

بسمه تعالی

کواهی پذیرش مقاله

بدینوسیله کواهی می‌شود مقاله نویسندگان محترم زیر

ابراهیم علائیان، محمدرضا جعفرزاده

با عنوان "مدلسازی جریان سیلابی در کانالهای شوری مستطیلی همراه با جریان تحت فشار جانبی"

در دوازدهمین کنفرانس هیدرولیک ایران که در تاریخ ۷ الی ۹ آبان ماه سال ۱۳۹۲ در گروه مهندسی آبیاری و آبادانی دانشگاه تهران برگزار گردید، به صورت شفاهی پذیرفته شده است.



دیر کتفرانس

دکتر محمد حسین امیدی



رئیس هیئت مدیره انجمن هیدرولیک

دکتر فرزین نصیری صالح

دکتر فرزین نصیری صالح



دوازدهمین کنفرانس هیدرولیک ایران
گروه مهندسی آبیاری و آبادانی
پردیس کشاورزی و منابع طبیعی
۷ و ۸ آبان ماه ۱۳۹۲



مدلسازی جریان سیلابی در کانالهای منشوری مستطیلی همراه با جریان تحت فشار جانبی

ابراهیم علامتیان

استادیار گروه عمران، موسسه آموزش عالی خاوران، Alamatian@khi.ac.ir

محمد رضا جعفرزاده

استاد گروه عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، Jafarzad@um.ac.ir

چکیده

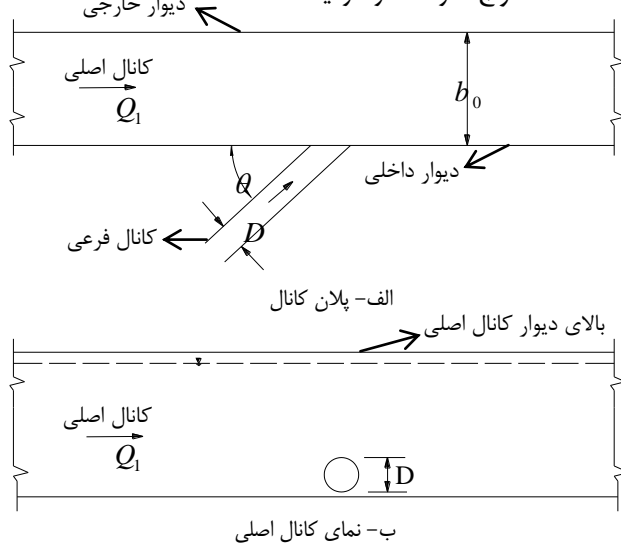
در این مقاله افزایش عمق جریان فوق بحرانی در کانال مستطیلی منشوری ناشی از ورود جریان جانبی تحت فشار بررسی می‌شود. برای این کار از روش حجم محدود Roe بر شبکه بی سازمان مثلثی شکل استفاده می‌گردد. اثر اصطکاک بستر با استفاده از رابطه مانینگ و جملات آشفستگی با اعمال مدل تلاطمی $k-\varepsilon$ و کاربرد مدل نیمه ضمنی محاسبه می‌شود. از نتایج آزمایشگاهی موجود برای صحت سنجی مدل عددی استفاده می‌گردد. با آزمونهای عددی اثر تغییرات عدد فرود جریان اصلی و زاویه ورود و عدد رینولدز جریان جانبی بررسی می‌شود. نتایج نشان می‌دهند با افزایش عدد فرود جریان در کانال اصلی تا حدود $4/7$ ، از ارتفاع امواج ایجاد شده کاسته می‌شود و پس از آن با افزایش عدد فرود ارتفاع امواج به شدت افزایش می‌یابد. بررسی تاثیر عدد رینولدز و زاویه ورود جریان جانبی بر ارتفاع امواج نشان می‌دهد با افزایش آنها ارتفاع امواج زیاد می‌گردد ولی با کاهش زاویه ورود جریان جانبی اثر تغییرات عدد رینولدز جریان مستغرق ناچیز خواهد بود.

واژه‌های کلیدی: روش حجم محدود، معادلات آبهای کم عمق، مدل $k-\varepsilon$ ، جریان جانبی

مقدمه

در محیطهای شهری رواناب ناشی از بارندگیهای جوی بوسیله شبکه کانالهای کوچک و فرعی جمع آوری و از طریق تعدادی کانال بزرگ (مسیل) بصورت ایمن دفع میگردد. در بسیاری از موارد به دلیل توپوگرافی، کانالهای فرعی به مسیلهها در تراز پایین تری از عمق نرمال متصل می‌شود و در نتیجه جریان بصورت مستغرق به مسیل وارد می‌گردد، (شکل ۱). با توجه به وجود جریان فوق بحرانی در مسیلهها، جریان ورودی جانبی باعث ایجاد امواج ایستا در مسیل شده و ارتفاع جریان را افزایش می‌دهد. هرچند که ورود جریان جانبی غیر مستغرق در کانالهای باز بصورت گسترده بررسی شده است، (El Kadi et al., 2011) و (Mignot et al., 2008) اما جریان جانبی مستغرق اولین بار توسط دوان و همکاران در مرکز کنترل سیل کلارک مطالعه شد، (Stockstill, 2007). هدف این تحقیق تعیین پارامترهای موثر در مشخصات هیدرولیکی جریان کانال اصلی بود، (شکل ۲). مطالعات ایشان نشان داد که حتی اگر دبی جریان جانبی از ۱۰ درصد دبی کانال اصلی کمتر باشد اثر قابل توجهی بر مشخصات جریان در کانال اصلی دارد و باعث حجیم شدن و بالا آمدن سطح جریان و ایجاد امواج در آن می‌شود. استوکس تیل جریان فوق بحرانی همراه با ورودی جانبی مستغرق را برای ۵ حالت بصورت آزمایشگاهی بررسی نمود، (Stockstill, 2007). سپس با آزمونهای عددی بوسیله نرم افزار المان محدود HIVE2D تاثیر زاویه ورودی جریان جانبی و نسبت

دبی ها را بر ارتفاع امواج ایجاد شده در کانال بررسی نمود. در این مطالعات عدد فرود در محدوده بسیار کوچکی تغییر کرد و جملات آشفتهگی در معادلات حذف شد و از تاثیر عدد رینولدز جریان جانبی بر مشخصات امواج صرف نظر گردید.



شکل ۲- پارامترهای موثر در مشخصات هیدرولیکی جریان



شکل ۱- جریان جانبی مستغرق در کانال منشوری مستطیلی (Stockstill, 2007)

برای مدلسازی عددی جریان‌های سطحی باید معادلات سه بعدی ناویر استوکس با در نظر گرفتن شرایط مرزی مناسب حل شوند، (Olsen and Kjellesvig, 1998). مشکل اصلی در شبیه سازی سه بعدی جریان، هزینه محاسباتی بسیار زیاد آن است. این مشکل در مسائلی که فضای حل بزرگ می‌باشد بیشتر است. بنابراین رهیافت سه بعدی برای حل مسایل مهندسی در حالت کلی هنوز مؤثر و کارآمد نیست، (Minh-Duc et al. 2004). هنگامی که معادلات ناویر استوکس در عمق انتگرال گیری می‌شوند معادلات دو بعدی آبهای سطحی یا معادلات سنت ونانت بدست می‌آید. از این معادلات بصورت گسترده ای در مدل سازی مسئله شکست سد و پخش امواج در سطح آزاد استفاده شده است، (Cea et al, 2004).

روشهای عددی مختلفی برای حل معادلاتی که شامل فرآیندهای انتقال و پخش هستند ارائه شده است. در دینامیک سیالات محاسباتی بیشتر از روش حجم محدود استفاده می‌شود. این روش برای حل معادلات دیفرانسیلی قوانین بقا (Conservation Laws) مناسب است. هنگامی که ناپیوستگی منفردی در یک نقطه از قلمرو جواب وجود دارد به آن مسئله ریمن گفته می‌شود. حل کننده‌های ریمن با سود جستن از تئوری مشخصات، به شکل مطلوبی قادر به شبیه سازی ناپیوستگی‌ها از جمله موج شاک می‌باشند، (Toro, 2001). در این مقاله جریان فوق بحرانی در کانال منشوری با وجود جریان جانبی مستغرق بصورت عددی بررسی می‌شود. مدل عددی مورد استفاده بر مبنای حل معادلات متوسط عمقی آبهای کم عمق با روش حجم محدود Roe با در نظر گرفتن جملات آشفتهگی می‌باشد. برای اعمال جریان جانبی شرط مرزی ویژه ای در معادلات اعمال می‌گردد. همچنین برای شبیه سازی اثرات آشفتهگی از مدل دو بعدی $k-\varepsilon$ استاندارد استفاده می‌گردد. در انتها دیاگرامهایی برای تعیین مشخصات هیدرولیکی جریان در کانالهای منشوری همراه با جریان جانبی ارائه می‌شود.

معادلات آبهای کم عمق

معادلات آبهای کم عمق، با فرض اولیه توزیع فشار هیدرواستاتیکی و همچنین سیال غیر قابل تراکم، از متوسط گیری معادلات سه بعدی ناویر استوکس در عمق حاصل می‌شود. این معادلات، برای مطالعه بسیاری از پدیده های فیزیکی از جمله شکست سد، جریان در کانالهای باز، امواج سیلابی، نیروهای عمل کننده بر سازه های ساحلی و انتقال آلودگی بکار می‌روند. شکل دو بعدی و ابقایی این معادلات به صورت زیر می‌باشد:

$$\frac{\partial W}{\partial t} + \frac{\partial F_x}{\partial x} + \frac{\partial F_y}{\partial y} = \sum_{k=1}^3 G_k \quad (1)$$

که در آنجا

$$W = \begin{pmatrix} h \\ q_x \\ q_y \end{pmatrix}; \quad F_x = \begin{pmatrix} q_x \\ \frac{q_x^2 + gh^2}{h} \\ \frac{q_x q_y}{h} \end{pmatrix}; \quad F_y = \begin{pmatrix} q_y \\ \frac{q_x q_y}{h} \\ \frac{q_y^2 + gh^2}{h} \end{pmatrix} \quad (2)$$

در سیستم معادلات فوق W بردار متغیرهای ابقاء شده شامل بر h عمق جریان و q_x و q_y دبی در واحد عرض در جهت‌های x و y است. همچنین F_x و F_y بردارهای فلاکس در جهت‌های x و y ، g شتاب جاذبه و G_k بردار جملات چشمه می باشد؛ G_1 و G_2 به ترتیب جملات چشمه شیب و اصطکاک بستر و G_3 جمله چشمه اثرات تلاطمی است و بصورت زیر نوشته می شوند:

$$G_1 = \begin{pmatrix} 0 \\ -gh \frac{\partial Z_b}{\partial x} \\ -gh \frac{\partial Z_b}{\partial y} \end{pmatrix}; \quad G_2 = \begin{pmatrix} 0 \\ -\frac{\tau_{b,x}}{\rho} \\ -\frac{\tau_{b,y}}{\rho} \end{pmatrix}; \quad G_3 = \begin{pmatrix} 0 \\ \frac{\partial}{\partial x} \left(v_t h \frac{\partial U_x}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(v_t h \frac{\partial U_x}{\partial y} \right) \\ \frac{\partial}{\partial x} \left(v_t h \frac{\partial U_y}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(v_t h \frac{\partial U_y}{\partial y} \right) \end{pmatrix} \quad (3)$$

Z_b تراز بستر کانال در مرکز سلول، τ_b تنش برشی در بستر، ρ جرم مخصوص آب، U_t لزجت گردابه ای متلاطم و U_x و U_y سرعت در جهت‌های x و y می باشد.

حل عددی معادلات به روش حجم محدود

از آنجا که معادلات آبهای کم عمق اغلب در محیط‌هایی با هندسه بسیار پیچیده مانند رودخانه ها بکار می‌روند انتخاب اجزاء بی سازمان مناسب‌تر می‌باشند؛ زیرا بهتر می‌توانند خود را با مرزها هماهنگ سازند. در این تحقیق با جداسازی معادلات (۱) در زمان و استفاده از یک گام میانی در نهایت از روش با دقت مرتبه دوم در زمان استفاده می‌شود. همچنین برای جدا سازی معادلات در مکان از سلول های مثلثی و روش Roe استفاده می‌گردد. برای رسیدن به دقت مرتبه دوم در مکان از محدود کننده شیب چند بعدی استفاده می‌شود. جملات آشفتگی با روش $k-\epsilon$ و بصورت نیمه ضمنی (Semi-implicit Method) جداسازی می‌شود. جزئیات و روابط مورد استفاده برای حل معادلات متوسط عمقی $k-\epsilon$ ، معادلات آبهای کم عمق در مقاله دیگری بوسیله نگارندگان توضیح داده شده است، (Alamatian and Jaefarzadeh, 2012).

جریان جانبی وارد شده به کانال بصورت مستغرق می‌باشد به این دلیل مدلسازی مستقیم این جریان با استفاده از معادلات آبهای کم عمق امکان ندارد. برای مدلسازی جریان مستغرق سلولی مجازی در محل ورود جریان جانبی در نظر گرفته می‌شود. در این سلول دبی جریان در جهات مختلف با توجه به دبی جریان جانبی فرض می‌گردد و عمق جریان در این سلول مجازی بصورت زیر در نظر گرفته می‌شود:

$$h = \frac{Q^2}{2gA^2} \quad (4)$$

در این رابطه Q و A به ترتیب دبی و سطح مقطع کانال جریان جانبی می‌باشد.

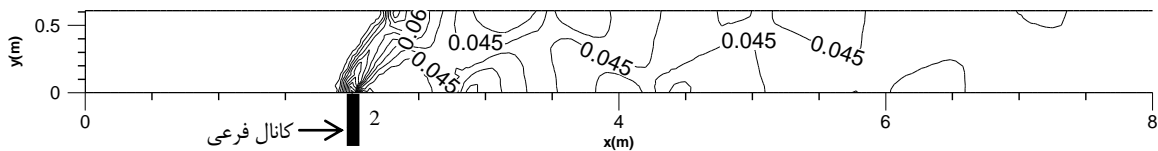
صحت سنجی مدل عددی

به منظور بررسی صحت عملکرد مدل عددی، کانال مستطیلی با عرض $b_0 = 0.61m$ و طول $12m$ همراه با جریان جانبی قائم ($\theta = 90^\circ$) برای دو آزمایش T1 و T2 با مشخصات جدول ۱ شبیه سازی می‌شود، (شکل ۲). شیب طولی کانال $S = 0.0095$

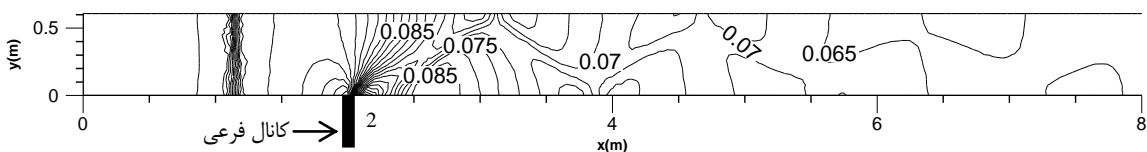
و زبری مانینگ $n = 0.01$ فرض می‌گردد. در شکل‌های ۳ و ۴ نتایج عددی خطوط هم تراز عمق در کانال نشان داده شده است. ایجاد امواج در پایین دست جریان جانبی مشهود می‌باشد. برای بررسی دقت نتایج مدل عددی Roe در شکل‌های ۵ و ۶ پروفیل طولی عمق در مرکز کانال با نتایج آزمایشگاهی ارائه شده توسط استوکس تیل مقایسه شده است. در این شکل‌ها نتایج بدست آمده از نرم‌افزار HIVE2D نیز ارائه شده است. مشاهده می‌شود که مدل عددی بخوبی قادر به پیش بینی مشخصات جریان می‌باشد و در مقایسه با نتایج نرم‌افزار HIVE2D دقت بالاتری دارد. در آزمون T2 مدل عددی بخوبی شرایط جریان در پایین دست جریان جانبی و امواج ایجاد شده را پیش‌بینی می‌کند ولی افزایش عمق بالادست جریان جانبی بخوبی پیش بینی نشده است.

جدول ۱- مشخصات هیدرولیکی جریان

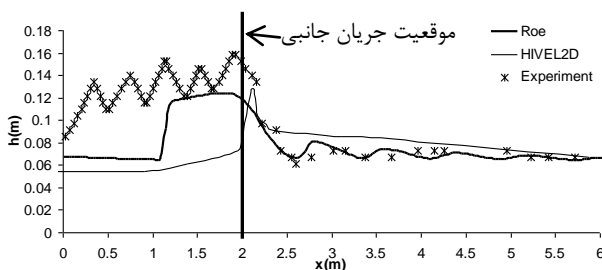
	$Q_1(m^3/s)$	$Q_2(m^3/s)$	Fr_1	$D(m)$
T1	۰/۰۲۹	۰/۰۰۱۴	۱/۷	۰/۰۵
T2	۰/۰۴۹	۰/۰۰۴۹	۱/۷۴	۰/۰۵



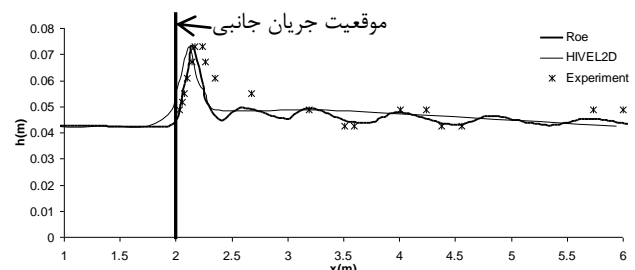
شکل ۳- خطوط هم تراز عمق در کانال (T1)



شکل ۴- خطوط هم تراز عمق در کانال (T2)



شکل ۵- مقایسه نتایج عددی عمق در مرکز کانال با داده های آزمایشگاهی (آزمون T2)



شکل ۶- مقایسه نتایج عددی عمق در مرکز کانال با داده های آزمایشگاهی (آزمون T1)

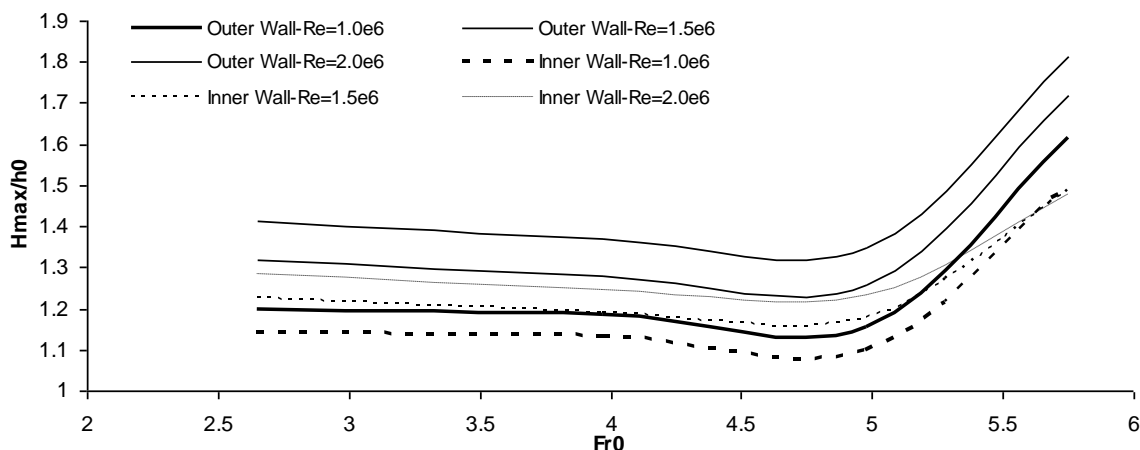
نتایج عددی

برای بررسی تاثیر جریان جانبی بر مشخصات هیدرولیکی جریان اصلی، کانال مستطیلی با طول $20m$ و عرض $b_0 = 2.0m$ بصورت عددی مدل‌سازی می‌شود. در فاصله $2m$ از ابتدای کانال، جریان جانبی بوسیله لوله‌ای به قطر $D=0.10m$ وارد می‌شود، (شکل ۲). شیب طولی کانال $S=0.01$ و ضریب زبری مانینگ $n=0.001$ فرض شد. جریان در کانال اصلی بصورت سطح آزاد است و در نتیجه رفتار آن تابع عدد بی بعد فرود می‌باشد. از طرف دیگر جریان جانبی بصورت مستغرق به کانال اصلی وارد می‌شود و ممنتم وارد شده به جریان اصلی (M) با عدد رینولدز جریان جانبی متناسب است؛ داریم:

$$M \propto Q \times V \rightarrow M \propto V \times A \times V \rightarrow M \propto V^2 \times D^2 \rightarrow M \propto Re^2$$

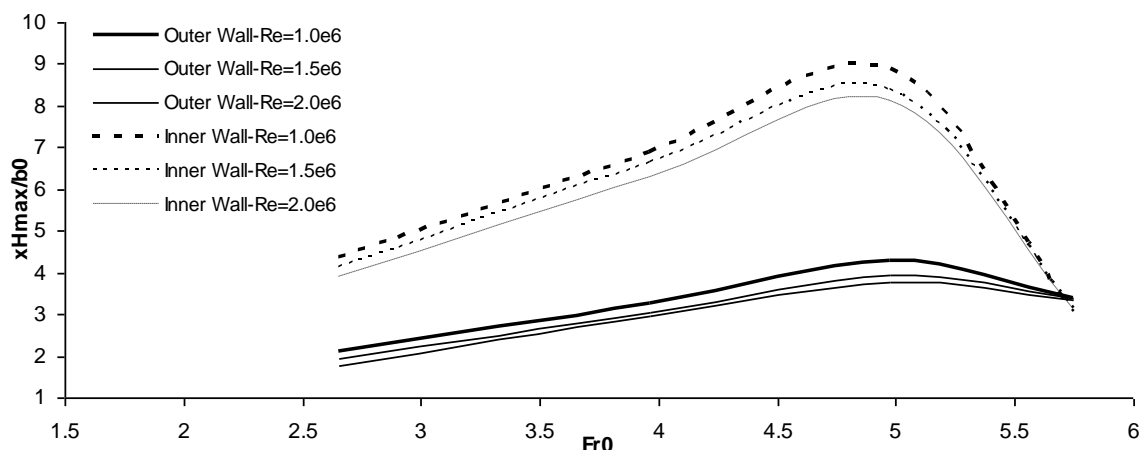
در آزمون‌های مختلف، جریان در کانال اصلی با عددهای فرود $Fr_0 = 2.65, 3.97, 4.98, 5.75$ برقرار شد. عدد رینولدز جریان جانبی $Re = 1.0e6, 1.5e6, 2.0e6$ و زاویه ورودی آن $\theta = 30^\circ, 60^\circ, 90^\circ$ بود. در مجموع ۳۶ آزمون عددی مختلف انجام

گرفت که در همه آنها نسبت دبی جریان کانال اصلی به ورودی جانبی زیر ۱۰٪ بود. برای تعیین حساسیت نتایج به تراکم سلولهای محاسباتی، در اولین آزمون چهار تراکم مختلف از سلولهای محاسباتی در نظر گرفته شد. در نهایت فضای حل به ۸۵۳۲ سلول مثلثی بی سازمان تقسیم شد. در شکل ۷ تغییرات حداکثر ارتفاع موج در دیوارهای داخلی و خارجی کانال برای اعداد رینولدز مختلف جریان جانبی در مقابل عدد فرود جریان کانال اصلی زمانی که جریان جانبی بصورت عمودی به کانال وارد می‌شود ($\theta = 90^\circ$) رسم شده است. مشاهده می‌شود که جریان جانبی باعث افزایش عمق در کانال تا ۸۰٪ عمق جریان می‌شود. نتایج عددی نشان می‌دهد که افزایش عدد رینولدز باعث افزایش ارتفاع امواج می‌گردد. با توجه به نمودارها می‌توان گفت با افزایش عدد فرود جریان تا حدود ۴/۷، ارتفاع امواج کمی کاهش و پس از آن به شدت اضافه می‌شود ضمناً ارتفاع امواج در دیواره داخلی کمتر از دیواره خارجی می‌باشد.



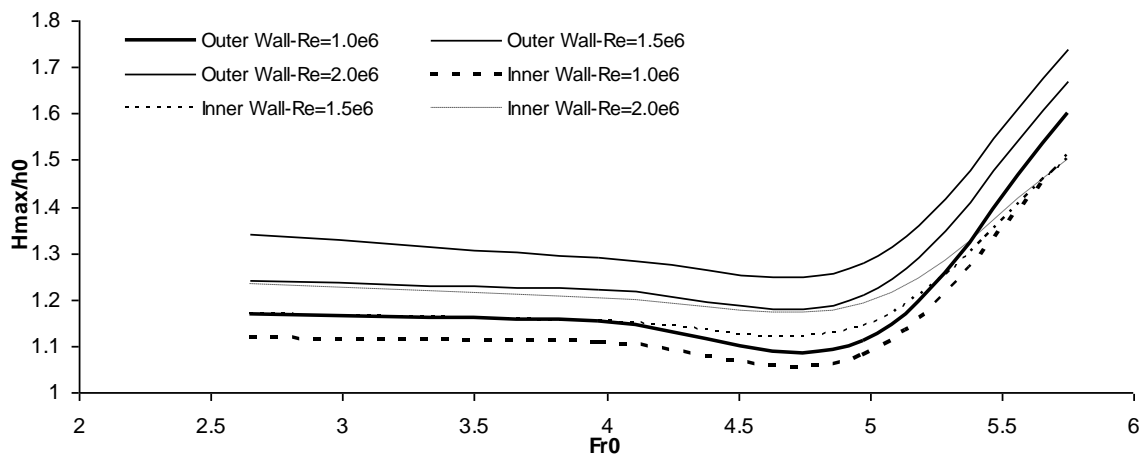
شکل ۷- حداکثر ارتفاع موج در دیوار داخلی و خارجی کانال برای زاویه ورودی $\theta = 90^\circ$

در شکل ۸ فاصله محل ایجاد حداکثر عمق در دیواره های داخلی و خارجی از محل ورود جریان جانبی در مقابل تغییرات عدد رینولدز و فرود نشان داده شده است. ملاحظه می‌گردد که با افزایش عدد فرود تا حدود ۴/۷، امواج ایجاد شده به سمت پایین دست منتقل می‌شوند و پس از آن محل ایجاد بالاترین موج به ورودی جریان جانبی نزدیک می‌شود. ولی به هر حال این فاصله حداکثر تا ۹ برابر عرض کانال خواهد بود. بنابراین افزایش ارتفاع دیواره، حداکثر در این محدوده باید در نظر گرفته شود. با افزایش عدد رینولدز جریان جانبی، حداکثر عمق در فاصله نزدیکتری ایجاد می‌شود.

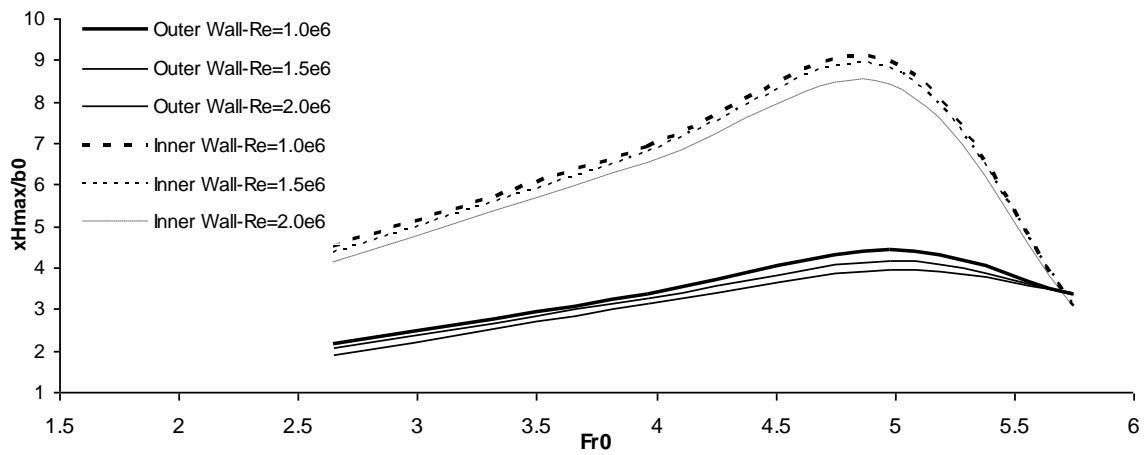


شکل ۸- محل ایجاد حداکثر ارتفاع موج در دیوار داخلی و خارجی کانال برای زاویه ورودی $\theta = 90^\circ$

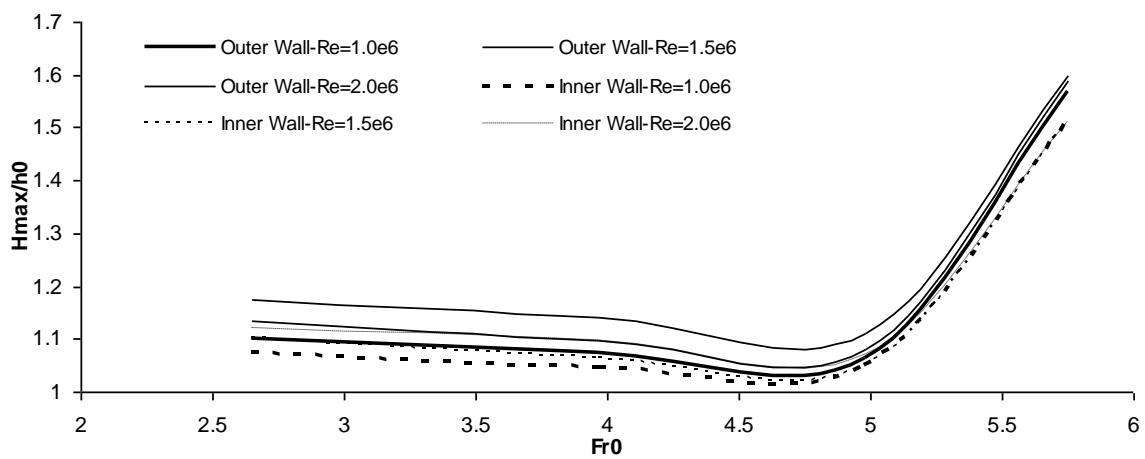
در شکل‌های ۹ تا ۱۲ نتایج مشابهی برای زوایای ورودی مختلف $\theta = 60^\circ$ و $\theta = 30^\circ$ آورده شده است. با کاهش زاویه جریان جانبی ارتفاع امواج کاهش می‌یابد و ارتفاع امواج در دیوارهای داخلی و خارجی به یکدیگر نزدیک می‌شوند. کاهش زاویه جریان جانبی تاثیر ناچیزی در موقعیت ایجاد امواج خواهد داشت و از تاثیر عدد رینولدز در ارتفاع امواج می‌کاهد.



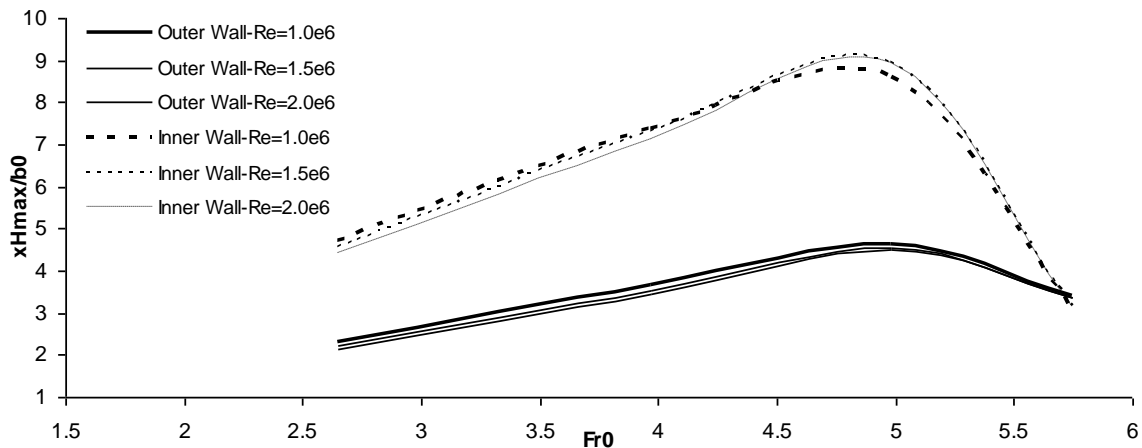
شکل ۹- حداکثر ارتفاع موج در دیوار داخلی و خارجی کانال برای زاویه ورودی $\theta = 60^\circ$



شکل ۱۰- محل ایجاد حداکثر ارتفاع موج در دیوار داخلی و خارجی کانال برای زاویه ورودی $\theta = 60^\circ$



شکل ۱۱- حداکثر ارتفاع موج در دیوار داخلی و خارجی کانال برای زاویه ورودی $\theta = 30^\circ$



شکل ۱۲- محل ایجاد حداکثر ارتفاع موج در دیوار داخلی و خارجی کانال برای زاویه ورودی $\theta = 30^\circ$

نتیجه گیری

در این مقاله افزایش عمق جریان فوق بحرانی ناشی از ورود یک جریان جانبی مستغرق با حل معادلات متوسط عمقی آبهای کم عمق تحلیل شد. برای این کار از روش حجم محدود Roe در شبکه بی سازمان مثلثی شکل استفاده گردید. اثرات شیب و اصطکاک بستر و آشفتگی در جملات چشمه منظور شدند. از مدل تلاطمی $k-\varepsilon$ برای محاسبه اثرات آشفتگی استفاده شد. شرط مرزی ویژه‌ای برای اعمال اثرات جریان جانبی مستغرق پیشنهاد گردید. مقایسه نتایج عددی و آزمایشگاهی صحت مدل عددی را تایید کرد. آزمونهای عددی نشان داد با افزایش عدد فرود جریان در کانال اصلی تا حدود $4/7$ ، ارتفاع امواج ایجاد شده کاهش می‌یابد و پس از آن با افزایش عدد فرود ارتفاع امواج به شدت افزایش می‌یابد. همچنین افزایش عدد رینولدز و زاویه ورود جریان جانبی، باعث افزایش ارتفاع امواج می‌گردد. از طرف دیگر زمانی که زاویه ورود جریان جانبی کاهش پیدا می‌کند اثر تغییرات عدد رینولدز جریان مستغرق ناچیز خواهد بود.

مراجع

- Alamatian, E. and Jaefarzadeh, M.R., (2012), Evaluation of turbulence models in the simulation of oblique standing shock waves in supercritical channel flows. *International Journal of Civil Engineering*, 10(1), pp 61-71.
- Cea, L., Ferreiro, A., Vazquez-Cendon, M.E., and Puertas, J. (2004), Experimental and Numerical Analysis of Solitary Waves Generated by Bed and Boundary Movements. *International Journal of Numerical and Mathematics Fluids*, 46(8), pp 793-813.
- El Kadi Abderrezzak, K., Lewicki, L., Paquier, A., Riviere, N. and Travin, G. (2011), Division of Critical Flow at Three-Branch Open-Channel Intersection. *Journal of Hydraulic Research*, 49(2), 231-238.
- Mignot, E., Riviere, N., Perkins, R. and Paquier, A. (2008). Flow Patterns in a Four-Branch Junction with Supercritical Flow. *Journal Hydraulic Engineering*, 134(6), pp 701-713.
- Minh-Duc, B., Wenka, T., and Rodi, W. (2004), Numerical modeling of Bed Deformation in Laboratory Channels. *Journal Hydraulic Engineering*, 130(9), pp 894-904.
- Stockstill, Richard L., (2007), Lateral Inflow in Supercritical Flow. ERDC/CHL TR-07-10
- Olsen, N.R.B., and Kjellesvig, H.M. (1998), Three-Dimensional Numerical Flow Modeling for Estimation of Spillway Capacity. *Journal Hydraulic Research*, 36(5), pp 775-784.
- Toro, E.F., (2001), Shock-capturing Methods for Free-Surface Shallow Flows. Wiley, Chichester, West Sussex PO19 1UD, England.