

## بررسی عددی و آزمایشگاهی پرش آبی نوع B در حوضچه‌ی آرامش با پله‌ی ناگهانی و بستر

### زبر

محمد جواد نصرافهانی<sup>۱\*</sup>، محمود شفاعی بجمستان<sup>۲</sup>، سید محمود کاشفی پور<sup>۳</sup>، منوچهر فتحی مقدم<sup>۴</sup>  
تاریخ دریافت: ۱۳۹۰/۷/۸ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۲/۸/۱۲

### چکیده

حوضچه‌ی‌های آرامش از نوع پرش آبی با افتادگی کف ناگهانی به منظور کاهش طول پرش و اطمینان از وقوع پرش در ابتدای حوضچه‌ی در پایین دست دریچه‌ها کاربرد دارند. ممکن است در این نوع حوضچه‌ی چهارنوع پرش تشکیل شود که مهمترین آن نوع B می‌باشد. از طرفی، ثابت شده‌است که زبری بستر نیز می‌تواند به کاهش بیشتر طول پرش و عمق پایاب کمک کند. از این رو، در تحقیق حاضر پرش نوع B بر روی بستر زبر با افتادگی ناگهانی با کاربرد شبیه سه بعدی FLOW-3D شبیه‌سازی و با داده‌های حاصل از شبیه آزمایشگاهی مقایسه شد. خصوصیات پرش، از جمله عمق مزدوج، توزیع سرعت، و تنش برشی بستر از دو شبیه عددی و فیزیکی استخراج و مقایسه شدند. برای شبیه‌سازی عددی پرش نوع B از روش حجم سیال در تحلیل جریان آزاد و شبیه RNG k-ε استفاده شد. نتایج به دست آمده نشان دادند که شبیه آشفتگی RNG k-ε در مقایسه با شبیه k-ε در شبیه‌سازی پرش آبی با افتادگی ناگهانی با بستر زبر نسبت به سایر شبیه‌های آشفتگی از دقت بیشتری برخوردار است. در مقایسه با پرش کلاسیک و بستر صاف، نتایج نشان دادند که در پرش با افتادگی ناگهانی و بستر زبر عمق مزدوج کاهش می‌یابد، که می‌تواند ناشی از افزایش تنش برشی به دلیل وجود زبری و افتادگی ناگهانی باشد.

**واژه‌های کلیدی:** جهش آبی، پله معکوس، بستر زبر، شبیه عددی

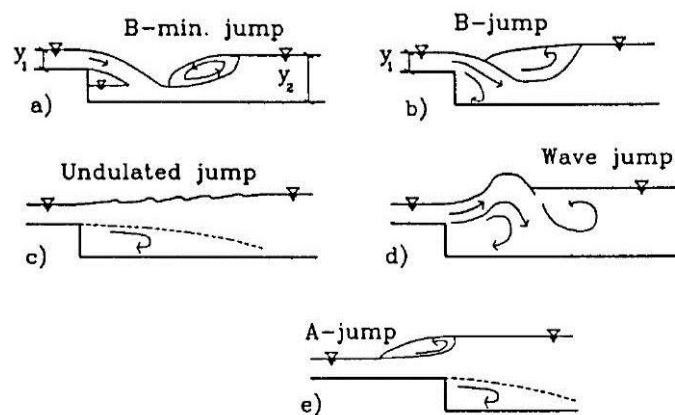
<sup>۱</sup> - استادیار دانشکده مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز  
<sup>۲</sup> - استاد دانشکده مهندسی علوم آب - دانشگاه شهید چمران اهواز  
<sup>۳</sup> - نویسنده مسئول مقاله: mo.isfahani@gmail.com

## مقدمه

روی پله‌ی معکوس نتایج متفاوتی داشته‌اند. فارستر و اسکریندا (۱۹۵۰) تحقیقاتی نظری و عملی در خصوص سرعت، کارمایه و نیمرخ سطح آزاد را در پرش آبی بر پله‌ها را انجام داده، و تاثیر آن را بر شرایط جریان بررسی کردند. پس از آن راس و همکاران (۱۹۵۱) مشخصات پرش آبی را در یک پایین افتادگی ناگهانی (پله‌ی معکوس) در کف نهر بررسی کردند. آنها نشان دادند که دو حالت کلی در این نوع پرش می‌تواند رخ دهد. هم-چنین، یک حالت بینابین، که برای تبدیل حالت اول به دوم یا بالعکس است. این حالت بینابین را موج توسعه نیافته نامیدند. مور و مورگان (۱۹۵۸) تحقیقی را در خصوص پرش پله‌ی معکوس در نهرهای مستطیلی انجام دادند. آنها در تحقیقات خود به این نتیجه رسیدند که ۴ حالت مختلف از پرش قابل وقوع است.

شکل (۱) انواع مختلف پرش آبی تشکیل شده بر پله‌ی معکوس را در ازاء افزایش عمق پایاب نشان می‌دهد.

پرش آبی جریان متغیر سریعی است که جریان فوق بحرانی را به زیر بحرانی تبدیل می‌کند. در طول پرش آبی مقداری از کارمایه جریان به وسیله‌ی گردابه‌های ایجاد شده و آشفتگی موجود در جریان از آن گرفته می‌شود؛ بنابراین، از پدیده‌ی مزبور در اتلاف کارمایه جریان‌های فوق بحرانی در پایین دست سدها استفاده می‌شود. در پایین دست سدها، در شرایطی که عمق آب رود کمتر از عمق ثانویه پرش باشد، پرش به رود وارد شده و باعث آبستگي شدید پایین دست حوضچه‌ی آرامش، و نهایتاً موجب آسیب دیدگی آن می‌گردد. در چنین شرایطی، برای تثبیت پرش در درون حوضچه‌ی آرامش از یک پله‌ی منفی استفاده می‌شود تا عمق ثانویه پرش با عمق جریان در رود برابر گردد. شناختن نوع پرش آبی تشکیل شده در درون حوضچه‌ی آرامش امکان طراحی مناسب آن را فراهم می‌سازد. تحقیقات محققین مختلف در مورد نوع پرش هیدرولیکی مناسب تشکیل شده بر



شکل ۱- انواع پرش آبی روی پله‌ی معکوس با افزایش عمق پایاب.

این پرش، تحت عنوان پرش موجی، یا  $Wz$ ، نامیده می‌شود. بعد از آن با کاهش عمق پایاب پرش نوسانی (موج قطاری) تشکیل خواهد شد. کاهش بیش‌تر عمق پایاب موجب می‌گردد که  $Wz$  با قرار گرفتن پنجه‌اش در کنار پله به جهش  $B$  تبدیل شود. هرگاه جریان فرصت پیدا کند تا به صورت فوق بحرانی از پله به پایین دست آن عبور کند، پرشی تشکیل خواهد شد که به آن پرش

هرگاه عمق پایاب نسبتاً بزرگ باشد، پرش آبی در قسمت بالادست تشکیل می‌شود. این نوع جهش تحت عنوان پرش نوع  $A$  خوانده می‌شود. هرگاه عمق پایاب کاهش یابد، پرش  $A$  جای خود را با موجی که در محل پله به وقوع می‌پیوندد عوض می‌کند. جریان فوق بحرانی در شرایطی که ارتفاع موج در پایاب بیشتر شود، به علت شکلی که به خود می‌گیرد، به بالادست منقل می‌گردد.

سعیدپناه و همکاران (۱۳۸۰)، در مطالعه‌ی خود در معادلات جریانهای متغیر تدریجی، عبارتهایی را جهت در نظر گرفتن توزیع غیرآب‌ایستایی فشار اضافه کرده، و از حل معادلات حاصل به روش تفاضل محدود برای محاسبه پرش آبی در یک نهر ذوزنقه‌ای بهره بردند. مقایسه‌ی نتایج حاصل از حل عددی و آزمایشگاهی صحت نتایج عددی را بطور قابل قبولی نشان داد. سارکر و رودز (۲۰۰۲) با شبیه‌سازی عددی، و هم‌چنین انجام آزمایش‌هایی، پرش آبی را مورد بررسی قرار دادند. آنها از شبیه‌سازی ک-ε RNG به همراه روش حجم سیال برای شبیه‌سازی سطح آزاد استفاده کردند. بین شبیه‌سازی عددی و نتایج آزمایشگاهی آنها تطابق مناسبی وجود داشت. ژائو و میسرا (۲۰۰۴) پرش بر روی بستر با شیب کم را شبیه‌سازی کردند. گونزالس و بمباردلی (۲۰۰۵) برای شبیه‌سازی دو بعدی و سه بعدی از شبیه‌سازی ک-ε LES استفاده کردند. آنها با استفاده از نرم افزار Flow-3D به کمک معادلات جریان دو مرحله‌ای به همراه شبیه‌سازی ورود هوا، شبیه‌سازی خود را انجام دادند. صباغ یزدی و همکاران (۲۰۰۷) نیز در یک شبیه‌سازی سه بعدی به ارزیابی شبیه‌سازی تلامی ک-ε و RNGk-ε در مورد اندازه‌ی ورود هوا در پرش آبی با استفاده از روش حجم محدود پرداختند. گونزالز و بمباردلی (۲۰۰۵) نیز در یک شبیه‌سازی عددی با استفاده از Flow-3D به بررسی مشخصات پرش آبی بر روی سطح صاف در دو حالت شبکه بندی ریز و شبکه بندی درشت به صورت دو بعدی و سه بعدی پرداختند. با توجه به اهمیت موضوع، و این که تحقیق در خصوص شبیه‌سازی عددی پرش بر پله‌ی معکوس با بستر زبر صورت نپذیرفته است، در این تحقیق با استفاده از نرم‌افزار Flow-3D پرش آبی بر پله‌ی معکوس با بستر زبر شبیه‌سازی عددی شد و نتایج حاصل از آن با بررسی‌های آزمایشگاهی انجام شده مورد مقایسه قرار گرفت.

### مواد و روشها

#### نرم افزار Flow-3D

نرم افزار Flow-3D یک شبیه‌سازی مناسب برای حل مسائل پیچیده‌ی دینامیک سیالات بوده و قادر است دامنه‌ی وسیعی از جریان سیالات را شبیه‌سازی کند. این

B کمینه گویند. پرش موسوم به پرش موجی (Wj)، در حقیقت همان حالت بینابینی است که راس و همکاران (۱۹۵۱) در تحقیقات خود به آن اشاره نموده‌اند. هاگر و کاواگوشی (۱۹۹۰) نیز به تحقیق بر پرش آبی روی پله‌ی معکوس با لبه‌ی مدور پرداخته، و روابطی را جهت ۴ نوع پرش، که پیشتر به‌وسیله‌ی مور و مورگان ارائه گردیده بود ارائه نمودند. آنها فراسنج  $\Delta Y$  (اختلاف عمق در پرش در پله معکوس با پرش کلاسیک) را به صورت  $Y = Y^* + \Delta Y$  ارائه کردند، که در آن  $Y$  و  $Y^*$  به ترتیب عمق ثانویه پرش آبی در حالت پله‌ی معکوس و کلاسیک می‌باشند. روابطی را نیز جهت محاسبه آن ارائه نمودند. از دیگر بررسی‌های انجام شده در خصوص پله‌ی معکوس می‌توان به مطالعه‌ی اسماعیلی و ابریشمی (۱۳۷۹)، آئین مهر و صالحی نیشابوری (۱۳۹۰)، هاگر و برتز (۱۹۸۷) و شارپ (۱۹۷۴) اشاره کرد.

راجاراتنام (۱۹۶۸) از اولین کسانی بود که مطالعات گسترده‌ای را در خصوص پرش بر بسترهای زبر انجام داد. او فراسنج  $k = k_e / y_I$  را به عنوان فراسنج زبری معرفی کرد، که در آن  $k_e$  ارتفاع معادل زبری و  $y_I$  عمق جریان ورودی در بالای زبریها است. او نشان داد که طول غلطایی ( $L_T$ ) و طول پرش ( $L_p$ ) بر روی بسترهای زبر نسبت به پرش کلاسیک به میزان قابل توجهی کاهش می‌یابد. از مطالعات انجام شده پرش آبی بر بستر زبر می‌توان به مطالعات گیل (۱۹۸۰)، هاگ‌هز و فلک (۱۹۸۴)، اید و راجاراتنام (۲۰۰۲)، ایزدجو و همکاران (۱۳۸۳)، توکیای (۲۰۰۵)، کارولو و همکاران (۲۰۰۷)، پاگلیارا و همکاران (۲۰۰۸)، شفافی بجستان و نیسی (۱۳۸۷)، عباسپور و همکاران (۱۳۸۸ و ۲۰۰۹)، گوهری و فرهودی (۲۰۰۹)، بدیع‌زادگان و همکاران (۱۳۹۰)، نژندعلی و همکاران (۱۳۹۰) و نصرافهانی و شفافی بجستان (۱۳۹۱) اشاره کرد.

مطالعات عددی نیز در مورد تعیین مشخصات پرش آبی روی سطوح صاف صورت گرفته است که می‌توان به بررسی‌های انجام شده به‌وسیله‌ی گونال و نارایانان (۱۹۹۸) اشاره کرد. آنها در یک شبیه‌سازی دو بعدی و با استفاده از شبیه‌سازی تلامی ک-ε و روش حجم محدود مشخصات پرش آبی مستغرق را مورد مطالعه قرار دادند.

$$\frac{V_F}{\rho c^2} \frac{\partial P}{\partial t} + \frac{\partial u A_x}{\partial x} + R \frac{\partial v A_y}{\partial y} + \frac{\partial w A_z}{\partial z} + \xi \frac{u A_x}{x} = \frac{R_{SOR}}{\rho} \quad (3)$$

شکل کلی معادلات اندازه‌ی حرکت (مومنتم) در حالت سه بعدی نیز به صورت زیر است:

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left\{ u A_x \frac{\partial u}{\partial x} + v A_y \frac{\partial u}{\partial y} + w A_z \frac{\partial u}{\partial z} \right\} - \zeta \frac{A_y v^2}{x V_F} \\ = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + G_x + f_x - b_x - \frac{R_{SOR}}{\rho V_F} (u - u_w - \delta u_s) \\ \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left\{ u A_x \frac{\partial v}{\partial x} + v A_y \frac{\partial v}{\partial y} + w A_z \frac{\partial v}{\partial z} \right\} + \zeta \frac{A_y u v}{x V_F} \\ = -\frac{1}{\rho} \left( R \frac{\partial P}{\partial y} \right) + G_y + f_y - b_y - \frac{R_{SOR}}{\rho V_F} (v - v_w - \delta v_s) \\ \frac{\partial w}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left\{ u A_x \frac{\partial w}{\partial x} + v A_y \frac{\partial w}{\partial y} + w A_z \frac{\partial w}{\partial z} \right\} \\ = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial z} + G_z + f_z - b_z - \frac{R_{SOR}}{\rho V_F} (w - w_w - \delta w_s) \end{aligned} \quad (4)$$

در معادلات فوق  $G_x$ ,  $G_y$ ,  $G_z$  مربوط به شتاب حجمی می‌باشند. فراسنجهای  $f_x$ ,  $f_y$ ,  $f_z$  شتابهای ناشی از جریانهای لزج بوده، و  $b_x$ ,  $b_y$ ,  $b_z$  نیز شامل روابط مربوط به افت در محیطهای متخلخل هستند.

### مشخصات میدان حل

در این تحقیق برای شبیه سازی عددی پرش آبی روی پله‌ی معکوس با بستر زبر، ابتدا با استفاده از نرم افزار AutoCAD یک پله‌ی معکوس با زبری بستر ایجاد گردید (شکل ۲). الگوی کلی شبیه به کار رفته در این تحقیق بر اساس نمونه‌ی فیزیکی ساخته شده به وسیله‌ی نصرافهانی و شفاعی بجستان (۱۳۹۱) می‌باشد، که در قسمت (۲-۲) توضیح داده شده است. در شبیه‌سازی زبریها طوری بر روی بستر قرار گرفتند که رقوم تاج زبریها هم ارتفاع با کف نهر اصلی، یعنی رقوم تاج پله باشند. جریان فوق بحرانی با استفاده از یک دریچه در ابتدای نهر شبیه‌سازی شده ایجاد گردید.

نرم افزار برای شبیه‌سازی جریان‌های سطح آزاد سه بعدی غیر ماندگار با هندسه‌ی پیچیده کاربرد فراوانی دارد. این نرم افزار از روش حجم سیال<sup>۱</sup> برای حل معادلات حاکم بر جریان در شبکه‌بندی منظم قائم<sup>۲</sup> استفاده می‌کند. شکل معادلات گسسته در این روش نظیر معادلات گسسته در روش تفاضل محدود بوده، و بر این اساس نرم افزار Flow-3D از روش‌های دقت مرتبه اول و دوم در حل معادلات بهره برد. این نرم افزار قابلیت به‌کارگیری ۵ شبیه‌آشنفنگی نظیر روش طول اختلاط پرناتل، شبیه تک معادله‌ای، دو معادله‌ای k-ε، دو معادله‌ای RNGk-ε، و روش گردابه‌های بزرگ (LES) را برای شبیه‌سازی جریان دارا می‌باشد.

**معادلات حاکم:** دینامیک سیالات محاسباتی روشی برای شبیه سازی جریان است که در آن معادلات معیار جریان، از قبیل معادلات ناویر استوکس و معادله پیوستگی قابل حل برای تمام فضای محاسبات می‌باشد. شکل کلی معادله پیوستگی به صورت شکل زیر بیان می‌شود:

$$\begin{aligned} V_F \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (\rho u A_x) + R \frac{\partial}{\partial y} (\rho v A_y) \\ + \frac{\partial}{\partial z} (\rho w A_z) + \xi \frac{\rho u A_x}{x} = R_{DIF} + R_{SOR} \end{aligned} \quad (1)$$

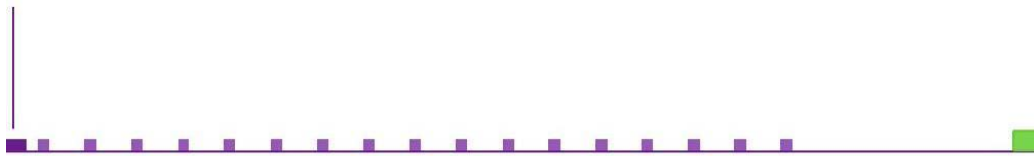
که در آن  $V_F$  ضریب حجم آزاد به سمت جریان و مقدار R در معادله‌ی فوق ضریب مربوط به مختصات به صورت کارترین و یا استوانه‌ای می‌باشد. اولین عبارت در سمت راست معادله (۱) مربوط به انتشار تلاطم بوده و به صورت زیر قابل تعریف است:

$$\begin{aligned} RDIF = \frac{\partial}{\partial x} \left( \nu \rho A_x \frac{\partial \rho}{\partial x} \right) + R \frac{\partial}{\partial y} \left( \nu \rho A_y \frac{\partial \rho}{\partial y} \right) \\ + \frac{\partial}{\partial z} \left( \nu \rho A_z \frac{\partial \rho}{\partial z} \right) + \xi \frac{\rho \nu \rho A_x}{x} \end{aligned} \quad (2)$$

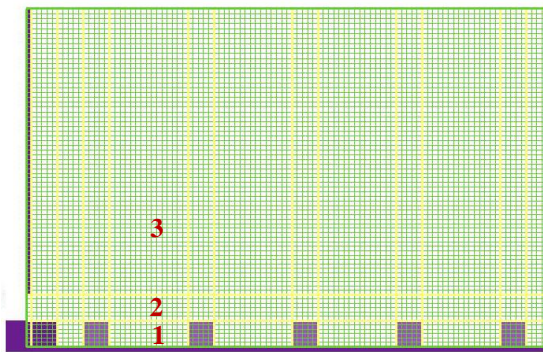
عبارت دوم در سمت راست معادله پیوستگی بیانگر منشا چگالی است که برای شبیه‌سازی تزریق توده‌ی مواد اهمیت دارد:

<sup>1</sup>- volume of fluid

<sup>2</sup>- orthogonal



شکل ۲- مدل شبیه‌سازی شده پله‌ی معکوس و زبریها.



شکل ۳- شبکه‌ی ایجاد شده در راستای عمق جریان.

### شبیه تلاطمی

از آن‌جا که شبیه تلاطمی  $k-\varepsilon$  RNG نسبت به شبیه  $k-\varepsilon$  معیار، کاربرد وسیع‌تری داشته، و بطور کلی برای جریان‌هایی که ناحیه‌ی برشی بزرگی دارند از دقت بیشتری برخوردار است (فلوساینس، ۲۰۰۹). در این تحقیق، همه‌ی مقایسه‌های انجام شده بین نتایج عددی و آزمایشگاهی براساس شبیه تلاطمی  $k-\varepsilon$  RNG صورت گرفت. شبیه‌های تلاطمی  $k-\varepsilon$  و  $k-\varepsilon$  RNG از نوع دو معادله‌ای بوده و معادلات حاکم در آنها به صورت زیر می‌باشند:

$$\frac{\partial k_T}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left\{ uA_x \frac{\partial k_T}{\partial x} + vA_y \frac{\partial k_T}{\partial y} + wA_z \frac{\partial k_T}{\partial z} \right\} \quad (5)$$

$$= P_T + G_T + Diff_T - \varepsilon_T$$

معادله‌ی (۵) مربوط به تولید کارمایه‌ی جنبشی تلاطمی بوده، که در آن عبارتهای  $P_T$ ،  $G_T$  و  $Diff_T$  به ترتیب مربوط به تولید کارمایه جنبشی، نیروی شناوری و انتشار تلاطم است. در معادله‌ی (۵) مقدار  $\varepsilon_T$  نرخ اتلاف کارمایه‌ی جنبشی در شبیه طول اختلاط پراتنل بوده، و از رابطه‌ی زیر قابل محاسبه است:

در شبیه عددی، به منظور پایدار کردن پرش آبی و جلوگیری از پرش‌های مستغرق، یک سرریز لبه پهن در انتهای بستر نصب گردید؛ ارتفاع این سرریز برای شرایط مختلف ورودی جریان با روش سعی و خطا تعیین شد. یکی از مهمترین نکاتی که باید در شبیه‌سازی‌های عددی مورد توجه و رعایت قرار گیرد، شبکه بندی مناسب برای حل دقیق معادلات حاکم است؛ بدین منظور، ابعاد شبکه ایجاد شده در راستای عمق جریان در سه قسمت تعریف گردید:

- ۱- فضایی که برآمدگی‌های بستر را در بر می‌گیرد؛
- ۲- فضایی که فشانه<sup>۱</sup> ورودی را در بر می‌گیرد؛ و ۳- بخشی که پرش آبی و جریان گردابی ناشی از آن در این فضا قرار می‌گیرند شکل (۳). در کلیه‌ی آزمایش‌های عددی صورت گرفته شبکه طوری تعیین شد که فراسنجهای کنترل شبکه از قبیل بیشینه‌ی نسبت ابعاد شبکه<sup>۲</sup> در راستای طولی و عمقی، و ضریب نسبت ابعاد شبکه<sup>۳</sup> در راستاهای مختلف و در مجاورت یکدیگر مناسب انتخاب شده باشند. برای نتایج دقیق و موثر مقدار هریک از دو فراسنج فوق باید به عدد ۱ نزدیک بوده و مقدار نسبت ابعاد شبکه در مجاور یکدیگر از ۱/۲۵، و هم‌چنین نسبت ابعاد شبکه در راستاهای مختلف از ۳ نباید بیش‌تر باشد (فلوساینس، ۲۰۰۹). نکته‌ی دیگری که در شبیه‌سازی‌های عددی بسیار مهم است زمان اجرای شبیه تا رسیدن به یک مقدار مناسب از لحاظ همگرایی خطای ناشی از حل عددی و پایداری و ماندگاری جریان است، که برای این منظور در کلیه آزمایش‌های شبیه‌سازی شده زمان اجرا بین ۱۰۰ تا ۱۵۰ ثانیه در نظر گرفته شد.

<sup>۱</sup> - Jet

<sup>۲</sup> - Maximum Aspect Ratio

<sup>۳</sup> - Maximum Adjacent Cell Size Ratio

جنس پلکسی گلاس استفاده شد. ، به منظور تثبیت موقعیت پرش و ایجاد پرش آزاد، دریچه‌ای کشویی در فاصله‌ی نیم‌متری از انتهای نهرپایه‌دار استفاده گردید. در این تحقیق، عمق پایاب همواره چنان تنظیم شد که پرش نوع B در محل پله‌ی معکوس ایجاد گردد. به منظور جلوگیری از انقباض جریان خروجی، و برای این‌که عمق اولیه‌ی پرش برابر با میزان بازشدگی دریچه باشد، شکل بالادست دریچه، به صورت نیم‌دایره‌ای استفاده شد. روند انجام آزمایش بدین صورت بود که پس از نصب زبریها (با آرایش کنگره‌های ۷-۶-۷)، تلمبه را روشن کرده و اجازه داده می‌شد تا جریان آب به آهستگی وارد نهرپایه‌دار گردد. سپس به تدریج بدهی ورودی را اضافه کرده تا بدهی به مقدار مورد نظر برسد. با تنظیم بدهی، دریچه‌ی پایین دست نیز طوری تنظیم می‌گردید تا عمق پایاب به عمق مورد نظر رسیده، و پرش آبی دقیقاً در محل پله‌ی معکوس تشکیل شود. این شرایط در مدت زمان کافی برای برداشت داده‌ها ثابت نگه داشته می‌شد. محدوده‌ی متغیرهای مورد آزمایش در جدول (۱) عرضه گردیده‌اند.

$$\frac{\partial \varepsilon_T}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left\{ uA_x \frac{\partial \varepsilon_T}{\partial x} + vA_y \frac{\partial \varepsilon_T}{\partial y} + wA_z \frac{\partial \varepsilon_T}{\partial z} \right\} = \frac{CDIS1}{k_T} (PT + CDIS3.G) + Diff_1 - CDIS2 \frac{\varepsilon_T^2}{k_T} \quad (۶)$$

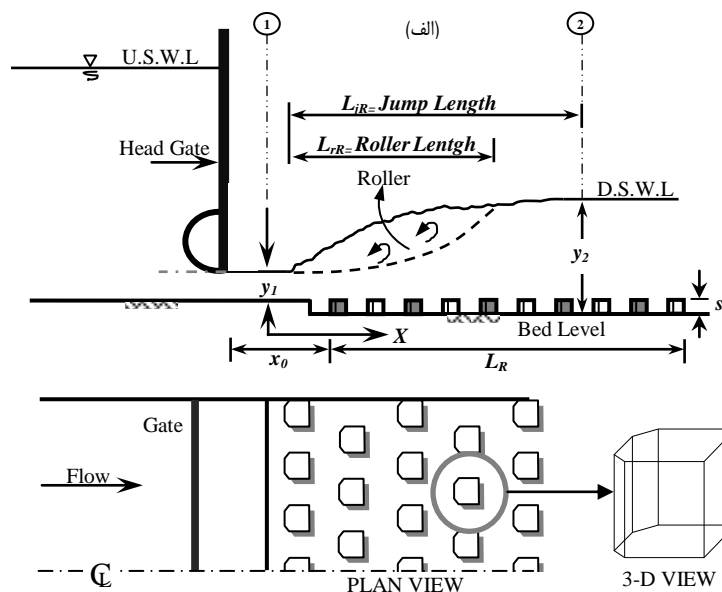
رابطه‌ی (۶) مربوط به نرخ اتلاف تلاطم است که در روش  $k-\varepsilon$  معیار ضرایب  $CDIS1$ ،  $CDIS2$  و  $CDIS3$  به ترتیب برابر با  $۱/۴۴$ ،  $۱/۹۲$  و  $۰/۲$  می‌باشند. در روش RNG  $k-\varepsilon$  ضرایب  $CDIS1$  و  $CDIS3$  به ترتیب برابر با  $۱/۴۲$  و  $۰/۲$  بوده، و مقدار  $CDIS2$  نیز از طریق جمله‌های  $P_T$  و  $K_T$  قابل محاسبه می‌باشد:

$$\varepsilon_T = CNU \sqrt{\frac{3}{2}} \frac{k_T^{3/2}}{TLEN} \quad (۷)$$

در رابطه‌ی (۷)، مقدار  $CNU$  در روش  $k-\varepsilon$  برابر با  $۰/۹$  و در روش RNG  $k-\varepsilon$  برابر با  $۰/۸۵$  می‌باشد.

### نمونه‌ی فیزیکی

شکل (۴) طرح‌واره‌ی نمونه‌ی شبیه مورد نظر را نشان می‌دهد. در این نمونه، به منظور ایجاد جریان فوق بحرانی و عمق اولیه‌ی پرش، از دریچه‌ای کشویی از



شکل ۴- (الف) طرح‌واره‌ی مقطع عرضی شبیه (ب) نقشه‌ی مسطحه‌ی شبیه

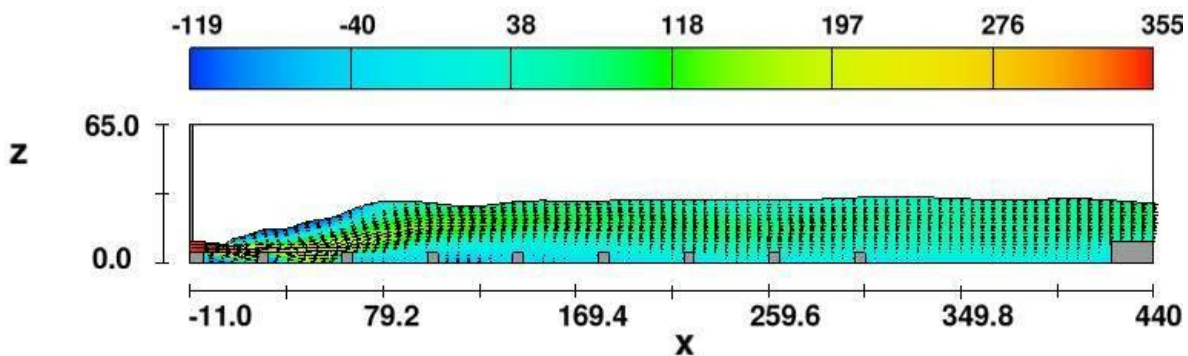
جدول ۱- مشخصات نهر آزمایشگاهی (نهر پایه‌دار) و محدوده‌ی متغیرهای مورد آزمایش.

متغیرهای مورد اندازه‌گیری			مشخصات زبری			محدوده‌ی متغیرهای جریان			مشخصات کلی نهر پایه‌دار		
عمق	سرعت	طول	ارتفاع (cm)	عرض (cm)	طول (cm)	Re	Fr <sub>1</sub>	Q(m <sup>3</sup> /s)	عرض (cm)	ارتفاع (cm)	طول (m)
مزدوج	عمقی	پرش	۴/۵	۵	۵	۶۴۷۱۳ تا ۲۵۲۷۴۷	۳/۰۱ تا ۹/۱۴	۰/۲۳ تا ۰/۰۵۶	۸۰	۷۰	۱۵

### نتایج و بحث

پس از اجرای تمامی شبیه‌های شبیه‌سازی شده، فراسنج‌های آبی مختلف مربوط به پرش B ایجاد شده بر پله‌ی معکوس با بستر زبر استخراج شد و با نتایج حاصل از آزمایش‌های تجربی صورت گرفته مورد مقایسه و بررسی قرار گرفت. شکل (۵) نمونه‌ای از شبیه‌سازی شده پرش آبی بر روی پله‌ی معکوس با بستر زبر، و مؤلفه‌های سرعت مربوطه، و شکل (۶) همان پرش را در شبیه‌فیزیکی نشان می‌دهد.

در حین انجام آزمایشها در اعداد فرود کمتر از ۳، پرش تشکیل شده در نمونه‌ی فیزیکی از نوع موجی مشاهده شد، که گونه‌ای از آن در شکل (۷) نشان داده شده است. در نمونه‌ی شبیه‌سازی شده نیز همین پرش در محدوده‌ی عدد فرود کمتر از ۳ تشکیل گردید، که در شکل (۸) نشان داده شده است. از آن‌جا که هدف از این تحقیق بررسی پرش نوع B بر پله‌ی معکوس با بستر زبر بود، نتایج حاصل از پرش موجی در این مقاله آورده نشده‌اند.



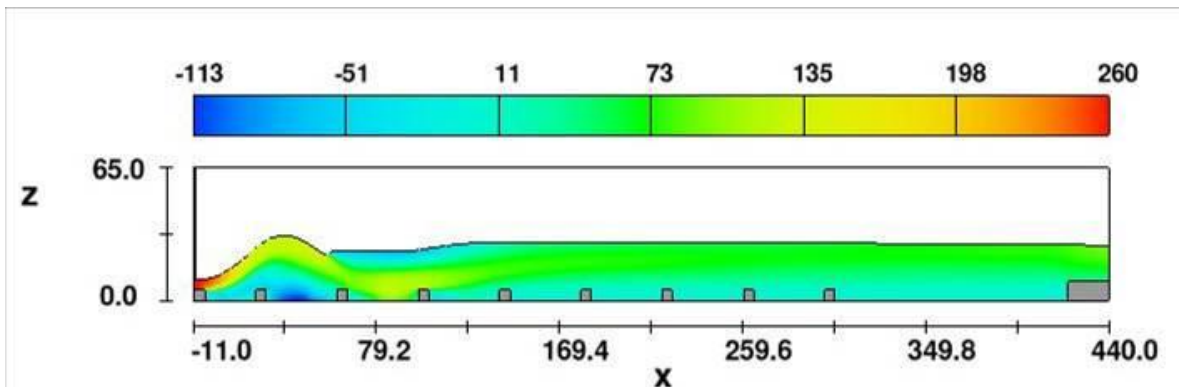
شکل ۵- نمایش نیمرخ سرعت ( cm/s ) و پرش آبی تشکیل شده بر پله‌ی معکوس با بستر زبر در شبیه عددی.



شکل ۶- پرش آبی تشکیل شده در نمونه‌ی فیزیکی.



شکل ۷- نمونه‌ای از پرش موجی تشکیل شده در نمونه‌ی فیزیکی.



شکل ۸- نمونه‌ای از نیمرخ سرعت (cm/s)، و پرش موجی تشکیل شده در شبیه عددی.

این رابطه در شبیه سازی عددی به صورت زیر حاصل گردید:

$$y_2 / y_1 = 1.2097Fr_1 + 0.6218 \quad (9)$$

با توجه به شکل (۹) می‌توان دریافت که عمق نسبی پرش آبی نسبت به پرش کلاسیک کاهش یافته است. کاهش عمق مزدوج پرش چندان چشمگیر نیست. این موضوع در هر دو نمونه‌ی فیزیکی و شبیه‌سازی عددی مشاهده می‌گردد. دلیل این پدیده آن است که فاصله‌ی بین اجزای زبری می‌تواند بر تشکیل حرکت گردابه‌ای اثر گذار باشد؛ یعنی، چنانچه فاصله‌ی بین اجزای زبری زیاد باشد، گردابه‌های عمودی و افقی به صورت مستقل تشکیل شده، و باعث افزایش عمق، از عمق اولیه به ثانویه در طول بسیار کوتاهی خواهند شد. درصد

### نسبت اعماق مزدوج

مقادیر آزمایشگاهی عمق  $y_2$  به ازاء بستر زبر برای اعداد فرود مختلف و مقایسه‌ی آن با نسبت اعماق متناظر در پرش آبی کلاسیک و مدل شبیه سازی شده در شکل (۹) نشان داده شده‌اند. همان‌گونه که از این شکل مشخص است، در اعداد فرود پایین، نسبت اعماق مزدوج چه در نمونه‌ی فیزیکی و چه در شبیه شبیه‌سازی شده، تغییر محسوسی از خود نشان نداده است. این مقدار در اعداد فرود بالا کاهش می‌یابد. با توجه به شکل (۹)، و بر اساس داده‌های آزمایشگاهی، ارتباط نسبت  $y_2 / y_1$  با عدد فرود به صورت رابطه‌ی زیر به‌دست آمد:

$$y_2 / y_1 = 1.1197Fr_1 + 0.7945 \quad (8)$$



حاصل از آزمایشهای تجربی مورد مقایسه قرار گرفت (شکل ۱۲). مقدار به‌دست آمده از شبیه‌سازی شده از رابطه‌ی زیر پیروی می‌کند:

$$\varepsilon = 0.682Fr_1^2 - 4.0531Fr_1 + 4.423 \quad (12)$$

مقدار تنش برشی محاسبه شده برای پرش آبی کلاسیک به‌وسیله‌ی راجاراتنام (۱۹۶۵) به صورت رابطه‌ی زیر به‌دست آمده است:

$$\varepsilon = 0.16Fr_1^2 - 0.8Fr_1 + 1 \quad (13)$$

با توجه به شکل (۱۲) مشخص می‌شود که ضریب تنش برشی برآورد شده به نتایج به‌دست آمده آزمایشگاهی بسیار نزدیک می‌باشد. همان‌طور که از این شکل پیداست، تا قبل از عدد فرود ۵، مقادیر  $\varepsilon$  کمتر از پرش کلاسیک به‌دست آمده، و در مقادیر عدد فرود اولیه‌ی بیشتر از ۵، این مقدار افزایش یافته است. دلیل این موضوع آن است که تا قبل از عدد فرود اولیه‌ی ۵، مقادیر عمق ثانویه در پله‌ی معکوس با بستر زیر بیشتر از عمق ثانویه‌ی پرش کلاسیک به‌دست آمد که در شکل (۹) نیز مشخص است. با نزدیک شدن عمق ثانویه پرش تشکیل شده بر پله معکوس با بستر زیر، به عمق ثانویه پرش آبی کلاسیک، مقدار تنشهای برشی بستر نیز به یکدیگر نزدیک شده، و از آن به بعد، به دلیل وجود زیرپها در کف، و افزایش تنش رینولدزی بستر، مقدار تنش در بستر زیر به مراتب بیش‌تر از پرش کلاسیک، و در حدود ۵ برابر آن گردید.

کاهش نسبت اعماق متناظر در نمونه‌ی فیزیکی ۳/۱٪ و در شبیه‌سازی ریاضی ۴/۵٪ به‌دست آمد.

### مشخصات سرعت

شکل (۱۰) نمونه‌ای از نیمرخ‌های عمقی جریان را در طول پرش آبی برای عدد فرود اولیه‌ی  $Fr_1 = 4.11$ ، و عمق اولیه‌ی  $y_1 = 3.5\text{cm}$  در نمونه‌ی فیزیکی نشان می‌دهد. این نیمرخ‌ها به روشنی تغییرات سرعت فشانه را در طول پرش، افزایش ضخامت لایه مرزی، و کاهش سرعت بیشینه نشان می‌دهند. سرعت ماکزیمم بر روی بستر زیر نسبت به افشانک<sup>۱</sup> دیواری کلاسیک در نقطه‌ی بالاتری اتفاق می‌افتد، و ضخامت، که ضخامت لایه‌ی مرزی است، در پرش بر روی بستر زیر بیش‌تر خواهد بود. شکل (۱۱) نیز نیمرخ بیشینه سرعت را به ازاء پرشهای با اعداد فرود مختلف در مدل شبیه‌سازی شده نشان می‌دهد. با مقایسه‌ی شکل‌های (۱۰) و (۱۱) مشاهده می‌شود که تطابق خوبی بین داده‌های آزمایشگاهی و شبیه‌سازی عددی برقرار است. همان‌طور که در شکل (۱۱) مشاهده می‌شود، بطور کلی، نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی شبیه تلاطمی RNG k- $\varepsilon$  در تعیین نیمرخهای سرعت در طول پرش آبی در مقایسه با نتایج حاصل از مطالعات آزمایشگاهی بسیار نزدیک می‌باشند.

### تنش برشی بستر

اگر  $F\tau$  مقدار نیروی برشی بر روی سطح زیر باشد، می‌توان با انتگرال‌گیری از معادله‌ی اندازه‌ی حرکت آن را از طریق رابطه‌ی زیر به‌دست آورد:

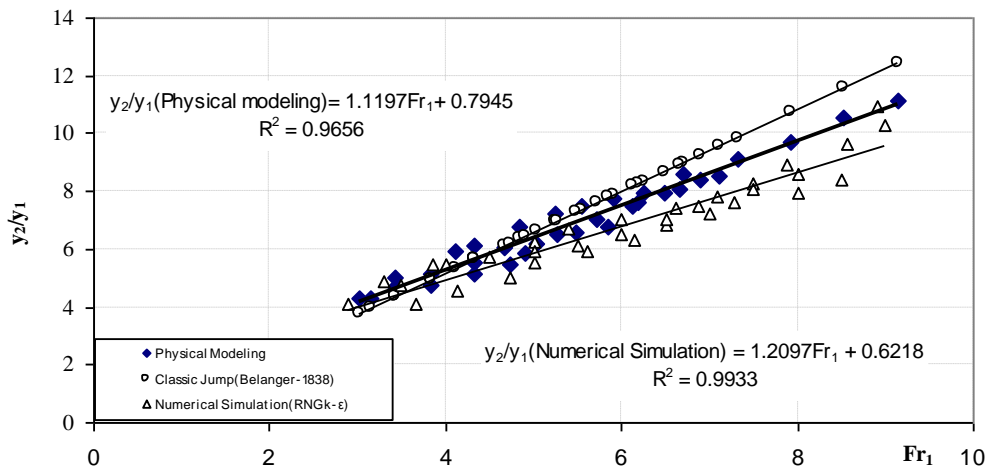
$$F\tau = (P_1 - P_2) + (M_1 - M_2) \quad (10)$$

که در آن  $P_1, P_2, M_1, M_2$  به ترتیب نیروی فشاری و اندازه‌ی حرکت بلافاصله در بالادست و پایین دست پرش آبی می‌باشند. با در نظر گرفتن  $F\tau = \varepsilon(P_1 - P_2)$ ، و داده‌های آزمایشگاهی، مقدار  $\varepsilon$  به صورت رابطه‌ی زیر به‌دست آمد:

$$\varepsilon = 0.9853Fr_1^2 - 4.5662Fr_1 + 0.5005 \quad (11)$$

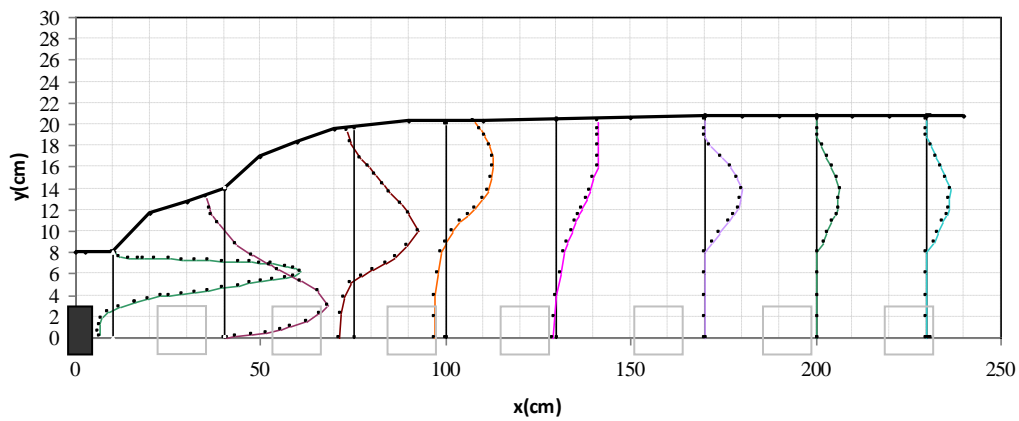
برای مقایسه‌ی مقدار نیروی برشی در مدل شبیه‌سازی شده و نمونه‌ی آزمایشگاهی، تغییرات ضریب نیروی برشی،  $\varepsilon$ ، در مقابل عدد فرود ترسیم و با منحنی

<sup>1</sup> - nozzle

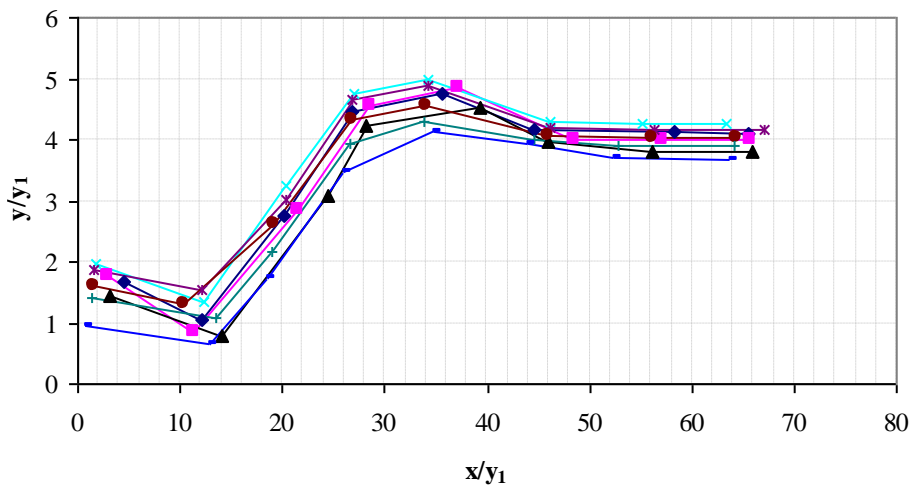


شکل ۹- تغییرات عمق نسبی پرش آبی در بستر زیر، صاف و پرش کلاسیک به ازاء عدد فرود اولیه.

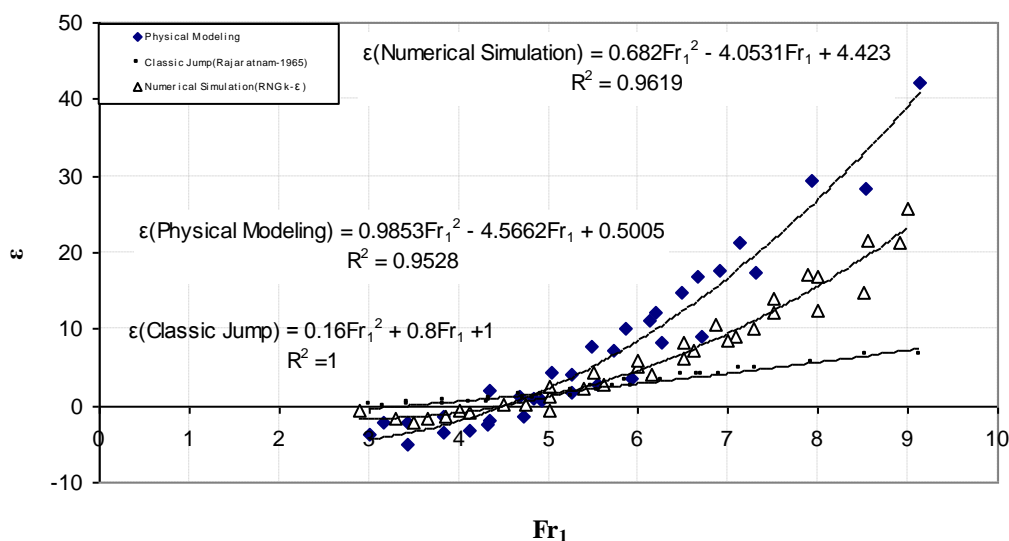
$y_1=3.5\text{cm}$  ,  $Fr_1=4.11$



شکل ۱۰- نیمرخ‌های عمقی سرعت برداشت شده در نمونه‌ی فیزیکی.



شکل ۱۱- عمق نسبی وقوع بیشینه‌ی سرعت در شبیه عددی.



شکل ۱۲- منحنی تغییرات ضریب نیروی برشی، ε، در مقابل عدد فرود بالادست Fr<sub>1</sub>

پرش آبی بر پله‌ی معکوس با بستر زبر خوب عمل می‌کند.

### تشکر و قدردانی

بخشی از هزینه‌های این تحقیق از محل پژوهانه‌ی نویسنده‌ی دوم تامین شده است که بدین‌وسیله تشکر و قدردانی به‌عمل می‌آید.

### منابع

- اسماعیلی، ک.، و ج. ابریشمی. ۱۳۷۹. پرش آبی روی نهرهای با شیب معکوس و پله منفی. نشریه استقلال. ۹۷-۱۱۰: ۲.
- ایزدجو، ف.، م. شفاعی بجستان، و م. بینا. ۱۳۸۳. مشخصات پرش آبی بر روی بسترهای موجدار دوزنقه‌ای شکل. مجله علمی کشاورزی ۲۷: ۱۲۲-۱۰۷.
- آئین مهر، م.، و ع.ا. صالحی نیشابوری. ۱۳۹۰. مطالعه آزمایشگاهی پرش آبی بر روی پله با استفاده از PIV. نشریه مهندسی عمران و نقشه برداری - دانشکده فنی، دوره ۴۵، شماره ۱: ۸۷-۹۷.
- بدیع زادگان، ر.، ک. اسماعیلی، م. فغفور مغربی، و م. صانعی. ۱۳۹۰. مشخصات پرش آبی در حوضچه‌های آرامش نهرهای آبیاری با بستر موج دار. نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی) ۲۵: ۶۸۷-۶۷۶.
- سعید پناه، ا.، م. کاویانپور، و م.ج. حامدی. ۱۳۸۰. شبیه ریاضی پرش آبی. سومین کنفرانس هیدرولیک ایران.

### نتیجه‌گیری

در این تحقیق تاثیر زبریهای مصنوعی منقطع بر ویژگی‌های پرش آبی بر پله‌های معکوس با کاربرد نمونه‌ی فیزیکی و عددی مورد بررسی قرار گرفت، که خلاصه‌ی نتایج آن به شرح زیر می‌باشد:

در اعداد فرود کمتر از ۳، پرش موجی W<sub>j</sub> تشکیل شد. این موضوع هم در نمونه‌ی فیزیکی و هم در شبیه‌سازی شده ملاحظه گردید. اعماق اندازه‌گیری شده در هر دو نمونه‌ی فیزیکی و شبیه‌سازی شده نشان داد که مقدار کاهش آن نسبت به پرش کلاسیک ناچیز است، با این تفاوت که عمق اولیه‌ی پرش در طول بسیار کوتاهتری نسبت به پرش کلاسیک به عمق ۱/۲ خواهد رسید. بررسی نیمرخ سرعت در شبیه عددی نشان داد که، عمق نسبی وقوع بیشترین سرعت تقریباً از روند یکسانی تبعیت می‌کند که در شکل (۱۱) آمده است.

با مقایسه‌ی داده‌های آزمایشگاهی و شبیه عددی، و همچنین، با توجه به شکل‌های رسم شده، مشخص می‌گردد که شبیه تلاطمی RNG k-ε توانایی خوبی در برآورد میزان سرعت‌ها، اعماق مزدوج و تنش برشی بستر دارد. بطور کلی، نرم افزار Flow-3D با به‌کارگیری روش عددی حجم محدود در حل معادلات حاکم، و شبیه تلاطمی RNG k-ε (که برای شبیه‌سازی جریان‌هایی با نیروی برشی زیاد توانایی‌های بالایی دارد) در شبیه‌سازی

18. Gunal, M. and R. Narayanan. 1998. K-ε turbulence modeling of submerged hydraulic jump using boundary-fitted coordinates, Proc. Inst. Civil Eng. Water, Maritime and Energy. 130:104-114.
19. Hager, W.H., and N. Kawagoshi. 1990. Hydraulic jump at rounded drop. J. Hydraul. Div. ASCE 89:443-470.
20. Hager, W.H., and R. Bremen. 1989. Classical hydraulic jump: sequent depths ratio. J. Hydraul. Res. IAHR 27: 566-570.
21. Hager, W.H., and N.V. Bretz. 1987. Hydraulic jumps at positive and negative steps. J. Hydraul. Res. 24(4).
22. Hughes, W.C., and J.E. Flack. 1984. Hydraulic jump properties over a rough bed. J. Hydraul. Eng. Div. ASCE 110: 1755-1771.
23. Moore, W.L., and C.W. Morgan. 1852. Hydraulic jump at an abrupt drop. J. Hydraul. Div. ASCE
24. Nasr Esfahani, M.J., and M. Shafai Bajestan. 2012. Dynamic force measurement of roughened bed B-jump at an abrupt drop. Arch. Des Sci. J. 65: n. 8.
25. Nasr Esfahani, M.J., and M. Shafai Bajestan. 2012. Design of stilling basins using artificial roughness. J. Civil Eng. and Urban. (JCEU) 2: 131-135.
26. Nasr Esfahani, M.J., and M. Shafai Bajesta. 2012. Effect of roughness height on the length of B jump at an abrupt drop. Int. Res. J. App. Bas. Sci. 3: 2757-2762.
27. Pagliara, S., I. Lotti, and M. Palermo. 2008. Hydraulic jump on rough bed of stream rehabilitation structure. J. Hydro-Environ. Res. 2: 29-38.
28. Rajaratnam, N. 1965. The Hydraulic jump as a wall jet. J. Hydraul Div. ASCE 91: 107-132.
29. Rajaratnam, N. 1968. Hydraulic jump on rough bed. Trans. Eng. Inst. Canada, 11(A-2): 1-8.
30. Rouse, H., B.V. Bhoota, and H. En-Yun. 1951. Design of channel expansions. Trans. Eng. Inst. Canada 116 : 360.
31. Sabbagh-Yazdi, S.R., F. Rostami, and E. Nikos Mastorakis. 2007. Turbulent modeling effects on finite volume solution of three dimensional aerated
۶. شفاعی بجزستان، م، و ک. نیسی. ۱۳۸۷. تاثیر شکل زبری بر طول پرش آبی در نهرهای مستطیلی. مجله هیدرولیک، دوره ۳، شماره ۳: ۲۹-۴۰.
۷. عباسپور، ا، ع. حسین زاده دلیر، د. فرسادی زاده، و ع. صدرالدینی. ۱۳۸۸. تاثیر بستر موج دار سینوسی بر خصوصیات پرش آبی. مجله دانش آب و خاک ۱۹:۲۶-۱۳.
۸. نژندعلی، ع، ک. اسماعیلی، ج. فرهودی، و ز. راور. ۱۳۹۰. تاثیر زبری های یکپارچه مثلثی بر مشخصات پرش آبی. نشریه آبیاری و زهکشی ایران، جلد ۵: ۲۴۱-۲۳۴.
۹. نصاصفهانانی، م، و م. شفاعی بجزستان. ۱۳۹۱. خصوصیات پرش آبی بر پله معکوس تحت زبری‌های مصنوعی. نشریه آب و خاک، جلد ۲۶، شماره ۴.
10. Abbaspour, A., A. Hosseinzadeh Dalir, D. Farsadizadeh, and A. Sadraddini. 2009. Effect of sinusoidal corrugated bed on hydraulic jump characteristics. J. Hydro-Environ. Res. 3:109-117.
11. Carolo, F.G., V. Ferro, and V. Pam Palone. 2007. Hydraulic jumps on rough beds. J. of Hydraul. Eng. ASCE 133: 989-999. DOI: 10.1061/ (ASCE) 0733-9429 (2007). 133: 9(989).
12. Ead, S.A., and N. Rajaratnam. 2002. Hydraulic jumps on corrugated beds. J. Hydraul. Eng. Div. ASCE 128: 656-663. DOI: 10.1061/ (ASCE) 0733-9429 (2002) 128:7 (656).
13. Forster, J.W., and R.A. Skrinde. 1950. Control of the hydraulic jump by sills. Trans. ASCE 115:988-991.
14. Flow Science Inc. 2009. Flow3D user's manual. Santa Fee, N.M.
15. Gill, M.A. 1980. Effect of boundary roughness on hydraulic jump. Water Power & Dam Construc. 32:22-24.
16. Gohari, A., and J. Farhoudi. 2009. The characteristics of hydraulic jump on rough bed stilling basins. 33rd IAHR Congr. Water Eng. a Sustainable Environ. Vancouver, British Columbia: 1-9.
17. González, A.E., and F.A. Bombardelli. 2005. Two-phase-flow theoretical and numerical models for hydraulic jumps, including air entrainment. In: Proc. XXXI IAHR Congr. Seoul, Korea.

34. Tokyay, N.D. 2005. Effect of channel bed corrugations on hydraulic jumps. Impacts of global climate change conference, EWRI, 15-19 May, Anchorage, Alaska, USA.
35. Zhao, Q., and S.K. Misra. 2004. Numerical Study of a Turbulent Hydraulic Jump. Proc. 17<sup>th</sup> Eng. Mech. Conf. University of Delaware, New York.
- hydraulic jumps using volume of fluid. Proc. 12th WSEAS Int. Conf. App. Mathematics.
32. Sarker, M.A., and D.G. Rhodes. 2002. Physical modeling and CFD applied to hydraulic jump. Cranfield University Report.
33. Sharp, J. 1974. Observation on hydraulic jumps at rounded step. J. Hydraul. Div. ASCE 100(HY6): 787-795.