

کاربرد شبیه‌آشتگی $K-\varepsilon$ مرسوم و روش جزء حجم سیال (VOF) در پیش‌بینی نيمرخهای سطح آب در پرش آبی بر روی بسترهای موجدار سه گوشه‌ای

اسمعیل حیدری فهونده^۱، نادر برهمند^{۲*}

چکیده

یکی از مهمترین پدیده‌های در جریانهای نه‌رهای باز پرش آبی می‌باشد که به طرز گسترده‌ای مورد تحقیق قرار گرفته است. زمانی که حالت جریان از حالت فوق بحرانی به زیر بحرانی تغییر می‌کند، در فاصله‌ی کوتاهی از جریان، رقوم سطح آب افزایش می‌یابد، که این افزایش همراه با تشکیل غلظابهای آشتگی می‌باشد. این پدیده، اصطلاحاً پرش آبی نامیده می‌شود. بررسی محققین نشان می‌دهد که بسترهای موجدار و زبر در کاهش عمق ثانویه و طول پرش آبی موثر می‌باشند. در این تحقیق با استفاده از شبیه‌های آشتگی مختلف ($K-\varepsilon$ معیار و RNG) و $K-\omega$ (از نوع SST) و با به کارگیری نرم افزار پویایی محاسباتی فلونت، پرش آبی بر روی بستر موجدار مثلثی شکل به صورت دو بعدی شبیه سازی شد. ضمناً، سطح آزاد جریان با روش جزء حجم سیال VOF تعیین گردید. در شبیه سازی عددی، پرش ایجاد شده در یک نهر مستطیلی با بستر موجدار مثلثی و بلافاصله بعد از دریچه و در محدوده‌ی اعداد فرود ۳ تا ۷/۵ می‌باشد. نتایج عددی نشان دادند که شبیه‌آشتگی $K-\varepsilon$ مرسوم، و روش جزء حجم سیال VOF ، برای پیش‌بینی نيمرخهای سطح آب در پرش آبی بر بستر موجدار مثلثی شکل مناسب بوده، و خطای مقادیر سطح آب به دست آمده از شبیه‌های عددی و اندازه‌گیری شده مابین ۳ تا ۷ درصد است. نتایج همچنین نشان دادند که عمق پایاب روی بستر موجدار مثلثی شکل نسبت به بستر صاف (در شرایط یکسان) بطور متوسط ۳۴/۸ درصد کوچکتر است. در این تحقیق مشاهده گردید که کارمایه‌ی جنبشی اغتشاشی (K) با فاصله گرفتن از پنجه‌ی پرش و به سمت پایین دست کاهش می‌یافت. ضمناً بیشترین تنش برشی بستر در ابتدای پرش دیده شد.

واژه‌های کلیدی: بستر موجدار، پرش آبی، روش VOF ، شبیه‌های آشتگی، فلونت، عمق پایاب

^۱ - دانشجوی کارشناسی ارشد سازه‌های هیدرولیکی، گروه مهندسی عمران، واحد لارستان، دانشگاه آزاد اسلامی، لارستان، ایران

^۲ - استادیار، گروه مهندسی عمران، واحد لارستان، دانشگاه آزاد اسلامی، لارستان، ایران.

*- نویسنده مسوول مقاله: nader_barahmand@yahoo.com

مقدمه

پرش آبی از پدیده‌های مهم در علم هیدرولیک بوده و در زمره‌ی جریانهای متغیر سریع طبقه‌بندی می‌شود. در این پدیده، جریان از حالت فوق بحرانی به زیر بحرانی تبدیل می‌شود (ابریشمی وحسینی ۱۳۸۵). بر اثر پدیده‌ی پرش آبی عمق جریان در مسیر نسبتاً کوتاهی به اندازه‌ی زیادی افزایش یافته، و در نتیجه ضمن ایجاد افت کارمایه، از سرعت جریان کاسته می‌شود. پرش آبی بر روی بسترهای صاف به صورت گسترده‌ای مورد بررسی قرار گرفته است که ساده‌ترین نوع آن، که در نهرهای با مقطع مستطیلی و کف افقی تشکیل می‌شود، پرش آبی معمولی یا نوع A می‌باشد که به‌طور گسترده‌ای به وسیله‌ی راجاراتنام (۱۹۶۸) مورد بررسی قرار گرفته است. بر اساس رابطه‌ی ارائه شده به وسیله‌ی بلانگر (۱۸۲۸) عمق ثانویه پرش آبی معمولی y_2^* با y_1 عمق اولیه (عمق فوق بحرانی در پنجه‌ی پرش) y_1 و سرعت اولیه‌ی V_1 به صورت زیر به دست می‌آید:

$$\frac{y_2^*}{y_1} = \frac{1}{2}(\sqrt{1+8Fr_1^2} - 1) \quad (1)$$

که در آن $Fr_1 = \frac{V_1}{\sqrt{gy_1}}$ عدد فرود در مقطع بالادست پرش، و g شتاب گرانش می‌باشد.

در مورد پرشهای ایجاد‌ی در جریانهای چگال بر روی بسترهای صاف نیز مطالعاتی از قبیل برهمند و موسوی (۱۳۹۲) انجام شده است.

گرچه مطالعات مختلفی در زمینه‌ی تشکیل پرش روی بسترهای زبر انجام گرفته است، اما با توجه به گستردگی شرایط، و پیچیدگی رفتار جریان در حالات مختلف، لزوم تحقیقاتی بیشتر در این زمینه ضروری به نظر می‌رسد.

شبیه عددی پرش آبی بر روی بستر صاف به وسیله‌ی زائو و میسرا (۲۰۰۴) با استفاده از معادلات پیوستگی و اندازه‌ی حرکت و با شبیه آشفستگی $K-\varepsilon$ به صورت دو بعدی بررسی شده و نتایج آن به صورت نیمرخهای سرعت و سطح آب محاسبه مقادیر جنبشی (K) و اتلاف کارمایه (ε) در مقاطع مختلف پرش ارائه گردیده اند.

راجاراتنام (۱۹۶۸) اولین مطالعات جامع را در خصوص پرشهایی بر روی بستر زبر انجام داد. او نشان داد که طول غلطابی L_r ، و طول پرش L_r بر روی بسترهای زبر، کاهش قابل توجهی نسبت به حالت معمولی دارد.

لوت هوسر و شیلر (۱۹۷۵) در زمینه‌ی جریانهای ورودی روی بستر زبر مطالعاتی را انجام دادند. آنها بیان نمودند که وجود زبری در کف باعث تسریع در رشد لایه‌ی مرزی شده، و برای ایجاد جریان فوق بحرانی توسعه یافته در پایین دست دریچه‌ها و سرریزها نیاز به طول کوتاهتری است.

اید و راجاراتنام (۲۰۰۰) با انجام آزمایشهایی در یک آبگذر با بستر موجدار نشان دادند که تنشهای برشی رینولدز بر روی بسترهای موجدار به وجود آمده و این امر میدانهای سرعت روی بستر را کاهش می‌دهند.

اید و راجاراتنام (۲۰۰۲) پرش آبی را بر روی بستر موجدار سینوسی شکل در بازه‌ی عدد فرود ۱۰-۴ و ارتفاع نسبی موج t/y_1 (ارتفاع موج بستر) برابر با ۰/۲۵، ۰/۴۳ و ۰/۵ بررسی کردند. نتایج بررسیها نشان دادند که درازای پرش تقریباً نصف طول آن روی بستر صاف است. همچنین، تغییرات عمق ثانویه y_2 با محاسبه‌ی کاهش عمق بررسی گردید. آنها ضمناً رابطه‌ی زیر را برای محاسبه‌ی عمق متناظر پرش به دست آوردند:

$$\frac{y_2}{y_1} \cong Fr_1 \quad R^2 = 0.99 \quad (2)$$

آنها همچنین فراسنجی را به نام فراسنج کاهش عمق نسبی پیشنهاد نمودند که به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$D = \frac{y_2^* - y_2}{y_1} \quad (3)$$

که در آن y_2^* عمق ثانویه پرش در بستر صاف بازاا عمق اولیه‌ی y_1 و عدد فرود اولیه‌ی Fr_1 یکسان با بستر موجدار می‌باشد. متوسط فراسنج D در تحقیقات آنان برابر با ۰/۲۵ به دست آمد.

توکای (۲۰۰۵) آثار بستر موجدار سینوسی را بر پرش آبی به صورت تجربی بررسی کرد و رابطه‌ی زیر را به دست آورد:

$$\frac{y_2}{y_1} = 1.1223Fr_1 + 0.0365 \quad (4)$$

آشفته‌گی است. این تحقیق با استفاده از نرم‌افزار فلوئنت، و با به کار بردن روش حجم محدود در حل معادلات ناویر استوکس متوسط رینولدزی، انجام گرفته و سطح آزاد جریان نیز با بهره‌وری از روش عددی جزء حجم سیال (VOF^1) تعیین شده است. لازم به ذکر است که استفاده از روش VOF برای شبیه‌سازی مناسب سطح آزاد جریان در مطالعات متعددی از قبیل عباسپور و هاشمی کیا (۱۳۹۲) اثبات شده است.

مواد و روشها

شبیه‌سازی عددی

از آن جا که هزینه‌ی قابل ملاحظه‌ای در طراحی سدها به طرح سرریز و حوضچه‌ی آرامش آنها اختصاص می‌یابد، طراحی بهینه‌ی حوضچه‌ی آرامش تا کنون بیشتر از طریق شبیه‌سازی آزمایشگاهی به دست می‌آید، که این موضوع هزینه‌ی زیادی را به اعتبارات طرح اضافه کرد. به کارگیری شبیه‌های عددی در راستای کاهش هزینه‌ها و شبیه‌سازی جریان در حالت‌های مختلف می‌تواند نقش بسزایی را ایفا نماید؛ یکی از این شبیه‌ها، نرم‌افزار فلوئنت است. شبیه فلوئنت از قابلیت بالایی برای تحلیل جریان سیال در هندسه‌های پیچیده برخوردار است. نرم‌افزار فلوئنت یکی از قویترین، کاملترین و کاربردیترین نرم‌افزارهای CFD در دنیا می‌باشد. این نرم‌افزار با زبان C نوشته شده و از معادلات ناویر-استوکس در تحلیل جریان استفاده می‌کند. در این تحقیق پرش آبی بر روی بستر موجی (مثلثی) شکل در اعداد فرود مختلف و با استفاده از شبیه‌های آشفته‌گی مختلف جریان دو حالتی آب و هوا و با به کارگیری روش‌های عددی مورد بررسی قرار گرفت.

معادلات حاکم

معادلات پیوستگی و اندازه‌ی حرکت ناویر-استوکس در شبیه‌مورد استفاده برای هر یک از حالت‌های جریان (آب و هوا) در پرش آبی به شکل زیر در نظر گرفته شده است (ورستینگ و مالاسکرا، ۱۹۹۵؛ هرت و نیکولاس، ۱۹۸۱):

مطالعات عباسپور و همکاران (۲۰۰۹) در مورد زبریهای موجی (سینوسی شکل) نشان دادند که عمق پایاب مورد نیاز برای تشکیل پرش آبی حدود ۵ تا ۲۶ درصد کوچکتر از بسترهای صاف است. همچنین، رابطه‌ی بین عدد فرود اولیه و اعماق مزدوج را به صورت زیر به دست آوردند:

$$\frac{y_2}{y_1} = 1.1146 Fr_1 \quad (5)$$

شفاعی بجستان و نیسی (۲۰۰۹) نیز با انجام ۴۸ آزمایش در محدوده‌ی اعداد فرود $4/9$ تا $12/4$ با کاربرد نمونه‌ی فیزیکی حوضچه‌ی آرامش با زبریهای لوزی شکل مشاهده کردند که آنها می‌توانند طول حوضچه را ۴۱ درصد و طول غلطاب را ۳۴ درصد کاهش دهند.

غزالی و همکاران (۱۳۸۹) مشخصات پرش آبی را در مورد نهر نهر پایه داری ۶ نوع بستر موجدار مثلثی در نهر پایه-داری با مقطع مستطیلی بررسی کردند. نتایج حاصل بیانگر این مطلب بودند که زبریهای مثلثی می‌توانند باعث کاهش عمق پایاب مورد نیاز برای ایجاد پرش در مقایسه با پرش معمولی به مقدار حدود $19/9$ تا $30/1$ درصد و بطور متوسط ۲۵ درصد گردند. همچنین، در مقایسه با پرش آبی معمولی روی بستر صاف، نتایج نشان می‌دهند که زبریها می‌توانند طول پرش آبی را تا $54/7$ درصد، و طول غلطاب پرش را بطور میانگین در حدود $57/61$ درصد، کاهش دهند.

بدیع زادگان و همکاران (۱۳۹۰) در مطالعات خود در مورد پرش آبی در حوضچه‌های آرامش مستطیلی با بستر موجدار سینوسی شکل نشان دادند که با به کارگیری چنین بسترها سینوسی در حوضچه‌ی آرامش، می‌توان شاهد کاهش نسبت اعماق ثانویه به اولیه‌ی تقریباً به میزان ۲۰ درصد، و کاهش طول پرش آبی به میزان ۳۵ درصد نسبت به پرش معمولی در این نوع حوضچه‌ها بود.

مطالعات پارسا مهر و همکاران (۱۳۹۱) در مورد بسترهای زبر با زبری نیم استوانه‌ای شکل نشان دادند که عمق ثانویه پرش آبی بطور متوسط $25/35$ درصد نسبت به بستر صاف کاهش یافته؛ و روند کاهش با افزایش ارتفاع و فاصله‌ی بین زبری و افزایش عدد فرود بیشتر می‌شود. گفتنی است که هدف از این تحقیق، شبیه‌سازی عددی پرش آبی بر روی بستر موجدار مثلثی شکل و تاثیر عوامل مختلف بر مشخصات پرش با استفاده از شبیه‌های مختلف

¹ - Volume of fluid

برای حل معادله‌ی (۱۰) در حجم شاهد که پر از سیال می‌باشد، مقدار α_q برابر با یک و در حجم شاهد خالی از سیال α_q برابر با صفر در نظر گرفته می‌شود.

شبیه‌های آشفته‌گی

در این تحقیق از شبیه‌های آشفته‌گی مختلف $K-\varepsilon$ (معیار و RNG) و $K-w$ (از نوع SST) استفاده گردید. در شبیه آشفته‌گی $K-\varepsilon$ معیار روابط زیر برقرارند (دوربین، ۱۹۹۵؛ و پارنیکس و همکاران، ۱۹۹۸):

$$\rho \frac{Dk}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + G_k - \rho \varepsilon \quad (11)$$

$$\rho \frac{D\varepsilon}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right] + c_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} G_k - c_{\varepsilon 2} \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (12)$$

که در آنها D مشتق ذاتی یا مادی و G_k معرف تولید کارمایه‌ی جنبشی اغتشاشی می‌باشند. ضمناً، لزوجت گردابه‌ای به وسیله‌ی K (کارمایه‌ی جنبشی اغتشاشی) و ε (نرخ استهلاک کارمایه‌ی جنبشی اغتشاشی) از رابطه‌ی زیر محاسبه می‌شود:

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{K^2}{\varepsilon} \quad (13)$$

که در آن:

$\sigma_k = 1, \sigma_\varepsilon = 1.3, c_{\varepsilon 1} = 1.44, c_{\varepsilon 2} = 1.92, C_\mu = 0.09$
شبیه RNG شبیه اصلاح شده‌ای از شبیه $K-\varepsilon$ بوده و معادلات K و ε آن به قرار زیر می‌باشند (چودری، ۱۹۹۳):

$$\frac{\partial(\rho K)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho U_i K)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\alpha_K \mu_{eff} \frac{\partial K}{\partial x_i} \right] + \rho P_K - \rho \varepsilon + P_b - Y_M + S_K \quad (14)$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho U_i \varepsilon)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\alpha_\varepsilon \mu_{eff} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right] + \frac{C_1 \rho P_K \varepsilon - C_2 \rho \varepsilon^2 + C_3 C_1 \varepsilon P_b}{K} - R_\varepsilon + S_\varepsilon \quad (15)$$

عدد پرانتل موثر می‌باشند؛ مقادیر ثابتها عبارتند از $C_1 = 1.42, C_2 = 1.68$ و μ_{eff} لزجت آشفته‌گی که از حل معادلات دیفرانسیلی به دست می‌آیند. جمله‌ی R اضافه شده در معادله‌ی RNG طبق رابطه‌ی زیر تعریف می‌شود:

$$R = \frac{C_\mu \rho \eta^3 (1 - \frac{\eta}{\eta_0}) \varepsilon^2}{1 + \beta \eta^3} \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (16)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho U_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (6)$$

$$\frac{\partial(\rho U_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho U_i U_j)}{\partial x_j} = - \frac{\partial P_i}{\partial x_i} \quad (7)$$

$$+ \frac{\partial}{\partial x_j} (\mu + \mu_t) \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) + \rho g_i$$

در روابط بالا P فشار، U_i نشان دهنده‌ی مولفه سرعت جریان در جهت x_i ام، t زمان و g_i نیز مولفه در جهت t ام شتاب گرانش می‌باشد.

در روابط فوق ρ (جرم مخصوص مخلوط آب و هوا) از رابطه‌ی (۸) به دست می‌آید:

$$\rho = \alpha_A \rho_A + \alpha_w \rho_w \quad (8)$$

که در آن ρ_A جرم مخصوص هوا، ρ_w جرم مخصوص آب و α_A و α_w به ترتیب نسبت هوا و آب می‌باشند.

همچنین، μ_t و μ به ترتیب لزوجت گردابی و لزوجت مخلوط آب و هوا بوده که μ از رابطه‌ی زیر به دست می‌آید:

$$\mu = \alpha_A \mu_A + \alpha_w \mu_w \quad (9)$$

که μ_A و μ_w به ترتیب لزوجت هوا و آب می‌باشند.

روش جزء حجم سیال (VOF)

در شبیه VOF فرض بر این است که ۲ یا چند حالت مختلف با هم مخلوط نمی‌شوند. متغیرهای هر حالت متناسب با کسر حجمی هر حالت در حجم شاهد می‌باشند. اگر α_q کسر حجمی سیال q در یک حجم شاهد باشد سه حالت وجود خواهند داشت: اگر α_q برابر صفر باشد در حجم شاهد سیال q وجود ندارد. اگر α_q برابر یک باشد، حجم شاهد به وسیله‌ی سیال q پر شده است. اگر α_q بین صفر و یک باشد، بخشی از سلول با سیال q پر شده است. همچنین، معادله‌ی پیوستگی در حجمهای شاهد به منظور تعیین سطح مشترک ($interface$) دو حالت آب و هوا مورد استفاده قرار می‌گیرد. برای حالت سیال q معادله پیوستگی به شکل زیر خواهد بود (هرت و نیکولاس، ۱۹۸۱):

$$\frac{\partial(\alpha_q)}{\partial t} + U_i \frac{\partial(\alpha_q)}{\partial x_i} + U_j \frac{\partial(\alpha_q)}{\partial x_j} + U_k \frac{\partial(\alpha_q)}{\partial x_k} = 0 \quad (10)$$

حساسیت کمتری برخوردارند، مانند ارتفاعات بالای نهر که جریان آب به آن جا نمی‌رسد، خودداری شده است. در قسمت ورودی (زیر دریچه‌ی کشویی) شرط مرزی سرعت ورودی (*velocity inlet*)، و در قسمت خروجی نهر و سطح آزاد آن، شرط مرزی فشار خروجی (*pressure outlet*)، و در قسمت دریچه و بستر نهر شرط مرزی دیواره (*wall*) در نظر گرفته شده است.

جدول ۱- ثابتهای مربوط به معادله‌ی دیفرانسیل

شبهه <i>RNG</i>						
C_μ	$C_{\varepsilon 1}$	$C_{\varepsilon 2}$	C_V	β	η_0	
۰/۰۸۴۵	۱/۴۲	۱/۶۸	۱/۰	۰/۰۱۲	۴/۳۸	

در این تحقیق، از نتایج آزمایشگاهی گزارش شده به وسیله‌ی السبایه و شبایک (۲۰۱۰) در دانشگاه قاهره استفاده شده است. این آزمایشها در یک نهر مستطیلی به عرض ۰/۲۹۵ متر، ارتفاع ۰/۳۲ متر و طول ۹ متر انجام گرفته است. آزمایشها در نهر پایه دار مستطیلی افقی با دیوارهایی از جنس پلکسی گلاس و با بستر موجدار مثلثی شکل از جنس پلاستیک و چوب و با ارتفاع موجهای (t) ۱۸ میلیمتر، و طول موج (s) ۶۵ میلیمتری ساخته شده و برای مهار کردن، خلاء زاوی تاج سطح موج دار هم تراز با کف نهر منظور گردیده است. شکل (۲) طرحی کل از نمونه‌ی آزمایشگاهی را نشان می‌دهد.

جدول ۲- جزئیات آزمایشها.

y_2^*	$y_2 (m)$	$y_1 (mm)$	$u_1 (m/s)$	R_1	Fr_1	$t (mm)$	$s (mm)$	آزمایش
۰/۱۳۴	۰/۰۶	۲۵	۲/۰۴	۵۱۰۴۷	۴/۱	۱۸	۶۵	A1
۰/۱۶۵	۰/۰۹۲	۲۵	۲/۴۸	۶۱۹۰۳	۵	۱۸	۶۵	A2
۰/۱۹۱	۰/۱۰۵	۲۵	۲/۸۴	۷۱۱۲۲	۵/۷	۱۸	۶۵	A3
۰/۲۱۴	۰/۱۲۱	۲۵	۳/۱۷	۷۹۲۷۵	۶/۴	۱۸	۶۵	A4

که در آن $\eta = S \frac{K}{\varepsilon}$ بوده و S بیانگر میزان نرخ کرنش متوسط می‌باشد، که رابطه‌ی آن بر حسب نرخ متوسط کرنش چنین است:

$$S = \sqrt{2S_{ij}S_{ij}} \quad (17)$$

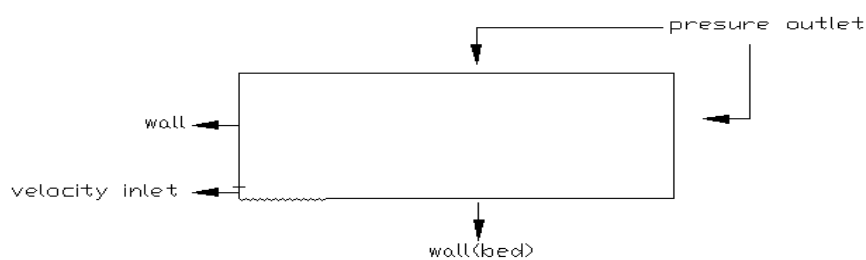
$$S_{ij} = \frac{1}{2}(U_{i,j} + U_{j,i})$$

در این شبیه‌ی ثابتهای معادله‌ی دیفرانسیل به صورت جدول (۱) تعریف می‌شوند.

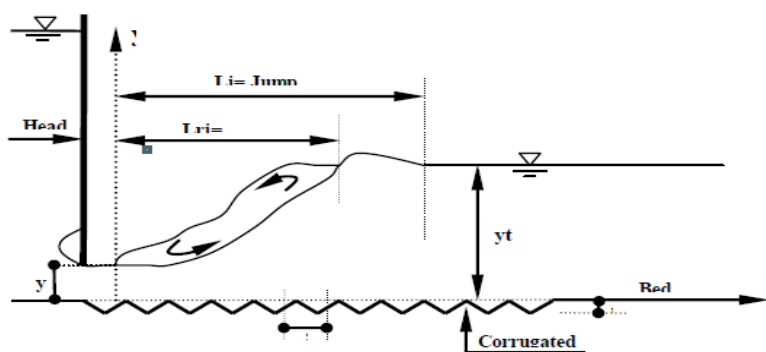
شبهه $K-\omega$ از نوع SST نیز ترکیبی از شبهه $K-\varepsilon$ معیار و شبهه $K-\varepsilon$ معیار می‌باشد، که به دلیل پیچیدگی از ذکر معادلات این نوع شبهه صرف نظر می‌گردد.

مشخصات شبهه عددی و شرایط مرزی و اولیه

برای ساختن هندسه‌ی شبهه از نرم‌افزار گمبیت استفاده شده است. شبکه‌بندی به وسیله حجم شاهدهایی با سازمان و چهار وجهی در گمبیت ایجاد شد. اجزاء شبکه در نزدیکی بستر موجدار ریز شده‌اند تا تغییرات شدید سرعت را در کف بستر موجدار مثلثی شکل به خوبی نشان دهند. در مرحله‌ی بعد شرایط مرزی آن مطابق شکل (۱) فرض می‌شود. برای شبکه‌بندی شبهه، الگوی *Quad-map* به کار گرفته شده است که حاصل حجم شاهدی مربعی و مستطیلی می‌باشد. جهت تسریع در حل عددی شبهه از ریز کردن شبکه‌ی محاسباتی در قسمت‌هایی که از



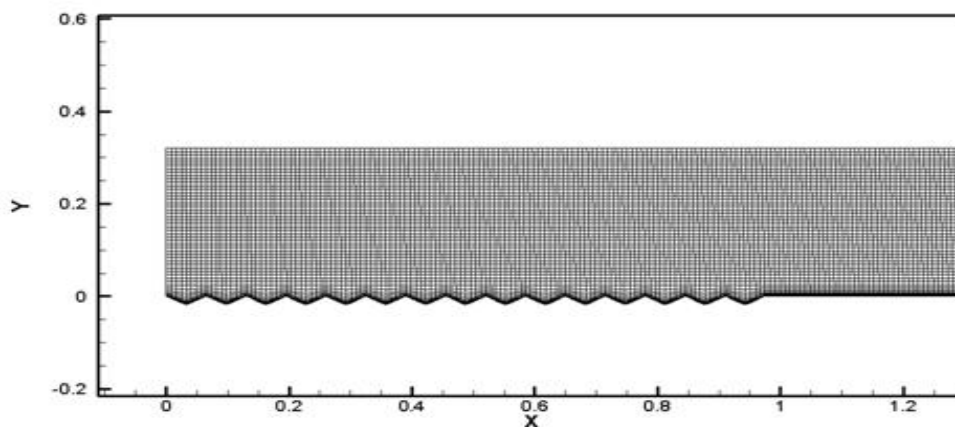
شکل ۱- شرایط مرزی به کار برده شده برای شبیه.



شکل ۲- طرحی کلی از نمونه‌ی آزمایشگاهی

لازم به ذکر است که در این تحقیق، شبکه با تعداد ۵۶۰۰۰ حجم شاهد به عنوان شبکه‌ی محاسباتی انتخاب گردید. در شکل (۳) شبکه‌بندی مزبور نشان داده شده است.

خلاصه‌ای از جزئیات آزمایشگاهی در جدول (۲) آمده است که در آن Fr_1 عدد فرود اولیه، R_1 عدد رینولدز، y_2 عمق ثانویه پرش و y^* عمق ثانویه پرش روی بستر صاف (پرش معمولی) می‌باشد.

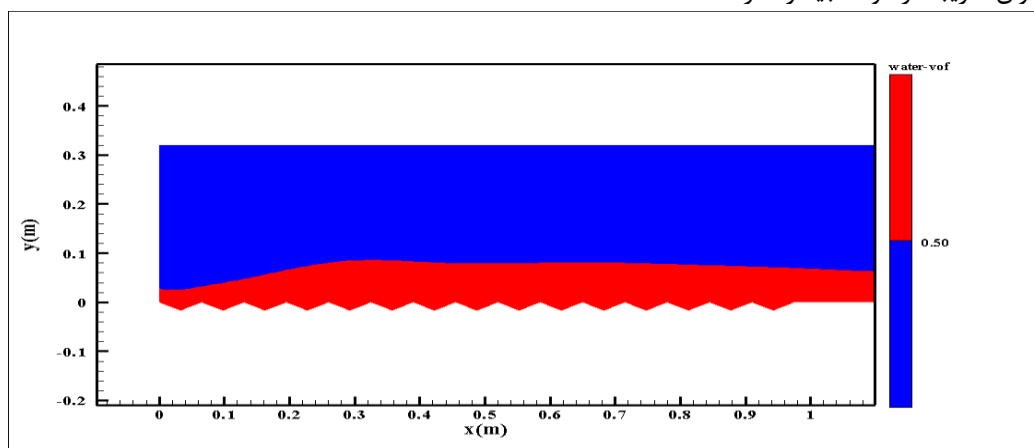


شکل ۳- شبکه بندی صورت گرفته برای محدوده‌ی جریان.

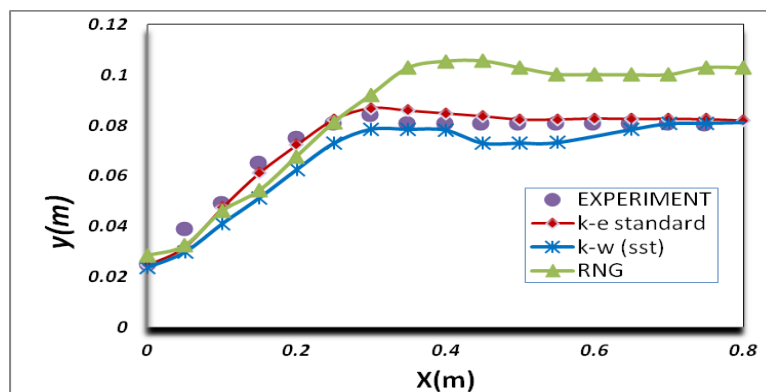
نتایج و بحث نیمرخ سطح آب

شبهه $K-\omega$ از نوع SST دارای نتایج ضعیفتری می‌باشد. شبهه SST در واقع، از ترکیب شبهه $K-\omega$ معیار و شبهه $K-\varepsilon$ از نوع مورد استفاده در اعداد رینولدز بالا ایجاد شده است؛ بطوری که شبهه SST در نواحی نزدیک دیواره (یعنی در ناحیه‌ی داخلی لایه مرزی که دارای عدد رینولدز پایینی است)، از شبهه $K-\omega$ معیار و در نواحی دور از دیواره (یعنی در قسمت خارجی لایه مرزی که دارای عدد رینولدز بالایی است)، از شبهه $K-\varepsilon$ از نوع مورد استفاده در اعداد رینولدز بالا استفاده می‌کند، بنابراین، اگرچه این روش تواناییهای هر دو نوع شبهه ذکر شده را دارد، ولی به دلیل تبدیل از یک شبهه به شبهه دیگر، اغلب با ناپایداری و ناهمگراییهایی توأم با خطا همراه می‌باشند. که این مطلب نیز در مورد شبهه سازی نمودن سطح پرش مشاهده گردید.

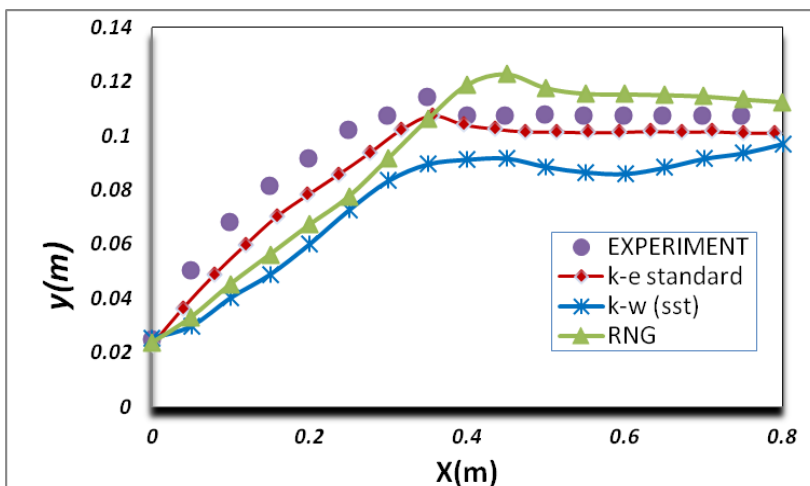
در شکل (۴) نیمرخ سطح آزاد آب به دست آمده از کاربرد شبهه آشفتگی $K-\varepsilon$ معیار و روش جزء حجم سیال VOF برای آزمون $A1$ نشان داده شده اند. همان‌طور که مشاهده می‌شود، تشکیل پرش آبی در ابتدای نهر روشن می‌باشد. ضمناً، در شکل‌های (۵) الی (۸)، نیمرخ‌های سطح آزاد آب به دست آمده از شبهه‌های آشفتگی مختلف با داده‌های تجربی السبایه و شبایک (۲۰۱۰) مقایسه شده اند. همان‌طور که مشاهده می‌گردد، سازگاری و تطابق مناسبی مابین داده‌های آزمایشگاهی و نتایج به دست آمده از شبهه عددی (با استفاده از شبهه آشفتگی $K-\varepsilon$ معیار) وجود دارد. ضمناً، شبهه نوع RNG نیز دارای تفاوت‌های اندکی با شبهه معیار بوده و از این منظر می‌توان تقریباً هر دو شبهه را کارآمد دانست، اما



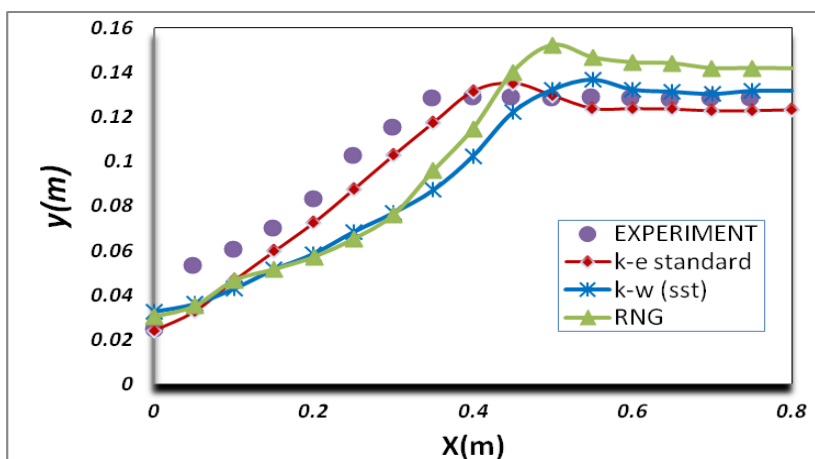
شکل ۴- شبهه سازی نیمرخ سطح آزاد پرش هیدرولیکی در شبهه $K-\varepsilon$ معیار با استفاده از روش VOF .



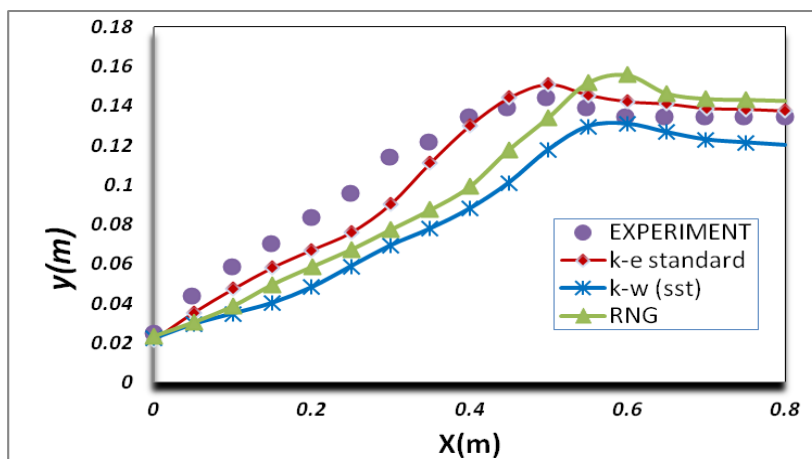
شکل ۵- مقایسه نیمرخ‌های سطح آزاد آب به دست آمده از شبهه‌های آشفتگی متفاوت با نتایج آزمایش $A1$ در عدد فرود



شکل ۶- مقایسه نیمرخهای سطح آزاد آب به دست آمده از شبیه‌های آشفته‌گی متفاوت با نتایج آزمایش A2 در عدد فرود ۵.



شکل ۷- مقایسه نیمرخهای سطح آزاد آب به دست آمده از شبیه‌های آشفته‌گی متفاوت با نتایج آزمایش A3 در عدد فرود ۵/۷.



شکل ۸- مقایسه نیمرخهای سطح آزاد آب بدست آمده از شبیه‌های آشفته‌گی متفاوت با نتایج آزمایش A4 در عدد فرود ۶/۴.

بررسی عمق مزدوج پرش آبی

برای بررسی میزان تاثیر زبریهای مثلثی شکل بر کاهش یا افزایش عمق مزدوج پرش، از نیمرخهای سطح آب به دست آمده از شبیه عددی استفاده شد. اگر u_1 سرعت متوسط در مقطع اولیه پرش، y_2 عمق مزدوج پرش و ζ فراسنج شکل باشد، می‌توان نوشت:

$$y_2 = f_1(y_1, u_1, g, v, t, \zeta) \quad (18)$$

که در آن، v لزوجت جنبشی آب است؛ بنا براین با توجه به نظریه‌ی باکینگهام رابطه‌ی زیر به دست می‌آید:

$$\frac{y_2}{y_1} = f_2\left(Fr_1 = \frac{u_1}{\sqrt{gy_1}}, R_1 = \frac{u_1 y_1}{\nu}, \frac{t}{y_1}, \zeta\right) \quad (19)$$

در این مطالعه مقدار اعداد رینولدز در محدوده‌ی ۵۱۰۴۷ تا ۹۳۳۷۴ می‌باشد که بیانگر جریان کاملاً آشفته است؛ بنابراین، می‌توان از اثر لزوجت صرفنظر کرد و نوشت:

$$\frac{y_2}{y_1} = f_3\left(Fr_1, \frac{t}{y_1}, \zeta\right) \quad (20)$$

همان طور که در شکل (۹) مشخص است، با افزایش عدد فرود، نسبت اعماق مزدوج پرش آبی افزایش می‌یابد،

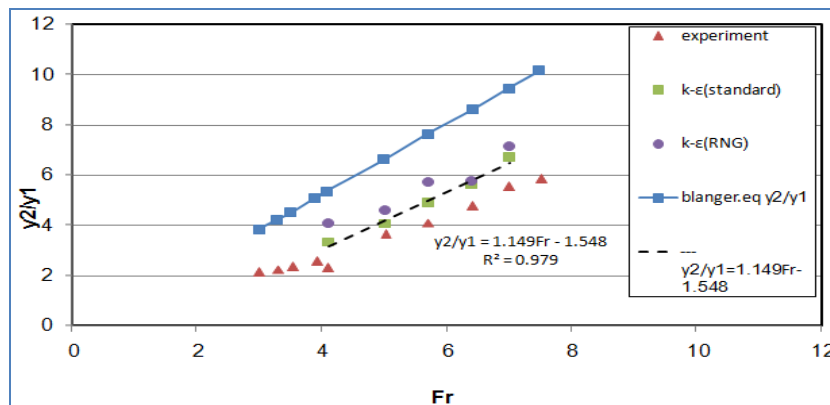
و در تمام اعداد فرود خط وایزی حاصل از این تحقیق زیر خط پرش معمولی (معادله‌ی بلانگر) قرار دارد.

برای نشان دادن میزان اختلاف عمق مزدوج پرش روی بستر زبر مثلثی شکل و بستر صاف از یک ضریب بدون بعد، به نام ضریب کاهش عمق (D)، استفاده می‌شود. این عامل در پرشهای آبی معمولی برابر با صفر است و از رابطه‌ی زیر به دست می‌آید:

$$D = \frac{y_2^* - y_2}{y_2^*} \quad (21)$$

در این معادله، y_2^* عمق ثانویه‌ی پرش در بستر صاف بزاء عمق اولیه‌ی y_1 و عدد فرود اولیه‌ی Fr_1 یکسان با بستر موجدار مثلثی شکل است. جدول (۳) مقادیر به دست آمده عمق ثانویه‌ی پرش آبی را روی بستر صاف (پرش معمولی) و شبیه عددی (شبیه آشفتگی $K-\epsilon$ معیار) نشان می‌دهد.

نتایج حاصل از جدول (۳) بیانگر این مطلبند که زبریهای مثلثی شکل می‌توانند باعث کاهش عمق پایاب مورد نیاز برای ایجاد پرش در مقایسه با پرش معمولی به مقدار حدود ۲۸/۳ تا ۳۸/۳ درصد، بطور متوسط ۳۴/۸ درصد گردند.



شکل ۹- نسبت y_2 به y_1 در برابر عدد فرود در پرش معمولی روی بستر صاف و مقایسه با پرش روی بسترهای زبر مثلثی شکل.

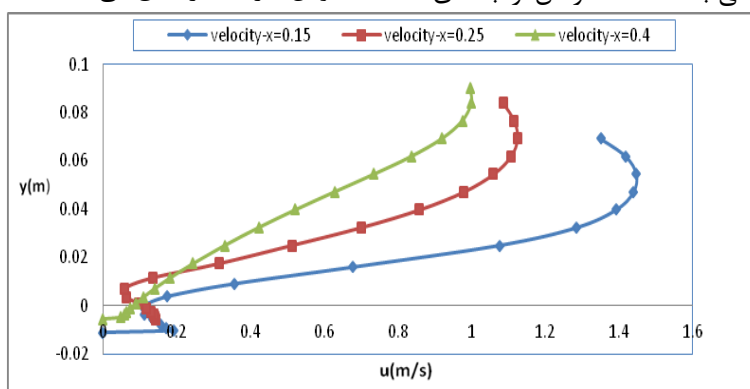
جدول ۳- مقادیر عمق ثانویه به دست آمده بر روی بستر صاف و بستر موجدار مثلثی.

آزمون	عمق محاسباتی ($K-\varepsilon$ معیار)		درصد کاهش نسبی عمق
	عمق پرش روی بستر صاف (cm) y_2^*	(cm) y_2	
A1	۱۳/۴۰	۸/۳۳	۳۷/۸
A2	۱۶/۵۰	۱۰/۱۷	۳۸/۳
A3	۱۹/۱۰	۱۲/۳۲	۳۵/۵
A4	۲۱/۴۰	۱۴/۰۵	۳۴/۳
A5	۲۳/۵۰	۱۶/۸۴	۲۸/۳
min	-----	-----	۲۸/۳
max	-----	-----	۳۸/۳
average	-----	-----	۳۴/۸

پرش کمتر شده و در هر مقطع، حداکثر سرعت در نزدیکی سطح آزاد آب اتفاق افتاده و بیشینه‌ی سرعت در روی نیمرخهای سرعت به سمت سطح پرش حرکت می‌کند؛ این نیمرخهای قائم سرعت نیز بیانگر غیریکنواخت بودن سرعت در عمق می‌باشند.

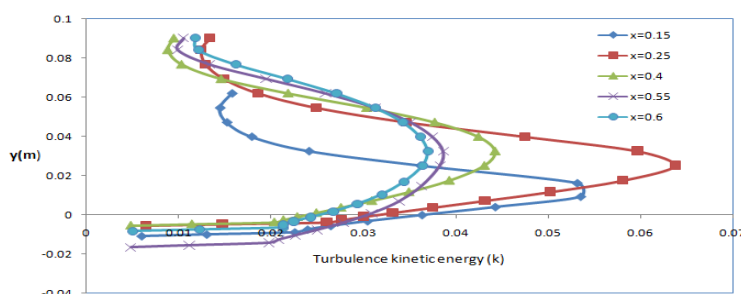
نیمرخهای قائم سرعت در طول پرش

شکل (۱۰) نیمرخهای قائم سرعت را در مقاطع مختلف پرش در شبیه آشفته‌گی $K-\varepsilon$ معیار در آزمون A1 نشان می‌دهد. با توجه به نیمرخهای قائم سرعت به دست آمده، سرعت موضعی با فاصله گرفتن از ابتدای



شکل ۱۰- نیمرخهای قائم سرعت در مقاطع مختلف در طول پرش هیدرولیکی با شبیه آشفته‌گی $K-\varepsilon$ معیار (برای آزمایش A1).

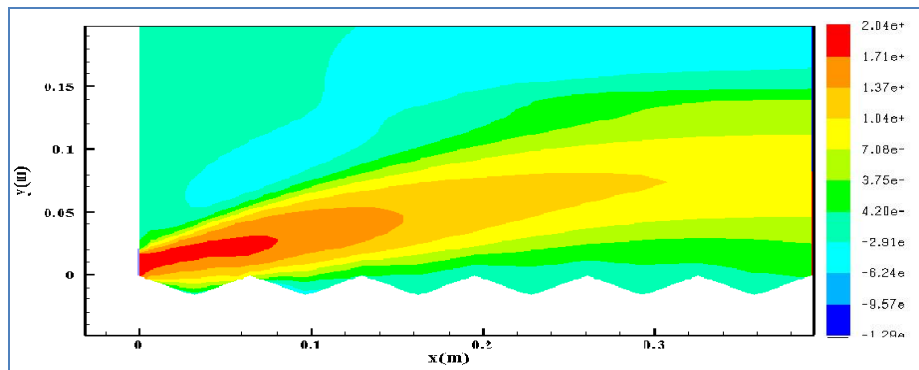
شکل (۱۱) نیمرخهای کارمایه‌ی جنبشی اغتشاشی را در مقاطع مختلف در طول پرش نشان می‌دهد.



شکل ۱۱- نیمرخهای کارمایه‌ی جنبشی اغتشاشی در مقاطع مختلف پرش و بعد از پرش با در نظر گرفتن شبیه $K-\varepsilon$ معیار (برای آزمایش A1).

نواحی مختلف پرش به دست آورد. نتایج نشان می‌دهند که حداکثر سرعت موضعی در ابتدای نهر، و حداقل آن در نزدیکی سطح آب و بستر موجدار مثلثی شکل دیده می‌شود.

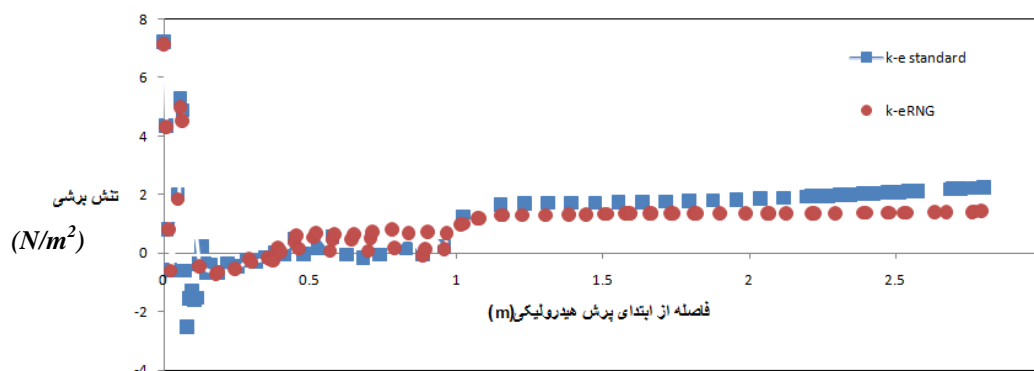
همان طور که در شکل مشاهده می‌شود، کارمایه‌ی جنبشی اغتشاشی (K) با فاصله گرفتن از پنجه‌ی پرش، و به سمت پایین دست کاهش می‌یابد. شکل (۱۲) میدان سرعت شبیه سازی شده با شبیه آشفته‌گی $K-\epsilon$ معیار را نشان می‌دهد. از این نتایج می‌توان سرعت جریان را در



شکل ۱۲- شبیه سازی دوبعدی میدان سرعت جریان با استفاده از شبیه آشفته‌گی $K-\epsilon$ معیار مربوط به آزمون A1.

با افزایش فاصله نسبت به ابتدای پرش، مقدار تنش برشی بستر کاهش یافته، و بیشینه‌ی آنها تقریباً در فاصله ۰/۰۶ متری (حدود ۲/۵ برابر عمق باز شدگی دریچه) از ابتدای پرش آبی دیده می‌شود.

تنش برشی بستر در فواصل مختلف از ابتدای پرش با استفاده از شبیه‌های آشفته‌گی $K-\epsilon$ معیار و $K-\epsilon$ نوع RNG به صورت شکل (۱۳) نمایش داده شده است.



شکل ۱۳- تغییرات تنش برشی بستر به دست آمده از شبیه‌های آشفته‌گی $K-\epsilon$ معیار و RNG (جهت آزمون A1).

۱- شبیه آشفته‌گی $K-\epsilon$ معیار و روش جزء حجم سیال (VOF) برای پیش‌بینی نیمرخهای سطح آب در پرش آبی بر روی بستر موجدار مثلثی شکل مناسب بوده و با دقت حدودی ۳ تا ۷ درصد نیمرخ سطح آب، شبیه‌سازی می‌گردد.

۲- مقایسه‌ی نتایج ارائه شده نشان می‌دهد که نیمرخهای سطح آب به دست آمده از دو شبیه آشفته‌گی $K-\epsilon$ معیار و RNG اختلاف کمی داشته، و فقط

نتیجه‌گیری

در این تحقیق شبیه‌سازی عددی پرش آبی بر روی بستر موجدار مثلثی شکل با به کار بردن نرم‌افزار فلوئنت، و با استفاده از شبیه‌های آشفته‌گی مختلف انجام گرفته و با نتایج بررسی تجربی السبایه و شبایک (۲۰۱۰) مقایسه گردید. نتایج حاصله به صورت خلاصه در زیر ارائه می‌گردند:

- بازبریهای نیم استوانه ای شکل. نشریه آب و خاک. ۲۶: ۷۷۵.
۵. عباسپور، ا. و س. هاشمی کیا. ۱۳۹۲. شبیه سازی عددی جریان بر روی سرریز استوانه ای با در نظر گرفتن مولفه‌ی زبری با استفاده از شبیه $K-\varepsilon$ معیار. مجله مهندسی منابع آب. ۶ (۱۸): ۸۷-۹۸.
۶. غزالی، م. ح. صمدی بروجنی، ب. قربانی، و ر. ر. فتاحی نافچی. ۱۳۸۹. تاثیر بستر موجدار مثلثی بر مشخصات پرش. مجله پژوهش آب ایران. سال ۴: ۱۰۸-۹۹.
7. Abbaspour, A. A. Hosseinzadeh-Dalir, D. farsadizadeh, and A.A. Sadraddini, 2009. Effect of sinusoidal corrugated bed on hydraulic jump characteristics. Appl. Sci. 9: 2045-2055.
8. Belanger, J.B. 1828. Essay on numerical solution of some problems relative to Steady flow of water. Carilan-Goeury, Paris, France.
9. Choudhury, D. 1993. Introduction to the renormalization group method and turbulence modeling. FLUENT Inc. Technical Memorandum TM-107.
10. Durbin, P.A. 1995. Separated low computations with $K-\varepsilon-v^2$ model. AIAA J. 33: 659-664.
11. Ead, S.A. and N. Rajaratnam, 2000. Turbulent open channel flow in circular corrugated culverts. J. Hydraul. Eng. 126: 750-757.
12. Ead, S.A. and N. Rajaratnam, 2002. Hydraulic jumps on corrugated bed. J. Hydraul. Eng. ASCE. 128:656-663.
13. Elsebaie, I.H. and Sh. Shabayek, 2010. Formation of hydraulic jumps on corrugated beds. civil & Environ. Eng. 10: 40- 45.
14. Hirt, C.W. and B.D. Nichols, 1981. Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries. J. Comput. Phy. 39: 201-225.
15. Leutheusser, H.J. and E.J. Schiller, 1975. Hydraulic jump in a rough

شبیه RNG همواره سطح پایاب (v_2) را بیشتر از مقدار واقعی نشان می دهد. ضمناً، شبیه $K-\omega$ (SST) برنامه‌ی چندان مناسبی نیست.

۳- زبریهای مثلثی شکل می‌توانند باعث کاهش عمق پایاب مورد نیاز برای ایجاد پرش در مقایسه با پرش معمولی به میزان تقریبی ۳۴/۸ درصد گردند.

۴- با افزایش فاصله از ابتدای پرش آبی، از سرعت جریان کاسته شده و بیشینه‌ی آن در روی نیمرخهای سرعت به سمت سطح پرش حرکت می‌کند.

۵- بررسی خطوط تراز سرعت شبیه سازی شده نشان می دهد که حداکثر سرعت در ابتدا و ناحیه‌ی چرخشی جریان بوده، و سرعتهای منفی در نزدیکی سطح آب و فرورفتگیهای بستر موجدار دیده می شود.

۶- نیمرخهای کارمایه‌ی جنبشی به دست آمده در مقاطع مختلف در طول پرش نشان می دهند که کارمایه‌ی جنبشی اغتشاشی با فاصله گرفتن از پنجه‌ی پرش و به سمت پایین دست کاهش می یابد.

۷- بیشینه‌ی تنش برشی بستر در ابتدای پرش آبی دیده شده، و با فاصله گرفتن از آن جا، تنش برشی بستر کاهش می یابد. در قسمتهایی از فرورفتگیهای بستر مثلثی شکل (جریان برگشتی)، مقادیر تنش برشی منفی شده یا مقادیری نزدیک به صفر را دارد.

منابع

۱. ابریشمی، ج. و م. حسینی. ۱۳۸۵. هیدرولیک نهرهای باز. چ چهاردهم. انتشارات دانشگاه امام رضا (ع).
۲. بدیع زادگان، ر. ک. اسماعیلی، م. فغور مغربی، و م. صانعی. ۱۳۹۰. مشخصات پرش در حوضچه های آرامش نهرهای آبیاری با بستر موجدار. نشریه آب و خاک. ۲۵: ۶۸۷-۶۷۶.
۳. برهمند، ن. و س. ر. موسوی. ۱۳۹۲. مقایسه‌ی شبیه‌های مختلف آشفستگی به منظور شبیه سازی مناسب جریانهای چگال در مجاورت محل کاهش شیب بستر. مجله مهندسی منابع آب دوره ۶: ۷۹-۹۳.
۴. پارسامهر، پ. ع. حسین زاده دلیر، د. فرسادیزاده، و ا. عباسپور. ۱۳۹۱. پرش هیدرولیکی بر روی بستر

- channel. Water Power Dam Constr.186-191.
16. Parneix, S. P. Durbin, and M. Behnia, 1998. Computation of 3-D turbulent boundary layer using the $v^2 - f$ model. Flow, Turbul. Combust, 60: 19-46.
 17. Rajaratnam, N. 1968. Hydraulic jump on rough bed. Trans.Eng. Inst. Canada. 11:1-8.
 18. Shafai Bejestan, M. and K. Neisi, 2009. A new roughened bed hydraulic jump stilling basin. App. Sci. 2: 436-445.
 19. Tokyay, N.D. 2005. Effect of channel bed corrugations on hydraulic jumps. Impacts of Global Climate Change Conference Proc. Paper, EWRI, Anchorage, Alaska, USA. 408-416.
 20. Versteeg, H. K. and W. Malalasekera, 1995. An introduction to computational fluid dynamics: The finite volume method. Longman Scientific & Technical. ISBN 0-582-21884-5.
 21. Zho, Q., and S.K. Misra, 2004. Numerical study of a turbulent hydraulic jump. Eng. Mech. Conf. University of Delaware, New york. 78-85.

