

## شبیه سازی عددی پدیده فرا آب در پایه های پل

احمد کریمی نیا<sup>۱</sup> و سید علی اکبر صالحی نیشابوری<sup>۲\*</sup>

<sup>۱</sup> دانش آموخته کارشناسی ارشد سازه های هیدرولیکی، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس

<sup>۲</sup> آستاد سازه های هیدرولیکی، پژوهشکده مهندسی آب، دانشگاه تربیت مدرس  
(تاریخ دریافت ۱۳۸۴/۱۰/۱۷، تاریخ دریافت روایت اصلاح شده ۱۳۹۰/۰۶/۰۵، تاریخ تصویب ۱۳۹۰/۰۶/۲۸)

### چکیده

الگوی جریان حول پایه پل و اثرات ثانویه آن به عنوان یکی از مسائل مورد علاقه محققین هیدرولیک می باشد. با توجه به اینکه امروزه روش های عددی تحلیل جریان سیال به عنوان گامی نوین در کنار روش رایج مدل سازی فیزیکی مطرح و با پیشرفت علوم رایانه ای در حال گسترش می باشد، در این مقاله به بحث شبیه سازی عددی سه بعدی الگوی جریان حول پایه پل پرداخته شده و نتایج تاثیر پایه پل در تولید فرا آب، مورد بررسی قرار گرفته است. شبیه سازی های عددی توسط نرم افزار فلونت (نسخه ۶) صورت گرفت و برای مدل کردن تغییرات پروفیل سطح آزاد و شبیه سازی عددی پدیده فرا آب از روش کسر حجمی سیال استفاده شده است. مقایسه نتایج عددی با نتایج آزمایشگاهی تطابق مناسبی را نشان می دهد.

واژه های کلیدی: شبیه سازی عددی، فلونت، فرا آب، کسر حجمی سیال (VOF)

### مقدمه

الگوی میدان را بررسی کردند. ین و همکاران [۵] مدل عددی سه بعدی که قادر به شبیه سازی میدان جریان و آبشستگی موضعی حول پایه بود را ارائه نمودند. علی و همکاران [۶] با استفاده از نرم افزار فلونت جریان حول پایه استوانه ای شکل را بصورت سه بعدی شبیه سازی و با استفاده از نتایج آن رابطه ای نیمه تجربی و نیمه عددی برای حداکثر عمق آبشستگی مقابل پایه ارائه کردند. چاودری و همکاران [۷] تحقیقی را با هدف بررسی اثر مدل های آشفتگی مختلف بر دقت شبیه سازی عددی میدان سرعت و تنش برشی بستر حول پایه استوانه ای شکل با استفاده از برنامه فلونت انجام دادند. در این تحقیق به شبیه سازی عددی سه بعدی سطح آب با استفاده از نرم افزار فلونت پرداخته شده است.

### معادلات حاکم

معادله پیوستگی و اندازه حرکت (متوسط گیری شده در زمان) روابط اساسی حاکم بر حرکت سیال آشفته می باشند [۸]:

مطالعه سازه هایی که در معرض جریان آب قرار دارند همواره مورد توجه محققین هیدرولیک بوده است. یکی از این موارد پایه پل های است که بر روی رودخانه ها احداث می شوند. احداث پایه های پل در رودخانه ها اثراتی مهم و گاه مخرب به همراه دارد که از این میان می توان به مواردی چون اعمال نیروی هیدرودینامیکی جریان بر پایه، وقوع آبشستگی موضعی حول پایه و افزایش سطح آب در بالادست پایه (فرا آب)، اشاره نمود. فرا آب در مراحل مختلف طراحی پل و عملیات ساماندهی منطقه بالادست آن به منظور پایداری آبراهه دخالت دارد [۱]. به عنوان مهمترین تحقیقات انجام شده در شبیه سازی عددی جریان حول پایه پل می توان به موارد ذیل اشاره نمود:

آلسن و همکاران [۲ و ۳] به توسعه مدلی برای شبیه سازی سه بعدی الگوی جریان حول پایه پل پرداختند، بطوریکه قادر به محاسبه تغییرات سطح آب و آبشستگی بستر حول پایه باشد. ریچاردسون و همکاران [۴] با استفاده از نرم افزار FLOW-3D، میدان جریان حول پایه استوانه شکل را شبیه سازی و اثرات آبشستگی موضعی بر

جدول ۲: مشخصات مدل آزمایشگاهی دانشمند [۱۳]

ابعاد پایه (متر)	سرعت متوسط جریان (متر بر ثانیه)	عمق جریان (متر)	ابعاد فلوم (متر)	
			عرض	طول
۰/۵۷*۰/۰۹۵	۰/۳۵۵	۰/۱۴۶	۰/۶	۱۰

### مشخصات شبکه حل عددی میدان جریان

میدان بکار رفته مکعب مستطیل شکل می‌باشد. نکات

مورد نظر در تعیین محل مرزها بشرح زیر می‌باشند:

- به منظور جلوگیری از خطای حل عددی، مرزهای ورودی و خروجی باید به اندازه کافی از پایه (محل تغییرات شدید الگوی جریان) دور باشند. محل ورود و خروج جریان به عواملی نظیر سرعت جریان، قطر پایه، فاصله دیواره‌های جانبی فلوم از پایه و شیب بستر فلوم بستگی دارد.
- مرز فوقانی حداقل به اندازه ۳۰ درصد عمق جریان ورودی از سطح آب (در ابتدای کانال) بالاتر باشد تا از واگرایی حل عددی جلوگیری شود.
- با انجام چندین سعی و خطا بر روی پارامترهای فوق نهایتاً حدود ابعاد میدان بصورت زیر انتخاب گردید.

جدول ۳: حدود ابعاد مرزهای مختلف میدان (D قطر پایه،  $y_0$  عمق نرمال جریان)

مرز ورودی از مرکز پایه پل	مرز خروجی از مرکز پایه پل	مرز فوقانی میدان از سطح آب
(۲۰-۲۵) D	(۳۰-۴۵) D	(۰/۳-۰/۵) $y_0$

به منظور امکان پیش بینی وقوع گردابه‌های نعل اسبی حول پایه، جریان رو به پایین مقابل پایه و گردابه‌های برخاستگی پشت آن توسط مدل عددی، شبکه حل، بویژه در مناطق حول پایه، باید تراکم مناسبی داشته باشد. برای جلوگیری از بروز خطای عددی بهتر است نسبت حجم‌های متوالی کمتر از ۰/۵ و نسبت هر دو لبه از هر حجم کمتر از ۱۰ باشد. در شکل (۱) نمونه ای از شبکه محاسباتی تولید شده حول پایه استوانه‌ای نشان داده شده است.

لازم بذکر است که در مرز ورودی از پروفیل سرعت توسعه یافته و برای تخمین پارامترهای آشفتگی در این مرز از دو کمیت شدت آشفتگی و شعاع هیدرولیکی استفاده شده است. همچنین مرز فوقانی، سطوح صلب و

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + g_i + \frac{\partial}{\partial x_j} (\nu \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - \overline{u_i u_j}) \quad (2)$$

در معادلات فوق  $u$  مولفه سرعت،  $p$  فشار کل و  $\rho$  چگالی سیال می‌باشد. همچنین جملات  $-\rho \overline{u_i u_j}$  عنوان تنش‌های رینولدز شناخته می‌شوند. برای کامل شدن یا به اصطلاح بستن معادلات از مدل آشفتگی k-ε استاندارد استفاده شده است.

شبیه سازی پروفیل سطح آب با استفاده از روش حجم جزء سیال (VOF) انجام شده است. در این طرح سطح مشترک در سلول‌هایی که حجم جزء سیال (F) بین صفر و یک می‌باشد؛ بصورت پاره خطی شیبدار تخمین زده می‌شود. معادله مربوط به بقاء حجم جزء سیال بصورت زیر می‌باشد [۹]:

$$\frac{\partial F}{\partial t} + u \frac{\partial F}{\partial x} + v \frac{\partial F}{\partial y} = 0 \quad (3)$$

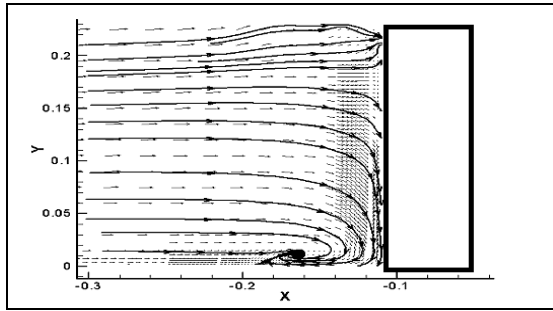
در این مقاله به جهت نیاز به نرم افزاری توانمند در زمینه شبیه سازی مدل‌های چندفازی از فلونت که در این زمینه نرم افزاری شاخص می‌باشد [۹]، استفاده شده است.

### مدل‌های آزمایشگاهی شبیه سازی شده

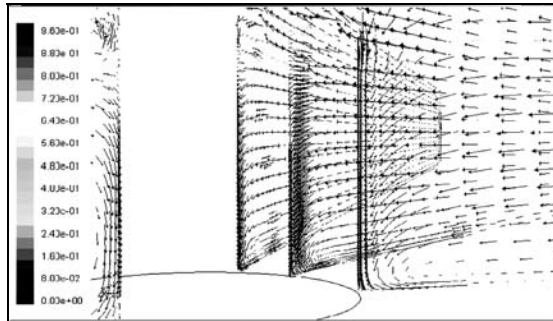
در شبیه سازی عددی از گزارشات چهار آزمایش معتبر؛ ملویل [۱۰]، احمد و راجاراتنام [۱۱]، گراف [۱۲] و دانشمند [۱۳]، استفاده شده است. شرایط جریان در آزمایش‌های فوق در جداول ۱ و ۲ آمده است.

جدول ۱: مشخصات مدل‌های آزمایشگاهی

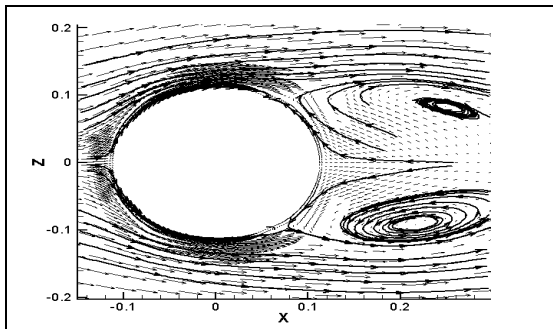
محقق	ابعاد فلوم (متر)		عمق جریان (متر)	سرعت متوسط جریان (متر بر ثانیه)	قطر متوسط ذرات بستر (میلی متر)
	عرض	طول			
گراف [۱۲]	۲	۲۰	۰/۱۸۵	۰/۶۷	۰/۴۴۵
احمد و راجا راتنام [۱۱]	۱/۲۲	۲۰	۰/۱۸	۰/۲۹۳	۰/۴۴۵
ملویل [۱۰]	۰/۴۶۵	۱۹	۰/۱۵	۰/۲۵	۰/۰۵۱



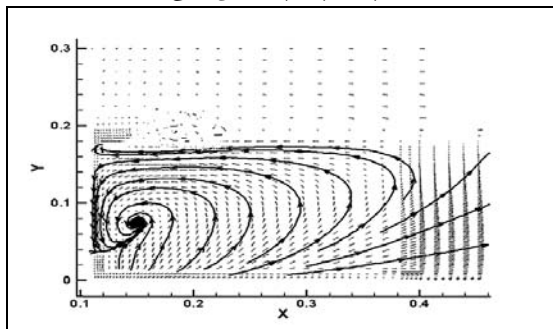
شکل ۲: نتایج شبیه سازی عددی: تشکیل جریان رو به پایین در مقابل پایه



شکل ۳: نتایج شبیه سازی عددی: چرخش گرداب نعل اسبی حول پایه پل در سه صفحه قائم، ۰، ۴۵ و ۹۰ درجه

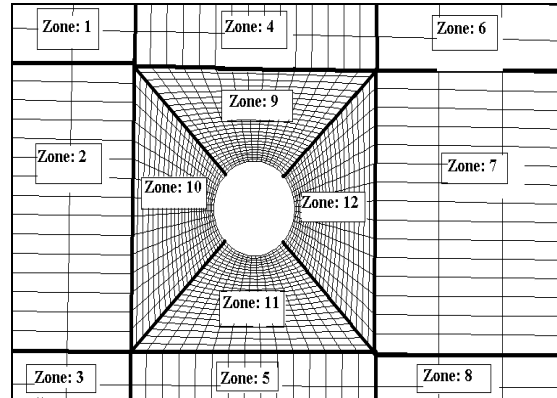


شکل ۴: نتایج شبیه سازی عددی: گردابه‌های ایجاد شده در ناحیه پشت پایه پل (نمای افقی)



شکل ۵: نتایج شبیه سازی عددی: جریان گردابی پشت پایه پل (نمای قائم)

مرز انتهایی میدان به ترتیب بصورت مرز تقارن، دیواره (با استفاده از تابع دیواره) و مرز خروجی (با عمق مشخص) شبیه‌سازی شده‌اند.



شکل ۱: تقسیم بندی مناطق حول پایه جهت تولید شبکه حل عددی نتایج

### نتایج مربوط به پیش‌بینی الگوی جریان

نتایج بدست آمده از شبیه سازی‌های مختلف در شکل‌های ۲ تا ۵ ارائه شده است. لازم به ذکر است که کلیه نتایج این بند، مربوط به شبیه‌سازی عددی مدل فیزیکی گراف [۱۲] می‌باشد.

### پیش‌بینی الگوی جریان حول پایه

همانگونه که در شکل‌های فوق مشاهده می‌شود، جریان پس از برخورد به دماغه پایه بدلیل وجود گردابان فشار در جهت قائم به سمت پایین منحرف می‌شود تا از فشار هیدرودینامیک بکاهد و پس از برخورد به کف کانال یک سیستم جریان چرخشی در مقابل پایه شکل می‌گیرد. گردابه‌های تولید شده دارای محور چرخشی در راستای جریان بوده و در پشت پایه به هم می‌رسند. این گردابه‌ها به گرداب نعل اسبی معروفند.

از سوی دیگر وجود پایه در مقابل جریان باعث ایجاد لایه مرزی بر روی جداره آن می‌شود. بر روی جداره پایه به سمت پایین دست به علت بازشدگی جریان و ایجاد گردابان فشار معکوس پدیده جدایی در لایه مرزی تشکیل می‌شود. گردابه‌های ایجاد شده دارای محور چرخش قائم هستند و به گرداب برخاستگی معروفند.

### محل برگشت و جدایی جریان

در شکل (۶) خطوط جریان رو به بالا دست پس از برخورد به کف کانال نشان داده شده است. فاصله طول

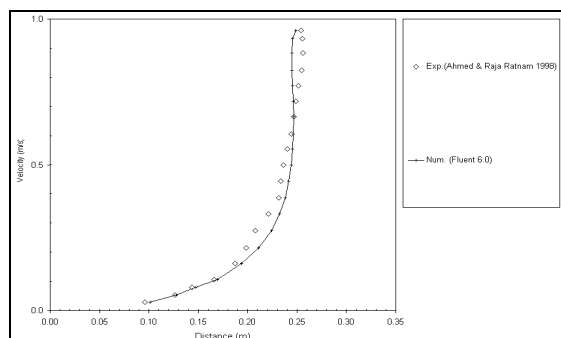
### مقایسه پروفیل سرعت در مقاطع مختلف

در نهایت برای اطمینان از نتایج بدست آمده، پروفیل سرعت در چند مقطع نیز مقایسه گردیده است که نتایج آن در شکل‌های ۸ تا ۱۱ ارائه می‌شود.

در عمل به علت وجود جریان‌های ثانویه در کانال، محل حداکثر سرعت هیچگاه در سطح آب نبوده، بلکه کمی پایینتر از آن قرار می‌گیرد. این مطلب در نتایج آزمایشگاهی احمد و راجاراتنام [۱۱] بخوبی دیده می‌شود. در نتایج عددی این پدیده مشاهده نگردید که علت این خطا ضعف مدل  $k-\epsilon$  استاندارد در شبیه سازی جریان‌های ثانویه می‌باشد.

نکته قابل توجه دیگر عدم تطبیق مناسب مقادیر عددی و آزمایشگاهی در نزدیک بستر است. همانطور که در نتایج بخش قبل بیان شد طول منطقه‌ای از جریان بالادست پایه که متاثر از وجود پایه می‌باشد در مدل عددی کوچکتر از نتایج آزمایشگاهی است به همین خاطر انتظار می‌رود در یک فاصله مشخص از محل پایه (در حوزه تاثیر پایه) مقادیر سرعت بدست آمده از شبیه‌سازی عددی بیشتر از نتایج آزمایشگاهی باشد که این مطلب بوضوح در نتایج فوق دیده می‌شود.

یکی دیگر از عوامل تولید خطا، میزان دقت تابع دیواره و عملکرد آن در انتقال اثر مرز جامد به داخل میدان می‌باشد. با توجه به اینکه این توابع به تراکم شبکه در مجاورت دیواره حساس می‌باشند، لذا شاید عدم تراکم کافی در این قسمت از شبکه باعث ایجاد بخشی از خطای موجود باشد. عدم توسعه یافتگی سرعت در مدل عددی نیز بر روی مقدار خطای نتایج تاثیر مهمی دارد و در صورت بروز این مشکل الگوی مورد انتظار پیرامون پایه شکل نمی‌گیرد.

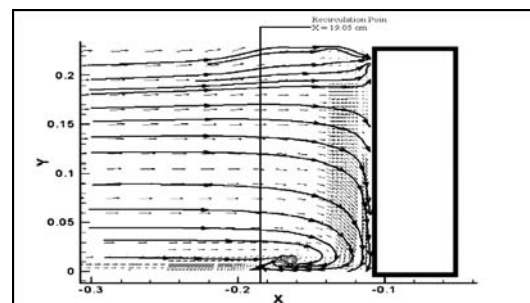


شکل ۸: مقایسه نتایج عددی با نتایج آزمایش احمد [۱۱] در فاصله ۲/۲۵ برابر شعاع پایه در بالادست آن

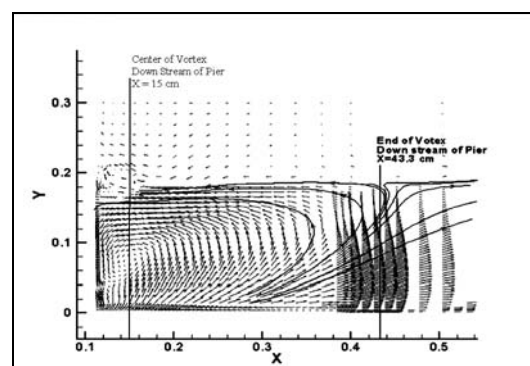
برگشت جریان در مقابل پایه در مدل عددی حدود ۱۹/۰۵ سانتیمتر از مرکز پایه بدست آمد که با مقدار آزمایشگاهی (۱۹/۷) سانتیمتر) همخوانی دارد.

شکل (۷) مرکز گردابه پشت پایه و انتهای آن را نشان می‌دهد. در مدل عددی این دو موضع به ترتیب حدود ۱۵ و ۴۳/۵ سانتیمتر از مرکز پایه بدست آمده و در اندازه‌گیری آزمایشگاهی [۱۲] این دو عدد به ترتیب بین ۱۷ تا ۱۹ و ۴۴ تا ۵۵ سانتیمتر گزارش شده است.

با توجه به اینکه آشفتگی جریان حول پایه بسیار پیچیده و کاملاً سه بعدی است و مدل  $k-\epsilon$  استاندارد لزجت آشفتگی (VT) را در هر سه جهت، ثابت در نظر می‌گیرد لذا می‌توان این مسئله را علت اصلی خطای موجود دانست. از دیگر علل خطا می‌توان به مواردی چون تقریب عددی در منفصل کردن معادلات، ظرافت‌های لازم برای طرح شبکه محاسباتی و تقریب زبری و شیب بستر اشاره داشت.



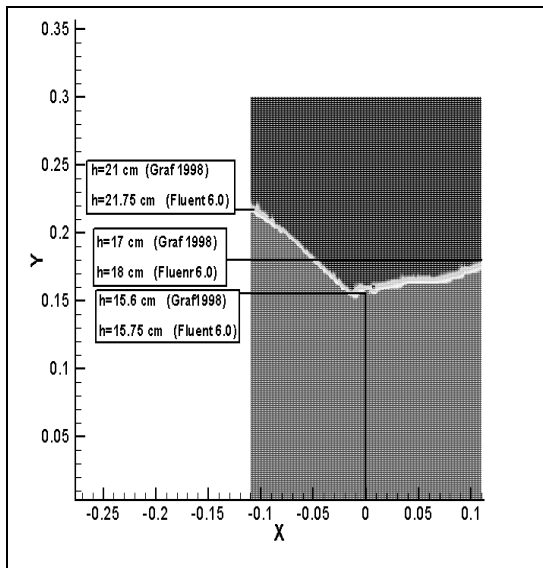
شکل ۶: مقایسه نتایج عددی با نتایج آزمایش گراف مربوط به طول برگشت جریان در مقابل پایه [۱۲]



شکل ۷: مقایسه نتایج عددی با نتایج آزمایش گراف [۱۲] مربوط به محل مرکز گردابه‌های پشت پایه

شده است، با نتایج آزمایش‌های دانشمند [۱۳] و گراف [۱۲] مقایسه می‌گردد.

شکل (۱۲) مقایسه نتایج آزمایشگاهی گراف [۱۲] و نتایج عددی فلونت را نشان می‌دهد. مشخصات جریان در مدل گراف در جدول (۴) موجود است.



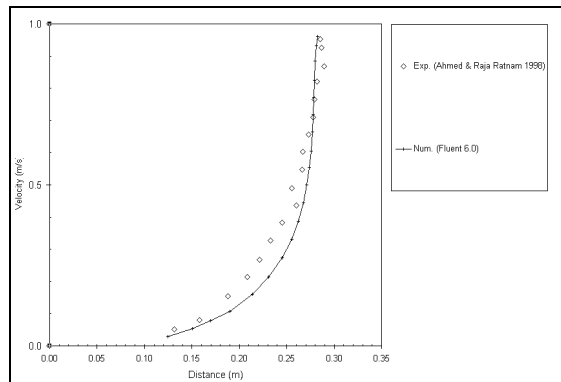
شکل ۱۲: مقایسه نتایج عددی با نتایج آزمایش گراف [۱۲] (پروفیل سطح آب حول پایه)

جدول ۴: مشخصات جریان در آزمایش گراف [۱۲]

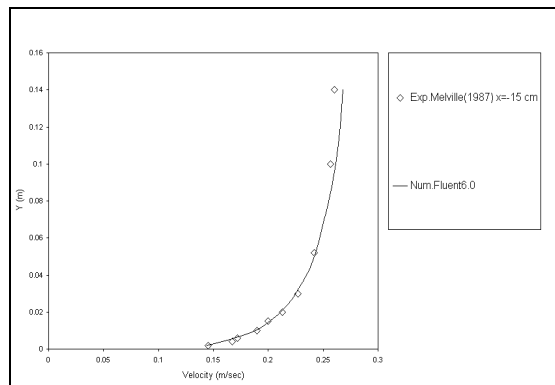
$D_{pier}$ mm	$Q$ Lit/s	$Y_o$ mm	$U_o$ m/s	$Fr$	$Re_D$	$L$ m	$W$ m
۵۷۰	۲۴/۸	۱۸۵	۰/۶۷۰	۰/۵	۱۴۸۰۰۰	۲۲	۲

متوسط خطا در این شبیه سازی ۳/۵ درصد است و بیشترین خطا مربوط به عمق پشت پایه و حدود ۵/۵ درصد می‌باشد. قبلاً بیان شد که این ناحیه کاملاً تحت نفوذ گردابه‌های سه‌بعدی است و لذا دقت مدل آشفتگی برای شبیه‌سازی آن مهم است. با توجه به استفاده از مدل آشفتگی k-ε استاندارد و اینکه در این مدل لزجت گردابه ای در هر سه بعد یکسان فرض می‌شود، لذا این مسئله می‌تواند منبع تولید خطا باشد. دقت کم تابع دیواره و تراکم نامناسب شبکه نیز در افزایش میزان خطا مؤثر هستند.

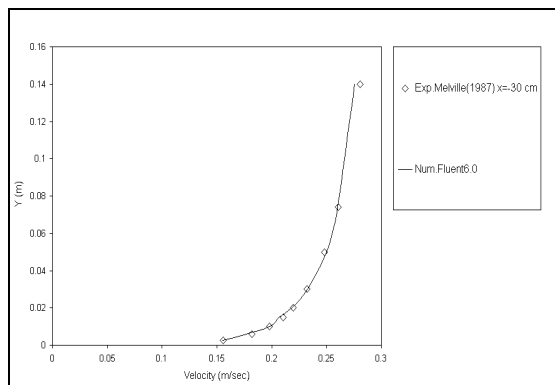
شکل (۱۳) مقایسه نتایج شبیه‌سازی عددی فلونت و مدل آزمایشگاهی دانشمند [۱۳] را نشان می‌دهد. خطای این شبیه سازی حدود ۰/۸ درصد می‌باشد. مشخصات



شکل ۹: مقایسه نتایج عددی با نتایج آزمایش احمد [۱۱] در فاصله ۳ برابر شعاع پایه در بالادست آن



شکل ۱۰: مقایسه نتایج عددی با نتایج آزمایش ملویل [۱۰] در فاصله ۱۵ سانتیمتر از مرکز پایه در بالادست آن



شکل ۱۱: مقایسه نتایج عددی با نتایج آزمایش ملویل [۱۰] در فاصله ۳۰ سانتیمتر از مرکز پایه در بالادست آن

### شبیه‌سازی پروفیل سطح آب

در این بخش نتایج عددی مربوط به پروفیل سطح آب بررسی می‌شود. برای این منظور پروفیل سطح آب که در امتداد صفحه تقارن مرکزی فلوم شبیه‌سازی شده برداشت

### نتیجه گیری

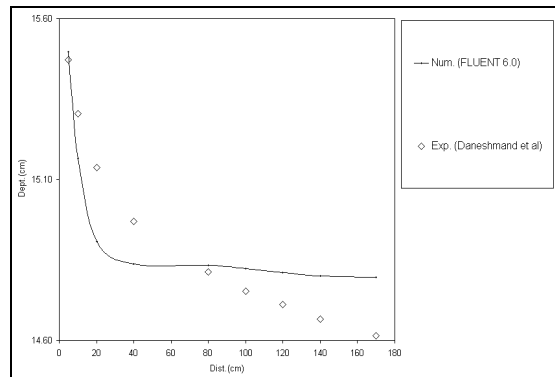
در این مقاله شبیه سازی عددی الگوی سه بعدی و پیچیده جریان حول پایه پل به همراه پدیده فرا آب انجام شده است. نتایج بدست آمده عبارتند از:

- گسترش سیستم جریان گردابی مقابل پایه موسوم به گرداب نعل اسبی تا زاویه حدود ۴۵ درجه در دو طرف پایه بوده و بعد از آن در پیرامون پایه جریانی بسیار پیچیده و متلاطم ایجاد می شود که در این سیستم پیچیده تفکیک جریان گرداب نعل اسبی از سیستم جریان عمومی امکان پذیر نیست. لذا نتایج عددی در ناحیه جانبی و پشت پایه، جریان مشخصی از گرداب نعل اسبی را نشان نمی دهد.

- کوچکتر بودن ناحیه متاثر از وجود پایه در مقابل جریان بویژه در ناحیه بالادست پایه در مدل های عددی باعث عدم تطبیق کامل نتایج سرعت بدست آمده از شبیه سازی عددی و نتایج آزمایشگاهی شده است. بررسی نتایج نشان می دهد هرچه سرعت جریان بیشتر، یا به عبارتی تلاطم ناحیه پیرامون پایه بالاتر باشد این مسئله خطای بیشتری در نتایج ایجاد می کند.

نتایج بدست آمده از این تحقیق در زمینه تخمین میزان فرآب با استفاده از شبیه سازی عددی توسط نرم افزار فلوئنت دارای دقت مناسب و خطای قابل قبولی می باشد.

جریان در جدول (۵) بیان شده و مقادیر مربوط به عمق آب در هر دو حالت مدل فیزیکی و شبیه سازی عددی در جدول (۶) ارائه شده است.



شکل ۱۳: مقایسه نتایج عددی با آزمایش دانشمند [۱۳]  
(پروفیل سطح آب در بالادست پایه)

جدول ۵: مشخصات جریان در آزمایشات دانشمند [۱۳]

$L_{pier}$ mm	$B_{pier}$ mm	Q Lit/s	$Y_o$ mm	$U_o$ m/s	Fr	$Re_B$	L M	W m
۵۷۰	۹۵	۳۱/۲	۱۴۶/۴	۰/۳۵۵	۰/۲۹۶	۳۳۷۲۵	۱۰	۰/۶

جدول ۶: مقایسه شبیه سازی عددی با آزمایشات دانشمند

[۱۳]

X cm	H (Exp.) cm	H (Num.) cm	Err. % Ave.= ۰/۷۷
۵	۱۵۴/۷۲	۱۵۴/۹۶	۰/۱۵۷
۱۰	۱۵۳/۰۴	۱۵۱/۶۶	۰/۹۰۳
۲۰	۱۵۱/۳۷	۱۴۹/۰۸	۱/۵۱
۴۰	۱۴۹/۶۹	۱۴۸/۳۸	۰/۸۷۳
۸۰	۱۴۸/۱۳	۱۴۸/۲۴	۰/۱۴۵
۱۰۰	۱۴۷/۵۳	۱۴۸/۲۳	۰/۴۸
۱۲۰	۱۴۷/۱۲	۱۴۸/۱	۰/۶۷
۱۴۰	۱۴۶/۶۶	۱۴۸/۰۱	۰/۹۲
۱۷۰	۱۴۶/۴۵	۱۴۷/۹۷	۱/۲۵

## مراجع

- 1- Farady R.V. and Charlton, F.G., Translated by A.R. Zaratti (2002), The Design of Highway Bridges for Hydraulic Action, 2nd. Ed., Amirkabir University Press., Tehran , Iran.
- 2- Olsen, N.R.B. and Kjellesvig, H.M. (1998). Three dimensional numerical flow modeling for estimation of maximum local scour depth. *J. Hydr. Research, IAHR*, 36(4), pp:579-590
- 3- Olsen, N.R.B. and Melaaen, M.C. (1993). Three dimensional calculation of scour around cylinders. *J. Hydr. Engrg.*, 119(9), pp:1048-1053
- 4- Richardson, J.E. and Panchang, V.G. (1998). Three dimensional simulation of scour inducing flow at bridge piers. *J. Hydr. Engrg.*, 124(5), pp:530-540
- 5- Yen, C.L. and Lai, J.S and Chang, W.Y. (2001). Modeling of 3d Flow and scouring around circular piers. *Proc. Naul. Sci. Counc, ROC(A)*,25(1), pp:17-26
- 6- Kamil, H.M.A. and Othman, K. (2002). "Simulation of flow around piers." *J. Hydr. Reaserch*. 40(2), PP. 161-173.
- 7- Salaheldin, T.M., Imran, J. and Chaudhry, M.H. (2004). "Numerical modeling of three dimensional flow fields around circular piers." *J. Hydr. Eng.*, 130(2), PP.91-100.
- 8- H. Versteeg, W. Malalasekera, Trans. by Shojaeefard, M.H., (2000), *An Introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method*, Science and Technology University, Tehran, Iran.
- 9- FLUENT user's guide manual, version 6.0 (November 2001), Fluent Incorporated.
- 10- Melville, B.W. (1975). "Local scour at bridge sites." *Rep. No. 117*. Dept. of Civil Engineering, School of Eng., Univ. of Auckland, Auckland.
- 11- Ahmed, F. and Rajaratnam, N. (1998). "Flow around bridge piers." *J. of Hydr. Eng.*, 124(3), PP. 288-300.
- 12- Graf, W.H. and Yulitiyanto, B. (1998). "Experiments on flow around a cylinder." *J. Hydr. Research (IAHR)*., 36(4), PP.637-653.
- 13- Daneshmand, P. (2001), Effect of rectangular bridge length on backwater, Msc. Thesis, Tarbiat Modares Uiversity, Tehran, Iran.

## واژه‌های انگلیسی به ترتیب استفاده در متن

1-Volume of Fraction