



# تحلیل هیدرولیکی بند توری سنگی سرریز شونده با مخزن پر از رسوب

• حمید رضا شیبانی، عضو هیات علمی دانشکده عمران و محیط‌زیست دانشگاه صنعتی امیرکبیر  
• حبیب‌الله بیات، دانشیار دانشکده عمران و محیط‌زیست دانشگاه صنعتی امیرکبیر

تاریخ دریافت: آذر ماه ۱۳۸۱ تاریخ پذیرش: مرداد ماه ۱۳۸۲

## چکیده

این پژوهش با اتکا به مشاهدات آزمایشگاهی و روش‌های تحلیل رایانه‌ای به مدل‌سازی ریاضی برای تشخیص هیدرولیک جریان عبوری از روی / درون بند توری سنگی با مخزن انباشته از رسوب‌های ریزدانه پرداخته است. وجود این رسوب سبب می‌شود تا نفوذ جریان از نمای بالادست بند بسیار ناچیز گردد و تمامی جریان از روی بند سرریز نماید. جریان گذرنده از روی بند به عنوان یک جریان متغیر مکانی مدل شده و مکان یابی مقطع کنترل بر روی بند با استفاده از روش Hinds امکان یافته است. در درون محیط متخلخل درشت دانه بند، جریان غیر خطی برقرار می‌باشد. این جریان با ترکیب معادلات پیوستگی و فورس هاپمر مدل‌سازی شده است. مدل برای مثالی از یک بند توری سنگی با نمای آبنند بالادست، یعنی مخزن پر از رسوب، اجراء شده است و نتایج حاصل از آن، ارتفاع پیزومتریک جریان و مقادیر سرعت ظاهری جریان در هر نقطه (گره) از بدنه متخلخل و نیز پروفیل سطح آب را به دست می‌دهد. برای تایید یافته‌های تحقیق، آزمایش بر روی مدل فیزیکی بند توری سنگی انجام شده است. یافته‌های آزمایشگاهی نشان داده‌اند که نفوذ جریان در تاج بند، شرایط خاصی را برای افت انرژی و نیز برای توزیع فشار بر روی تاج بند بوجود می‌آورد.

کلمات کلیدی: توری سنگی، محیط متخلخل، جریان غیر دارسی، افت انرژی، نفوذ جریان، جریان غیر خطی، کنترل سیل، پروفیل سطح آب

Pajouhesh & Sazandegi No: 63 pp: 85-94

**Hydraulic analysis of overtoppable gabion dam with fully sedimented reservoir.**

By: H.R. Sheibani, Member of Scientific Board of Civil & Environmental Department,  
Amir Kabir University, Tehran, Iran.

H. Bayat, Associate Prof., Civil & Environmental Department,  
Amir Kabir University, Tehran, Iran.

This study is concerned with a numerical modelling of flow through / over gabion dam with fully sedimented reservoir with fine sediment. Fine sediment causes that total of discharge flow over dam. The flow over the dam is assumed as a spatially varied flow, and control section has been verified by Hind's method. The flow through porous coarse media of dam is nonlinear. This flow has been modelled numerically by continuity and Forchheimer equations. The numerical model was performed for a impervious upstream face of gabion dam i.e. fully sedimented reservoir. The results of analysis show the piezometric water level and virtual velocity of any node within porous body as well as the profile of water level over dam. In order to confirm the finding of this research, physical model test of gabion dam has been done. Physical test results show that suction in gabion dam crest cause special condition for energy losses and pressure profile in that domain.

**Key words:** Gabion, Porous Media, Non Darcy Flow, Energy Loss, Flow Suction Nonlinear Flow, Flood Control, Water Surface Profile

## مقدمه

بندهای توری سنگی سازه‌هایی هستند که از کنار هم قراردادن توری سنگی ساخته می‌شوند. شکل ۱- نمای سه بعدی و مقطع جانبی یک بند را نشان می‌دهد. این سازه‌ها در اصلاح شیب آبراهه‌ها، کنترل رسوب و کاهش پیک سیلاب کاربرد فراوانی دارند. مخزن اینگونه بندها اغلب کم حجم است و در فاصله زمانی کمی از شروع بهره برداری توسط رسوبات پر میگردد. مصالح حوضه آبریز بند نوع رسوبات تشکیل دهنده مخزن را تعریف می‌نماید این مصالح می‌توانند درشت دانه یا ریز دانه باشند. تصویر ۲- رسوب حمل شده توسط رودخانه شور، از شاخه‌های فرعی منتهی شده به مخزن سد مسجد سلیمان را نشان می‌دهد. از آنجاییکه حوضه رود شور عمدتاً از مصالح رسی تشکیل شده است حجم زیادی از رس در مواقع سیلابی توسط این رود حمل می‌شود. تحلیل رفتار هیدرولیکی بندهای توری سنگی با مخزن پراز رسوب ریزدانه، موضوع این تحقیق می‌باشد. استنباط می‌شود که بعد از انباشته شدن رسوب در مخزن بند، شرایط خاص هیدرولیکی در جریان عبوری از روی / درون آن بوجود آید.

در آغاز بهره برداری از بند، گذر آب از تمامی وجوه یعنی نمای بالادست، تاج و نمای پایین دست انجام می‌شود. پیرامون گذر جریان از بدنه‌های سنگریزه‌ای مطالعه‌هایی صورت گرفته است. Townsend و همکاران (۹) مدل ریاضی جریان در درون مصالح سد سنگریزه‌ای را تدوین نمودند آنها با استفاده از حل عددی معادله موسوم به رابطه Parkin ( کاربرد این معادله در جریان نا آرام مشابه معادله لاپلاس در جریان آرام است ) که از تلفیق معادله پیوستگی و معادله Wilkins به دست می‌آید، فشار را در نقاط مختلف از محیط متخلخل درشت دانه به دست آورده‌اند. نتایج مدل ریاضی آنها با نتایج مدل فیزیکی مطابقت داشته است. Kells (۶) با تدوین مدل ریاضی، جریان عبوری از روی و درون بدنه سد سرریز شونده توری سنگی با نمای قائم در پایین دست را مدل کرده و پروفیل جریان عبوری از روی سد و نیز خطوط هم فشار در درون بدنه را به دست آورده است. نتایج بدست آمده با مقادیر حاصل شده از مدل فیزیکی، با اندکی اختلاف، تطابق خوبی داشته‌اند. وی در سال ۱۹۹۳ در راستای همان تحقیق سرریزهای توری سنگی پلکانی را نیز مورد بررسی قرار داده است (۸). Huanxiong و Jialiang (۵) با تدوین مدل ریاضی، جریان آشفته‌ای را در درون مصالح سنگی یک فرازبند با کمک معادله فورسهایمر مدل نمودند. نتایج آنها با نتایج تست‌های آزمایشگاهی تطابق خوبی داشته است. Bari و Hansen (۱) بر روی پروفیل جریان در درون مصالح سنگریزه‌ای ساخته شده در مسیر رودخانه‌های طبیعی تحقیق نموده‌اند (۱). جریان در داخل محیط متخلخل مشابه یک جریان متغیر تدریجی در یک کانال فرض شده و با دو روش استاندارد گام به گام و روش پرازاد (Prasad) پروفیل سطح آب در درون بدنه سنگریزه‌ای بدست آمده است. نتایج مدل ریاضی با برداشت‌های آزمایشگاهی مقایسه گردید و انطباق بین نتایج مشاهده شد.

در این مقاله مدل ریاضی تدوین شده و تحقیقات آزمایشگاهی انجام یافته برای تحلیل جریان عبوری از روی و درون بند توری سنگی با نمای آبنند بالادست، شکل ۱-، معرفی می‌گردند. نمای آبنند بالادست مخزن پراز رسوب ریزدانه، همچون نمونه عینی رسوبات رودخانه شور، را مدل می‌نماید. تحت چنین شرایطی گذر آب تنها از تاج (وجه فوقانی) و نمای پایین دست انجام می‌شود و در تمامی طول تاج، نفوذ جریان (Infiltration) به داخل بدنه وجود دارد. در صورتیکه قبل از پر شدن رسوبات در مخزن، آب از نمای بالادست نفوذ می‌کند و در طولی از ابتدای تاج، جریان از بدنه خارج شده و در طول بعدی از تاج، جریان به داخل بدنه نفوذ می‌نماید Kells (۷) رسوبگذاری در مخزن باعث تغییر رفتار جریان گذری از روی بند می‌شود و توزیع فشار و افت انرژی (اصطلاحی) را متأثر می‌سازد. نیز نفوذ جریان تنها از سطح تاج، جریانی کاملاً دو بعدی در محیط متخلخل بند برقرار می‌کند و سبب می‌شود نیاز به تعریف ضرایب ثابت متفاوتی برای معادله حاکم، در دو جهت افق و عمودی، باشد.



## مبانی نظری

پایه‌های تحلیلی تئوری حاکم بر آنالیز جریان عبوری از روی / درون یک بند توری سنگی سرریز شونده مشتمل بر دو قسمت است. یکی نظریه‌ای که برای تعیین پروفیل سطح آب روی بند به کار گرفته می‌شود و دیگری تعیین مقادیر فشار و سرعت ظاهری جریان در داخل بدنه متخلخل بند است. هر دو نظریه در این کاربری خاص، به نوعی به یکدیگر وابسته می‌شوند. حصول پروفیل سطح آب، مقادیر فشار را برای مرز فوقانی جریان در محیط متخلخل به دست می‌دهد و آنالیز جریان در بدنه، مقادیر دبی خروجی از کف را در تعیین پروفیل سطح آب دیکته می‌نماید.

### الف - پروفیل سطح آب

در مسیر جریان بر روی تاج به طور تدریجی دبی جریان کاسته می‌شود.

با پذیرش فرضیاتی ساده کننده می‌توان جریان بر روی تاج را از نوع جریان متغیر مکانی (Spatially Varied Flow) در نظر گرفت. این فرضیات عبارتند از: ۱- خطوط جریان موازی و مستقیم هستند. ۲- شیب کف مسیر ملایم است. ۳- جریان بر روی بند عمدتاً یک بعدی است. ۴- ضریب تصحیح سرعت برابر واحد می‌باشد. ۵- در تعیین افت در مسیر روابط حاکم بر جریان یکنواخت قابل استفاده است. اگرچه فرضیات مذکور کاملاً با شرایط واقعی انطباق ندارند و وجود شتاب جریان در جهت عمود بر مسیر اصلی حرکت سیال، که جریانی دو بعدی با توزیعی غیر یکنواخت برای سرعت را موجب می‌گردد، از قوت فرضیات می‌کاهد، ولی ضمن اینکه Kells (۷) در کار آزمایشگاهی خود نشان داده است که استفاده از تئوری جریان متغیر مکانی نتایج قابل قبولی برای پروفیل سطح آب ارائه می‌دهد

می باشد .

### ب - جریان در درون محیط متخلخل

نفوذ پذیری زیاد مصالح درشت دانه توری سنگی سبب می شود تا ماهیت جریان از نوع جریان غیر دارسی باشد . اگرچه معادلات نیمه تجربی فراوانی در مدل سازی این نوع جریان ارائه شده اند . لیکن نشان می دهند که استفاده از رابطه فورس هایمر در جریانهای غیر دارسی نتایج خوبی را در بر داشته است (۲) . از این رو معادلات حاکم به قرار زیر می باشند .  
 ۱- رابطه پیوستگی برای جریان دو بعدی با سیال غیر قابل تراکم :

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (2)$$

۲- رابطه فورس هایمر که تغییرات فشار پیژومتریکی در مسیر جریان را با سرعت نشان می دهد :

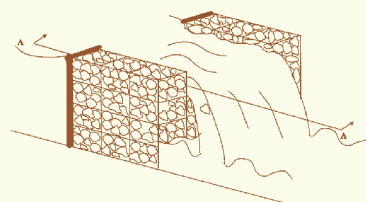
$$i_n = \frac{\partial h}{\partial n} = a_n V + b_n V^2 \quad (3)$$

و مولفه های آن در دو جهت  $x$  و  $y$  به صورتی که می آید خواهند بود .

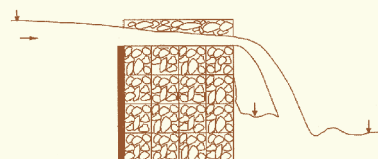
$$i_x = \frac{\partial h}{\partial x} = a_x u + b_x u^2 \quad (4)$$

$$i_y = \frac{\partial h}{\partial y} = a_y v + b_y v^2 \quad (5)$$

$$V = (u^2 + v^2)^{\frac{1}{2}} \quad (6)$$



الف - نمایش سه بعدی از بند توری سنگی .



ب- برش A-A

شکل- ۱ نمای سه بعدی و جانبی بند سرریز شونده توری سنگی با نمای نفوذناپذیر در بالادست .

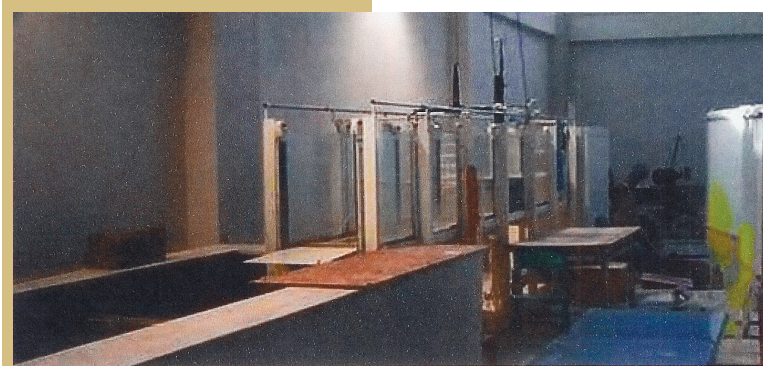
، نیز در این تحقیق با عنایت به برداشتهای آزمایشگاهی اصلاحیه بر رابطه جریان متغیر مکانی جهت انطباق بیشتر با شرایط ، وارد شده است که در قسمت های بعدی تشریح می گردد . به طوریکه در هیدرولیک کلاسیک بحث می شود ، رابطه ۱- جریان با دبی کاهنده در مسیر را مدل می نماید ( صفحه ۳۳۲ ، ۱۹۷۳ ، Chow ) (۴) .

$$\frac{dy}{dx} = \frac{S_0 - S_f - \frac{Q \cdot dQ/dx}{g \cdot A^2}}{1 - \frac{Q^2}{g \cdot A^2 \cdot D}} \quad (1)$$

جریان بر روی تاج بند معمولاً متشکل از دو جریان زیر بحرانی و فوق بحرانی است . می توان با استفاده از روش هیندز (۴) محل و عمق مقطع بحرانی را مشخص نمود و سپس پروفیل سطح آب را محاسبه کرد . جریان در بالادست این مقطع زیر بحرانی و در پایین دست آن فوق بحرانی



عکس ۲- گذر سیلاب با دبی حدود ۴۳۰ مترمکعب در ثانیه با حمل رسوبات ریزدانه در رودخانه شور .



عکس ۳ - کانال و تجهیزات آزمایشگاهی .

### مدلسازی ریاضی

از روش تفاضلهای محدود در جداسازی معادلات حاکم برای تعیین پروفیل سطح آب و نیز حل جریان در محیط متخلخل استفاده شده است .

#### الف - پروفیل سطح آب

رابطه ( ۱ ) معادله دیفرانسیلی مرتبه اول است و با تقریب درجه یک عقب رونده (Backward Differencing) جداسازی می شود .

#### ب - جریان در محیط متخلخل

تلفیق معادلات پیوستگی و فورس هایمر امکان مدلسازی را فراهم می نماید.

$$i_x = \frac{\partial h}{\partial x} = a_x u + b_x u^2 = (a_x + b_x u) \cdot u = \frac{1}{c_x} \cdot u$$

$$i_y = \frac{\partial h}{\partial y} = a_y v + b_y v^2 = (a_y + b_y v) \cdot v = \frac{1}{c_y} \cdot v$$

$$\frac{\partial}{\partial x} (c_x \cdot \frac{\partial h}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (c_y \cdot \frac{\partial h}{\partial y}) = 0$$

$$c_x \cdot \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + c_y \cdot \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} = 0 \quad (۸)$$

رابطه ( ۸ ) مبنای مدلسازی ریاضی است و تقریب درجه دوم تفاضل مرکزی ( Central Differencing ) معادله فوق را جدا سازی می نماید.

### مدلسازی فیزیکی

مدل آزمایشگاهی در کانالی به عرض ۵۰ و عمق ۷۵ سانتیمتر و طولی برابر ۶ متر ساخته شده است . تصویر - ۳ کانال و تصویر - ۴ مدل بند توری سنگی را نشان می دهد . قبل از کانال ، مخزن آرام کننده ای جریان آرامی را به کانال هدایت می نماید و بعد از آن نیز حوضچه آرام کننده ای جریان را به سرریز اندازه گیری می رساند . بند توری سنگی با ارتفاع ۳۱ ، عرض ۵۰ و طول ۴۲ سانتیمتر به صورت بسته هایی به ابعاد ۱۰ × ۱۰ × ۲۱ ، از توری های گالوانیزه با چشمه های مربع شکل به ابعاد ۰/۶ × ۰/۶ ساخته شده اند و با مصالح گرد گوشه ، دارای نماینده قطر دانه های  $(d_{50})$  برابر ۱۷ میلیمتر و تخلخلی  $(n)$  معادل ۰/۳۳ پر گردیدند . زبری مانینگ این مصالح با استفاده از رابطه  $n = 0.1155 d_{50}^{1/4}$  قابل تعیین و برابر ۰/۲۵ به دست می آید . در این رابطه نماینده قطر دانه ها بر حسب میلیمتر قرار داده می شود (۶) . با ابعاد قید شده ، دیده می شود که ۳ ردیف بسته ارتفاع بند را می سازند و در هر ردیف ۱۰ بسته سطح بند را تشکیل می دهند . در حین انجام آزمایش مشاهده شد که با وجود دوخته شدن بسته ها به یکدیگر ، با گذر دبی ها با مقدار زیاد ، فاصله اندکی بین بسته های قرار گرفته در سطح ایجاد می گردد و دقت برداشت نتایج را کاهش می دهد لذا ردیف فوقانی بند به صورت یکپارچه ، از بسته ای به ابعاد ۵۰ × ۴۰ × ۱۱ ساخته شده است . شبکه پیژومتری در دیوار و کف کانال امکان قرائت فشار در بدنه متخلخل بند و نیز فشار در سطح تاج بند را فراهم می نمایند . این پیژومترها به فاصله ۱۰ سانتیمتری از یکدیگر قرار دارند . برداشت پروفیل جریان گذری از روی بند نیز با استفاده از ارتفاع سنج نقطه ای (Point gauge)

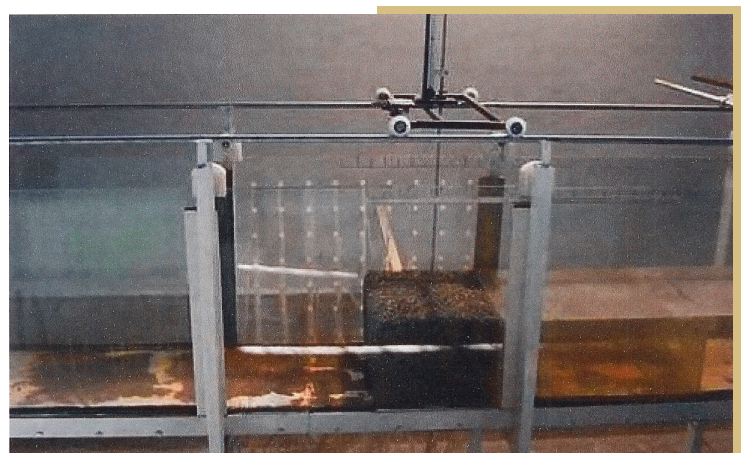
$$c_x = \frac{1}{(a_x + b_x u)} \quad \text{و} \quad c_y = \frac{1}{(a_y + b_y v)}$$

پس:

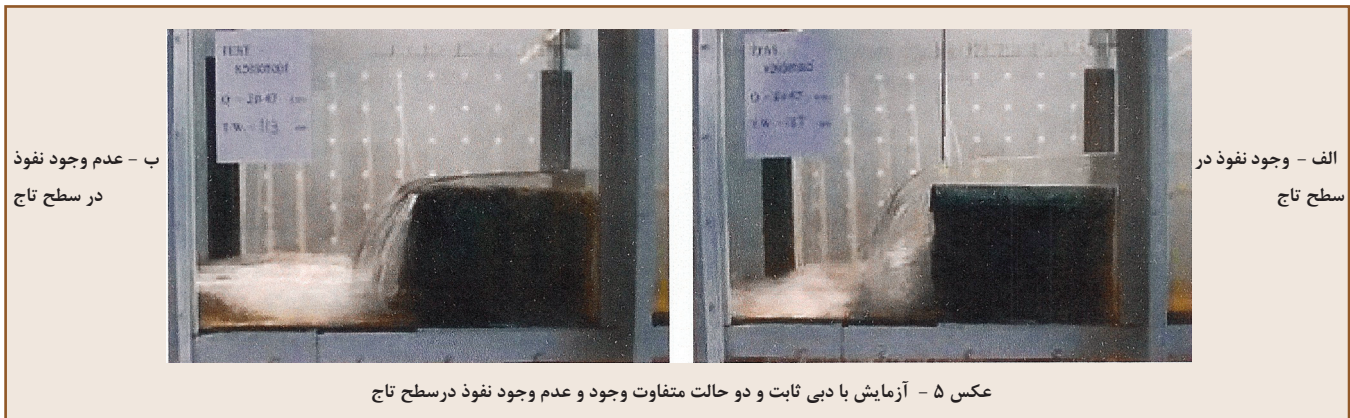
(۷)

$$u = c_x \cdot \frac{\partial h}{\partial x} \quad \text{و} \quad v = c_y \cdot \frac{\partial h}{\partial y}$$

با جایگذاری سری روابط (۷) در رابطه پیوستگی نتیجه می شود:



عکس ۴ - مدل آزمایشگاهی بند توری سنگی .



موردنظر،  $x$  فاصله از نمای بالادست و  $L$  طول بند است.  $K_p$  ضریب تبدیل فشار هیدروستاتیک به فشار واقعی است.

عملی می‌شود.

$$P_{Actual} = K_p \cdot P_{Hydrostatic} \quad (9)$$

### دستاوردهای آزمایشگاهی

برداشت نتایج از مدل فیزیکی جنبه‌های هیدرولیکی تازه‌ای را روشن ساختند. لحاظ این جنبه‌ها، سبب رفتار نگاری صحیح جریان در مدل‌سازی ریاضی می‌گردد. ذیلاً به آنها اشاره می‌شود.

$$\begin{aligned} \text{اگر } \frac{x}{L} \leq 0.35: & \quad K_p = 0.85 \\ \text{اگر } 0.35 < \frac{x}{L} < 0.7: & \quad K_p = 0.96 \\ \text{اگر } 0.7 \leq \frac{x}{L} \leq 1: & \quad K_p = 1.0 \end{aligned} \quad (10)$$

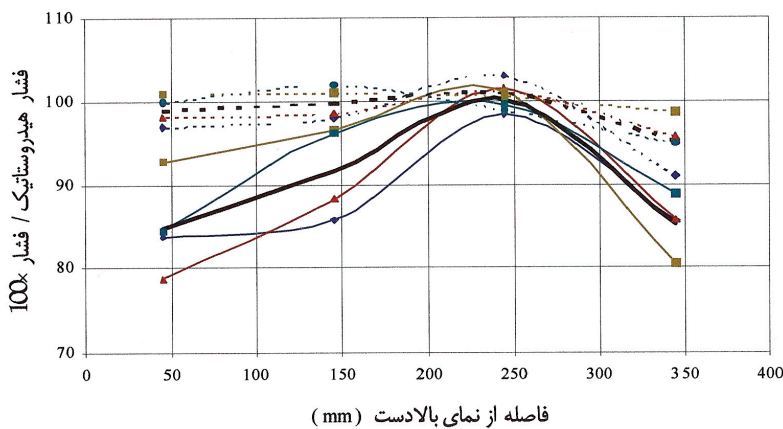
### الف - توزیع فشار در جریان عبوری از روی بند

فشار بر روی سطح تاج، به عنوان یک مورد از اطلاعات موثر بر شبیه‌سازی جریان در محیط متخلخل شناخته می‌شود. از پیش استنباط می‌شد که وجود انحناء در پروفیل جریان سبب گردد تا توزیع فشار از توزیع هیدروستاتیک فاصله بگیرد و انتخاب فشاری برابر ستون آب بر روی بند سبب ایجاد خطا در نتایج مدل ریاضی شود. برداشتهای آزمایشگاهی، ضمن تایید درستی این پیش بینی، وقوع پدیده دیگری را نشان دادند. با

### ب - اتلاف انرژی

یکی از پارامترهای رابطه ۱- شیب خط انرژی ( $S_f$ ) است که با فرض یکنواخت بودن جریان مابین دو مقطع متوالی، مقدار آن از رابطه مانینگ

وجود نفوذ جریان در سطح تاج بند، توزیع فشار اختلاف بیشتری نسبت به توزیع فشار هیدروستاتیک، از آنچه بدلیل انحناء در سطح آب ایجاد می‌شود، پیدا می‌کند. برای یافتن صحت این ادعا آزمایشهایی با دبی‌های مختلف و به ازای هر دبی تحت دو حالت متفاوت، الف - وجود نفوذ در سطح تاج و ب - عدم وجود نفوذ در این سطح، انجام گردید. تصویر (۵) این دو حالت را نشان می‌دهد. از نتایج آزمایش، نسبت فشار موجود به فشار هیدروستاتیک در سطح تاج برای هر دو حالت بدست آمد و با یکدیگر مقایسه گردید. منحنی شکل (۶) این مقایسه را به ازای دبی‌های مختلف نشان می‌دهد. با توضیح فوق ضروری می‌نمود از عمق جریان بر روی تاج بند، یا عبارتی فشار هیدروستاتیک، فشار واقعی استخراج گردد. معیار (۱۰) از تعداد دبی آزمایش شده بدست آمده است. لازم به ذکر است که اگر چه این معیار برای شرایط حاضر از ابعاد بند، دانه بندی و شکل مصالح سنگریزه‌ای و نیز محدوده دبی‌های آزمایش شده، با دقت مناسب قابل قبول می‌باشد، ولی تایید آن به عنوان یک استاندارد، نیازمند انجام آزمایشهای متعدد با شرایط مختلف خواهد بود. در معیار



Q=15.0 lit/s -With Suction in Crest	Q=15.0 lit/s -Without Suction in Crest
Q=20.5 lit/s -With Suction in Crest	Q=20.5 lit/s -Without Suction in Crest
Q=29.4 lit/s -With Suction in Crest	Q=29.4 lit/s -Without Suction in Crest
Q=34.0 lit/s -With Suction in Crest	Q=34.0 lit/s -Without Suction in Crest
Average -With Suction in Crest	Average -Without Suction in Crest

عکس ۶- تاثیر نفوذ جریان بر توزیع فشار در روی تاج بند توری سنگی.

$$\frac{dy}{dx} \propto \frac{-S_f + \frac{v_s u_s}{gR} - \frac{2\beta v_s U}{gR}}{(1 - \beta \frac{U^2}{gR} + \frac{u_s^2}{gR})} \quad (13)$$

مقایسه تناسب-۱۳ با رابطه-۱ نشان می دهد که شاید عبارت  $\frac{v_s u_s}{gR}$  بتواند تاثیر نفوذ جریان در تغییر افت اصطکاکی را لحاظ نماید یا عبارتی:

$$-S_f \propto -S_{f(manning)} + \frac{v_s u_s}{gR} \quad (14)$$

جایگذاری این تناسب در رابطه-۱ و مقایسه نتایج به دست آمده از آن با نتایج مدل فیزیکی نشان داد که این تناسب را می توان به تساوی زیر تبدیل نمود و در حصول پروفیل سطح آب از آن استفاده کرد.

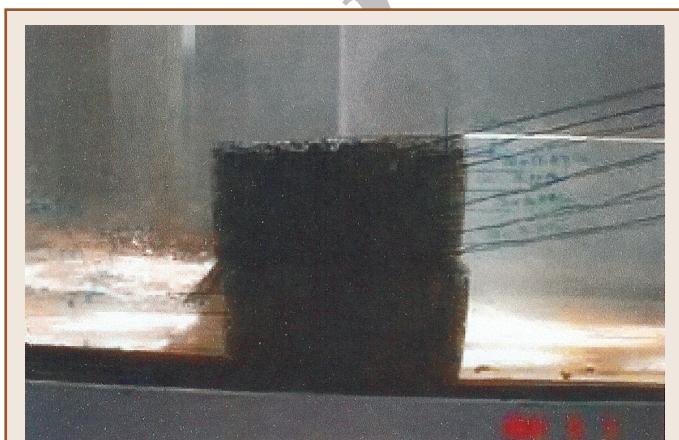
$$-S_f = -S_{f(manning)} + k_{Suction} \cdot \frac{v_s u_s}{gR} \quad (15)$$

به هنگام نفوذ جریان جهت سرعت نفوذ ( $v_s$ ) از بالا به پایین است و لذا مقدار عددی منفی را به خود اختصاص می دهد و سبب افزایش افت اصطکاکی می شود. رابطه-۱۶ شکل اصلاح شده رابطه جریان متغیر مکانی است و ملاک عمل برای تعیین پروفیل سطح آب قرار گرفته است.

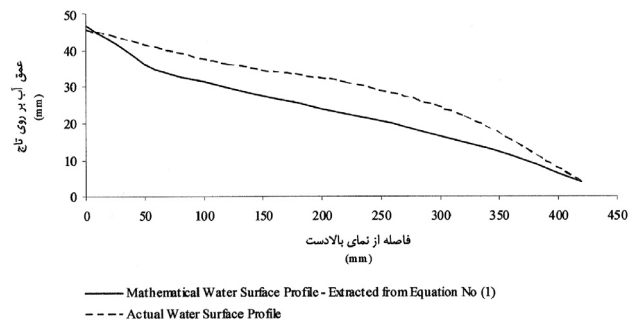
$$\frac{dy}{dx} = \frac{S_0 - S_{f(manning)} + k_{Suction} \cdot \frac{v_s u_s}{gR} - \frac{Q \cdot dQ/dx}{g \cdot A^2}}{1 - \frac{Q^2}{g \cdot A^2 \cdot D}} \quad (16)$$

$$S_{f(manning)} = \frac{n^2 \cdot U^2}{R^{\frac{4}{3}}}$$

با حصول نتایج آزمایشگاهی در دبی های ۱۵ تا ۳۵ لیتر در ثانیه ، و



عکس ۸ - آزمایش برای استخراج ضرایب ثابت در رابطه فورس هایمر .



عکس ۷- اختلاف بین پروفیل سطح آب بدست آمده

از رابطه (۱) با پروفیل واقعی .

استخراج می شود. نتایج بدست آمده از حل عددی تدوین شده بر پایه این رابطه ، پروفیلی بدست می دهد که با اختلاف زیادی در زیر پروفیل واقعی ، یعنی پروفیل بدست آمده از نتایج آزمایشگاهی ، قرار دارد . نمودار شکل ۷- نتیجه مورد ذکر را برای مثالی نمایش می دهد . بررسی های بیشتر نشان دادند که این اختلاف به دلیل نفوذ جریان در سطح تاج بوجود آمده است . نفوذ سبب افزایش زبری هیدرولیکی بستر نسبت به شرایط عدم نفوذ می شود . بنابراین لازم گردید به نحوی این یافته تحقیقاتی به مدل ریاضی اعمال شود تا نتایج تئوری اصلاح گردند . برای این منظور ، تعریف دیگری برای مقدار شیب خط انرژی یافت شد که تاثیر نفوذ را به سیستم اعمال می نماید . حصول این تعریف بدین ترتیب است .

Chiew و Chen (۳) در تحقیق خود رابطه تحلیلی ۱۱ را برای تنش برشی بر سطح محیط متخلخل تحت نفوذ استخراج نمودند .

$$\tau_b = -\rho g y \frac{dy}{dx} (1 - \beta \frac{U^2}{g y} + \frac{u_s^2}{g y}) - \rho v_s (2\beta U - u_s) \quad (11)$$

مقادیر  $v_s$  و  $u_s$  به ترتیب سرعتهای جریان در جهت  $x$  و  $y$  بر روی بستر متخلخل می باشند . بنابراین  $v_s$  سرعت نفوذ جریان خواهد بود . رابطه فوق به صورت دیگری مرتب می شود .

$$\frac{dy}{dx} = \frac{-\tau_b + \rho v_s u_s - 2\rho v_s \beta U}{\rho g y (1 - \beta \frac{U^2}{g y} + \frac{u_s^2}{g y})} \quad (12)$$

از طرفی روشن است که برای جریان یکنواخت ، بین تنش برشی کف و شیب خط انرژی رابطه زیر برقرار است .

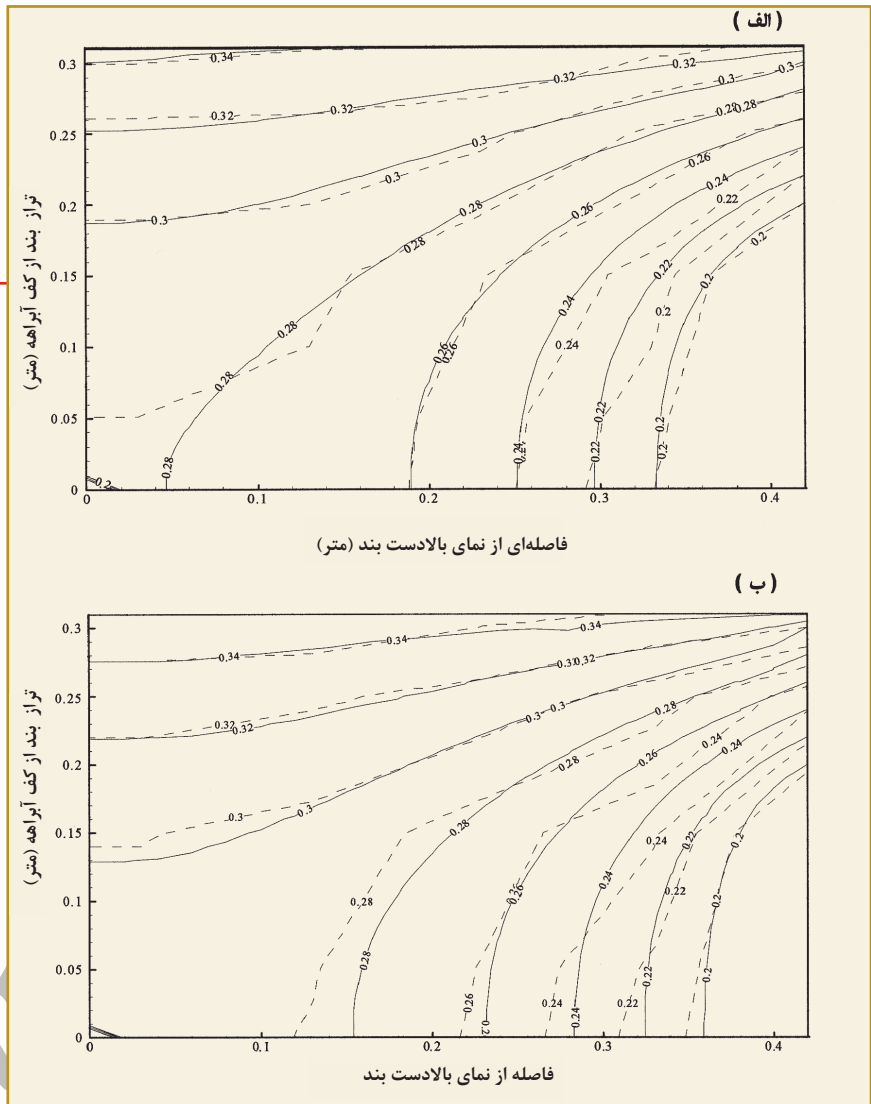
$$\tau_b = \rho g R S_f$$

بنابراین می توان برای جریان غیر یکنواخت تناسب زیر را معقول دانست .

$$\tau_b \propto \rho g R S_f$$

با جایگذاری  $\tau_b$  در رابطه - ۱۲ ، آن رابطه به تناسب زیر تغییر داده

شکل (۹) - مقایسه منحنی‌های هم فشار بدست آمده از مدل ریاضی و مدل فیزیکی (فشارها بر حسب متر).  
الف- مثال (۱) ب- مثال (۲)  
منحنی خط پر: نتایج حاصل از مدل ریاضی  
منحنی خط چین: نتایج حاصل از مدل فیزیکی



جریان یک بعدی به گونه زیر حاصل آمده اند.

$$a = 3/7 \frac{s}{m}, \quad b = 40/7 \frac{s^2}{m^2}$$

از آنجاییکه جریان عبوری از محیط متخلخل بند جریانی کاملاً دو بعدی است لذا فرض برابری مقادیر ثابت در دو جهت افق و عمودی، سبب شد تا نتیجه مطلوبی از مدل ریاضی حاصل نگردد. از اینرو با عنایت به عدم امکان تعیین آزمایشگاهی ضرایب در فضای دو بعدی، لاجرم با اجرای مکرر مدل ریاضی به ازای ضرایب ثابت مختلف، ضرایب مطلوب استخراج شدند. با چنین ضرایبی نتایج مناسبی به ازای گذر دیگر دبی‌ها نیز حاصل می‌آید.

$$a_x = 2/5 \frac{s}{m}, \quad b_x = 40/5 \frac{s^2}{m^2} \quad (17)$$

$$a_y = 8/2 \frac{s}{m}, \quad b_y = 5/120 \frac{s^2}{m^2}$$

### شرایط مرزی

ترکیب معادله‌های حاکم، معادله‌ای با تنها متغیر ارتفاع پیزومتریک ( $h$ ) در رابطه ۸ - نتیجه داده است. از اینرو برای حل جریان، لازمست مقدار و یا نرخ تغییرات آن در مرزها معین باشد. این ارتفاع پیزومتریک نسبت به سطح مبنای کف کانال در پایین دست اندازه گیری می‌شود.

مرز بالادست: این مرز یک لایه نفوذ ناپذیر بوده و بنابراین تغییر فشار پیزومتریک عمود بر آن برابر صفر است.

$$\frac{\partial h}{\partial x} = 0$$

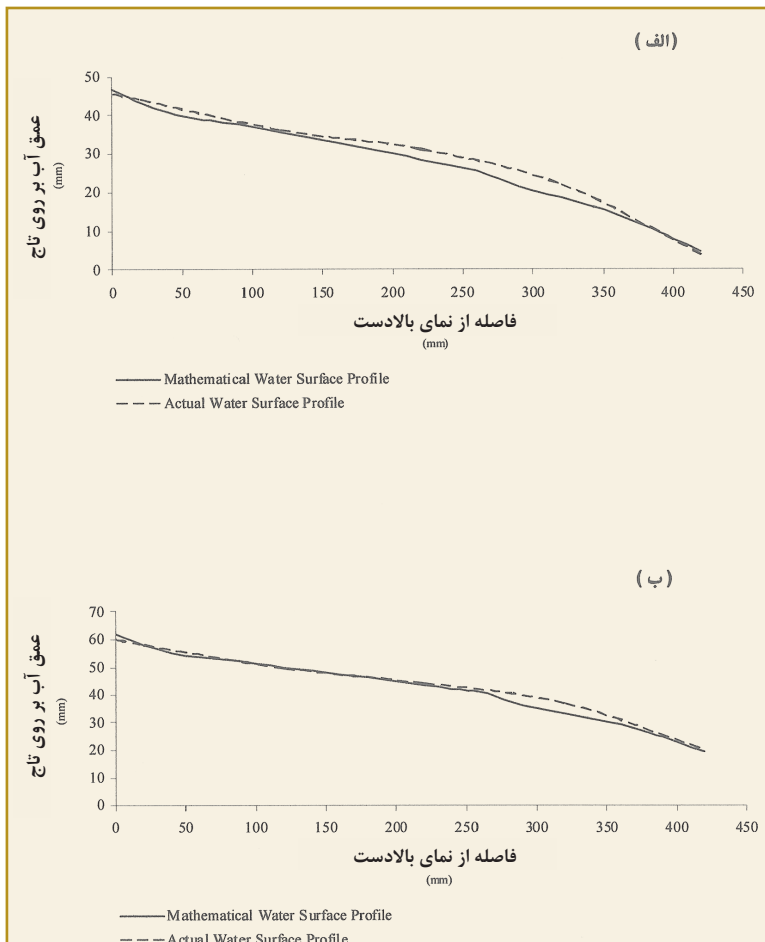
مقایسه آنها با نتایج مدل عددی،  $k_{suction}$  بدست آمد.

$$k_{suction} = 50.$$

توضیح اینکه، مقادیر US و VS از اطلاعات اولین ردیف گروه‌های محاسباتی فوقانی در محیط متخلخل حاصل می‌شوند.

### ج - ضرایب ثابت

ضرایب ثابت در معادله فروش هایمر،  $a$  و  $b$ ، تابعی از خصوصیات فیزیکی محیط متخلخل از جمله اندازه دانه‌ها، تخلخل و ... می‌باشند. تعیین این ضرایب، با امکانات موجود آزمایشگاهی، برای جریانی یک بعدی قابل انجام بوده است. بدین ترتیب که ضخامتی از بسته‌های توری سنجی در مسیر جریان در کانال قرار داده می‌شود و شیب خط انرژی در محیط متخلخل برای چند دبی مختلف اندازه گیری می‌گردد سپس با کمک رابطه فروش هایمر ثابت‌ها استخراج می‌شوند. این ضرایب برای



شکل (۱۰) - مقایسه پروفیل‌های سطح آب بدست آمده از

مدل ریاضی و مدل فیزیکی.

الف - مثال (۱) ب - مثال (۲)

منحنی خط پر: نتایج حاصل از مدل ریاضی

منحنی خط چین: نتایج حاصل از مدل فیزیکی

مرز کف: این مرز نیز یک مرز نفوذ ناپذیر است.

$$\frac{\partial h}{\partial y} = 0$$

مرز فوقانی (سطح تاج بند): با کمک معیار تعریف شده (۱۰)، از عمق آب در هر مقطع بر روی بند، فشار بر سطح تاج بدست می‌آید.  $L_y$  تراز سطح تاج نسبت به سطح مبناء است.

$$h = P_{Actual} + L_y$$

مرز پایین دست: تراز آب در بلافاصله پایین دست بند بالاتر از تراز نظری پایاب قرار دارد مقایسه نتایج مدل ریاضی با برداشت‌های آزمایشگاهی نشان می‌دهد که عمق آب پایین دست در بلافاصله از بند شرط مرزی را تعریف می‌نماید.  $y_p$  تراز گره مورد نظر و  $EL_{Tailwater}$  تراز سطح آب پایاب از سطح مبناء است. روی تراز آب در پایین دست:

$$h = y_p$$

زیر تراز آب در پایین دست:

$$h = EL_{Tailwater}$$

### سلسله مراتب مدل‌سازی ریاضی

دو مدل تعیین پروفیل سطح آب و آنالیز جریان در محیط متخلخل توری سنگی در برنامه به یکدیگر کوپل شده و مسیر سعی و تکرار برای رسیدن به جواب نهایی انجام می‌شود. خلاصه مسیر حل ریاضی به قرار زیر است.

۱ - ابتدا، مدل پروفیل فرضی برای سطح آب در نظر می‌گیرد.

۲ - با استفاده از پروفیل فرضی، فشارهای پیزومتریک در سطح تاج بدست می‌آیند و جریان در بدنه توری سنگی آنالیز می‌شود. نتیجه این آنالیز حصول مشخصه‌های مولفه‌های سرعت و ارتفاع پیزومتریک جریان می‌باشند. در اینجا نکته حائز اهمیت اینست که اگرچه مقادیر  $C_x, C_y$  در رابطه ۸- به شکل پارامترهای ثابتی نمایان شده‌اند ولی واضح است که مقادیر آنها در هر گره از محیط متخلخل وابسته به مقادیر مولفه‌های سرعت در آن گره می‌باشد از اینرو حل جریان در بدنه توری سنگی نیز با تکرار انجام می‌شود.

تکرار بدین صورت است که ابتدا مقادیر فرض می‌گردند، میدان حل عددی می‌شود و فشارهای پیزومتریک حاصل می‌گردند این فشارها مولفه‌های سرعت را بدست می‌دهد و با استفاده از آنها جدید حاصل می‌شود. مسیر فوق تا رسیدن به همگرایی تکرار می‌گردد.

۳- با استفاده از سرعت‌های بدست آمده در محیط متخلخل، مولفه افقی سرعت جریان بلافاصله بر روی تاج ( $u_s$ ) و سرعت نفوذ جریان ( $v_s$ ) حاصل می‌شود. مقدار  $v_s$  تغییرات دبی در طول تاج، یعنی  $\frac{dQ}{dx}$ ، را بدست می‌دهد و پروفیل سطح آب مجدداً محاسبه می‌شود.

۴- از مرحله دوم با داشتن پروفیل سطح آب تجدید شده، محاسبات تکرار می‌شود تا در نهایت پروفیل در دو تکرار متوالی با دقت قابل قبولی مشابه یکدیگر باشند.

### نتایج و بحث

با استفاده از برداشت‌های آزمایشگاهی، درک هیدرولیک جریان گذری از روی بستر متخلخل بند ممکن، و بدنبال آن شرایط در مدل عددی جهت انطباق با واقعیت اصلاح گردید. مدل بند توری سنگی با مشخصاتی که پیشتر ذکر شد مبنای مقایسه مدل‌های ریاضی و فیزیکی قرار داده شده است. با عنایت به هدف تحقیق، که همانا تولید کار مدل ریاضی است، مشخصات بند و شرایط فیزیکی مصالح سنگریزه‌ای آن



در کلیه آزمایش‌ها ثابت نگه داشته شده و تنها با برقراری دبی و سطوح آب پایاب مختلف، شرایط متفاوت آزمایشگاهی در مدل فراهم گردیده است. دو نمونه از مقایسه‌هایی که صورت گرفته، انتخاب گردیده و نتایج در قالب نمودارهایی که مقادیر فشار در بدنه و نیز پروفیل سطح آب روی بند را نشان می‌دهند، در اینجا آورده شده است. مشخصات این دو نمونه بدین قرار هستند:

مثال (۱) - جریان با دبی ۱۴/۹ لیتر در ثانیه و عمق آب پایاب برابر ۱۴۰ میلی‌متر.

مثال (۲) - جریان با دبی ۲۳/۰ لیتر در ثانیه و عمق آب پایاب برابر ۱۶۰ میلی‌متر.

شکل (۹) خطوط هم فشار و شکل (۱۰) پروفیل‌های سطح آب را نمایش می‌دهند. نیز در شکل (۱۱) به همراه خطوط هم فشار، بردارهای سرعت ظاهری در بدنه متخلخل بند قابل رؤیت هستند. دیده می‌شود که نتایج بدست آمده از مدل ریاضی با برداشتهای آزمایشگاهی تطابق مناسبی دارند و می‌توان رای به صحت کار مدل صادر نمود اگرچه تأکید می‌شود که برای عمومیت بخشیدن به معیارهای ارائه شده در این تحقیق کوشش بیشتری نیاز می‌باشد.

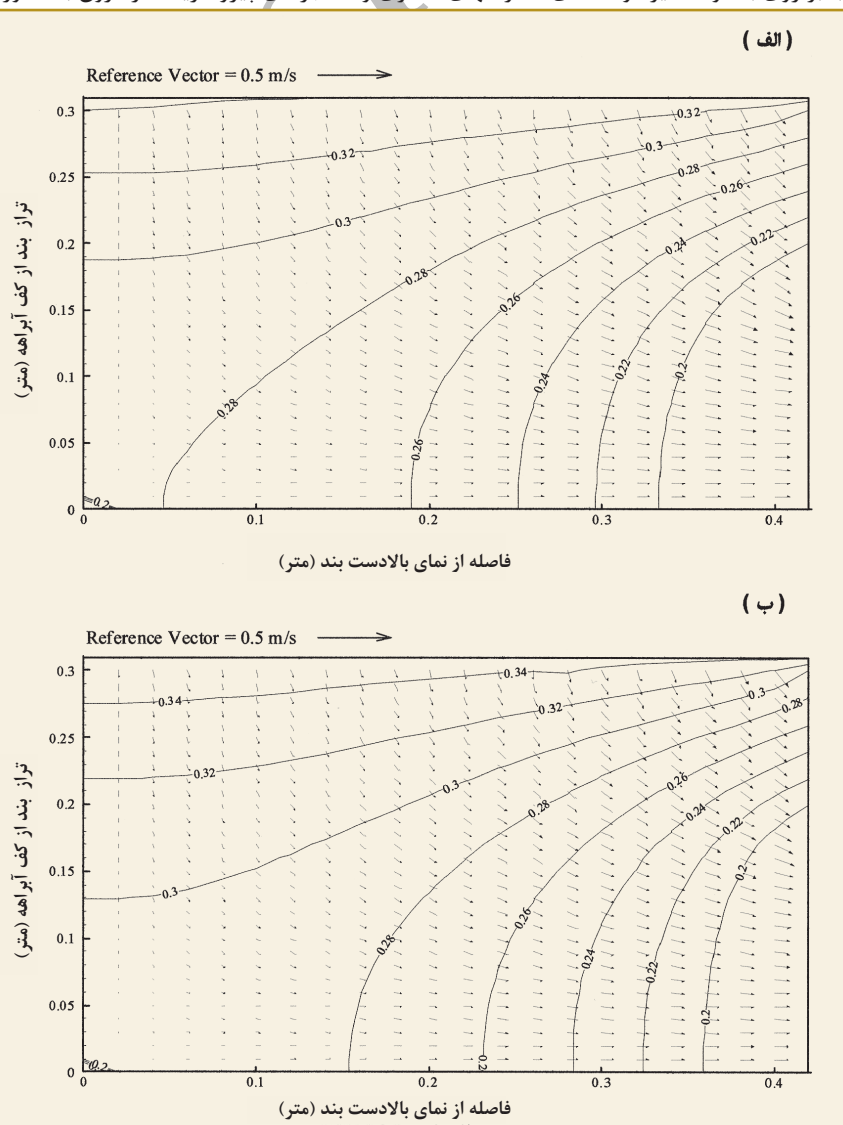
### خلاصه و نتیجه گیری

تحقیق حاضر با بهره‌گیری از مدل ریاضی تدوین شده توسط مولفین، می‌تواند پروفیل سطح آب بر روی بند و مقادیر مولفه‌های سرعت‌های ظاهری و فشارهای بیژومتریک در درون بدنه توری

۱- توزیع فشار نسبت به شرایط عدم نفوذ تغییر یافته و مقدار فشار در سطح تاج کاهش نسبت به آن شرایط بیشتری پیدا می‌کند. بدیهی است که چنانچه سطح سیال در مسیر حرکت دارای انحناء باشد توزیع فشار از توزیع هیدروستاتیک فاصله می‌گیرد ولی نشان داده شد که همراه با نفوذ جریان در بدنه متخلخل بند این فاصله بیشتر می‌شود به گونه‌ای که تفاوت آن نسبت به توزیع هیدروستاتیک حائز اهمیت می‌گردد.

۲- افت انرژی (اصطلاحاً) جریان افزایش می‌یابد. لمس فیزیکی این پدیده نیز به آسانی قابل درک است. وجود نفوذ سبب می‌شود تا حجم آب گذر کرده از روی بند به سطح تاج بیشتر بچسبد و هنگامیکه با چسبندگی بیشتر حرکت می‌کند اصطکاک بین سیال و سطح زیرین آن افزوده می‌شود. بدیهی است که این مهم در تعیین جانمایی پروفیل سطح آب باید لحاظ گردد.

۳- شرایط کاملاً دو بعدی برای حرکت جریان در محیط متخلخل بوجود می‌آید و باعث می‌شود که نتوان تنها یک جهت، افق یا عمود، را به عنوان جهت غالب حرکت در نظر گرفت. در تحقیق‌های دیگر همچون تحقیق Kells (۷) که جریان از بدنه توری سنگی با مخزنی خالی از رسوب عبور می‌کند جهت غالبی در امتداد افق برای حرکت سیال می‌توان تصور نمود و ضرایب فورس‌هایم در جهت‌های  $x$  و  $y$  را مشابه



شکل (۱۱) - منحنی‌های هم فشار و بردارهای سرعت ظاهری حاصله از مدل ریاضی (فشارها بر حسب متر).

الف- مثال (۱) ب- مثال (۲)

- 3- Chiew Yee-Meny , Chen Xingwei 2001. Bed shear stress in open channel flow with bed suction, sep. 16-21, XXIX IAHR Congress Proceedings , Beijing – China
- 4- Chow, V.T. 1973; Open Channel Hydraulics “ McGraw-Hill Pub. Co. , ISBN 0-07-Y85906-X
- 5-Huanxiang X. , Jianliang L. 1994. Calculation of water depth on the top of cofferdam and the lifting pressure underneath the concrete slabs on downstream slop . I. J. Water Resources Engineering . Vol 2 , No : 2 , P 45 - 60
- 6-Joy D.M. 1991. Nonlinear porous media flow : Determination of Parameters for a Coarse Granular Media “ 13 th Can. Cong. Appl. Mech. , Winnipeg , Canada
- 7-Kells J. A. 1993. Spatially varied flow over rockfill embankment . Can . J. Civ. Eng. , Vol 20 P 820 – 827
- 8-Kells J. A.1993. Analysis of flow through a gabion Dam . Canadian society for civil engineering annual conference , P 51 – 60
- 9-Townsend Ronald D. , Garga Vinod K. , Hansen David. 1991; Finite difference modeling of the variation in piezometric head within a rockfill embankment. Can. J. Civ. Eng., Vol 18 , P 254 – 265.



دانست . حال آنکه در جریان دو بعدی لزوما ضرایب فورش هایمر در دو جهت برابر نخواهند بود .

### ضمیمه: تعریف پارامترها

$A$	: سطح مقطع جریان :
$a_n, b_n$	: ضرایب فورش هایمر :
$C_x, C_y$	: ضرایب وابسته به مولفه های ظاهری سرعت:
$D$	: عمق هیدرولیکی:
$D_{TW}$	: عمق آب در پایاب :
$EL_{Tailwater}$	: تراز سطح آب پایاب :
$g$	: شتاب ثقل:
$h$	: ارتفاع پیزومتریک جریان:
$i_n$	: شیب هیدرولیکی در راستای $n$ :
$K_p$	: ضریب تصحیح فشار :
$L$	: طول بند در امتداد جریان:
$L_y$	: ارتفاع بند از کف کانال در پایین دست :
$\bar{n}$	: ضریب زبری مانینگ:
$P$	: فشار :
$Q$	: دبی جریان :
$R$	: شعاع هیدرولیکی:
$S_0$	: شیب کف مجرا :
$S_f$	: شیب خط انرژی :
$S_{f(manning)}$	: شیب خط انرژی برای جریان یکنواخت :
$u$	: مولفه سرعت ظاهری جریان در محیط متخلخل و در راستای محور $a$ :
$U$	: سرعت متوسط جریان گذری از روی بند :
$u_s$	: مولفه افقی سرعت جریان بلافاصله بر روی تاج بند :
$v$	: مولفه سرعت ظاهری جریان در محیط متخلخل و در راستای محور $y$ :
$V$	: سرعت ظاهری جریان در محیط متخلخل :
$v_s$	: مولفه عمودی سرعت یا سرعت نفوذ جریان به داخل محیط متخلخل :
$x$	: محور مختصات در جهت افق :
$y$	: محور مختصات در جهت عمود :
$y_p$	: فاصله تا سطح مینا :
$\beta$	: ضریب تصحیح سرعت در معادله ممتموم :
$\rho$	: دانسیته سیال :
$\tau_b$	: تنش برشی بر روی محیط متخلخل :

### منابع مورد استفاده

- 1- Bari R. & Hansen D. 2002. Application of gradually varied flow algorithms to simulation buried streams J. Hyd. Res. , Vol. 40 , No. 6 , pp 673-683
- 2- Bear J. 1975. Dynamics of fluids in porous media. American Elsevier Pub. Co. , ISBN 0-444-00 114.