

سرعت جریان و تنش برشی رینولدزی بر روی تاج بند توری سنگی سرریز شونده

حمید رضا شیبانی* و حبیب الله بیات**

دانشکده مهندسی، دانشگاه پیام نور تهران

دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه امیرکبیر

(دریافت مقاله: ۸۴/۹/۱۳ - دریافت نسخه نهایی: ۸۵/۷/۱۷)

چکیده - در این تحقیق، آزمایشهای مدل فیزیکی برای بررسی چگونگی توزیع سرعت جریان و تنشهای برشی رینولدز بر روی بند توری سنگی سرریز شونده انجام شده‌اند. آزمایشها برای دو حالت مختلف نفوذپذیر بودن و نفوذناپذیر بودن سطح تاج بند صورت گرفته است. با کمک ابزار ای.دی.وی^۱ (سرعت سنج با مکانیزم اندازه‌گیری استفاده از صوت) که قادر به برداشت مولفه‌ی سرعت لحظه‌ای با فرکانس تا ۲۵ هرتز است، مقادیر مولفه‌های سرعت جریان و نیز تنشهای برشی در سطح تاج اندازه‌گیری شده‌اند. مقایسه نتایج به‌دست آمده از این تحقیق، تاثیر نفوذپذیری سطح تاج را در توزیع سرعت و تنش برشی رینولدز نشان داده است. در حالت نفوذپذیر بودن سطح تاج، دیده می‌شود که تنشهای برشی رینولدز، مولفه‌ی افقی سرعت و قدر مطلق مولفه‌ی قائم مقادیر بیشتری نسبت به حالت نفوذناپذیر بودن را دارا هستند. توزیع سرعت بر روی تاج بند توری سنگی سرریز شونده توزیعی لگاریتمی اما متفاوت با توزیع لگاریتمی مرسوم است.

واژگان کلیدی: محیط متخلخل، بند توری سنگی، بستر نفوذ پذیر، توزیع سرعت، تنش برشی رینولدز، کنترل سیلاب، رسوب ای.دی.وی

Velocity Profile and Reynolds Shear Stress in Overflow Gabion Dam Crest

H. R. Sheibani and H. Bayyat

Engineering Department, Tehran Payam-e-noor University
Civil Engineering Department, Amirkair University

Abstract: A physical model of gabion overflow dams was studied to determine the velocity profile and Reynolds shear stress. Physical tests were done under two different conditions of dam crest, overflow dams with impermeable and with permeable crests. Instantaneous velocity components over dam crest were measured by an ADV (Acoustic Doppler Velocimeter) instrument. This

** - دانشیار

* - استادیار

instrument is capable of measuring instantaneous velocity components with frequencies up to 25 Hz. Average velocity components and bed shear stress were extracted from ADV measurements. The results of this research show the effect of crest permeability on velocity and Reynolds shear stress. The magnitude of Reynolds shear stresses, horizontal velocity components, and absolute value of vertical velocity components under the permeable scenario are bigger than those of the impermeable scenario. Velocity distribution over the dam crest is different from the universal logarithmic profile.

Keywords: porous media – gabion dam – permeable bed – velocity profile – Reynolds shear stress – flood control – sediment – ADV

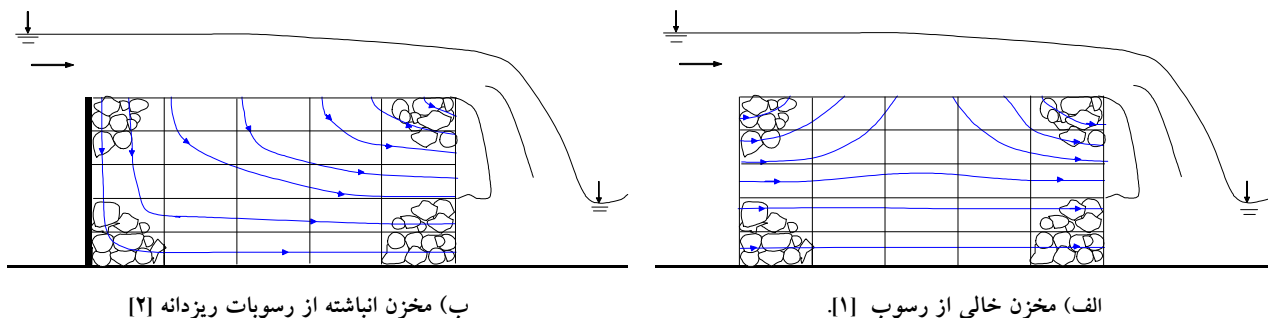
فهرست علائم

مؤلفه‌ی قائم سرعت لحظه‌ای	v	مقدار ثابت	A
سرعت نفوذ جریان در کف در جهت y	v_s	نماینده قطر دانه‌های مصالح	D_{50}
مؤلفه‌ی قائم سرعت متوسط زمانی	\bar{v}	شتاب ثقل	g
ارتفاع نرمالایز شده	y^+	عمق آب در کانال	h
فاصله تا کف	y	زبری بستر	k_s
ضریب تصحیح سرعت در رابطه اندازه حرکت	β	مؤلفه افقی سرعت لحظه‌ای	u
پارامتری از جنس طول	δz	سرعت لغزش	u_s
ضریب ون کارمن	κ	سرعت برشی	u^*
گرانروی سینماتیک	ν	تنش برشی رینولدز در کف	$\overline{u'v'_b}$
جرم مخصوص آب	ρ	تنش برشی رینولدز	$\overline{u'v'}$
تنش برشی در کف	τ_b	مؤلفه افقی سرعت متوسط زمانی	\bar{u}
		سرعت نرمالایز شده مؤلفه‌ی افقی	U^+

۱- مقدمه

بندهای توری سنگی که عمدتاً به صورت سرریز شونده ساخته می‌شوند در طرحهای آبخیزداری جایگاه خاصی دارند. آنها به منظور کنترل فرسایش، تله اندازی رسوب و کاهش پیک سیلاب در مسیر رودخانه و آبراه‌ها احداث می‌شود. یک بند توری سنگی با هر هدفی که ساخته شود بعد از مدت زمانی مخزن آن انباشته از رسوب می‌شود و جریان آبراهه یا مخزن بالادست آن عمدتاً از روی تاج بند سرریز می‌کند. هر چه رسوبات انباشته شده در مخزن ریزدانه‌تر باشند نفوذ جریان از نمای بالادست بند کمتر خواهد بود و نفوذ جریان به داخل بدنه‌ی متخلخل بند تنها از سطح تاج نفوذپذیر بند صورت می‌گیرد. نفوذ سیال به‌داخل سطح تاج، شرایط هیدرولیکی خاصی را برای جریان گذری از روی بند به‌وجود می‌آورد

کلز [۱] در مطالعه خود بر روی جریان گذری از روی بند توری سنگی مشاهده کرد که برای تطابق نتایج مدل عددی با نتایج آزمایشگاهی، لازم است زبری سطح تاج را خیلی بیش از آنچه بزرگی دانه‌ها دیکته می‌کنند اتخاذ کند علت این امر برای وی ناشناخته ماند اما به واقع علت، افزایش تنش برشی در سطح تاج به سبب وجود نفوذ جریان در آن است. بزرگی تنش برشی نسبت مستقیم با میزان نفوذ به داخل سطح تاج دارد. در شرایطی که مخزن پر از رسوب است و جریان درکل طول تاج به درون محیط متخلخل بند نفوذ می‌کند افزایش تنش برشی ناشی از نفوذ، نسبت به زمانی که مخزن خالی از رسوب است بیشتر خواهد بود. در حالتی که مخزن بند از رسوبات انباشته نشده است جریان از نمای بالادست بند وارد می‌شود و در سطح تاج، در ناحیه ابتدایی آن خروج جریان از سطح و در



الف) مخزن خالی از رسوب [۱].

ب) مخزن انباشته از رسوبات ریزدانه [۲].

شکل ۱ - نمایش خطوط جریان در بدنه متخلخل بند توری سنگی

افزایش می‌یابد. این محقق در آزمایشهای فیزیکی خود مشاهده کرد که با افزایش میزان دبی مکش در کف، تنش برشی درکف نیز افزوده می‌شود. این افزایش تنش می‌تواند سرعت و شدت فرسایش و تشکیل حفره‌هایی را در آبگیرهای موجود درکف موجب شود. چپو و چن [۵] تحقیق خود را معطوف به ارزیابی تنش برشی موجود درکف کانال نفوذپذیر کردند. معادله تحلیلی برای تعیین تنش برشی کف به‌دست آمده و برای تایید آن آزمایشهای فیزیکی نیز انجام گرفته است. با انتگرالگیری از معادلات اندازه حرکت و پیوستگی و انجام عملیات ریاضی، این دو محقق معادله‌ای را برای تعیین تنش برشی درکف استخراج کردند.

$$\tau_b = -\rho gh \frac{dh}{dx} \left(1 - \frac{\beta U^2}{gh} + \frac{u_s^2}{gh}\right) - \rho v_s (2\beta U - u_s) \quad (2)$$

با کمک دستگاه اندازه‌گیری سرعت ای.دی.وی، مؤلفه‌های سرعت لحظه‌ای در فضای دو بعدی اندازه‌گیری شده است. توزیع سرعت به‌دست آمده در عمق ضمن اینکه نشان می‌دهد سرعت در کف صفر نیست نیز گرایان کمتری برای تغییرات سرعت در عمق را ارائه می‌دهد. به عبارت دیگر با وجود نفوذ جریان در کف، توزیع سرعت حالت یکنواخت‌تری را داراست. نفوذ جریان در کف، تنش برشی رینولدز $\overline{u'v'}$ را نیز افزایش می‌دهد. ارزیابی افزایش تنش برشی در بررسی حرکت رسوب و یا امکان ایجاد فرسایش و تخریب در کف از اهمیت خاصی برخوردار است. چن و چپو [۶] تحقیق خود را روی توزیع سرعت برای جریان گذری از کف کانال نفوذپذیر معطوف

ناحیه انتهایی ورود جریان به داخل سطح وجود دارد. شکل (۱) به طور شماتیک این دو حالت را نشان می‌دهد.

گوپتا و پاودیل [۳] جریان در کانال با سطح آزاد و کف متخلخل نفوذپذیر را مورد مطالعه آزمایشگاهی قرار دادند. نتایج آزمایشگاهی نشان داد که توزیعی لگاریتمی برای سرعت صادق است مشروط بر آنکه به جای کف کانال، مبنای سطحی در فاصله δz در زیر کف کانال فرض شود و نیز ضریب ون کارمن از مقدار 0.4 ، که برای جریان بر روی سطوح نفوذناپذیر صادق است، به مقداری برابر 0.28 برای کانال با کف نفوذپذیر تغییر پیدا کند. معادله زیر برای توزیع سرعت پیشنهاد شده است.

$$\frac{\bar{u}}{u_*} = \frac{1}{\kappa} \ln\left(\frac{y + \delta z}{k_s}\right) + A \quad (1)$$

κ ضریب ون کارمن و برابر 0.28 ، k_s زبری بستر و مقدار آن برابر D_{50} ، و A ثابت معادله و مقدار آن برابر $8/21$ است. در تعیین δz دیده شده است که از برابری این مقدار با یک سوم اندازه D_{50} نتایج درستی برای توزیع سرعت به‌دست می‌آید. معادله (۱) نشان می‌دهد زمانی که در کف کانال مکش وجود دارد، شرط عدم لغزش^۲ درکف مهیا نمی‌شود و سرعت در کف صفر نیست. مک لین [۴] تحقیقی آزمایشگاهی درباره چگونگی توزیع سرعت در کانالی که در محدوده‌ای از کف آن آبگیری می‌شود انجام داد. وی مشاهده کرد که در مسیر جریان به محض رسیدن به محدوده آبگیری، توزیع سرعت از پروفیل لگاریتمی مرسوم فاصله می‌گیرد و با پیشرفت بیشتر در این محدوده این فاصله نیز



شکل ۲ - مدل آزمایشگاهی بند توری سنگی با نمای آب‌بند در بالادست

انتهای کانال، کنترل و تغییر سطح آب در پایین دست سازه را بر عهده دارد. دو پمپ با ظرفیت هر کدام حدود ۵۰ لیتر در ثانیه دبی کانال را تامین می‌کنند. مخزن آرام کننده‌ای در مسیر بین پمپها و کانال قرار گرفته است و جریان ورودی را به کانال آرام می‌کند. بعد از فلوم و قبل از رسیدن به سرریز اندازه‌گیری جریان، حوضچه‌ای اغتشاش جریان را مستهلک می‌کند و جریان ملایمی را برای اندازه‌گیری به سرریز می‌رساند. جریان خروجی از سیستم در یک سیکل بسته توسط پمپها به کانال باز گردانده می‌شود. توسط دستگاه ای.دی.وی مؤلفه‌های لحظه‌ای سرعت اندازه‌گیری شدند. اطلاعات دریافتی از سنسور دستگاه به پردازش کننده‌ای در رایانه منتقل می‌شود و مؤلفه‌های لحظه‌ای سرعت در فایل‌های مشخص ثبت می‌شوند. امکان برداشت سرعت با فرکانس تا ۲۵ هرتز از قابلیت‌های این دستگاه است. ارائه نگهدارنده دستگاه ای.دی.وی قابلیت حرکت در سه جهت طول، عرض و عمق کانال را موجب می‌شود. برای اندازه‌گیری سرعت در مجاورت مرزها باید حداقل فاصله‌ای بین حجم نمونه برداری^۳ و مرز کف یا دیواره وجود داشته باشد این فاصله حداقل برابر ۶ میلی‌متر عنوان می‌شود (راهنمای استفاده از ای، دی، وی - شرکت نور تک ۲۰۰۰) [۷]. لازم به ذکر است که چنانچه بستر متخلخل با مصالحی درشت دانه، مرز را

داشته‌اند. آنها نیز ضمن تایید یافته‌های پیشین، توزیع زیر را برای سرعت پیشنهاد کردند.

$$\frac{\bar{u} - u_s}{u_*} = \frac{1}{\kappa} \text{Ln} \frac{y + \delta z}{\delta z} + \frac{v_s}{4u_*} \left(\frac{1}{\kappa} \text{Ln} \frac{y + \delta z}{\delta z} \right)^2 \quad (3)$$

در بررسی شرایط هیدرولیکی جریانهای گذری از روی محیطهای متخلخل تحت نفوذ، مطالعات آزمایشگاهی و ریاضی صورت گرفته است، ولی مدرکی در مطالعه مستقیم بر روی شرایط آشفته‌گی جریان گذری از روی بند توری سنگی مشاهده نمی‌شود.

۲ - تجهیزات آزمایشگاهی

بند توری سنگی با ارتفاع ۳۰، عرض ۵۲ و طول ۴۲ سانتیمتر بصورت بسته‌هایی به بزرگی ۲۱ × ۱۰ × ۱۰ سانتیمتر، از توری‌های گالوانیزه با چشمه‌های مربع شکل به ابعاد ۰/۶ × ۰/۶ سانتیمتر ساخته شده‌است و با مصالح گرد گوشه، با قطر متوسط (d₅₀) برابر ۱۸ میلی‌متر و تخلخل (n) معادل ۰/۳۳ پر شده‌اند. شکل (۲) مدل آزمایشگاهی بند را نمایش می‌دهد. بند در فلوم آزمایشگاهی با عرض ۵۲ سانتیمتر، عمق ۷۵ سانتیمتر و طول ۶ متر قرار داده شده است. کف کانال از جنس فولاد و جداره آن از شیشه است. استقرار دریچه‌ای در



شکل ۳ - شکل سمت چپ تاج نفوذپذیر و سمت راست تاج نفوذ ناپذیر

سرعت‌های متوسط زمانی و تنش برشی رینولدز در مقطع را به دست می‌دهد، شکل (۵) مقادیر را نشان می‌دهد.

۴ - تنش‌های برشی رینولدز

توزیع سرعت برای جریان بر روی سطوح نفوذناپذیر که به لحاظ هیدرولیکی صاف‌اند از توزیع لگاریتمی مطابق معادله (۷) تبعیت می‌کند. برای جریان توسعه یافته مقادیر ثابت‌های κ و A به ترتیب برابر $0/41$ و $5/5$ هستند.

$$U^+ = \frac{1}{\kappa} \ln Y^+ + A \quad (7)$$

$$U^+ = \frac{\bar{u}}{u_*}, \quad Y^+ = \frac{yu_*}{\nu}$$

$$\bar{u} = \frac{u_*}{\kappa} \ln \frac{y}{\nu} + \frac{u_*}{\kappa} \ln u_* + u_* A = \frac{u_*}{\kappa} \ln \frac{y}{\nu} + B \quad (8)$$

در شرایط تاج با بستر نفوذناپذیر، با رسم منحنی مقادیر آزمایشگاهی \bar{u} در برابر $\frac{y}{\nu}$ ، شکل (۶)، مقادیر u_* و A در معادله توزیع سرعت به ترتیب زیر استخراج می‌شوند.

$$\kappa = 0/41$$

$$\frac{u_*}{\kappa} = 7/275 \quad \text{پس} \quad \tau_b = \rho u_*^2 = 0/88 \frac{N}{m^2}$$

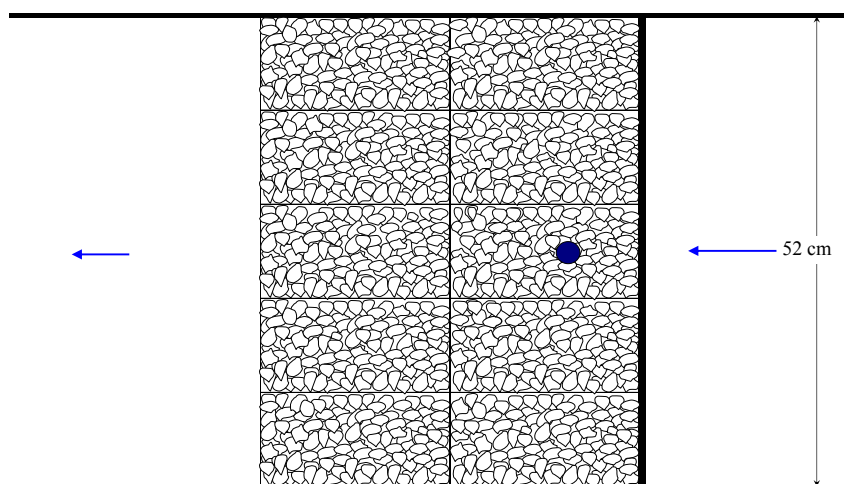
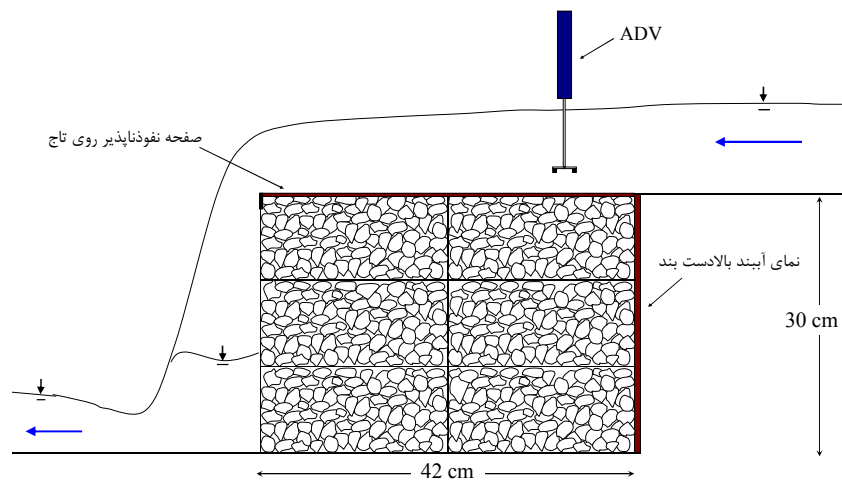
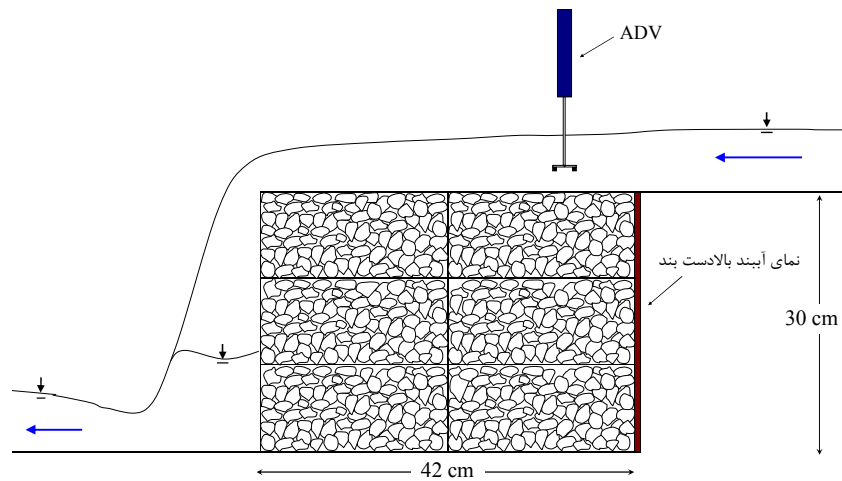
$$u_* = 2/98 \frac{cm}{s}$$

$$B = \frac{u_*}{\kappa} \ln u_* + u_* A = 44/274 \quad \text{پس} \quad A = 12/18$$

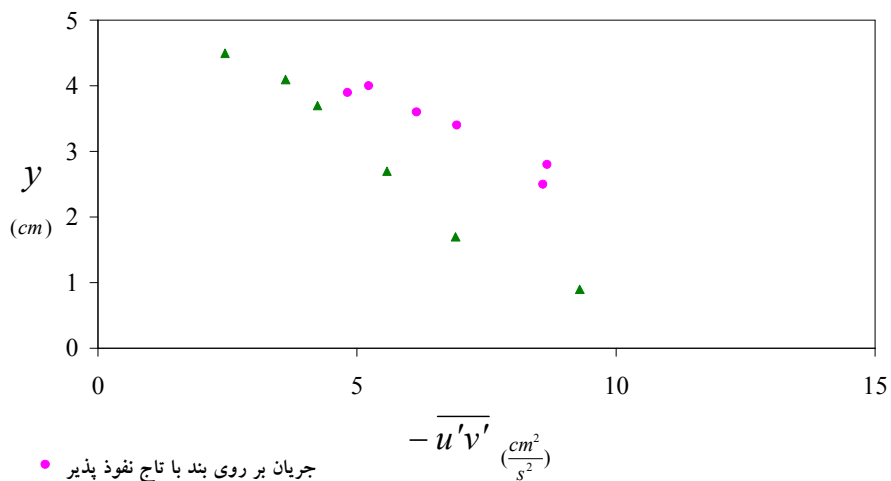
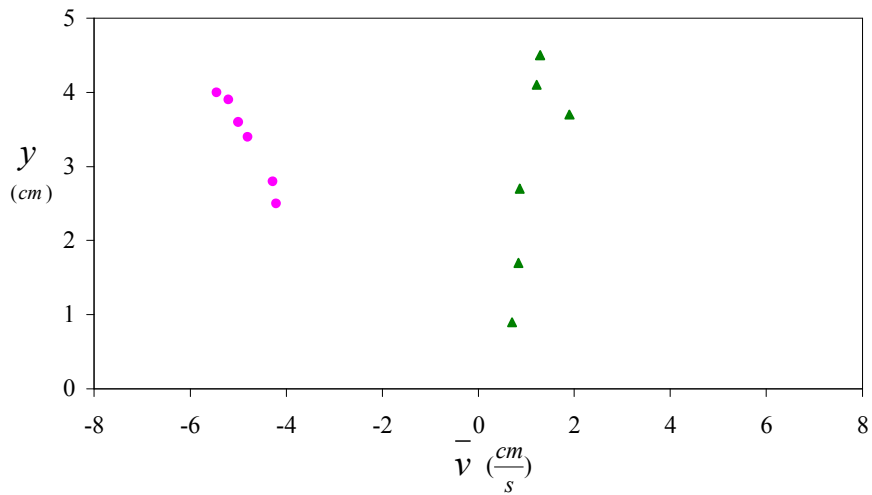
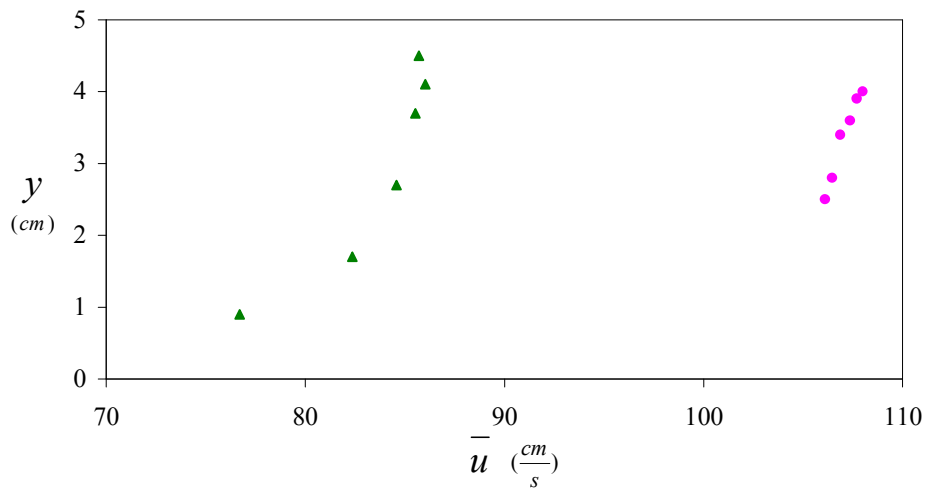
تشکیل داده باشد این حداقل فاصله افزایش می‌یابد. در آزمایش‌های انجام شده در این تحقیق، این حداقل فاصله برابر $2/5$ سانتیمتر از سطح تاج بند گزارش می‌شود.

۳ - شرح آزمایشها

مقطع آزمایش به فاصله 7 سانتیمتر از ابتدای بند و برای اندازه‌گیری سرعت و تنش برشی در نظر گرفته شده است. دبی جریان برابر $39/15$ لیتر در ثانیه انتخاب شده است. زمان اندازه‌گیری سرعت لحظه‌ای به دفعات مختلف برابر 300 ، 600 ، 900 ، 1800 ، 2700 ، 3600 و 4200 ثانیه انتخاب شده و ملاحظه شده است با انتخاب زمانهای بیش از 900 ثانیه تغییری در مقادیر متوسط حاصل شده برای متغیرها داده نمی‌شود بنابراین، این زمان به عنوان زمان کافی برای دوره اندازه‌گیری سرعت لحظه‌ای تعیین شد. آزمایشها در دو حالت مختلف بند با تاج نفوذ ناپذیر و بند با تاج نفوذ پذیر صورت گرفت تا بتوان تاثیر نفوذ جریان در تاج بند را بر روی متغیرهای حاصله معلوم کرد. در شکل (۳) تصویر بند توری سنگی و در شکل (۴) تصویر شماتیک آن در دو حالت مختلف نمایش داده شده است. ارتفاع جریان در مقطع مورد اندازه‌گیری، در حالت اول $8/65$ و در حالت دوم $6/90$ سانتیمتر گزارش می‌شود. تحلیل نتایج خام آزمایشگاهی (سرعت‌های لحظه‌ای)، پارامترهای

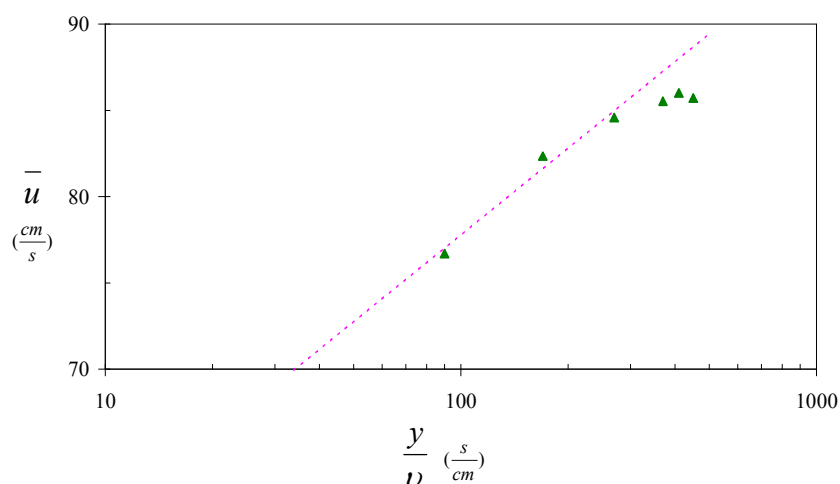


شکل ۴ - شکلها به ترتیب بالا مقطع طولی بند با تاج نفوذپذیر، وسط مقطع طولی بند با تاج نفوذناپذیر و پایین پلان بند با تاج نفوذپذیر

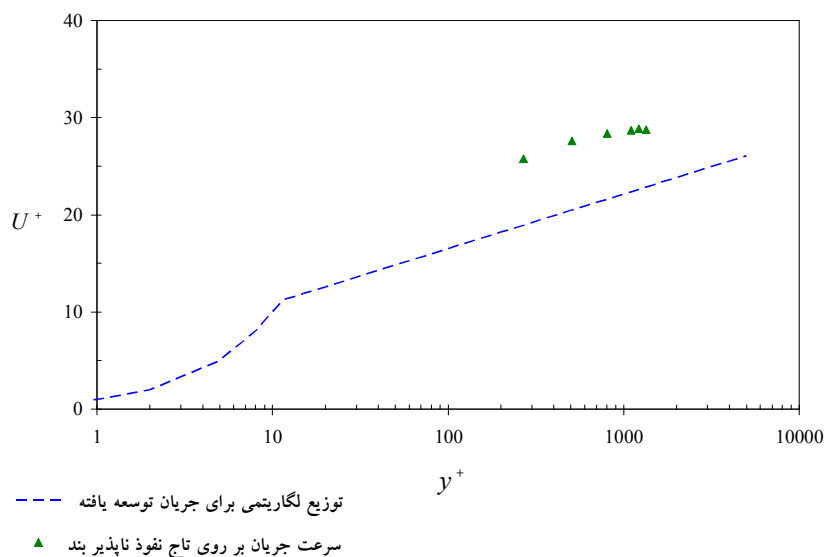


- جریان بر روی بند با تاج نفوذ پذیر
- ▲ جریان بر روی بند با تاج نفوذ ناپذیر

شکل ۵ - مولفه‌های افقی و عمودی سرعت متوسط و تنش برشی رینولدز بر روی تاج بند



شکل ۶ - توزیع سرعت جریان روی بند و با سطح تاج نفوذناپذیر

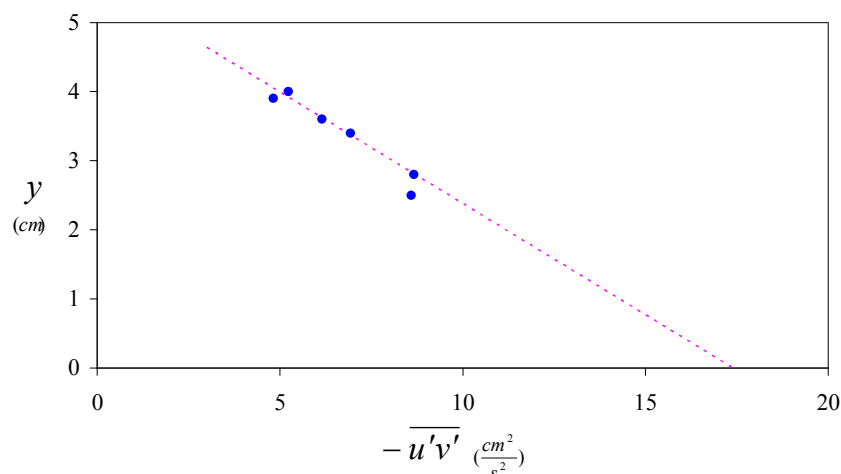


شکل ۷ - مقایسه مقادیر سرعتی آزمایشگاهی بر روی تاج، با توزیع لگاریتمی مرسوم

متفاوت با توزیع لگاریتمی مرسوم است، گوپتا و پاودیل [۳]. معادله (۱) نمونه‌ای از این توزیع است. اندازه‌گیریهای آزمایشگاهی در تحقیقات قبلی، همان‌طور که پیشتر نیز اشاره شد، نشان داده‌اند که ضریب ون کارمن برای جریان گذری از روی محیط متخلخل تحت نفوذ لزوماً برابر ۰/۴۱ نیست. لذا، تعداد مجهولات موجود در معادله لگاریتمی سرعت بر روی محیط متخلخل، یعنی κ و u^* و A ، نسبت به محیط غیر متخلخل از دو مجهول به سه مجهول افزایش پیدا کرده است و

با مقایسه سرعتی آزمایشگاهی با توزیع لگاریتمی مرسوم سرعت، دیده می‌شود که مقادیر سرعت بر روی بند با تاج نفوذناپذیر، مقادیر بیشتری از آنچه توزیع لگاریتمی ارائه می‌کند به دست می‌دهند. این مقایسه در شکل (۷) نمایش داده شده است.

برای بررسی شرایط جریان روی بند با سطح تاج نفوذ پذیر، یادآور می‌شود که مطالعات قبلی نشان داده‌اند که توزیع سرعت بر روی محیط متخلخل تحت نفوذ، توزیعی لگاریتمی اما



شکل ۸ - توزیع تنش برشی رینولدز روی بند و با سطح تاج نفوذپذیر

مقایسه مقادیر تنشهای برشی رینولدز و نیز تنش برشی در کف برای دو حالت بستر با تاج نفوذپذیر و تاج نفوذناپذیر نشان می‌دهد که نفوذ جریان به داخل بدنه متخلخل بند توری سنگی سبب افزایش تنشها می‌شود. احتمال دارد در نظر اول این شبیهه پیش آید که دو بستر به لحاظ زبری با یکدیگر متفاوت‌اند و عامل افزایش تنش برشی بر روی بستر سنگدانه‌ای، می‌تواند افزایش زبری بستر باشد. برای رفع این شبیهه، یادآور می‌شود که شیبانی [۲] در بررسی جریان گذری از درون محیط متخلخل بند توری سنگی، با کمک یافته‌های آزمایشگاهی نیز نشان داد که با وجود نفوذ در کف، مقدار تنش برشی بر روی بستر افزوده می‌شود این دریافت منجر به اصلاح معادله جریان متغیر مکانی برای جریان گذری از روی بستر متخلخل نیز شد. چنانچه شرایط آزمایشگاهی اجازه می‌داد تا برداشت سرعتهای لحظه‌ای در فواصل بیشتری از شروع تاج بند صورت گیرد. احتمالاً اختلاف بیشتری بین تنشهای برشی در دو حالت وجود و عدم وجود نفوذ به چشم می‌خورد.

۵ - توزیع سرعت روی بند و با کف تاج نفوذپذیر

نفوذ جریان در کف تاج بند توری سنگی شرایط جدیدی برای پروفیل سرعت جریان به وجود می‌آورد. برای ملاحظه این شرایط جدید، مقایسه‌ای بین سرعتهای آزمایشگاهی با توزیع

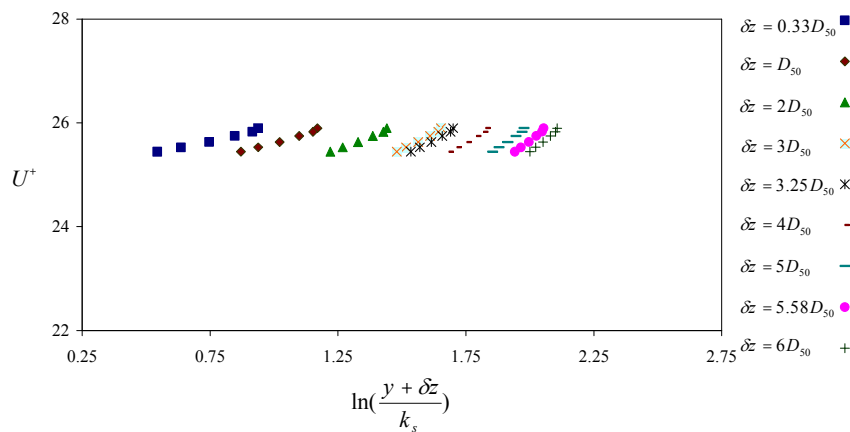
نمی‌توان به ترتیبی که برای شرایط تاج با سطح نفوذناپذیر عمل کرد برای شرایط با نفوذ پذیری تاج، مقدار تنش برشی بر روی کف را به دست آورد.

چنگ و چپو [۸]، و چپو و چن [۵] در مطالعه خود بر روی جریان گذری از روی محیطهای متخلخل تحت نفوذ، مقدار سرعت برشی را بدین ترتیب به دست آوردند که ابتدا با برونیابی از مقادیر تنش برشی رینولدز در عمق، مقدار این تنش را بر روی مرز برآورد کردند و سپس از این مقدار، تنش برشی بر روی کف و در نتیجه سرعت برشی را نیز تعیین کردند. آن محققان اشاره دارند که مناسب است برونیابی با استفاده از نقاط نزدیک به مرز صورت گیرد. ابزار آزمایشگاهی موجود در این تحقیق شرایط برداشت در فاصله نزدیک به محیط متخلخل را فراهم نکرد، از این رو به ناچار از نزدیکترین نقاط برداشت شده نزدیک به مرز، برای برونیابی استفاده شد. در شکل (۸) از معقولترین سه نقطه نزدیک به مرز، خطی برازش داده شده است. این خط، تنش برشی رینولدز و سرعت برشی بر روی کف را به دست می‌دهد.

$$-\overline{uv}_b = -\overline{uv}_y=0 = 17/40 \frac{\text{cm}^2}{\text{s}^2}$$

$$\tau_b = -\rho \overline{uv} = 1/74 \frac{\text{N}}{\text{m}^2}$$

$$u_* = \sqrt{\frac{\tau_b}{\rho}} = 4/17 \frac{\text{cm}}{\text{s}}$$



شکل ۹ - منحنی مقادیر نرمالایز شده سرعت بر روی تاج بند نفوذپذیر به ازای δz های متفاوت

جدول ۱ - مقادیر ثابتهای κ ، A در معادله توزیع سرعت لگاریتمی بر روی محیط متخلخل،

به ازای δz های مختلف، $D_{50} = 1/8$ cm

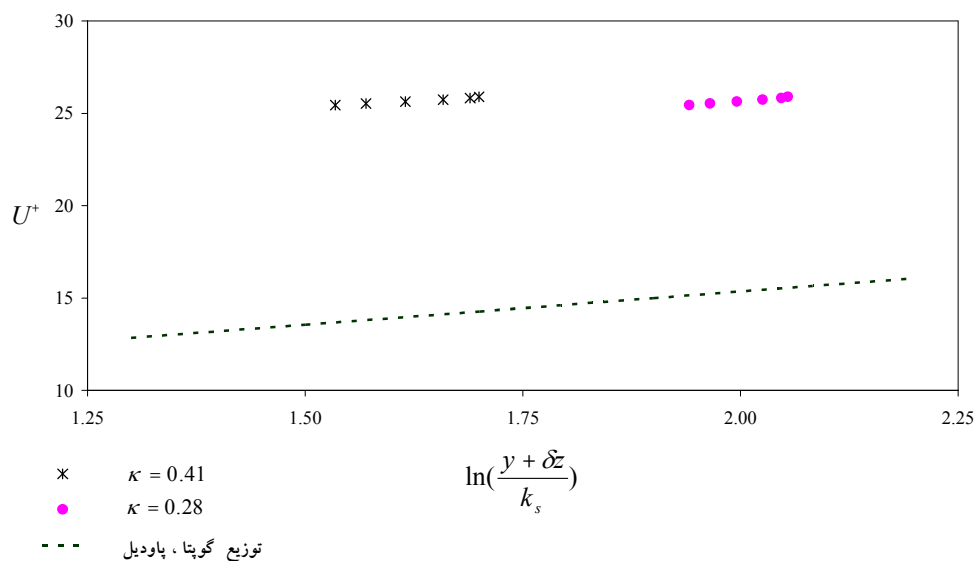
δz	κ	A
$0.33 D_{50}$	0.98	$24/88$
D_{50}	0.74	$24/27$
$2 D_{50}$	0.55	$23/20$
$3 D_{50}$	0.43	$22/01$
$3/25 D_{50}$	0.41	$21/70$
$4 D_{50}$	0.36	$20/72$
$5 D_{50}$	0.30	$19/34$
$5/58 D_{50}$	0.28	$18/51$
$6 D_{50}$	0.27	$17/89$

نحوی است که مؤلفه‌های افقی جریان مقادیر قابل توجه‌ای را در درون بدنه متخلخل بند به خود اختصاص می‌دهند و این مؤلفه‌های افقی در تمامی عمق وجود دارند. از این رو این اعتقاد وجود دارد که برای تحقیق حاضر، فاصله کف تا سطح مینا، یعنی δz ، مقدار بیشتری از آنچه این محققان در تحقیق خود به‌دست آورده‌اند را دارد. به‌رحال به ازای δz های متفاوت، منحنی $\ln\left(\frac{y+\delta z}{k_s}\right)$ در برابر U^+ ترسیم شده و از آن، مقادیر ثابتها در معادله توزیع سرعت (۱) به‌دست آمده است. شکل (۹) منحنیها و جدول (۱) مقادیر ثابتها را نشان می‌دهند. برای رسم آن منحنیها، پارامترهای زیر از

ارائه شده در معادله (۱)، و نیز با توزیع سرعت جریان بر روی سطوح زیر معادله (۹)، انجام گرفته است.

$$U^+ = \frac{1}{\kappa} \ln \frac{y}{k_s} + 8.5 \quad (9)$$

با توجه به معادله (۱)، منحنی U^+ در برابر $\ln\left(\frac{y+\delta z}{k_s}\right)$ رسم می‌شود و چنانچه منحنی که به‌دست می‌آید یک خط باشد، توزیع واقعی سرعت یک توزیع لگاریتمی است و از شیب و عرض از مبدا خط به‌دست آمده می‌توان ضرایب معادله را برای انطباق با واقعیت حاصل کرد. جریان بر روی و درون بند توری سنگی به



شکل ۱۰ - مقایسه سرعت‌های نرمالایز شده آزمایشگاهی با آنچه معادله گویتا، پاودیل [۳] به دست می‌دهد

جریان بر روی بستر متخلخل داراست [۲].

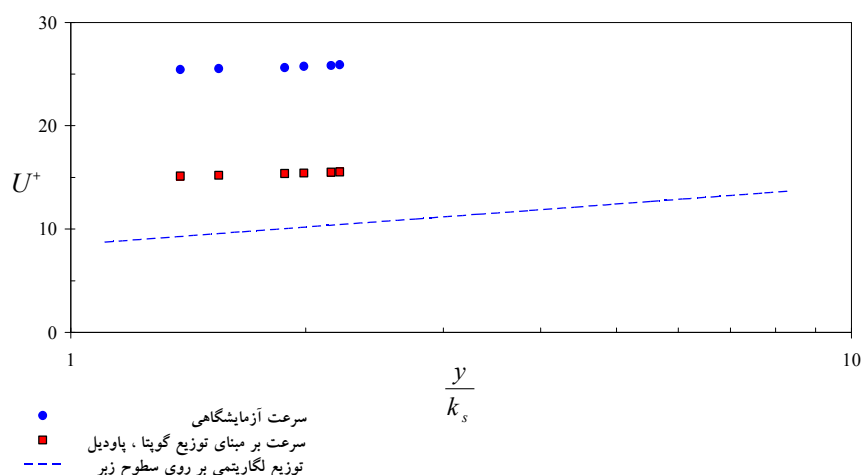
مقایسه دیگری بین سرعت‌های نرمالایز شده آزمایشگاهی با آنچه توزیع لگاریتمی جریان بر روی سطوح زبر پیش‌بینی می‌کند انجام شده است. با استفاده از معادله (۹) مقایسه مذکور در شکل (۱۱) آورده شده است. دیده می‌شود که سرعت‌های نرمالایز شده آزمایشگاهی و نیز سرعت‌هایی که معادله گویتا، پاودیل [۳] برای جریان روی بند ارائه می‌دهند هر دو بیش از سرعت‌های است که معادله لگاریتمی بر روی سطح زبر به دست می‌دهد و این تاثیر نفوذ جریان در بستر متخلخل را بر روی مقادیر سرعت جریان گذری از روی محیط نشان می‌دهد.

به صراحت متذکر می‌شود که مقادیر ثابت‌های به دست آمده در جدول (۱)، برای شرایط فیزیکی و هیدرولیکی تحقیق حاضر است و نمی‌توان از آنها به عنوان ثابت‌های معادله توزیع سرعت بر روی محیط متخلخل بند توری سنگی سرریز شونده یاد کرد. چه اینکه در این مطالعه این هدف نیز مورد نظر نبوده است. هدف تحقیق عمدتاً مقایسه تنش‌های برشی رینولدز و نیز توزیع سرعت در دو شرایط مختلف فیزیکی از سطح تاج بند توری سنگی سرریز شونده بوده است. یکی شرایط معمول تاج بند که امکان نفوذ جریان در سطح تاج وجود دارد و دیگری

آزمایش و مشخصات فیزیکی مصالح معلوم‌اند.

$$u_* = 4/17 \frac{\text{cm}}{\text{s}}, \quad D_{50} = 1/8 \text{ cm}, \quad k_s = 1/8 \text{ cm}$$

منحنی (۹) نشان می‌دهد که پروفیل سرعت بر روی محیط متخلخل بند از توزیع نسبتاً یکنواختی برخوردار است. توزیع حاصله به ازای $\delta z = 3/25 D_{50}$ مقدار κ را برابر $0/41$ ، یعنی مقدار رایج آن را به دست می‌دهد و به ازای $\delta z = 5/58 D_{50}$ مقدار κ برابر $0/28$ ، یعنی مقداری که گویتا، پاودیل [۳] از آزمایش‌های خود به دست آوردند، حاصل می‌شود. شکل (۱۰) مقایسه بین سرعت‌های نرمالایز شده آزمایشگاهی با κ های فوق‌الذکر را نسبت به توزیع سرعت گویتا، پاودیل [۳] نشان می‌دهد. شرایط هیدرولیکی جریان در درون بدنه متخلخل بند توری سنگی و تفاوت آن با شرایط هیدرولیکی جریان در کانال با بستر متخلخل، علت عمده در بروز تفاوت بین سرعت‌های نرمالایز شده آزمایشگاهی و سرعت‌هایی است که معادله این دو محقق پیش‌بینی می‌کند. مولفه‌های افقی سرعت جریان در بدنه متخلخل بند توری سنگی سبب می‌شوند تا سرعت جریان در سطوح زیرین جریان روگذر از بند افزوده شده و توزیع سرعت شکل یکنواخت‌تری را به خود اختصاص دهد سرعت لغزش نیز مقدار بیشتری را نسبت به



شکل ۱۱ - مقایسه سرعت‌های آزمایشگاهی با توزیع لگاریتمی بر روی سطوح زبر

مولفه افقی سرعت جریان بر روی تاج نفوذپذیر به مراتب
بیش از مولفه افقی سرعت تحت شرایط بدون نفوذ است.

- مولفه قائم جریان برای مقطع مورد آزمایش در تاج بند و برای شرایط بدون وجود نفوذ در سطح تاج، مقادیر مثبت ولی کوچکی را به خود اختصاص می‌دهد در حالی که برای جریان گذری از روی تاج بند نفوذپذیر، مولفه قائم سرعت مقادیر منفی و با بزرگی (قدر مطلق) بیشتری را داراست.
- در شرایط مشابه گذر دبی یکسان از روی بند و برای مقطعی مشابه، تحت شرایط وجود نفوذ تنش‌های برشی رینولدز بیش از تنش‌های تحت شرایط عدم نفوذ است.
- پروفیل سرعت بر روی تاج بند توری سنگی تحت نفوذ، از یکنواختی بیشتری نسبت به پروفیل سرعت در جریان بر روی بسترمتمخلخل تحت نفوذ، همچون آزمایش‌های گوپتا، پاددیل [۳]، برخوردار است و این به سبب تفاوت شرایط گذر جریان در بدنه متمخلخل بند با شرایط گذر جریان بر روی آن بسترهاست. همچنین سرعت‌های لغزش بیشتری بر روی بند در مقایسه با این نوع محیط‌های متمخلخل واقع می‌شود.
- ثابت‌های پیشنهادی برای معادله توزیع سرعت در جریان بر روی بسترهای متمخلخل تحت نفوذ، برای جریان گذری از روی بند توری سنگی صدق نمی‌کند.

شرایط نامعمول که با گذاردن صفحه فلزی بر روی سطح تاج، از نفوذ جریان به داخل آن سطح ممانعت به عمل آمده است. این مقایسه کمک می‌کند تا بدانیم چنانچه بتوان در شرایط واقعی، از نفوذ جریان در سطح تاج بند توری سنگی ممانعت شود، تنش‌ها در آن سطح کاهش می‌یابند و نیز آگاه باشیم که ثابت‌های پیشنهادی برای معادله توزیع سرعت در جریان بر روی بسترهای متمخلخل تحت نفوذ، برای جریان گذری از روی بند صدق نمی‌کنند.

۶ - نتیجه‌گیری

- نتایج به‌دست آمده از آزمایش‌های فیزیکی مدل بند توری سنگی و بررسی بر روی آنها موارد زیر را به‌دست داده است.
- توزیع سرعت بر روی بند با تاج نفوذناپذیر، توزیعی لگاریتمی است اما مقادیر سرعت‌های آزمایشگاهی نشان داده‌اند که سرعت‌های واقعی بیش از مقادیر به‌دست آمده از توزیع لگاریتمی مرسوم به‌دست می‌آیند.
- توزیع سرعت بر روی بند با تاج نفوذپذیر توزیعی لگاریتمی ولی متفاوت با توزیع لگاریتمی مرسوم برای سطوح نفوذناپذیر است. سرعت‌های نرمالایز شده واقعی در هر تراز، بیش از سرعت‌های ارائه شده توسط این توزیع لگاریتمی است.
- در شرایط مشابه و گذر دبی یکسان از روی بند توری سنگی،

1. ADV (Acoustic Doppler Velocimeter) 2. no slip condition 3. sampling volume

مراجع

1. Kells, J. A. "Spatially Varied Flow over Rock Fill Embankments," *Can. J. Civ. Eng.* Vol. 20, pp. 820-827
2. Sheibani, H.R. "Hydraulic Analysis Modeling of Gabion Dam With Sealed Upstream Face," Ph. D. Thesis, Amir-Kabir University, Tehran, Iran, 2004.
3. Gupta, A. D. and Paudyal, N. G., "Flow over Gravel Bed," *J. Irr. Drain. Eng.*, ASCE, Vol. 111, No. 4, pp. 299-318, 1985.
4. Maclean, A. G., "Open Channel Velocity Profiles over a Zone of Rapid Infiltration," *J. Hyd. Res.*, Vol. 29, No. 1, pp. 15-27, 1991.
5. Chiew, Y.M., and Chen, X., "Bed Shear Stress in Open Channel Flow with Bed Suction," XXIX IAHR Congress Proceedings, Beijing, China, 2001.
6. Chen, X., and Chiew, Y.M., "Velocity Distribution of Turbulent Open Channel Flow with Bed Suction," *J. Hyd. Eng.*, Vol. 130, No. 2, pp. 140-148, 2004.
7. Nortek As (2000), Nortek 10 MHz Velocimeter – Operational Manual, Nortek As Company.
8. Cheng, N.S., and Chiew Y. M., "Turbulent Open Channel Flow with Upward Seepage", *J. Hyd. Res.*, Vol. 36, No. 3, pp. 415-431, 1998.