

## بررسی پروفیل سطح آزاد جریان پایدار در اطراف پایه‌های استوانه‌ای با مدل سازی عددی

یوسف حسن‌زاده<sup>۱\*</sup>، حبیب حکیم‌زاده<sup>۲</sup>، حامد سرورام<sup>۳</sup>، هادی دل‌افروز<sup>۴</sup>

۱- استاد دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز

۲- دانشیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی سهند، تبریز

۳- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی عمران، دانشگاه تبریز

۴- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی عمران، دانشگاه تبریز

\* تبریز، دانشگاه تبریز، کد پستی ۵۱۶۶۶۱۶۴۷۱

yhassanzadeh@tabrizu.ac.ir

**چکیده-** در این مقاله مدلی عددی برای بررسی الگوی تغییرات پروفیل سطح آزاد جریان در اطراف پایه استوانه‌ای ارائه شده است. برای گسسته‌سازی معادلات انتگرال‌گیری شده در عمق از روش تفاضل محدود با شبکه‌بندی غیریکنواخت استفاده شده و الگوریتم عددی صریح مک کورمک برای حل معادلات تفاضلی به کار رفته است. برای صحت‌سنجی مدل، نتایج عددی با داده‌های آزمایشگاهی سایر پژوهشگران در این زمینه مقایسه شده است. نتایج نشان می‌دهد که پروفیل سطح آزاد جریان اطراف پایه، به هر دو پارامتر عدد فرود و عمق نسبی جریان وابسته بوده و مقایسه نتایج مدل عددی و آزمایشگاهی نشان می‌دهد که معادلات انتگرال‌گیری شده در عمق، در اعداد فرود پایین نتایج مطلوبی را برای پروفیل سطح آزاد جریان ارائه می‌دهد، اما با افزایش عدد فرود، از دقت این نتایج به طور قابل ملاحظه‌ای کاسته می‌شود.

**کلید واژگان:** پایه استوانه‌ای، روش تفاضل محدود، روش مک کورمک، عدد فرود.

### ۱- مقدمه

شناخت پروفیل سطح آزاد جریان اطراف پایه علاوه بر اینکه کارشناسان را در تخمین صحیح آبشستگی اطراف پایه کمک می‌کند؛ اطلاعات مناسبی را برای پیش‌بینی میزان پس‌زدگی حاصل از انسداد جریان در اختیار قرار می‌دهد.

مطالعات پژوهشگران مختلف نشان می‌دهد که الگوی آبشستگی در اطراف پایه‌های پل به طور قابل ملاحظه‌ای به پارامترهای جریان اطراف پایه و حرکت مواد رسوبی، داخل و خارج گودال آبشستگی وابسته است. از این رو

### ۳- مدل فیزیکی

برای صحت‌سنجی مدل عددی، از نتایج آزمایشگاهی Ting et al. (2003) استفاده شده است. آزمایش‌ها در کانالی به طول  $7/62m$  و عرض  $0/61m$  و عمق  $0/61m$  با بستر افقی انجام شده است. در تمامی آزمایش‌ها ستونی استوانه‌ای شکل با قطر  $60mm$  به‌طور عمودی در بستری شیشه‌ای قرار گرفته است. آزمایش‌ها دامنه وسیعی از جریان زیر بحرانی را پوشش می‌دهد، اما به دلیل محدودیت در دبی و شیب بستر، جریان فوق بحرانی بررسی نشده است.

تمامی آزمایش‌ها در شرایط یکنواخت و تغییرات تدریجی جریان انجام شده و عدد فرود ( $Fr$ )، عمق نسبی آب ( $h/d$ ) ( $h$  عمق جریان نزدیک شونده به پایه و  $d$  قطر پایه است) و سرعت متوسط‌گیری شده در عمق اندازه‌گیری شده است.

با توجه به آزمایش‌های انجام شده، پروفیل سرعت جریان نزدیک شونده به استوانه به‌شکل قابل قبولی از پروفیل لگاریتمی سرعت پیروی می‌کند؛ از این‌رو سرعت جریان در  $60$  درصد عمق جریان زیر سطح آزاد، به‌عنوان سرعت متوسط‌گیری شده در عمق در نظر گرفته شده است (Johnson, 2002).

Ting و Johnson در سال  $2003$  به‌منظور بررسی تغییرات پروفیل سطح آزاد جریان، در  $24$  آزمایش، برای مقادیر مختلف عدد فرود و عمق نسبی، ارتفاع سطح آزاد جریان را در سه نقطه صفر (بالادست پایه)،  $90$  (جانب پایه) و  $180$  درجه (پایین‌دست پایه)، همان‌گونه که در شکل ۱ نشان داده شده، اندازه‌گیری کرده‌اند. در نقطه صفر درجه اندازه‌گیری ارتفاع جریان بر روی موج کم‌انرژی و در نقاط  $90$  و  $180$  درجه در فاصله تقریبی  $1$  cm از سطح پایه انجام شده است.

پژوهشگران از مدل‌های عددی مختلفی برای بررسی الگوی جریان اطراف پایه پل استفاده کرده‌اند. محققانی مانند Yuhi et al. (2000)، Recharson et al. (1998) با برنامه‌نویسی عددی و حل معادلات سه‌بعدی ناویر استوکس، به بررسی الگوی جریان اطراف پایه، بعد و قبل از تشکیل گودال آبشستگی پرداخته و محققانی مانند Kamil et al. (2002)، Salaheldin et al. (2004) استفاده از نرم‌افزارهای از پیش آماده‌ای مانند FLUENT این موضوع را بررسی کرده‌اند. یکی از اهداف پژوهش حاضر بررسی این موضوع است که برای چه دامنه‌ای از پارامترهای جریان، استفاده از معادلات آبهای کم‌عمق برای مدل‌سازی الگوی جریان در اطراف پایه استوانه‌ای مناسب است. همچنین تغییرات پروفیل سطح آزاد جریان اطراف پایه استوانه‌ای به‌منظور شناخت بهتر رفتار جریان در اطراف پایه مطالعه و بررسی شده است.

### ۲- مدل عددی

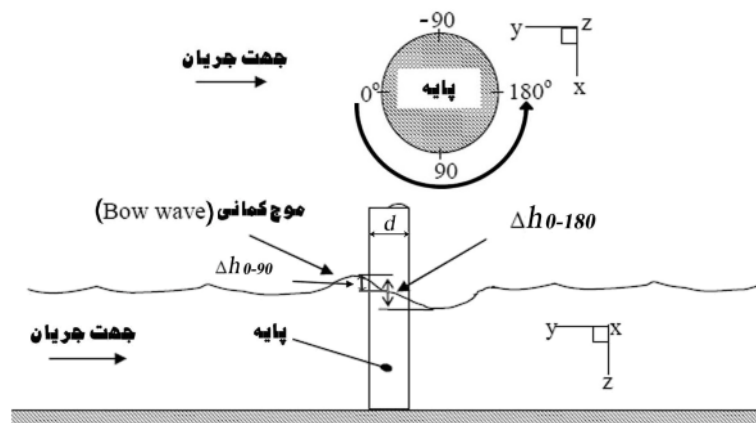
در این پژوهش به‌منظور مدل‌سازی از معادلات متوسط‌گیری شده در عمق پیوستگی و ممتوم استفاده شده است. این دستگاه معادلات دیفرانسیل با مشتقات نسبی، معادلات دینامیک جریان آبهای کم‌عمق را تشکیل می‌دهند که با فرض ناچیز بودن سرعت جریان در راستای عمود، هیدرواستاتیکی بودن توزیع فشار و کم بودن شیب بستر به‌دست می‌آید.

در این بررسی به‌منظور حل عددی معادلات آبهای کم‌عمق با استفاده از الگوریتم صریح مک کورمک، از روش تفاضل محدود پیشرو و پسرو استفاده شده و شبکه‌بندی غیریکنواخت به مدل اعمال شده است. شرایط مرزی نیز به‌صورت غیرلغزشی بر روی مرز پایه و دیوار به‌کار رفته است (سرورام،  $1385$ ).

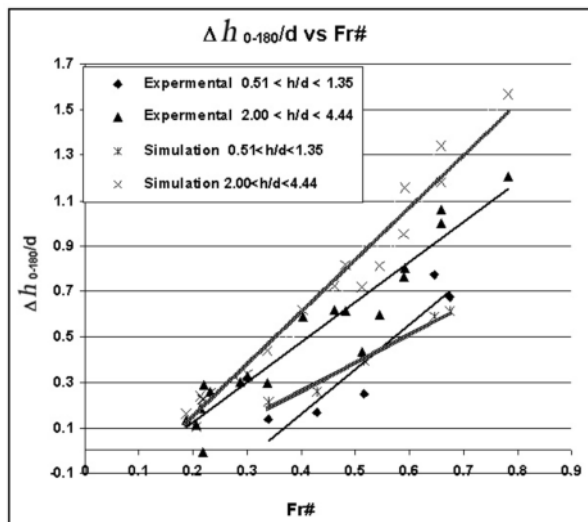
#### ۴- صحت‌سنجی مدل عددی

شکل ۲ تأثیر عدد فرود را بر تغییرات عمق نسبی جریان از صفر به ۹۰ و ۱۸۰ درجه نشان می‌دهد. در نتایج آزمایشگاهی و عددی با تغییر شرایط از جریان نزدیک شونده زیر بحرانی با عدد فرود پایین ( $Fr \approx 0.1$ ) به جریان بحرانی ( $Fr \approx 1$ ) تغییرات در پروفیل سطح آزاد

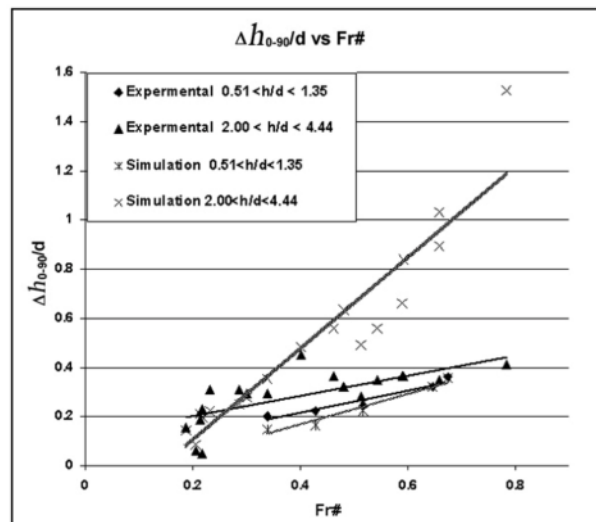
جریان افزایش می‌یابد. این نمودارها به‌وضوح تأثیر عدد فرود را بر تغییرات پروفیل سطح آزاد جریان نشان می‌دهد. در این نمودارها، به‌منظور بی‌بعد کردن داده‌ها، تغییرات ارتفاع بر قطر پایه تقسیم شده است. جزئیات بیشتر مدل عددی تهیه شده برای اختصار در اینجا آورده نشده است.



شکل ۱ جریان اطراف پایه پل



(ب)



(الف)

شکل ۲ مقایسه نتایج آزمایشگاهی و مدل عددی تغییرات پروفیل سطح آزاد جریان برای مقادیر مختلف  $h/d$

الف) بین زاویه ۰ و ۹۰ درجه و ب) بین زاویه ۰ و ۱۸۰ درجه

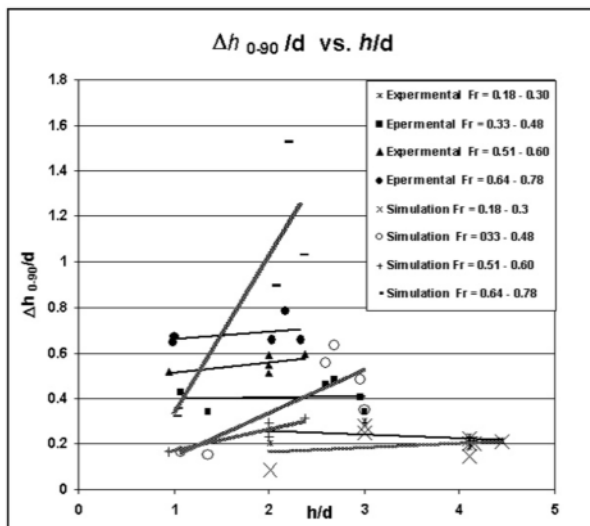
به عنوان جمع بندی نتایج بالا می توان گفت که پروفیل سطح آزاد جریان در اطراف پایه به هر دو پارامتر عدد فرود و عمق نسبی جریان وابسته است، به طوری که با افزایش عدد فرود در عمق ثابت جریان، تغییرات پروفیل سطح آزاد جریان افزایش یافته و موج کمانی با ارتفاع بیشتری ایجاد می شود. همچنین در مقادیر بالای عدد فرود با افزایش  $h/d$  تغییرات پروفیل سطح آزاد جریان افزایش می یابد.

همچنین در شکل ۴ نمونه ای از پروفیل طولی سطح آزاد جریان در حالتی که عدد فرود جریان نزدیک شونده به پایه برابر  $0.2$  باشد ارائه شده است. هم چنان که مشاهده می شود مدل عددی در عدد فرود پایین جریان نزدیک شونده به پایه، تطابق خوبی با نتایج مدل آزمایشگاهی داشته و مطابق اطلاعات قبلی موجود در این زمینه، بالا آمدگی موج کمانی در جلو و تورفتگی پروفیل سطح آزاد در پشت پایه به وضوح قابل مشاهده است.

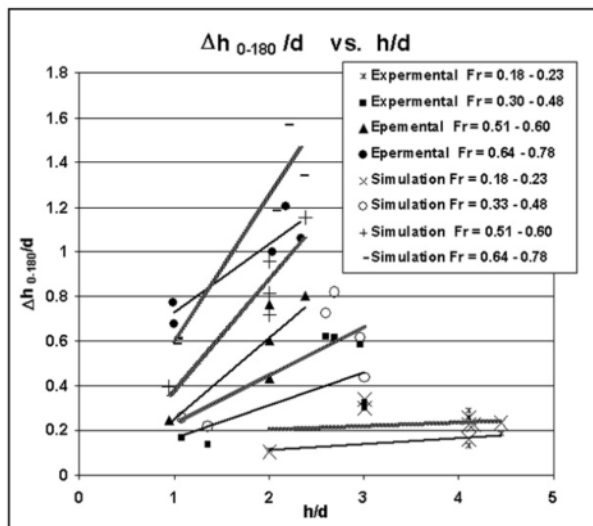
در شکل ۲ همچنین تعدادی از نقاط در نتایج آزمایشگاهی و عددی برای  $2 < h/d < 4.4$  تمایز آشکاری را نسبت به سایر نقاط از خود نشان می دهند.

در واقع روند تغییر پروفیل سطح آزاد جریان اطراف پایه برای عمقهای نسبی بزرگتر از ۲ متفاوت بوده و نمی توان در تمامی نقاط، افزایش تغییرات پروفیل سطح آزاد جریان را با زیاد شدن عدد فرود مشاهده کرد. اما در مجموع می توان گفت که برای مقادیر کوچک  $0.5 < h/d < 1.35$  در مقایسه با  $2 < h/d$ ، با افزایش عدد فرود، مقادیر از  $\Delta h/d$  کوچکتر می شود.

روش دیگری برای مشاهده تأثیر عدد فرود و عمق نسبی جریان بر پروفیل سطح آزاد جریان اطراف پایه، ترسیم نمودار  $\Delta h/d$  نسبت به  $h/d$  برای دامنه های مختلف عدد فرود است، که در شکل ۳ نشان داده شده است. نتایج نشان می دهد که در مقادیر بالای عدد فرود، تغییرات  $h/d$  تأثیر بیشتری بر پروفیل سطح آزاد جریان در اطراف پایه دارد.



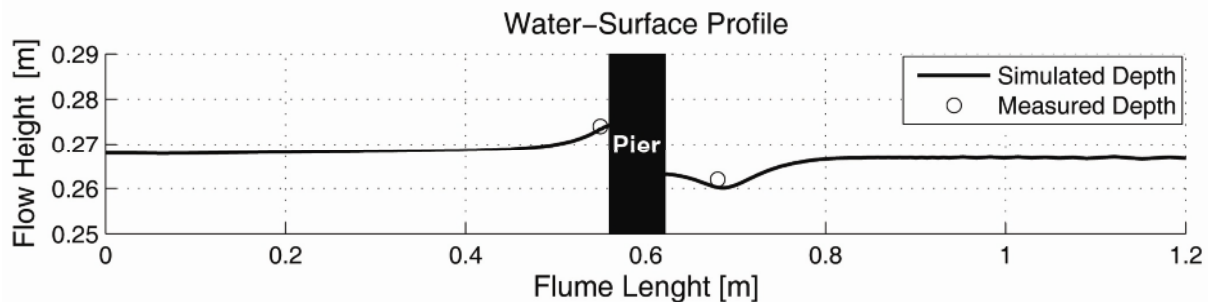
(ب)



(الف)

شکل ۳ مقایسه نتایج آزمایشگاهی و مدل عددی تغییرات پروفیل سطح آزاد جریان برای اعداد فرود مختلف

(الف) بین زاویه  $h$  و  $180^\circ$  درجه و (ب) بین زاویه  $0^\circ$  و  $90^\circ$  درجه



شکل ۴ نمونه‌ای از پروفیل طولی سطح آزاد جریان در اطراف پایه برای حالتی که عمق و سرعت جریان نزدیک شونده به پایه به ترتیب برابر ۰/۲۶۷ m و ۰/۳۴۵ m/s عدد فرود جریان نزدیک شونده برابر ۰/۲ باشد.

یافته و این افزایش خطا از تابعی نمایی پیروی می‌کند (شکل ۵-د). به نظر می‌رسد که دلیل این عدم تطابق در مقادیر بزرگ عدد فرود جریان را می‌توان در دو عامل جستجو کرد: نخست این که با افزایش عدد فرود، فرضیات حاکم بر معادلات متوسط‌گیری شده در عمق (هیدرواستاتیکی بودن فشار و ناچیز فرض کردن جریان رو به پایین) با خطا همراه است، از این رو از دقت نتایج عددی به دست آمده کاسته می‌شود؛ دوم اینکه براساس تجربیات (Ting و Johnson، ۲۰۰۳) با افزایش سرعت جریان به دلیل نوسانهای بیشتر در سطح آب، دقت اندازه‌گیری‌های پروفیل سطح آزاد جریان نیز کم می‌شود.

### ۵- نتیجه‌گیری

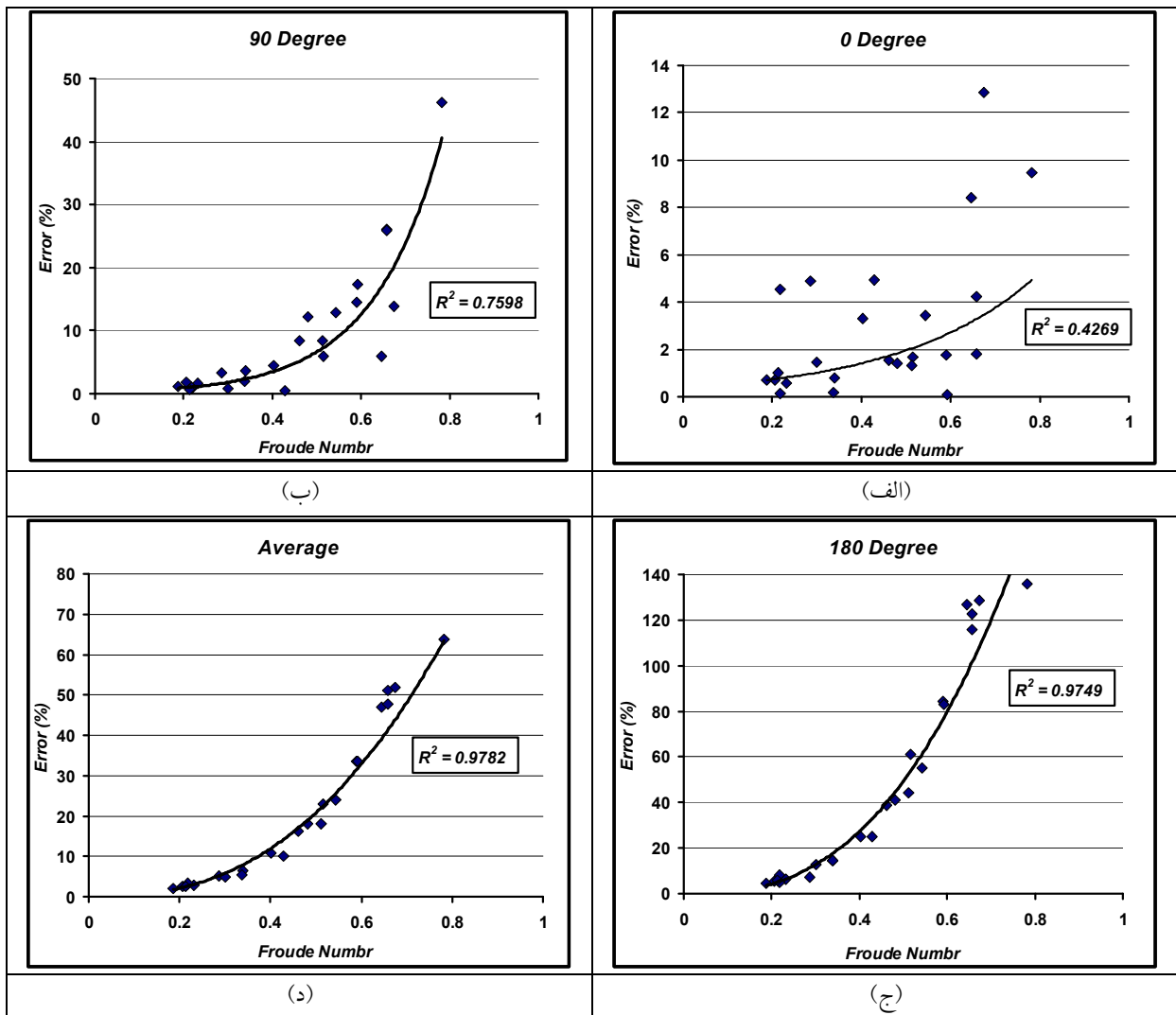
نتایج آزمایشگاهی و عددی نشان داد که پروفیل سطح آزاد جریان در اطراف پایه به هر دو پارامتر عدد فرود و عمق نسبی جریان وابسته است، به طوری که با افزایش عدد فرود در عمق ثابت جریان، تغییرات پروفیل سطح آزاد جریان افزایش یافته و موج کمانی با ارتفاع بیشتری ایجاد می‌شود.

همچنین در مقادیر بالای عدد فرود با افزایش  $h/d$  تغییرات در پروفیل سطح آزاد جریان افزایش می‌یابد.

به منظور بررسی دقت مدل عددی، خطای مدل عددی در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی در شکل ۵ ارائه شده است. از روی شکل ۵-الف می‌توان مشاهده کرد که مدل عددی، ارتفاع جریان را در جلوی پایه (نقطه صفر درجه) با خطای کمی پیش‌بینی کرده و با افزایش عدد فرود، روند خاصی در خطاها مشاهده نمی‌شود. اما در پهلو (نقطه ۹۰ درجه) و پشت (نقطه ۱۸۰ درجه) پایه با افزایش عدد فرود خطای پیش‌بینی ارتفاع سطح آزاد جریان توسط مدل عددی به صورت نمایی افزایش می‌یابد (شکل ۵-ب و ج) و این افزایش در پشت پایه با شدت بیشتری مشاهده می‌شود.

همچنان که در شکل ۵ مشاهده می‌شود، به دلیل وجود آشفتگی‌های بیشتری در پشت نسبت به جلوی پایه و از آنجا که مدل آشفتگی نوع جبری بکار رفته و نیز مدل کامل و دقیقی برای معادلات آبهای کم عمق استفاده نشده، خطای پیش‌بینی مدل عددی با حرکت از جلو به سمت پشت پایه به طور قابل توجهی افزایش می‌یابد.

در مجموع از مقایسه نتایج عددی و آزمایشگاهی می‌توان نتیجه گرفت که در عدد فرود پایین، تطابق نتایج آزمایشگاهی و عددی مناسب بوده و مدل عددی، پروفیل سطح آزاد جریان را با خطای کمی پیش‌بینی می‌کند، اما با افزایش عدد فرود خطای پیش‌بینی مدل عددی افزایش



شکل ۵ خطای پیشبینی مدل عددی برای پروفیل سطح آزاد جریان در اطراف پایه استوانه‌ای در نقاط الف) صفر درجه {جلوی پایه}، ب) ۹۰ درجه {پهلوی پایه}، ج) ۱۸۰ درجه {پشت پایه}، د) میانگین سه نقطه، برای مقادیر مختلف عدد فرود

عدد فرود بالا است. همچنین به دلیل استفاده نکردن از مدل آشفتگی دقیق در معادلات حاکم، با حرکت از جلو به سمت پشت پایه و افزایش میزان آشفتگی، از دقت مدل به طور قابل توجهی کاسته می‌شود. سرانجام با توجه به نتایج این تحقیق، پیشنهاد می‌شود که به منظور دستیابی به نتایجی قابل قبول، در جریانهایی با

همچنین مقایسه نتایج آزمایشگاهی و مدل عددی نشان داد که در عدد فرود پایین، مدل عددی تطابق خوبی با نتایج آزمایشگاهی داشته، اما با افزایش عدد فرود جریان، خطای پیش بینی پروفیل سطح آزاد جریان در اطراف پایه توسط مدل عددی به طور نمایی افزایش می‌یابد که دلیل اصلی آن عدم تطابق فرضیات معادلات آبهای کم عمق در

Anderson, J. D. (1995). "Computational fluid dynamic, the basics with applications", McGraw Hill Book Company.

K. R. Johnson and F. C.K. Ting (2003). "Measurements of water surface profile and velocity field at a circular pier", Journal of Engineering Mechanics, ASCE, Vol. 129, No. 5, pp. 502-512.

K. R. Johnson (2002). "Measurements of velocity field at a circular cylinder in open channel flow by Particle Image Velocimetry", A thesis for the Master of Science Major in Civil & Environmental Engineering, South Dakota State University.

Kamil, H. M. and Karim, O. (2002). "Simulation of flow around pier" Journal of Hyhraulic Research", Vol. 40, No. 2, pp. 161-174.

Richardson, E. and Panchang, G. (1998). "Three-dimensional simulation of scour-inducing flow at bridge piers", Journal of Hydraulic Research, Vol. 124, No. 5, pp. 530-540.

Salaheldin, M. and Iman, J. (2004). "Numerical modeling of three-dimensional flow field around circular piers", Journal of Hydraulic Engineering., Vol. 130, No. 2, pp. 91-100.

Yulistiyanto, B., Zech, Y. and Graf, W. H. (1998). "Flow around a cylinder: shallow-water modeling with diffusion-dispersion", Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, Vol. 124, No. 4, pp. 419-429.

Yuni, M., Ishida, H. and Umeda, S. (2000). "A numerical study of three-dimensional flow fields around a vertical cylinder mounted on a bed", Coastal Structures, Losada Balkema, Rotterdam, ISBN 90 5809 092, pp. 783-792.

عدد فرود بیشتر، از مدل عددی سه بعدی مناسبی برای شبیه سازی الگوی جریان در اطراف پایه استوانه ای استفاده شود.

## ۶- تشکر و قدردانی

از آقای Kent R. Johnson و دکتر Francis C. K. Ting از دانشگاه ایالتی South Dakota آمریکا که در تهیه اطلاعات آزمایشگاهی برای صحت سنجی مدل ما را یاری کردند، تشکر و قدردانی کرده و کمک ایشان را ارج می نهیم.

## ۷- فهرست علائم

$d$	قطر پایه
$Fr$	عدد فرود
$h$	عمق جریان نزدیک شونده به پایه
$h/d$	عمق نسبی جریان
$\Delta h_{0-180}$	اختلاف عمق جریان جلو و پشت پایه
$\Delta h_{0-90}$	اختلاف عمق جریان جلو و جانب پایه

## ۸- منابع

سرورام، ح. (۱۳۸۵). "تهیه مدلی عددی برای شبیه سازی الگوی جریان اطراف پایه پل"، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تبریز.