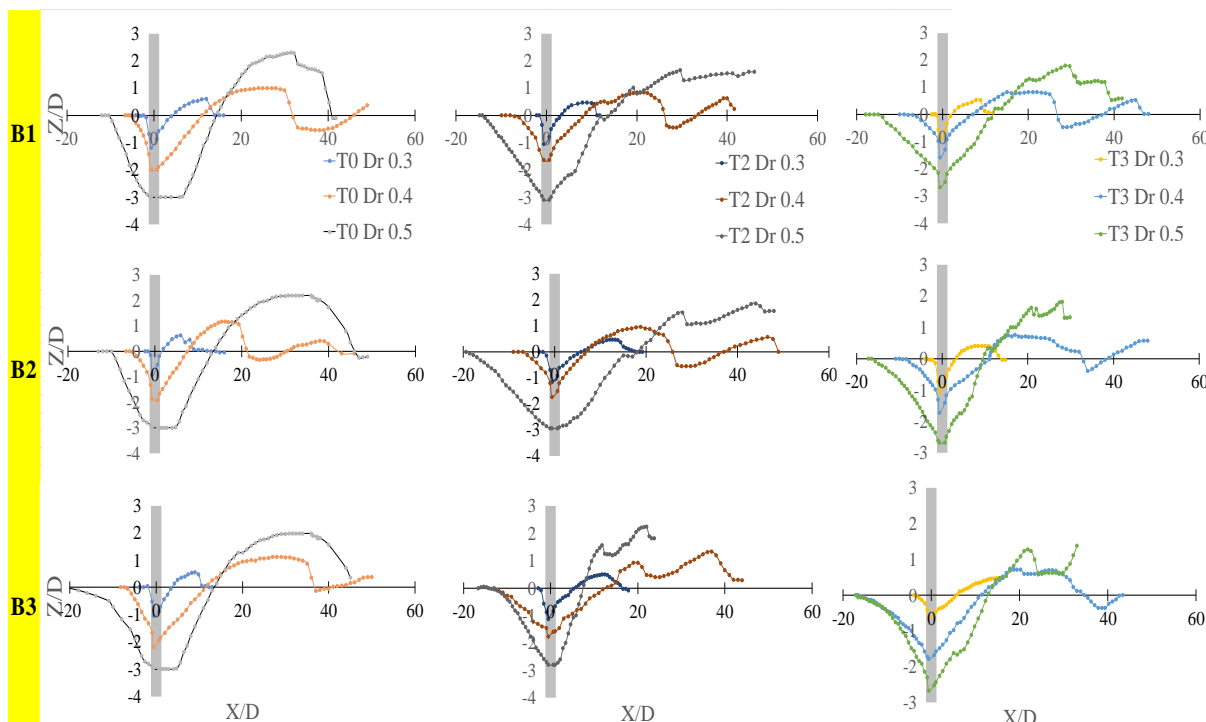


Fig. 10 Longitudinal profile of bed scour

شکل ۱۰ نیمرخ طولی آبستگي بستر

افزایش مقاومت پل و کاهش خطرهای حیات و هدررفت‌های اقتصادی بسیار با اهمیت است. در این تحقیق، آزمایش‌هایی برای بررسی هیدرولیک جریان نزدیک شونده به پل و همچنین میزان آبستگي پایه پل با پوشش‌های مختلف گیاهی در مقاطع مرکب متفاوت انجام شده است. در نهایت معادله‌ای برای تعیین کمیت

نزدیک شونده به سرعت جریان بحرانی آستانه حرکت رسوبات ( $\kappa$ )، از طریق نرم افزار spss، بررسی شده است. نتایج تحلیل حساسیت نشان داد، بیشترین تأثیر در تعیین بیشینه عمق آبستگي، به ترتیب نسبت عمق جریان نزدیک شونده به ارتفاع پل ( $\psi$ )، عمق نسبی ( $Dr$ )، نسبت سرعت جریان نزدیک شونده به سرعت جریان بحرانی آستانه حرکت رسوبات ( $\kappa$ )، تراکم پوشش گیاهی ( $T$ ) و در انتها نسبت عرض آبراهه به عرض سیلابدشت ( $\chi$ ) می‌باشد. با استفاده از تحلیل ضریب‌های خروجی نرم افزار spss، رابطه رگرسیونی شماره (۹) حاصل شده است.

$$Z_{\max} = -16.012 + 0.298(\chi) + 19.078(Dr) - 0.494(T) + 13.406(\psi) + 0.509(\kappa) \quad (10)$$

مقایسه بین داده‌های آزمایشگاهی بیشینه عمق آبستگي پایه پل و مقادیر محاسبه شده با استفاده از معادله (۹) در شکل ۱۱ نشان داده شده است.

#### ۴- جمع‌بندی

آبستگي پایه پل یک پدیده به‌کلی پیچیده است. شرایط جریان تحت فشار و آبراهه مرکب پیچیدگی مسئله را بیشتر می‌کند. شناخت توان بالقوه کامل آبستگي برای

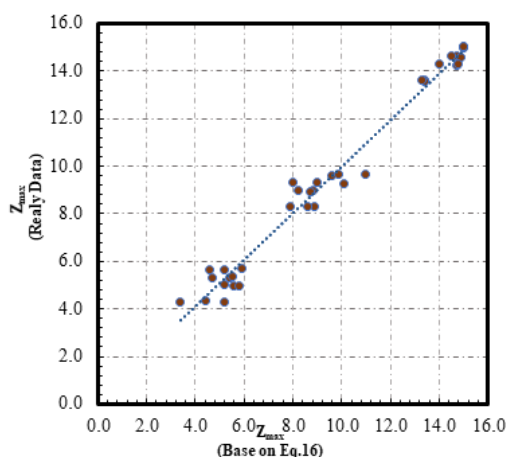


Fig. 11 Comparison of laboratory results of maximum bridge scour depth and values calculated based on Equation 9

شکل ۱۱ مقایسه داده‌های آزمایشگاهی بیشینه عمق

آبستگي پایه پل و مقادیر محاسبه شده براساس رابطه ۹

$Dr$	عمق نسبی
$T$	تراکم پوشش گیاهی
$y_f$	عمق جریان در سیلابدشت (m)
$C_u$	ضریب یکنواختی منحنی دانه بندی
$D_g$	میانگین هندسی ذرات
$\delta_g$	انحراف معیار هندسی ذرات
	نسبت سرعت جریان نزدیک شونده به سرعت بحرانی
$\kappa$	آستانه حرکت رسوبات
	نسبت ارتفاع جریان نزدیک شونده به ارتفاع بین لبه پایین
$\psi$	پل و کف ناحیه دست نخورده
$F_p$	نیروی فشاری (N)
$W_{mc}$	وزن آب در آبراهه اصلی (N)
$S_0 (S_{0x})$	شیب کف آبراهه
$U_{mc}$	سرعت میانگین جریان در آبراهه اصلی ( $m.s^{-1}$ )
$Q_{mc}$	دبی عبوری از آبراهه اصلی ( $m^3.s^{-1}$ )
$\beta$	ضریب تصحیح اندازه حرکت
$L$	طول بازه حجم کنترل (m)
$SF$	نیروی برشی (N)
$ASF$	نیروی برشی ظاهری (N)
$\rho$	چگالی سیال ( $kg.m^{-3}$ )
$H$	عمق جریان نزدیک شونده (m)
$\lambda$	ضریب بدون بعد لزجت گردابه‌ای
$S_{0y}$	شیب دیواره جانبی آبراهه
$U$	سرعت در راستای $x$ ( $m.s^{-1}$ )
$V$	سرعت در راستای $y$ ( $m.s^{-1}$ )
$f$	ضریب زبری دارسی-ویسباخ
$\Gamma$	ترم جریان ثانویه
$U_d$	سرعت میانگین‌گیری شده در عمق ( $m.s^{-1}$ )
$u^*$	سرعت برشی ( $m.s^{-1}$ )
$C_d$	ضریب درگ
$Re_{rod}$	عدد رینولدز بین المان‌ها
$\phi$	کسر حجمی انسداد
$\nu$	لزجت جنبشی ( $m^2.s^{-1}$ )

### ۶- منبع‌ها

- Abed, L.M. (1991). Local scour around bridge piers in pressure flow, Ph.D. Thesis, Colorado State University.
- Arneson, L.A., Zevenbergen, L.W., Lagasse, P.F., and Clopper, P.E. (2012). Evaluating Scour at

بیشینه عمق آبشستگی بعنوان تابعی از متغیرهای بی بعد، شدت جریان زیر عرشه پل، استغراق پل (بدون سرریزی)، ابعاد هندسی آبراهه، ویژگی‌های جریان نزدیک شونده و میزان تراکم پوشش گیاهی سیلابدشت ارائه شده است. یافته‌های تحقیق اخیر برای پیش بینی عمق آبشستگی جریان تحت فشار را می‌توان به شرح زیر خلاصه کرد: افزایش تراکم پوشش گیاهی باعث افزایش سرعت طولی در آبراهه اصلی و کاهش آن در سیلابدشت می‌شود. آبشستگی پیرامون پایه پل در جریان تحت فشار در مقایسه با جریان سطح آزاد، سریع‌تر تکامل می‌یابد. به استثنای عمق‌های دیون، در جریان تحت فشار، عمق گودال‌های آبشستگی اندازه‌گیری شده در مقیاس کوچک آزمایشگاهی کمتر از ۵۰ درصد عمق جریان بالادست عرشه پل می‌باشد. موقعیت بیشینه عمق آبشستگی، به سرعت به وضعیت تعادلی خود در نزدیکی لبه پایین دست عرشه پل نزدیک می‌شود.

### ۵- فهرست نشانه‌ها

$h_b$	فاصله بین لبه پایین پل و کف آبراهه (m)
$u$	سرعت جریان نزدیک شونده ( $m.s^{-1}$ )
$w_e$	تراز آب روی لبه بالای عرشه پل (m)
$U_c$	سرعت بحرانی مواد بستر ( $m.s^{-1}$ )
$s$	وزن مخصوص مواد رسوبی
$g$	شتاب ثقل ( $m.s^{-2}$ )
$d_{50}$	قطر میانگین ذرات رسوبی (m)
$U_b$	سرعت اولیه در زیر پل ( $m.s^{-1}$ )
$Z_{max}$	عمق آبشستگی پایه (m)
$h_a$	عمق جریان نزدیک شونده (m)
$K_1$	ضریب شکل دماغه پایه
$K_2$	ضریب زاویه برخورد جریان
$K_3$	ضریب مربوط به وضعیت بستر
$K_4$	ضریب پنهان شدگی ذرات بستر
$t$	عرض پایه (m)
$Fr$	عدد فرود بالادست پایه
$U_p$	میانگین سرعت بین المان‌ها ( $m.s^{-1}$ )
$\chi$	نسبت عرض آبراهه به عرض آبراهه اصلی

- Nepf, H.M. (1999). Drag turbulence and diffusion in flow through emergent vegetation, *Water Resources Research*, 35(2), 479-489.
- Rameshwaran, P. and Shiono, K. (2007). Quasi two-dimensional model for straight overbank flows through emergent. *Journal of Hydraulic Research*, 45(3), 302-315.
- Rameshwaran, P. and Naden, P.S. (2003). Three-dimensional numerical simulation of compound channel flows, *J. Hydraul. Eng.*, 129(8), 645-652.
- Richardson, A. and Davis, S. R. (2001). Evaluating scour at bridges, Retrieved from *Hydraulic Engineering Circular No. 18*, Publication No. FHWA NHI 01-001, 4<sup>th</sup> ed.
- Richardson, E.V., Simons, D.B. and Lagasse, P.F. (2001) *River Engineering for Highway Encroachments - Highways in the River Environment*, FHWA NHI 01-004, Federal Highway Administration, Hydraulic Series No. 6, Washington, D.C.
- Samadi Rahim, A., Yonesi, H.A., Shahinejad, B. and Torabipoudeh, H. (2021), Experimental Investigation of Floodplain Vegetation Density Effect on Flow Hydraulic in Divergent Compound Channels, *Journal of Hydraulics*, 16(1), 111-130.
- Shiono, K. and Knight, D.W. (1991). Turbulent open-channel flows with variable depth across the channel, *Journal of Fluid Mech.*, 222, 617-646
- Tang, X. and Knight, D. W. (2009). Lateral Distributions of Streamwise Velocity in Compound Channels with Partially Vegetated Floodplains, *Journal of Science in China Series E: Technological Sciences*, 52, 3357-3362.
- 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), 34-41.
- Umbrell, E.R., Young, G.K., Stein, S.M. and Jones, J.S. (1998). Clear-Water Contraction Scour Under Bridges in Pressure Flow, *Journal of Hydraulic Engineering*, 124(2), 236-240.
- Shan, Y.Q., Liu, C., Luo, M.-K. and Yang, K.-J. (2016). A simple method for estimating bed shear stress in smooth and vegetated compound channels, *Journal of Hydrodynamics*, 28(3), 497-505.
- Zarrati, A.R, Jin, Y.C. and Karimpour, S. (2008). Semianalytical Model for Shear Stress Distribution in Simple and Compound Open Channels, *Journal of Hydraulic Engineering*, 134(2), 205-215.
- Bridges, *Hydraulic Engineering Circular No. 18*, Publication No. FHWA-HIF-12-003, 5<sup>th</sup> ed.
- Arneson, L.A. (1997). The effect of pressure-flow on local scour in bridge openings, Ph.D. Thesis, Colorado State University.
- Arneson, L.A. and Abt, S.R. (1999). Vertical Contraction Scour At Bridges With Water Flowing Under Pressure Conditions, Paper presented at the ASCE Compendium, *Stream Stability and Scour at Highway Bridges*, Reston, VA.
- Arneson, L. and Abt, S. (1999). Vertical Contraction Scour at Bridges with Water Flowing Under Pressure Conditions, *Transportation Research Report*, 98, 10-17.
- Cook, W., Barr, P.J., and Halling, M.W. (2015). Bridge failure rate, *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 29(3), [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CF.1943-5509.0000571,04014080](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CF.1943-5509.0000571,04014080).
- Sonnenwald, F., Stovin, V. and Guymer, I. (2019). Estimating drag coefficient for arrays of rigid cylinders representing emergent vegetation, 57(4), 591-597.
- Guo, J., Kerényi, K., Pagan-Ortiz, J.E. and Flora, K. (2009). Bridge pressure flow scour at clear water threshold condition. *Trans. Tianjin Univ.*, 15(2), 79-94.
- Hamidifar, H., Omid, M.H., Keshavarzi, A. (2013). Mean Flow and Turbulence in Compound Channels with Vegetated Floodplains. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 14(3), 51-66.
- Kang, H. and Choi, S.U. (2006). Turbulence modeling of compound open-channel flows with and without vegetation on the floodplain using the Reynolds stress model. *Journal of Advances in Water Resources*, 29, 1650-1664.
- Kumcu, S.Y. (2016). Steady and Unsteady Pressure Scour under Bridges at Clear-Water Conditions, *Canadian Journal of Civil Engineering: cjce-2015-0385.R2*.
- Mohseni, M. (2017). Velocity Distribution and Boundary Shear Stress in a Compound Channel with Emergent, Rigid Vegetation on Floodplain, 8th National Conference on Watershed and Soil and Water Resources Management.
- Musleh, F.A. and Cruise, J.F. (2006). Functional relationships of resistance in wide flood plains with rigid unsubmerged vegetation. *Journal of hydraulic engineering*, 132(2), 163-171.



fulfillment of requirements for MS degree, the Graduate Collage at the University of Nebraska.

Zhai, Y. (2010). Time-dependent scour depth under bridge-submerged flow, Thesis presented in partial

