

مطالعه عددی شرایط جریان در برخورد با پایه پل

ابراهیم علامتیان، محمد رضا جعفرزاده

دانشجوی دکتری عمران، دانشگاه فردوسی مشهد، عضو هیات علمی موسسه آموزش عالی خاوران

دانشیار گروه عمران، دانشگاه فردوسی مشهد - jafarzad@um.ac.ir

چکیده

در این تحقیق جریان در بر خورد با پایه های یک پل بصورت عددی بررسی می شود. شبیه سازی بر مبنای معادلات ناماندگار متوسط عمقی سنت و نانت می باشد. حل معادلات با روش حجم محدود Roe-TVD در یک شبکه بی سازمان چهار ضلعی انجام می شود. برای مدلسازی اثرات تلاطمی از مدل DASM استفاده می گردد. صحت مدل عددی با نتایج بدست آمده از روابط تجربی و داده های آزمایشگاهی موجود کنترل گردیده است. اثر شکل پایه پل بر میزان حداکثر بالآمدگی آب قبل از پایه پل بصورت عددی بررسی شده و با استفاده از نتایج عددی، ضرایب ثابت مدل تجربی چاربنو و هالی اصلاح گردیده است.

واژه های کلیدی: روش حجم محدود Roe-TVD، شبکه بی سازمان، مدل تلاطمی DASM، رابطه Yarnell

مقدمه

یکی از موانعی که در مسیر جریان آب در کانال ها و رودخانه ها قرار می گیرد و باعث انقباض و انبساط بعدی جریان و بطور کلی تغییراتی در حرکت آب می گردد پایه های پل می باشد. آنچه در پایه های پل مهم می باشد افزایش عمق جریان در بالادست پایه ها است که در اثر کاسته شدن سطح مقطع در محل پل بوجود می آید. این افزایش بر تعیین ارتفاع دیوار حائل اطراف رودخانه موثر است. علاوه بر این، انبساط ناگهانی مقطع جریان در پایین دست، باعث ایجاد جریان گردابه ای می شود که این جریان می تواند بر شسته شدن پی فونداسیون پایه ها تاثیر گذار باشد.

محققان مختلفی بر روی تاثیر پایه های پل بر مشخصات هیدرولیکی جریان و بخصوص میزان بالا آمدگی عمق آب در بالادست پایه ها تحقیق نموده اند، [1-2]. یکی از قدیمی ترین تحقیقات انجام شده توسط یارنل¹ انجام شده است، [3]. در این تحقیق با استفاده از آزمایشات بر روی پایه های پل با شکل های متفاوت و در شرایط مختلف جریان، رابطه تجربی برای تعیین حداکثر عمق بالآمدگی جریان در محل پایه پل ارائه شده است. در آزمایشهای انجام شده توسط یارنل نسبت طول پایه پل به عرض آن 4 بوده است. هرچند که آزمایشهای دیگری که برای نسبت های طول به عرض 7 و 13 انجام شده است نشان داده که می توان از این رابطه با اطمینان استفاده نمود. اخیرا چاربنو² و هالی³ با انجام آزمایشهای مفصلی بر روی پایه های با شکل های متفاوت رابطه یارنل را اصلاح نمودند، [4].

در سالهای اخیر روش حجم محدود کاربرد زیادی در محاسبات عددی سیالات پیدا کرده است. در این روش به علت استفاده از شکل انتگرالی معادلات، می توان از شبکه محاسباتی با اجزای نامنظم استفاده کرد. در این صورت، بخش عمده کار، تعیین شار عمودی عبوری از هر وجه جزء محاسباتی است. در مقاله حاضر از روش حجم محدود Roe-TVD برای شبیه سازی جریان در اطراف پایه پل استفاده می شود. اثرات تلاطم با استفاده از مدل متوسط عمقی تنش جبری (DASM) شبیه سازی می شود. برای اطمینان از صحت کاربرد روش عددی، نتایج با داده های آزمایشگاهی ارائه شده توسط سایر محققین مقایسه می گردد. در انتها با انجام آزمون های عددی، ضرایب ثابت روابط تجربی موجود اصلاح می گردد.

۱- Yarnell

۲- Charbeneau

۳- Holley

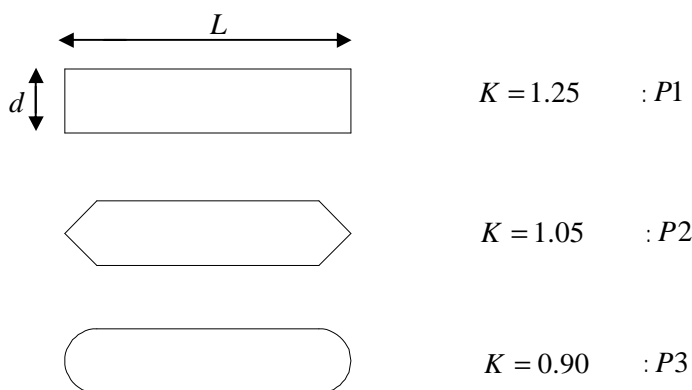
سابقه آزمایشگاهی

از جمله مهمترین فعالیتهای آزمایشگاهی که در رابطه با تاثیر پایه پل بر مشخصات جریان انجام شده است، تحقیقات یارنل می باشد. در این تحقیقات آزمایشات مختلفی بر روی پایه پل با شکل های متفاوت در شرایط هیدرولیکی مختلف انجام شده است. یارنل رابطه زیر را برای تعیین میزان حداکثر بالا آمدگی جریان در اثر برخورد با پایه پل پیشنهاد داد، [3]:

$$\frac{Dy}{y} = K(K + 5Fr^2 - 0.6)(a + 15a^4)Fr^2 \quad (1)$$

$$a = 1 - s$$

که در آن Dy میزان افزایش عمق جریان در بالادست نسبت به عمق پایین دست، y عمق جریان در پایین دست، Fr عدد فرود در پایین دست، s نسبت عرض در محل پایه ها به عرض اولیه کانال و K ضریب شکل پایه پل می باشد که مقدار آن برای پایه ها با شکل های مختلف بصورت زیر پیشنهاد شده است:



شکل (1) ضریب شکل پایه پل در رابطه تجربی یارنل

در سال 2001 چارنو و هالی با انجام آزمایشهای مفصلی بر روی پایه های با شکل های متفاوت رابطه یارنل را بصورت زیر اصلاح نمودند، [4]:

$$\frac{Dy}{y} = bK(K + m5Fr^2 - 0.6)(a + 15a^4)Fr^2 \quad (2)$$

در این رابطه b و m ضرایب ثابت روش هستند که مقدار آنها بر اساس آزمایشات انجام شده برای پایه هایی مشابه آزمایشات یارنل، $b = 0.65$ و $m = 0.69$ می باشد. ایشان برای پایه های با اشکال مختلف ضرایب ثابت متفاوت ارائه نمودند.

معادلات حاکم

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 می شود. 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، انتقال آلودگی و... بکار می روند. شکل دو بعدی و ابقایی این معادلات به صورت زیر می باشد، [5]:

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

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

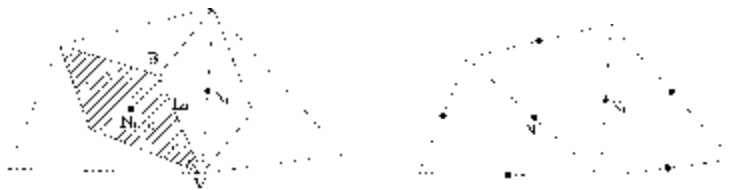
در این رابطه g شتاب جاذبه، W بردار متغیرهای ابقاء شده، q_x و q_y دبی در واحد عرض، F_x و F_y بردارهای فلاکس در جهت‌های x و y و G_k بردار جملات چشمه می باشد؛ G_1 و G_2 به ترتیب جملات چشمه شیب و اصطکاک بستر و G_3 جمله چشمه اثرات تلاطمی است؛ جملات چشمه بصورت زیر بیان می شوند:

$$G_1 = \begin{pmatrix} 0 \\ -gh \frac{\partial Z_b}{\partial x} \\ -gh \frac{\partial Z_b}{\partial y} \end{pmatrix}; \quad G_2 = \begin{pmatrix} 0 \\ -\tau_{b,x} \\ -\tau_{b,y} \end{pmatrix}; \quad G_3 = \begin{pmatrix} 0 \\ \frac{\partial}{\partial x} \left(uh \frac{\partial U_x}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(uh \frac{\partial U_x}{\partial y} \right) \\ \frac{\partial}{\partial x} \left(uh \frac{\partial U_y}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(uh \frac{\partial U_y}{\partial y} \right) \end{pmatrix} \quad (4)$$

که در آن U_x و U_y سرعت جریان در جهت محورهای x و y ، u لزجت گردابه ای، τ_b تنش برشی در بستر و Z_b تراز بستر کانال در مرکز سلول می باشد.

حل عددی معادلات

از آنجا که حل عددی معادلات آبهای کم عمق با استفاده از روش های حجم محدود اغلب در محیط‌هایی با هندسه بسیار پیچیده مانند رودخانه ها بکار می‌رود به منظور جدا سازی قلمرو حل از اجزا بی‌سازمان استفاده می شود؛ این اجزا بخوبی می‌توانند خود را با مرزها هماهنگ کنند. روش‌های مختلفی برای تولید سلولهای بی‌سازمان وجود دارد که در اغلب آنها فضای حل به اجزای مثلثی تقسیم بندی می‌شود. در این روش ها مرکز سلول مثلثی مبنای محاسبات عددی قرار می گیرد، (حجم کنترل مثلثی). برمودز و همکاران روش دیگری را برای تولید سلول های بی‌سازمان پیشنهاد کردند، [6]. در این راهکار ابتدا محیط حل به تعدادی مثلث تقسیم می شود. وسط هر ضلع مثلث به عنوان مرکز یک سلول محاسباتی چهار گوش در نظر گرفته می شود؛ که دو گوشه آن ابتدا و انتهای ضلع سلول مثلثی و دو گوشه دیگر آن مراکز دو سلول مثلثی اطراف ضلع مورد نظر می باشد، شکل (2). سلول های محاسباتی در مرزهای فضای حل، مثلثی و در نواحی میانی چهار ضلعی هستند. این سلولها بنام سلولهای لبه‌ای¹ نامیده می‌شوند. با این روش در هندسه های پیچیده بردارهای عمودی بر هر ضلع به سادگی محاسبه می شود و شرط مرزی در شلست بخوبی تعریف می گردد؛ زیرا نقاط سلولهای مرزی بر مرزها قرار می گیرند. در صورتیکه معادلات (3) با یک گام میانی در زمان جداسازی شوند دقت روش عددی به مرتبه دوم زمانی ارتقا پیدا می کند. همچنین برای جدا سازی معادلات در مکان از روش Roe-TVD بر سلول های بی‌سازمان چهار ضلعی استفاده می شود و برای رسیدن به دقت مرتبه دوم در مکان، محدود کننده شیب چند بعدی بکار می رود. جزئیات و روابط استفاده شده در مقاله دیگری بوسیله مولفین توضیح داده شده است، [7].



شکل (2) جزئیات سلول های محاسباتی لبه ای

مدلسازی جملات چشمه

در این تحقیق کانال بدون شیب در نظر گرفته شده است؛ در نتیجه $G_1 \equiv 0$ می باشد. جمله چشمه اصطکاک بستر (G_2 در رابطه (4)) بصورت زیر تعریف می شود:

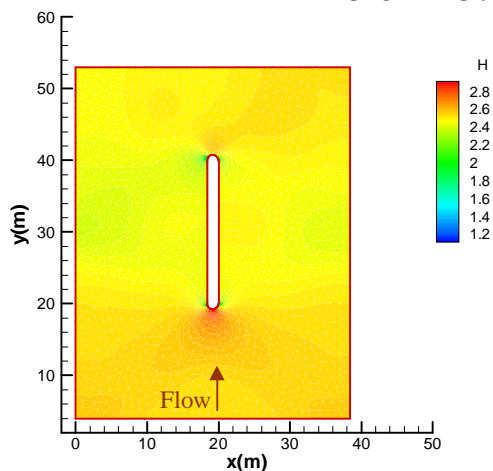
$$G_2 = \begin{pmatrix} 0 \\ -c_f U_x |U_x| \\ -c_f U_y |U_y| \end{pmatrix}; \quad c_f = \frac{gn^2}{h^{1/3}} \quad (5)$$

که در آن c_f ضریب اصطکاک بستر و n ضریب زبری مانینگ می باشد.

مدل های تلاطمی لزجت گردابه ای بر اساس فرضیه بوزینسک تعریف می شوند. این فرضیه رابطه بین تنش رینولدز و گرادیان سرعت اصلی جریان را بیان می کند. راهکار دیگر برای مدلسازی اثرات تلاطم استفاده از معادلات جبری برای بدست آوردن تنشهای رینولدز می باشد. با وجود اینکه سیستم معادلات این روش نسبت به مدل های لزجت گردابه ای ساده تر به نظر میرسد، معمولاً پایداری آن ضعیف تر می باشد. در این مقاله از مدل متوسط عمقی تنش جبری برای بدست آوردن تنشهای رینولدز استفاده می شود. جزئیات و روابط مورد استفاده بوسیله سیا و همکاران ذکر شده است، [5].

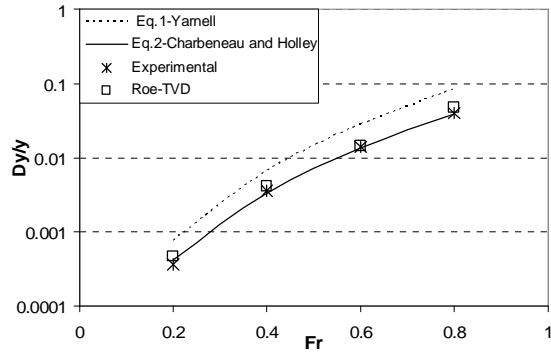
نتایج عددی

برای صحت سنجی مدل عددی ابتدا یک پایه پل مستطیلی با عرض 16.50cm و طول 91.40cm که دو انتهای آن بصورت نیم دایره می باشد مدلسازی می گردد. در ورودی و خروجی شرط دبی ثابت اعمال گردید. برای اعمال شرایط مرزی جریان در مرزهای جامد از تئوری مشخصات استفاده شد، [8]. برای تضمین پایداری روش عددی عدد کورانت $Cr = 0.4$ فرض گردید. در این آزمون $a = 0.0416$ بوده است. فضای حل به 4177 سلول مثلثی بی سازمان تقسیم گردید. در این حالت، تعداد سلول های محاسباتی چهار ضلعی لبه ای برابر 6409 سلول می باشد. در شکل (3) پلان فضای محاسباتی به همراه منحنی سایه عمق جریان نشان داده شده است. بالا آمدگی جریان در قبل از پایه پل در شکل بخوبی مشخص می باشد.



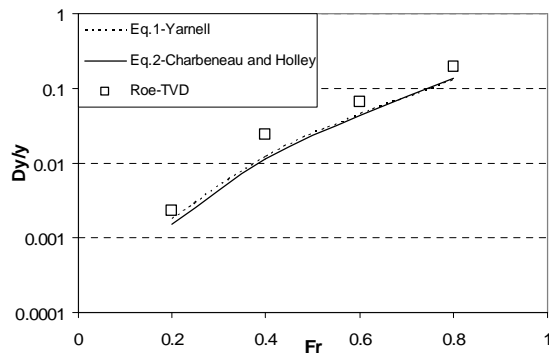
شکل (3) پلان فضای محاسباتی به همراه منحنی سایه عمق جریان

در شکل (4) نسبت حداکثر بالا آمدگی جریان قبل از پایه به عمق پایین دست برای جریان با اعداد فرود مختلف و روش های مختلف مقایسه شده است. مشاهده می شود که نتایج مدل عددی اعمال شده، با داده های آزمایشگاهی و همچنین داده های بدست آمده از رابطه تجربی چارنو و هالی همخوانی مناسبی دارد و مدل عددی بخوبی توانسته است شرایط جریان را شبیه سازی کند. همچنین ملاحظه می گردد معادله تجربی ارائه شده توسط یارنل در تمامی حالات عمق بالا آمدگی جریان را بیش از مقدار آزمایشگاهی برآورد می کند.

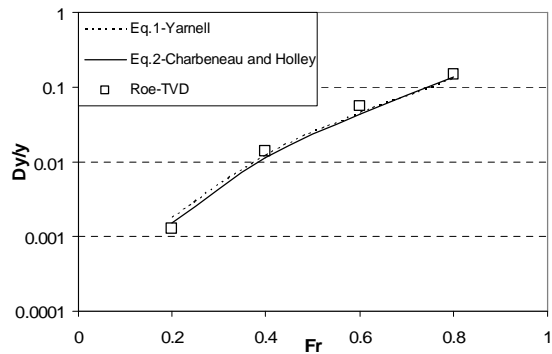


شکل (4) مقایسه نتایج عددی با اطلاعات آزمایشگاهی و روابط تجربی

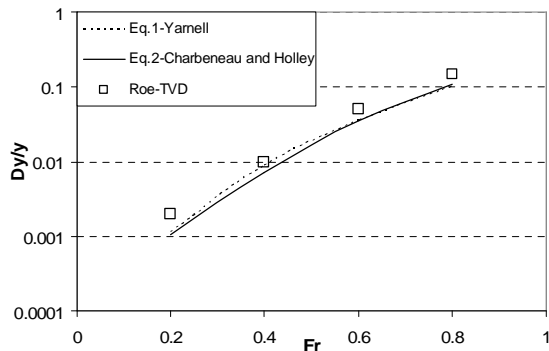
آزمایشات انجام شده بوسیله چاربنو و هالی برای سه نوع پایه انجام شده است که شامل دو پایه دایره ای با قطر های 8.9cm و 16.5cm و همچنین یک پایه مستطیلی که مشخصات آن در فوق آمده است می باشند. بر اساس این آزمایشها ایشان رابطه تجربی یارنل را اصلاح نمودند، (رابطه (2)). مقادیر ضرایب ثابت b و m تابعی از شکل و مشخصات پایه می باشد. با توجه به اینکه نتایج مدل عددی با داده های آزمایشگاهی موجود همخوانی مناسبی نشان می دهد با استفاده از آزمون های عددی این ضرایب برای پایه ها با اشکال مختلف محاسبه می گردد. آزمون های عددی انجام شده برای سه شکل پایه پل که در شکل (1) نشان داده شده است انجام می شود. در هر سه شکل از پایه ها برای سه نسبت طول به عرض 2، 10 و 20 و همچنین چهار عدد فرود 0.2، 0.4، 0.6 و 0.8 نتایج عددی بدست آمد، (در مجموع 36 آزمون عددی انجام شد). در شکل (5) تا (10) نسبت حداکثر بالا آمدگی عمق جریان قبل از پایه به عمق پایین دست برای جریان با اعداد فرود مختلف برای پایه های مختلف و نسبت های طول به عرض 2 و 20 رسم شده است. در این شکل ها نتایج بدست آمده از رابطه تجربی یارنل و چاربنو و هالی نیز نمایش داده شده است. قابل توجه اینکه در این آزمونها $a = 0.0416$ بوده است.



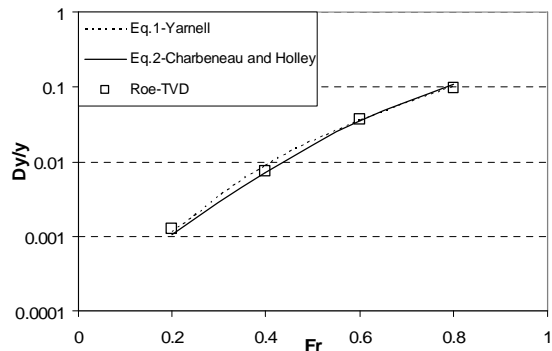
شکل (6) مقایسه نتایج عددی با داده های تجربی $P1$ ، $L/d = 20$



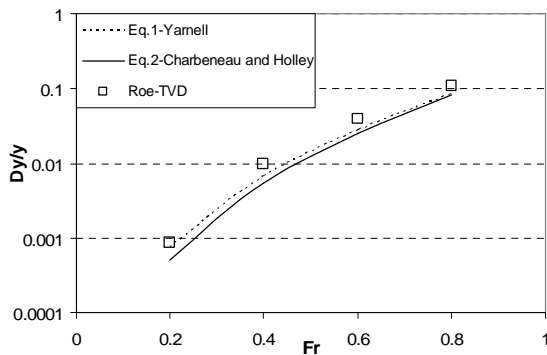
شکل (5) مقایسه نتایج عددی با داده های تجربی $P1$ ، $L/d = 2$



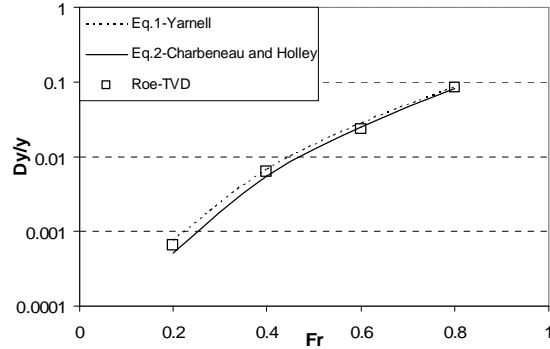
شکل (8) مقایسه نتایج عددی با داده های تجربی $P2$ ، $L/d = 20$



شکل (7) مقایسه نتایج عددی با داده های تجربی $P2$ ، $L/d = 2$



شکل (10) مقایسه نتایج عددی با داده‌های تجربی $P3$ ، $L/d = 20$



شکل (9) مقایسه نتایج عددی با داده‌های تجربی $P3$ ، $L/d = 2$

مشاهده می‌گردد که برای نسبت طول به عرض 2 نتایج مدل عددی با داده‌های رابطه تجربی یارنل و همچنین رابطه تجربی چاربنو و هالی همخوانی مناسبی دارد. این عملکرد تقریباً برای نسبت طول به عرض 10 نیز صادق است؛ ولی برای نسبت طول به عرض 20 اختلاف بین نتایج مدل عددی و روابط تجربی قابل توجه است. می‌توان با تغییر ضرایب رابطه تجربی چاربنو و هالی (و یا رابطه تجربی یارنل) نتایج رابطه تجربی را به داده‌های مدل عددی نزدیک کرد. برای این کار آزمون‌های عددی برای حالت $a = 0.2$ نیز اعمال گردید. سپس با استفاده از نتایج بدست آمده ضرایب b و m در رابطه تجربی چاربنو و هالی اصلاح شد. ضرایب پیشنهادی در جدول (1) برای سه شکل پایه مختلف آمده است:

جدول (1) مقادیر ضرایب ثابت پیشنهادی برای رابطه چاربنو و هالی در پایه‌های مختلف پل

$L/d=20$		$L/d=10$		$L/d=2$		شکل پایه
b	m	b	m	b	m	
1.11	0.98	1.01	1.03	0.98	0.96	$P1$
1.15	1.27	1.09	1.12	0.96	0.99	$P2$
1.19	1.14	1.02	1.08	0.98	0.98	$P3$

با ضرایب پیشنهادی در جدول (1) بهترین تطابق بین نتایج عددی و نتایج رابطه چاربنو و هالی بدست می‌آید. مشاهده می‌شود ضرایب پیشنهادی برای $L/d=2$ تقریباً برابر واحد است که این نشان‌دهنده آن است که رابطه یارنل می‌تواند با اطمینان استفاده شود.

نتیجه‌گیری

در این مقاله میزان بالا آمدگی جریان در برخورد با پایه پل با شکل‌های مختلف بصورت عددی بررسی شد. مدل سازی بر اساس معادلات نامانداگر متوسط گرفته شده در عمق آبهای کم عمق انجام گرفت. برای این کار از روش حجم محدود Roe-TVD در شبکه بی‌سازمان چهار ضلعی استفاده شد. به منظور حذف نوسانات در مناطقی که گرادیان متغیرها زیاد بودند از توابع محدود کننده شیب پیشرفته استفاده گردید. اثرات اصطکاک بستر و تلاطم در جملات چشمه منظور شدند. جمله اصطکاک بستر به کمک رابطه مانینگ و جمله اثرات تلاطمی با مدل (DASM) شبیه سازی شد. به منظور کنترل نتایج عددی از داده‌های آزمایشگاهی موجود استفاده شد. با استفاده از آزمون‌های عددی انجام شده برای پایه پل با اشکال و ابعاد مختلف ضرایب معادله تجربی چاربنو و هالی اصلاح گردید.

منابع

- [1] Martin-Vide, J.P. and Prio J.M. (2005). "Backwater of arch bridges under free and submerged conditions." Journal of Hydraulic Research, Vol.43, No. 5, PP. 515–521
- [2] Tracy, H.J. and Carter, R.W. (1955). "Backwater Effects of Open-channel Constrictions." Trans. ASCE Vol.120, PP. 993–1006.
- [3] Yarnell, D.L. (1934). "Bridge Piers as Channel Obstructions." Technical Bulletin No. 442. US Department of Agriculture, Washington, DC.

- [4] Charbeneau, R.J and Holley E.H. (2001). " Backwater effects of bridge piers in subcritical flow." Center for transportation research the university of texas at austin, Project Summary Report 1805-S.
- [5] Cea, L., Jerónimo, P. and Vazquez-Cendon, M.E. (2007). " Depth Averaged Modelling of Turbulent Shallow Water Flow With Wet-Dry Fronts." Arch Comput Methods Eng., Vol.14, PP. 303–341.
- [6] Bermudez, A., Dervieux, A., Desideri, J.A., and Vazquez-Cendon, M.E. (1998). " Upwind Schemes For the Two-Dimensional Shallow Water Equations With Variable Depth Using Unstructured Meshes." Comput. Methods Appl. Mech. Engineering, Vol.155, PP. 49-72.
- [7] علامتیان، ا. و جعفرزاده، م. ر. (1387). "شبيه سازی امواج ایستا، با استفاده از روشهای حجم محدود و تفاضل محدود"، هفتمین کنفرانس هیدرولیک ایران، تهران، 23-21 آبان.
- [8] Yoon, T. H. and Kang, S. (2004), " Finite Volume Model for Two-Dimensional Shallow Water Flows on Unstructured Grids." Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 130 No. 7, pp 678-688.