

## مدلسازی عددی آبستگي موضعی اطراف گروه پایه پل و مقایسه با نتایج آزمایشگاهی

بنفشه محبوب<sup>۱</sup> - بايرامعلی محمدنژاد<sup>۲</sup> - جواد بهمنش<sup>۳\*</sup>

تاریخ دریافت: ۱۳۹۱/۱۲/۸

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۲/۱۲/۲۷

### چکیده

پل‌ها یکی از مهم‌ترین سازه‌ها در مهندسی رودخانه می‌باشند. یکی از مهم‌ترین دلایل تخریب پل‌ها، آبستگي موضعی اطراف پایه‌های پل است. پل‌های بسیاری در سراسر دنیا به دلیل آبستگي خیلی زیاد در اطراف پایه‌ها تخریب شده‌اند، که باعث از دست رفتن بسیاری از سرمایه‌گذاری‌ها شده است. پس، این ضروری است که عمق آبستگي در اطراف پایه‌های پل پیش‌بینی شود. در این تحقیق از مدل عددی سه بعدی فلونت برای بررسی آبستگي موضعی اطراف گروه پایه استوانه‌ای در شرایط آب زلال و بستر ماسه‌ای یکنواخت استفاده گردید. در این مدل، جریان حاوی رسوب به صورت جریان دو فازي (آب-ماسه) در نظر گرفته شده و از مدل دو فازي اولرین استفاده گردید. برای تخمین پارامترهای آشفتگی جریان در فاز آب از مدل K-ε RNG استفاده شد. به منظور ارزیابی و صحت سنجی مدل عددی، نتایج محاسباتی با داده‌های آزمایشگاهی مورد مقایسه قرار گرفت. حداکثر عمق آبستگي در جلوی پایه اول در مدل عددی برابر ۱۲/۵ سانتی‌متر و در مدل آزمایشگاهی برابر ۱۲ سانتی‌متر اندازه‌گیری شده است. همچنین عمق آبستگي در پایه دوم کمتر از پایه اول و عمق آبستگي در پایه سوم کمتر از مقادیر مربوط به پایه‌های اول و دوم است. نتایج نشان دادند که مدل دو فازي می‌تواند پدیده آبستگي را در اطراف پایه‌ها شبیه‌سازی کند.

**واژه‌های کلیدی:** حفره آبستگي، پایه پل دایره‌ای، رسوب، شبیه‌سازی عددی، مدل دو فازي اولرین

### مقدمه

پل‌ها یکی از سازه‌های تاثیر گذار در هیدرولیک و مورفولوژی رودخانه‌ها می‌باشند. وجود پایه‌ها و تکیه‌گاه‌ها در عرض رودخانه باعث کاهش مقطع عبوری جریان، برخورد جریان به پایه و انحراف خطوط جریان اطراف پایه به کف بستر و تشکیل گرداب‌های نعل‌اسبی، چرخشی و برخاسته می‌شود که یکی از عوامل موثر در پدیده آبستگي موضعی پایه پل‌ها می‌باشد. سالانه بسیاری از پل‌ها در اثر پدیده آبستگي و لغزش پایه‌ها در مواقع سیلابی که شریان‌های ارتباطی به مناطق سیل‌زده هستند تخریب می‌شوند و دسترسی و امداد رسانی به مناطق سیل‌زده با مشکلات مواجه می‌شود که بیانگر اهمیت بررسی این پدیده می‌باشد (۴).

میدان جریان سه‌بعدی و الگوی آبستگي اطراف تک پایه به دلیل وجود سیستم‌های گردابی و اندرکنش هیدرودینامیکی جریان با بستر قابل فرسایش، پیچیده می‌باشد اما میدان جریان و روند

آبستگي اطراف گروه پایه تحت تاثیر مکانیزم‌هایی است که آن را نسبت به تک پایه پیچیده‌تر و عمق و شکل آبستگي را متفاوت می‌سازد. مکانیزم‌هایی که روند آبستگي گروه پایه‌های هم‌امتداد را تحت تاثیر قرار می‌دهند عبارتند از (۶):

اثر افزایشی آبستگي پایه‌های پشتی روی پایه‌های جلویی: به علت وجود پایه پشتی، ممکن است حفره‌های آبستگي دو پایه روی هم قرار گیرد که در این صورت به علت پایین آمدن تراز بستر در پشت پایه جلویی، انتقال مصالح کنده شده از حفره جلوی پایه اول راحت‌تر صورت می‌گیرد و در نتیجه عمق آبستگي در پایه جلویی افزایش می‌یابد.

اثر حفاظتی پایه‌های جلویی نسبت به پایه‌های پشتی: وجود پایه جلویی باعث کاهش سرعت مؤثر جریان برای پایه پشتی و کم شدن اثر گرداب نعل‌اسبی می‌شود و عمق آبستگي در پایه پشتی کاهش می‌یابد.

شبیه‌سازی‌های عددی بر اساس دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) به صورت گسترده‌ای برای مطالعه جریان آشفته و انتقال رسوب در اطراف پایه استفاده شده است. تسنگ و همکاران (۱۵) شبیه‌سازی عددی با پایه‌های استوانه‌ای و مربعی با مدل LES انجام دادند. آن‌ها دریافتند که جریان پایین رو که در سطح جلویی پایه

۱ و ۳- دانش آموخته کارشناسی ارشد و دانشیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ارومیه  
\* - نویسنده مسئول: (Email: j.behmanesh@urmia.ac.ir)

۲- استادیار گروه مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی قم

از خروجی فلوم نیز برابر ۲/۳ متر بود. با توجه به تحقیقات صورت گرفته فاصله پایه‌ها براساس نسبت فاصله پایه‌ها به قطر پایه‌ها بین ۲ تا ۴ انتخاب شد، بدیهی است که هرچقدر این نسبت بیشتر انتخاب شود پایه‌های قرار گرفته در یک ردیف عمود بر مسیر جریان اثر ناچیزی بر یکدیگر دارند و برعکس. با توجه به این امر فاصله مناسب بین پایه‌ها در این آزمایش ۲۵ سانتیمتر و فاصله مرکز به مرکز پایه‌ها ۳۵ سانتیمتر انتخاب شد. اندازه مصالح چنان انتخاب گردید که ذرات بدون وجود جریان پایه حرکتی نداشته باشند و آب حاوی ذرات معلق نبوده و زلال باشد. همچنین نسبت قطر پایه به  $d_{50}$  باید بزرگتر از ۲۰ تا ۲۵ باشد تا آبشستگی مستقل از اندازه رسوبات باشد (۱۳). برای حذف تاثیر غیریکنواختی رسوبات بر آبشستگی، انحراف معیار هندسی ذرات باید کمتر از ۱/۵ باشد (۶):

$$\sigma_g = \sqrt{d_{94}/d_{16}} \leq 1.5 \quad (1)$$

با رعایت معیارهای اخیر، برای آزمایش‌ها ذرات ماسه با اندازه متوسط ۱/۳ میلی‌متر و  $\sigma_g = 1/27$  انتخاب شد که در لایه‌ای به ضخامت ۲۵ سانتی‌متر کف فلوم را می‌پوشاند. کل کف کانال طول بستر رسوبی را تشکیل می‌دهد. برای بررسی آبشستگی تحت شرایط آب زلال باید  $U < U_c$  باشد. آستانه حرکت ذرات در شرایط آب زلال زمانی برقرار می‌شود که رابطه زیر برقرار باشد (۱۲):

$$U_{max} = 0.95U_c \quad (2)$$

که در آن  $U$  سرعت جریان،  $U_c$  سرعت بحرانی حرکت رسوب یا آستانه حرکت ذرات که بر اساس نوع رسوبات از نمودار شیلدز به دست می‌آید و  $U_{max}$  سرعت بیشینه انتخابی برای جریان در کانال است.

بنابراین با توجه به دبی ۵۰ لیتر بر ثانیه عمق جریان به گونه‌ای تنظیم شد که شرط اخیر برقرار باشد. بنابراین سرعت واقعی متناسب با حداقل عمق ۱۲ سانتی‌متر انتخاب گردید. در ضمن شیب کف کانال ناچیز در نظر گرفته شد.

### ساخت هندسه مدل و شبکه بندی

به منظور امکان مقایسه نتایج با نتایج آزمایشگاهی موجود در این تحقیق، هندسه مدل پایه‌ها و کانال و مواد بستر و شرایط جریان در مدلسازی حاضر نیز همانند شرایط آزمایشات موجود در نظر گرفته شد. تنها به منظور پرهیز از طولانی شدن روند تحلیل مدل و با در نظر گرفتن این شرط که جریان اطراف پایه متاثر از فاصله خود از ورودی کانال نبوده و به حالت توسعه یافته رسیده باشد و نیز فاصله پایه از خروجی کانال به اندازه‌ای باشد که بتوان جریان‌ها و تنش‌های پشت پایه را بررسی نمود، طول کانال در مدل ساخته شده به گونه‌ای در نظر گرفته شد که فاصله مرکز پایه اول از ورودی فلوم ۱/۸ متر و فاصله مرکز پایه سوم از خروجی فلوم نیز به ۰/۵ متر کاهش یافت. فاصله مرکز به مرکز پایه‌ها همانند مدل آزمایشگاهی و برابر ۳۵

ایجاد می‌شود گرداب‌های نعل‌اسبی حاصل می‌کند. احمد محمد و همکاران (۷) تحقیقی درباره مدلسازی فیزیکی آبشستگی اطراف پایه‌های پل در بسترهای رسوبی ارائه دادند. آزمایشات ایشان بر روی مدل‌های فیزیکی برای مطالعه اثرات عمق جریان، سرعت نزدیک شدن، زاویه شیب پایه، شکل پایه و تعداد پایه‌ها بر روی عمق آبشستگی موضعی بود. قربانی (۱۰) در مطالعه‌ای به بررسی میدانی آبشستگی پایه‌های پل در دشت‌های سیلابی رودخانه‌ها پرداخته است. مطالعه او بر اساس ارزیابی آبشستگی پایه‌ها و خرابی آن‌ها در رودخانه‌های با بسترهای با چسبندگی کم و متمرکز شدن بر روی یک دید کلی به پدیده آبشستگی است. اسماعیلی و همکاران (۸) مطالعه‌ای را به صورت موردی بر روی پل ۵۲۴ در عرض رودخانه تانانا با استفاده از مدل عددی سه بعدی SSIIM انجام دادند. واسکیوز و والش (۱۶) شبیه‌سازی کیفی از آبشستگی موضعی در پایه‌های پل مرکب تحت جریان جزرومدی را با استفاده از مدل (CFD)، Flow-3D ارائه کرده‌اند. هوانگ و همکاران (۱۱) در مطالعه‌ای به شبیه‌سازی پایه‌های پل با استفاده از مدل CFD سه بعدی فلوئنت برای بررسی اثرات مقیاس بر جریان آشفتگی و آبشستگی رسوب پرداختند.

در این تحقیق به بررسی و مطالعه الگوی جریان و آبشستگی موضعی اطراف گروه پایه‌ای متشکل از سه پایه استوانه‌ای هم امتداد پرداخته شد. برای این منظور از آزمایش‌هایی که بر روی مدل فیزیکی متشکل از سه پایه استوانه‌ای در شرایط آب زلال و با استفاده از رسوبات یکنواخت انجام گرفته استفاده گردید. همچنین مدل عددی سه بعدی فلوئنت منطبق بر شرایط آزمایشگاهی برای شبیه‌سازی عددی الگوی جریان و آبشستگی اطراف گروه پایه به کار گرفته شد. در شبیه‌سازی عددی آبشستگی از مدل دو فازی اولرین (سیال آب به عنوان فاز اولیه و لایه ای از ماسه به عنوان فاز جامد) و مدل آشفتگی RNG K-ε برای فاز سیال استفاده گردید. هدف از این تحقیق ارزیابی کارآمدی مدل عددی دو فازی اولرین در تخمین آبشستگی از طریق مقایسه نتایج آن با نتایج آزمایشگاهی بود.

### مواد و روش‌ها

#### مدل آزمایشگاهی

برای بررسی آبشستگی موضعی اطراف گروه پایه، یک سری آزمایش‌ها بر روی مدل فیزیکی متشکل از سه پایه استوانه‌ای هم امتداد در موسسه تحقیقات آب وزارت نیرو توسط ساغروانی و همکاران (۳) انجام گرفت. این آزمایش‌ها در فلوم مستطیلی شکلی با طول ۸ متر، عرض ۱/۲ متر و ارتفاع ۰/۷ متر انجام شد. سه پایه استوانه‌ای با قطر ۱۰ سانتی‌متر در امتداد یکدیگر قرار گرفت به طوری که فاصله مرکز پایه اول از ورودی فلوم ۵ متر و فاصله مرکز پایه سوم

ثانیه، خروجی جریان نیز از نوع خروجی<sup>۵</sup> انتخاب شد. در خروجی پایین دست، گرادیان‌های قائم تمام متغیرهای وابسته برابر صفر می‌باشد. به عبارت دیگر متغیرها در انتهای پایین دست از دامنه درونی برون‌یابی می‌شود. سطح آب به عنوان مرز تقارن<sup>۶</sup> انتخاب شد که در آن سرعت قائم صفر و گرادیان‌های قائم صفر برای تمامی متغیرها برقرار است.

### مدل عددی دو فاز اولرین

مدلی که در این مطالعه برای شبیه‌سازی آبشستگی اطراف پایه مورد استفاده قرار گرفت، قسمتی از بسته نرم‌افزاری دینامیک سیالات محاسباتی فلوئنت می‌باشد و به مدل دو فاز اولرین موسوم است. این مدل جریان حاوی رسوب را به صورت جریان دو فاز شامل فاز آب و فاز ماسه در نظر می‌گیرد به طوری که این فازها محیط‌های جداگانه‌ای را تشکیل می‌دهند ولی در عین حال قابلیت نفوذ در یکدیگر را دارا می‌باشند. فضای اشغال شده توسط هریک از فازها با استفاده از کسر حجمی  $0 \leq \alpha \leq 1$  مشخص می‌شود. در این مدل معادلات بقای جرم و مومنت برای هریک از فازها اقناع شده و اتصال بین فازها از طریق فشار و ضریب تبادل بین فازها حاصل می‌شود (۹).

### معادلات حاکم بر مدل اولرین

معادلات پیوستگی برای دو فاز آب ( $w$ ) و ماسه ( $s$ ) به شکل زیر می‌باشند:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_w \rho_w) + \nabla(\alpha_w \rho_w v_w) = 0 \quad (3)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_s \rho_s) + \nabla(\alpha_s \rho_s v_s) = 0 \quad (4)$$

که در معادلات فوق اندیس  $w$  برای فاز آب و اندیس  $s$  برای فاز ماسه است و  $\alpha_w + \alpha_s = 1$  می‌باشد به طوری که  $\alpha_w$  و  $\alpha_s$  به ترتیب کسر حجمی آب و ماسه می‌باشند.  $\rho_s$  و  $\rho_w$  نیز به ترتیب بیانگر چگالی جرمی آب و ماسه می‌باشند.

مطالعه دینامیک ذره جامد درون یک سیال نشان می‌دهد که ذره تحت تأثیر نیروهای گرادیان فشار استاتیک، گرادیان فشار جامد یا نیروی عمودی در طی اندرکنش ذرات، نیروی دراگ (پسا) ناشی از اختلاف سرعت بین فازها و نیروهای لزج و حجمی قرار دارد. بنابراین معادله مومنت برای فاز آب ( $w$ ) به صورت زیر بیان می‌شود:

سانتی‌متر در نظر گرفته شد. پس در نهایت طول کانال در شبیه‌سازی عددی به ۳ متر کاهش یافت. همچنین عمق انباشت رسوبات در کف با در نظر گرفتن ماکزیمم عمق آبشستگی به دست آمده از نتایج آزمایشگاهی، به منظور کاهش حجم و زمان انجام محاسبات به ۱۵ سانتی‌متر در مدلسازی عددی کاهش یافت. نهایتاً با در نظر گرفتن عمق آب ۱۲ سانتی‌متر عمق فوم در شبیه‌سازی عددی برابر با ۲۷ سانتی‌متر در نظر گرفته شد. قطر پایه‌ها نیز همانند مدل آزمایشگاهی و برابر ۱۰ سانتی‌متر در نظر گرفته شدند.

نرم‌افزار فلوئنت قابلیت ساخت هندسه و تولید شبکه برای مدل‌ها را دارا نمی‌باشد و بدین منظور از نرم‌افزار گمبیت<sup>۱</sup> استفاده گردید. در این نرم‌افزار هندسه مدل با استفاده از روش طراحی از پایین به بالا ساخته شد. به منظور ایجاد مش‌های منظم در صفحات از الگوریتم Map و در حجم‌ها از الگوریتم Cooper استفاده شد. پس از انجام هر شبکه‌بندی با استفاده از ابزار کنترل کیفیت شبکه بندی در گمبیت، شبکه‌های تولید شده کنترل گردید تا از وجود خاصیت‌هایی مانند چولگی<sup>۲</sup> که می‌تواند به طور جدی بر روی دقت و صحت جواب‌های حل CFD موثر باشد در شبکه‌ها احتراز گردد. جهت انتخاب شبکه بندی مناسب، چندین نوع شبکه بندی با ابعاد مختلف که با نزدیک شدن به پایه‌های پل ریزتر می‌شدند، ساخته شد و از آن میان و با در نظر گرفتن معیارهای دقت و سرعت همگرایی جواب‌های حاصله، شبکه مناسب انتخاب گردید. در این شبکه بهینه فاصله گره‌های مش از یکدیگر ۵ سانتی‌متر است. شکل ۱ دیدی سه بعدی را از شبکه بندی کانال نشان می‌دهد.

### شرایط مرزی

در حل‌های عددی تعیین شرایط مرزی مناسب با توجه به نوع جریان و شرایط مسئله دارای اهمیت بالایی است. در مدلسازی انجام شده برای دیواره‌های کانال و نیز پایه‌های پل شرط مرزی دیوار<sup>۳</sup> استفاده شد که با توجه به دانه بندی مواد بستر کانال و نیز جنس پایه‌های پل و دیواره‌های کانال (که یکسان در نظر گرفته شد) میزان بلندی المان‌های زبری در نرم‌افزار اعمال گردید. به منظور ایجاد سرعت صفر جریان در سطوح دیوار شرایط No slip در تنظیمات این مرزها انتخاب شد. در مدلسازی کانال با استفاده از مدل جریان چند فاز، یک ناحیه دو فاز شامل آب و ماسه تشکیل شد. ورودی جریان از نوع مرز ورودی سرعت<sup>۴</sup> با سرعت ورودی یکنواخت ۰/۳۴۷ متر بر

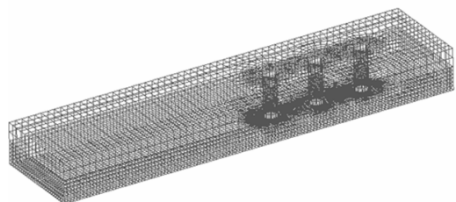
- 1- Gambit
- 2- Skewness
- 3- Wall
- 4- Velocity inlet

- 5- Outflow
- 6- Symmetry

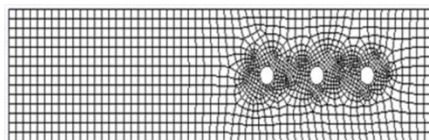
$$\frac{\partial}{\partial t} (\alpha_w \rho_w \vec{v}_w) + \nabla \cdot (\alpha_w \rho_w \vec{v}_w \vec{v}_w) = -\alpha_w \nabla p + \nabla \cdot \vec{\tau}_w + \alpha_w \rho_w \vec{g} + k_{s,w} (\vec{v}_s - \vec{v}_w) \quad (5)$$

معادله مومنتم برای فاز ماسه (s) نیز به صورت زیر بیان می‌شود:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\alpha_s \rho_s \vec{v}_s) + \nabla \cdot (\alpha_s \rho_s \vec{v}_s \vec{v}_s) = -\alpha_s \nabla p - \nabla p_s + \nabla \cdot \vec{\tau}_s + \alpha_s \rho_s \vec{g} + k_{w,s} (\vec{v}_w - \vec{v}_s) \quad (6)$$



(ب) دید از بالا



(الف) دید سه بعدی

شکل ۱- شبکه محاسباتی سه بعدی برای شبیه سازی عددی آبشستگی موضعی اطراف گروه پایه

(۹)

تابع دراگ (پسا)  $C_d$  به شکل زیر تعریف می‌شود:

$$C_d = \frac{24}{\alpha_w Re_s} [1 + 0.15 (\alpha_w Re_s)^{0.687}] \quad (10)$$

عدد رینولدز نسبی  $Re_s$  نیز به صورت زیر بیان می‌شود:

$$Re_s = \frac{\rho_w d_s |\vec{v}_s - \vec{v}_w|}{\mu_w} \quad (11)$$

### انتخاب مدل آشفتگی

مدل‌های آشفتگی متعددی در نرم‌افزار فلوئنت موجود است. هر مدل بسته به نوع و شرایط ناحیه جریان مدلسازی شده و دقت مورد نظر، دارای مزایای خاص خود می‌باشد و امکان معرفی مدلی که بتواند برای انواع مسائل مناسب عمل نماید وجود ندارد. برای انتخاب مدل آشفتگی مناسب با توجه به تحقیقات صورت گرفته پیشین، مدل‌های  $K-\epsilon$  استاندارد،  $RNG K-\epsilon$ ،  $Realizable K-\epsilon$  و  $RSM$  که تاکنون نتایج قابل قبولی را در شبیه سازی جریان اطراف پایه‌های پل نشان داده‌اند مورد بررسی قرار گرفتند. که از میان این مدل‌های آشفتگی مورد بررسی مدل‌های  $RNG K-\epsilon$  و  $RSM$  نتایج قابل قبول‌تری را در شبیه سازی جریان اطراف پایه‌های پل نشان دادند. از میان این دو مدل آشفتگی، مدل  $RNG K-\epsilon$  به دلیل سرعت بالاتر در رسیدن به همگرایی و اقتصادی‌تر بودن انتخاب گردید و در تمام مراحل حل از این مدل استفاده شد.

### معرفی نرم افزار Tecplot

نرم‌افزار *Tecplot* از جمله نرم‌افزارهای ترسیمی قدرتمند می‌باشد که در بسیاری از رشته‌های مهندسی و علوم پایه از آن استفاده می‌شود. از قابلیت‌های آن راحتی کار با این نرم‌افزار، امکان ورود داده‌ها با فرمت‌های مختلف و قابلیت ترسیم دو بعدی، سه بعدی و

در معادلات اخیر  $\vec{v}_s$  و  $\vec{v}_w$  سرعت‌های متوسط جریان برای آب و ماسه،  $p$  فشار مشترک بین دو فاز،  $p_s$  فشار ذرات جامد،  $\vec{\tau}_s$  و  $\vec{\tau}_w$  تانسور تنش برای فاز آب و فاز ماسه،  $\vec{g}$  بردار شتاب ثقل و  $k_{s,w} = k_{w,s}$  ضریب تبادل بین فازی می‌باشند. جزئیات بیشتر در رابطه با پارامترهای اخیر در مرجع (۹) آورده شده است.

### ضریب تبادل بین فازی در مدل اولرین

در معادلات مومنتم اخیر تبادل مومنتم بین فازها بر اساس اندازه ضریب تبادل آب-ماسه  $k_{s,w}$  می‌باشد. این ضریب در شکل کلی آن به صورت زیر بیان می‌شود (۹):

$$k_{s,w} = \frac{\alpha_s \rho_s f}{\tau_s} \quad (7)$$

که در آن  $f$  برای مدل‌های مختلف ضریب تبادل، به شکل‌های متفاوتی تعریف می‌گردد. زمان آرام سازی ذره می‌باشد که به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\tau_s = \frac{\rho_s d_s^2}{18 \mu_w} \quad (8)$$

که در آن  $d_s$  قطر ذرات فاز ماسه (s) و  $\mu_w$  لزوجت دینامیکی سیال (آب) می‌باشد. تمام تعاریف بیانگر  $f$ ، شامل تابع دراگ (پسا)  $C_d$  می‌باشند که بر اساس عدد رینولدز نسبی  $Re_s$  استوار است. مدل ضریب تبادل بین فازی سیال-جامد که در این مطالعه مورد استفاده قرار می‌گیرد به مدل *Gidaspow* موسوم است که ترکیبی از مدل *Wen-Yu* و معادله *Ergun* می‌باشد و برای بسترهای متراکم آبگونه مناسب است. مدل *Gidaspow* به شکل زیر بیان می‌شود:

$$\begin{cases} k_{s,w} = \frac{3}{4} C_d \frac{\alpha_s \rho_s \mu_w |\vec{v}_s - \vec{v}_w|}{d_s} \alpha_w^{-2.42} & \alpha_w > 0.8 \\ k_{s,w} = 150 \frac{\alpha_s (1 - \alpha_w) \mu_w}{\alpha_w d_s^2} + 1.75 \frac{\alpha_s \rho_s \mu_w |\vec{v}_s - \vec{v}_w|}{d_s} & \alpha_w \leq 0.8 \end{cases}$$

از مدت زمان ۲۴۰ دقیقه در مدل عددی برابر ۱۲/۵ سانتی‌متر و در مدل آزمایشگاهی برابر ۱۱/۵ سانتی‌متر است. حداکثر عمق آبستتگی در آزمایشگاه پس از ۳۶۰ دقیقه حدود ۱۲ سانتی‌متر اندازه‌گیری شده است. مقایسه این نتایج نشان می‌دهد که مدل عددی فلوئنت حداکثر عمق آبستتگی را با دقت قابل قبولی تخمین می‌زند. محققان دیگری همانند صلاح‌الدین و همکاران (۱۴)، هوانگ و همکاران (۱۱)، بشارتی‌گیوی و حکیم‌زاده (۱)، زارع‌دهشت و همکاران (۲)، ساغروانی و همکاران (۳) و نوری‌فر و همکاران (۵) که از مدل فلوئنت برای تحقیقات خودشان و مدل‌های فیزیکی مختلف استفاده کرده‌اند نیز به این نتیجه رسیدند که نرم‌افزار فلوئنت می‌تواند آبستتگی اطراف پایه‌ها را با دقت خوبی شبیه‌سازی کند.

همچنین همانطور که در این اشکال دیده می‌شود در هر دو مدل روند آبستتگی در ابتدا سریع بوده و تقریباً ۸۰ درصد عمق آبستتگی در ۲ ساعت اول ایجاد می‌شود و سپس روند آبستتگی کندتر شده و در نهایت به یک حالت تعادل می‌رسد. همچنین در شکل‌ها دیده می‌شود که در مدل آزمایشگاهی پس از گذشت مدت زمان حدود ۲۰۰ دقیقه و در مدل عددی پس از گذشت مدت زمان حدود ۱۵۰ دقیقه روند تعادلی به وجود آمده است.

با توجه به اشکال فوق و مقایسه نتایج می‌توان نتیجه‌گیری کرد که در تمام مدت آزمایش و محاسبات، عمق آبستتگی در پایه دوم کمتر از پایه اول و عمق آبستتگی در پایه سوم کمتر از مقادیر مربوط به پایه‌های اول و دوم است. پایه اول تحت تأثیر پدیده تقویت‌کننده پایه‌های دوم و سوم است و همین عامل باعث افزایش ۲۶ درصدی عمق آبستتگی پایه جلویی نسبت به تک پایه شده است. پایه دوم تحت تأثیر پدیده تقویت‌کننده پایه سوم و پدیده محافظت‌کننده پایه اول قرار دارد به دلیل کاهش ۴۳ درصدی عمق آبستتگی در این پایه می‌توان نتیجه گرفت که تأثیر پدیده محافظت‌کننده پایه اول بیشتر بوده است. پایه سوم تحت تأثیر پدیده محافظت‌کننده پایه‌های اول و دوم است و در نتیجه عمق آبستتگی در جلوی این پایه به میزان ۵۰ درصد نسبت به تک پایه کاهش یافته است.

در جدول ۱ خطای مدل عددی فلوئنت برای محاسبه عمق آبستتگی نهایی نسبت به مدل آزمایشگاهی آمده است. این درصد خطا با استفاده از رابطه ۱۴ محاسبه شده است.

همانطور که در جدول فوق مشاهده می‌شود درصد خطای مدل فلوئنت برای محاسبه عمق آبستتگی اطراف پایه اول کم است، و در پایه دوم و سوم درصد خطای بیشتری دیده شده است.

در جدول ۲ خطای محاسباتی مدل عددی فلوئنت برای شبیه‌سازی آبستتگی اطراف مدل آزمایشگاهی به وسیله دو رابطه متوسط خطای مطلق و مجذور مربعات خطا ارائه شده است.

نکته ای که لازم است به آن توجه شود این است که در جدول ۲ خطا به صورت مجموع نقاط، از زمان شروع آبستتگی تا زمان رسیدن

ایجاد انیمیشن و انجام محاسبات مربوط به دینامیک سیالات را می‌توان نام برد. در این تحقیق به دلیل اینکه نمایش نتایج به دست آمده آبستتگی در نرم‌افزار فلوئنت چندان واضح نیست، نتایج به دست آمده از فلوئنت توسط نرم‌افزار Tecplot تحلیل شدند.

## خطای محاسباتی مدل عددی فلوئنت نسبت به مدل‌های آزمایشگاهی

خطا عبارت است از فاصله عمودی بین مقدار واقعی مشاهده شده و مقدار محاسبه شده. در این تحقیق از متوسط خطای مطلق و مجذور مربعات خطا برای بررسی خطای مدل عددی فلوئنت نسبت به مدل‌های آزمایشگاهی استفاده شد. متوسط خطای مطلق  $(AME)$  از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$AME = \frac{1}{N} \sum \left| \text{مقدار محاسبه شده} - \text{مقدار اندازه‌گیری شده} \right| \quad (12)$$

مجذور مربعات خطا  $(RMSE)$  از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum (\text{مقدار محاسبه شده} - \text{مقدار اندازه‌گیری شده})^2}{N}} \quad (13)$$

دو مقدار به دست آمده از روابط فوق هرچه به صفر نزدیک‌تر باشند نشان دهنده این است که خطا کمتر است و در نتیجه دقت محاسبه بیشتر است. همچنین به منظور محاسبه درصد خطای مدل فلوئنت برای محاسبه عمق آبستتگی نهایی، نسبت به مدل آزمایشگاهی از رابطه زیر استفاده گردید:

$$\Delta d = \left| \frac{d_{\text{محاسبه}} - d_{\text{آزمایشگاهی}}}{d_{\text{آزمایشگاهی}}} \right| \times 100 \quad (14)$$

## نتایج و بحث

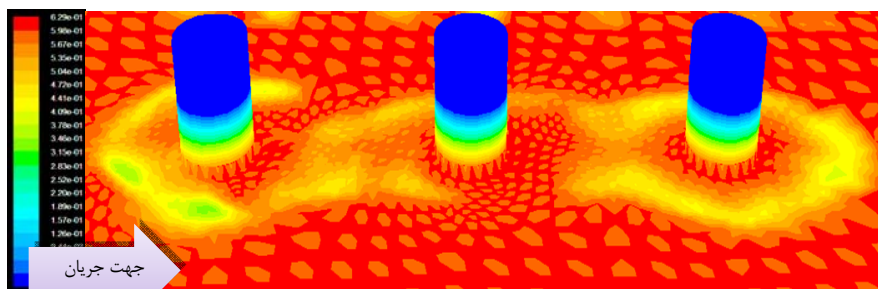
در شکل ۲ گسترش آبستتگی محاسبه شده توسط فلوئنت در اطراف گروه پایه و در شکل ۳ شکل دو بعدی توسعه آبستتگی در صفحه قائمی که از مرکز گروه پایه‌ها عبور می‌کند در Tecplot نشان داده شده است. مطابق شکل ۳ ماکزیمم عمق آبستتگی در جلوی پایه اول رخ می‌دهد. همچنین در شکل ۲ تقارن عرضی در خفره آبستتگی ایجاد شده در اطراف پایه‌ها تا حدودی نشان داده شده است.

توسعه زمانی عمق آبستتگی در جلوی هر یک از پایه‌ها در مدل فیزیکی پس از مدت زمان ۳۶۰ دقیقه در شکل ۴ و در مدل عددی پس از مدت زمان ۲۴۰ دقیقه در شکل ۵ نشان داده شده است. مطابق این اشکال حداکثر عمق آبستتگی در جلوی پایه اول ایجاد می‌شود. حداکثر عمق آبستتگی به دست آمده در جلوی پایه اول پس

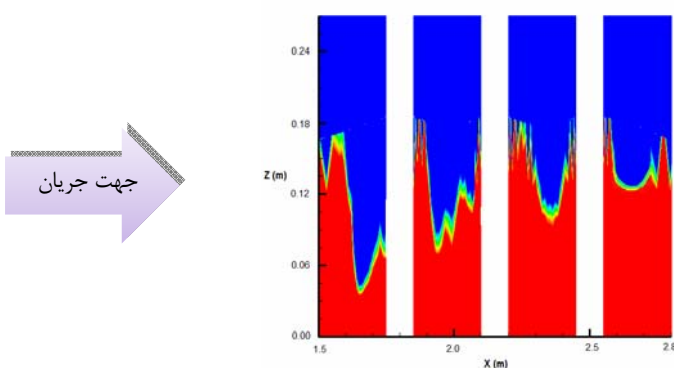
1- Absolute Mean Error

2- Root Mean Square Error

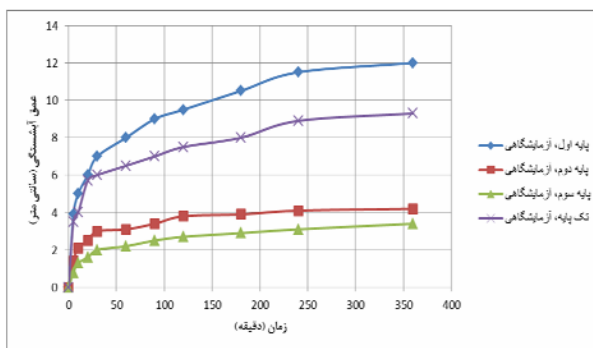
به عمق نهایی آبستنگی آمده است، همانطور که در روابط مجذور مربعات خطا و متوسط خطای مطلق نشان داده شده است. اما در جدول ۱ فقط خطای محاسبه عمق آبستنگی نهایی آمده است.



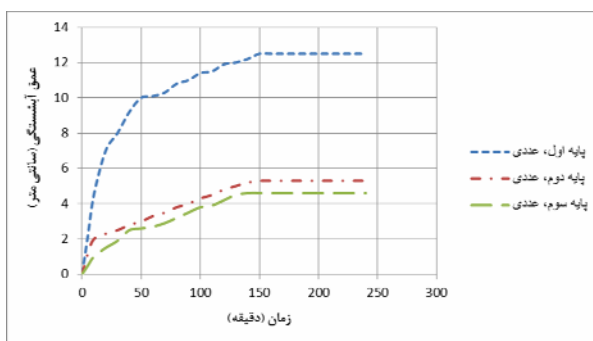
شکل ۲- گسترش حفره آبستنگی محاسبه شده توسط فلوننت در اطراف گروه پایه



شکل ۳- آبستنگی اطراف گروه پایه در وسط پایه‌ها به فاصله  $0.6/$  متر از لبه راست فلوم نسبت به جهت جریان



شکل ۴- توسعه زمانی عمق آبستنگی در جلوی گروه پایه در مدل آزمایشگاهی



شکل ۵- توسعه زمانی عمق آبستنگی در جلوی گروه پایه در مدل عددی

جدول ۱- درصد خطای مدل عددی فلونت نسبت به مدل آزمایشگاهی برای محاسبه عمق آبستنگی نهایی

| ردیف | مدل فیزیکی | عمق آبستنگی نهایی آزمایشگاهی | عمق آبستنگی نهایی عددی | درصد خطای مدل فلونت در تخمین عمق آبستنگی نهایی |
|------|------------|------------------------------|------------------------|--|
| ۱    | پایه اول   | ۱۲                           | ۱۲/۵                   | ۴/۱۷   |
| ۲    | پایه دوم   | ۴/۲                          | ۵/۳                    | ۲۶/۱۹  |
| ۳    | پایه سوم   | ۳/۴                          | ۴/۶                    | ۳۵/۲۹  |

جدول ۲- خطای مدل عددی فلونت نسبت به مدل آزمایشگاهی

| ردیف | مدل فیزیکی | متوسط خطای مطلق (cm) | مجذور مربعات خطا (cm) |
|------|------------|----------------------|-----------------------|
| ۱    | پایه اول   | ۱/۲۹                 | ۱/۴۹                  |
| ۲    | پایه دوم   | ۰/۵۹۱                | ۰/۷۶                  |
| ۳    | پایه سوم   | ۰/۷۴۵                | ۰/۹۷                  |

تقارن عرضی در حفرة آبستنگی ایجاد شده در اطراف پایه‌ها دیده می‌شود. مطابق نتایج به‌دست آمده ماکزیم عمق آبستنگی در جلوی پایه‌ها رخ می‌دهد. همچنین توسعه زمانی عمق آبستنگی در پیشانی پایه‌ها مطابق شکل‌های ۴ و ۵ نشان می‌دهد که روند آبستنگی در ابتدا سریع بوده و سپس کاهش می‌یابد و در نهایت به یک حالت تعادل می‌رسد به طوری که ۸۰ درصد آبستنگی در ۲ ساعت اول رخ می‌دهد.

در این مدل گروه پایه دیده شد که عمق آبستنگی در پایه دوم کمتر از پایه اول و عمق آبستنگی در پایه سوم کمتر از مقادیر مربوط به پایه‌های اول و دوم است. پایه اول تحت تأثیر پدیده تقویت کننده پایه‌های دوم و سوم است و همین عامل باعث افزایش ۲۶ درصدی عمق آبستنگی پایه جلویی نسبت به تک پایه شده است. پایه دوم تحت تأثیر پدیده تقویت کننده پایه سوم و پدیده محافظت کننده پایه اول قرار دارد. به دلیل کاهش ۴۳ درصدی عمق آبستنگی در این پایه می‌توان نتیجه گرفت که تأثیر پدیده محافظت کننده پایه اول بیشتر بوده است. پایه سوم تحت تأثیر پدیده محافظت کننده پایه‌های اول و دوم است و در نتیجه عمق آبستنگی در جلوی این پایه به میزان ۵۰ درصد نسبت به تک پایه کاهش یافته است.

مدل‌های اغتشاش موجود در نرم‌افزار به طور کامل تست شدند و مشخص گردید که برای این حالت، یعنی شبیه سازی سه بعدی جریان در اطراف پایه‌های پل، مدل  $RNG K-\epsilon$  نسبت به سایر مدل‌ها نتایج بهتری ارائه می‌دهد.

همانطور که در جدول فوق مشاهده می‌شود به طور کلی خطای مدل عددی فلونت برای شبیه سازی آبستنگی اطراف پایه‌های پل کم است. در پایه دوم کمترین خطا یعنی بیشترین دقت و در پایه اول بیشترین خطا مشاهده شده است. همانطور که در جدول ۱ مشاهده می‌شود مدل فلونت عمق آبستنگی نهایی را در جلوی پایه اول تقریباً خوب تخمین می‌زند پس به طور کلی علت خطای بیشتر در جلوی پایه اول در جدول ۲ این است که در این مدل زمان رسیدن به حالت تعادل بین مدل آزمایشگاهی و عددی یکسان نیست و مدل عددی زودتر از مدل آزمایشگاهی به عمق تعادل آبستنگی می‌رسد و چون خطا در اینجا به صورت فاصله عمودی بین مقدار واقعی و مقدار محاسبه شده می‌باشد در نتیجه پایه اول خطای بیشتری را نشان می‌دهد.

## نتیجه گیری

در این مطالعه برای مدلسازی آبستنگی در اطراف گروه پایه متشکل از سه پایه مدور هم امتداد تحت شرایط آب زلال و بستر ماسه ای یکنواخت، مدل دو فاز اولرین که قسمتی از بسته نرم-افزاری فلونت می‌باشد استفاده شد. نتایج مدل عددی با نتایج حاصل از آزمایشات انجام شده بر روی مدل فیزیکی مورد مقایسه قرار گرفت. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که: نرم‌افزار فلونت و مدل عددی دو فاز اولرین قادر هستند حداکثر عمق آبستنگی در اطراف پایه‌ها را به خوبی پیش‌بینی نمایند.

## منابع

- ۱- بشارتی گیوی م.م. و حکیم زاده ح. ۱۳۸۹. بررسی عددی سه بعدی الگوی جریان و تنش برشی بستر اطراف پایه های مخروطی. نشریه مهندسی دریا، ۶(۱۱): ۷۰-۶۳.
- ۲- زارع دهشت الف، حسونی زاده ه. و محمدیان شوشتری م. ۱۳۸۹. بررسی پدیده آبستنگی اطراف پایه های پل توسط مدل عددی FLUENT.

- نهمین کنفرانس هیدرولیک ایران. دانشگاه تربیت مدرس، ۱۸-۲۰ آبان.
- ۳- ساغروانی س.ف.الف.، اظهاری الف.، علیزاده م.، محمد نژاد ب. و شریفی منش ح. ۱۳۸۹. مدل سازی عددی آبشستگی موضعی اطراف گروه پایه پل با مقطع دایره ای. نهمین کنفرانس هیدرولیک ایران، دانشگاه تربیت مدرس، ۱۸-۲۰ آبان.
- ۴- شفاعی بجستان م. ۱۳۸۴. هیدرولیک رسوب. انتشارات دانشگاه شهید چمران اهواز.
- ۵- نوری فر م.، فغفور مغربی م. و حسن زاده ی. ۱۳۸۹. مقایسه عددی کاهش آبشستگی موضعی اطراف پایه پل شکاف دار و دو پایه پل مجزا. پنجمین کنگره ملی مهندسی عمران. دانشگاه فردوسی مشهد. مشهد، ایران، ۱۴-۱۶ اردیبهشت.
- ۶- وزارت نیرو. ۱۳۸۶. راهنمای روش های محاسبه آبشستگی موضعی. نشریه شماره ۳۱۸-الف.
- 7- Ahmed Mohammed T., Megat Mohd Noor M.J., Ghazali A.H., Yusuf B. and Saed K. 2007. Physical modeling of local scouring around bridge piers in erodible bed. J. King Saud Univ, 19: 195-207.
- 8- Esmaeili T., Dehghani A.A., Zahiri A.R. and Suzuki K. 2009. 3D numerical simulation of scouring around bridge piers (case study: bridge 524 crosses the Tanana river). World Academy of Science, Engineering and Technology, 58.
- 9- FLUENT Incorporated. 2006. FLUENT 6.3 USER'S GUIDE. Lebanon, USA.
- 10- Ghorbani B. 2007. A field study of scour at bridge piers in flood plain rivers. Turkish J. Eng. Env. Sci. 32: 189-199.
- 11- Huang W., Yang Q. and Xiao H. 2009. CFD modeling of scale effects on turbulence flow and scour around bridge piers. Computers and Fluids, 38: 1050-1058.
- 12- Raudkivi A.J. 1998. Loose Boundary Hydraulics. A.A. Balkema, Rotterdam, The Netherland.
- 13- Raudkivi A.J. and Ettema R. 1983. Clear-water scour at cylindrical piers. J. Hyd. Eng., ASCE, 109(3):338-350.
- 14- Salaheldin T.M., Imran J. and Chaudhry M.H. 2004. Numerical modeling of three-dimensional flow field around circular piers. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 130(2):91-100.
- 15- Tseng M., Yen C.L. and Song C.C.S. 2000. Computation of three-dimensional flow around square and circular piers. Int J Number Meth Fluids, 34, pp. 207-227.
- 16- Vasquez J.A. and Walsh B.W. 2009. CFD simulation of local scour in complex piers under tidal flow. 33<sup>rd</sup> IHAR Congress: Water Engineering for a Sustainable Environment, ISBN: 978-94-90365-01-1.





## Numerical Modeling of Local Scouring Around Group Bridge Piers and Compared with Experimental Results

B. Mahjoob<sup>1</sup>- B. Mohammadnezhad<sup>2</sup>- J. Behmanesh<sup>3\*</sup>

Received: 27-03-2013

Accepted: 18-03-2014

### Abstract

Bridges are the most important structures in river engineering. One of the most causes in bridges destruction is local scouring around the bridge piers. Many bridges failed in the world because of the extreme scour around piers, which have caused to disappear a lot of investments. Then, it is essential to predict the scour depth around bridge piers. In this research, the Fluent three-dimensional numerical model was used to investigate the scouring around the group cylindrical pier in clear water and uniform sand bed conditions. In this model, sedimentary flow was considered as two-phase flow (water - sand) and Eulerian two-phase model was used. To estimate the parameters of flow turbulence in the water phase, the RNG K- $\epsilon$  model was used. To evaluate and verify the numerical model, the computational results were compared with experimental data. The maximum scour depth in front of the first pier on a numerical model equal to 12.5 cm and in experimental model equal to 12 cm have been measured. Also scour depth at the second pier less than that at the first pier and scour depth at the third pier has been less than the values of the first and second pier. The results showed that the two phase model can simulate the scour phenomena around the pier.

**Keywords:** Scour Hole, Circular Pier, Sediment, Numerical Simulation, The Two-Phase Model Eulerian

---

1,3- M.Sc Graduated and Associate Professor, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Urmia University, Urmia, Iran

(\* - Corresponding Author Email: [j.behmanesh@urmia.ac.ir](mailto:j.behmanesh@urmia.ac.ir))

2- Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Qom University, Qom, Iran