

## مقایسه مدل‌های آشفتگی در تخمین تنش برشی بستر پیرامون تکیه‌گاه پل در مقطع مرکب

یوسف رضانی<sup>1\*</sup>، رضا باباگلی سفیدکوهی<sup>2</sup>

تاریخ دریافت: 94/04/17 تاریخ پذیرش: 94/12/11

<sup>1</sup>- استادیار، گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه بیرجند

<sup>2</sup>- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه بیرجند

\* مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: y.ramezani@birjand.ac.ir

### چکیده

شکست پل ناشی از آبشستگی در تکیه‌گاه پل، ضرورت مطالعه در مورد میدان جریان پیرامون آن را روشن می‌سازد. هدف این تحقیق، مقایسه نتایج آزمایشگاهی و شبیه‌سازی عددی تنش برشی بستر پیرامون تکیه‌گاه پل در مقطع مرکب توسط مدل FLOW-3D هست. به منظور استخراج نتایج تنش برشی بستر آزمایشگاهی، سرعت جریان در ترازهای مختلف عمق آب در دشت سیلابی، به وسیله سرعت‌سنج 3 بعدی الکترومغناطیس اندازه‌گیری شد. برای محاسبه تنش‌های رینولدزی کف کانال  $u_{\tau}^*$ ،  $u_{\tau}^*$  و  $v_{\tau}^*$ ، به دلیل عمق کم جریان در دشت سیلابی، از روش برون‌یابی تنش‌های رینولدزی به کف کانال استفاده شد. نتایج آزمایشگاهی نشان داد بیشترین میزان تنش برشی بستر در دماغه بالادست تکیه‌گاه هست. پس از شبکه‌بندی در مدل FLOW-3D، شبیه‌سازی هیدرولیکی جریان در 5 مدل آشفتگی طول اختلاط پرانتل، مدل یک معادله‌ای انرژی جنبشی آشفتگی، مدل دو معادله‌ای  $k-\epsilon$ ، مدل گروه‌های نرمال شده RNG و مدل شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ اجرا گردید. مقایسه نتایج نشان می‌دهد نتایج مدل عددی توسط مدل آشفتگی RNG مطابقت بیشتری با نتایج آزمایشگاهی دارد و به خوبی الگوی تنش برشی پیرامون تکیه‌گاه پل را پیش‌بینی می‌نماید. تنش برشی بستر در دماغه بالادست تکیه‌گاه توسط نتایج آزمایشگاهی و مدل آشفتگی RNG در مدل عددی به ترتیب 3/84 و 4/6 نیوتن بر مترمربع به دست آمد.

واژه‌های کلیدی: تکیه‌گاه پل، تنش برشی بستر، تنش‌های رینولدزی، مدل FLOW-3D، مدل آشفتگی

## Comparison of Turbulence Models for Estimation of Bed Shear Stress Around Bridge Abutment in Compound Channel

Y Ramezani<sup>1\*</sup>, R Babagoli Sefidkoochi<sup>2</sup>

Received: 08 July 2015 Accepted: 01 March 2016

<sup>1</sup>- Assist. Prof., Dept. of Water Engin., Univ. of Birjand, Iran

<sup>2</sup>- M.Sc. Student, Dept. of Water Engin., Univ. of Birjand, Iran

\*Corresponding Author, Email: [y.ramezani@birjand.ac.ir](mailto:y.ramezani@birjand.ac.ir)

### Abstract

Bridge failures due to scour at bridge abutments clarify importance of flow field around them. Scope of this study is the comparison between experimental results and numerical simulation of bed shear stress around bridge abutment in a compound channel by Flow-3D model. In order to calculate the experimental bed shear stress, flow velocity was measured by a 3D electromagnetic velocimeter in different levels of flow depth of floodplain. For estimation of Reynolds stresses of  $\overline{u'v'}$ ,  $\overline{u'w'}$  and  $\overline{v'w'}$ , in low flow depth of floodplain, extrapolations of these values to the bed were used. Experimental results showed that maximum bed shear stress occurred at the upstream corner of the abutment. After mesh generation, hydraulic simulation of flow with Flow-3D model was run in 5 turbulent models of Prandtl mixing-length model, one equation turbulent energy model, k- $\epsilon$  model, renormalized group (RNG) model and large eddy simulation model. Comparison between models showed that the results achieved by the RNG model had a better agreement with experimental observations and the pattern of shear stress around the bridge abutment was well predicted by this model. Bed shear stress at the upstream corner of the abutment was determined by experimental results and RNG model giving 3.84 and 4.6 N/m<sup>2</sup>, respectively.

**Keywords:** Bed shear stress, Bridge abutment, Flow-3D model, Reynolds stresses, Turbulence model

### مقدمه

تکیه‌گاه پل بود. ملویل (1992) همچنین خاطرنشان می‌سازد که 70 درصد هزینه‌ها روی شکست پل در نیوزیلند ناشی از آبشستگی تکیه‌گاه پل بوده است. در شکل 1 میدان جریان پیرامون یک تکیه‌گاه پل نشان داده شده است. عوامل درگیر در آبشستگی پیرامون تکیه‌گاه پل را می‌توان به جریان پایین‌رونده<sup>3</sup>، گرداب موج

شکست پل ناشی از آبشستگی در فونداسیون (شامل پایه<sup>1</sup> و تکیه‌گاه<sup>2</sup>)، ضرورت مطالعه در مورد میدان جریان پیرامون آن و پیش‌بینی آبشستگی را روشن می‌سازد. داده‌ها نشان می‌دهند که مشکل آبشستگی در تکیه‌گاه پل‌ها بسیار مهم است. بر طبق مطالعات ملویل (1992)، از 108 شکست پل که در فاصله سال‌های 1960 الی 1984 در نیوزیلند رخ داد، 29 مورد آن مربوط به آبشستگی

<sup>3</sup> Down flow

<sup>1</sup> Pier

<sup>2</sup> Abutment

اعمال نیروی بالابرنده به ذرات کف (به دلیل مؤلفه سرعت رو به بالا)، باعث جدا شدن ذرات از بستر می‌شود و آن‌ها را در اختیار جریان عمومی آبراهه قرار داده تا به سمت پائین دست حمل شوند. با عمیق‌تر شدن حفره و اضافه شدن حجم آب داخل حفره، این گرداب تضعیف شده و از تنش‌های وارد به کف کاسته می‌شود.

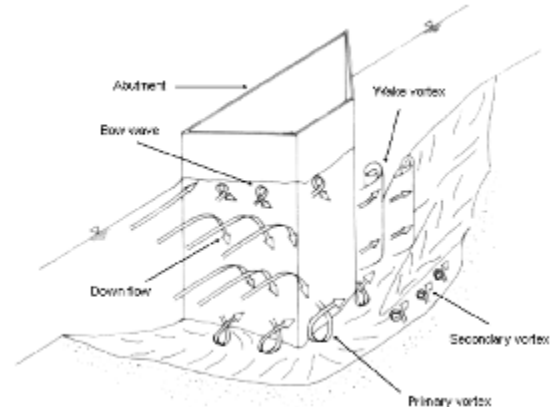
تحقیقات در زمینه مکانیسم آبشستگی در تکیه‌گاه پل‌ها توسط کوان (1984 و 1988)، احمد و راجاراتنام (2000)، باربویا و دی (2003)، دی و باربویا (2005a، 2005b، 2006a، 2006b) و بسیاری دیگر نشان داده است مهم‌ترین عامل ایجاد حفره آبشستگی در جلوی تکیه‌گاه و پایه پل، گرداب نعل اسبی هست.

مولیناس و همکاران (1998) به‌طور آزمایشگاهی به‌وسیله لوله پرستون توزیع تنش برشی بستر اطراف تکیه‌گاه پل با دیواره عمودی را در یک کانال مستطیلی بررسی نمودند. آن‌ها نشان دادند که بالاترین مقدار تنش برشی برای محدوده عدد فرود بین 0/3 تا 0/9 و نسبت پیش‌آمدگی 0/1، 0/2 و 0/3، در گوشه بالادست تکیه‌گاه رخ می‌دهد. بر طبق مطالعات آزمایشگاهی، تنش برشی اطراف تکیه‌گاه پل با دیواره عمودی، بسته به شرایط جریان و میزان پیش‌آمدگی تکیه‌گاه، افزایش می‌یابد.

احمد و راجاراتنام (2000) میدان جریان را حول یک تکیه‌گاه بالی شکل<sup>8</sup> بررسی نمودند. آن‌ها دریافتند که جریان نزدیک شونده به یک جریان 3 بعدی پیچیده در بالادست و اطراف تکیه‌گاه تبدیل می‌شود. همچنین آن‌ها دریافتند که تنش برشی بستر پیرامون تکیه‌گاه، به مقدار بیشینه  $\tau/\tau_0$  برابر 3/63 در نزدیکی دماغه می‌رسد که تنش برشی بستر و  $\tau_0$  تنش برشی جریان نزدیک شونده در بستر است. همچنین آن‌ها دریافتند که میزان انحراف جریان پیرامون تکیه‌گاه پل بیشتر از اطراف پایه پل است. تروزی و همکاران (2009) به بررسی عددی تنش‌های تلاطم کف در نزدیکی تکیه‌گاه پل پرداختند. جریان

کمانی<sup>4</sup>، گرداب نعل اسبی<sup>5</sup>، گرداب ثانویه<sup>6</sup> و گرداب برخاستگی<sup>7</sup> تقسیم‌بندی نمود.

هنگام برخورد جریان آب به دماغه تکیه‌گاه پل، سرعت جریان پس از برخورد به دماغه تبدیل به فشاری روی تکیه‌گاه می‌گردد. از آنجا که سرعت از سطح به طرف کف کم می‌گردد، فشار دینامیکی روی دماغه تکیه‌گاه از بالا به پائین نیز کم شده و گرادیان فشار ایجاد شده باعث ایجاد جریانی به طرف کف می‌شود.



شکل 1- میدان جریان پیرامون یک تکیه‌گاه پل (باربویا و دی 2004).

این جریان روبه پائین پس از برخورد با بستر، ذرات آن را کنده و به جهات مختلف پراکنده می‌کند. مقداری از این جریان که رو به سمت بالادست بازگشت می‌کند در برخورد با جریان عمومی مجبور به حرکت در جهت جریان می‌شود. این چرخش جریان و بازگشت مجدد آن باعث تشکیل گردابی می‌شود. چرخش این گرداب به طرف پائین دست امتداد می‌یابد که در مجموع شکلی شبیه نعل اسب در پلان پیدا می‌کند و به همین دلیل آن را گرداب نعل اسبی می‌نامند.

به این ترتیب حرکت جریان رو به پائین، باعث ایجاد حفره‌ای در جلوی دماغه تکیه‌گاه پل می‌شود و با تشکیل این حفره، گرداب نعل اسبی در این حفره تشکیل می‌شود. این گرداب هم به سبب تنشی که به کف وارد می‌کند و هم

<sup>7</sup> Wake vortex

<sup>8</sup> Wing wall

<sup>4</sup> Bow wave

<sup>5</sup> Horseshoe vortex

<sup>6</sup> Secondary vortex

پیرامون تکیه‌گاه پل در مقطع مرکب توسط مدل عددی FLOW-3D هست.

### مواد و روش‌ها

#### فلوم آزمایشگاهی

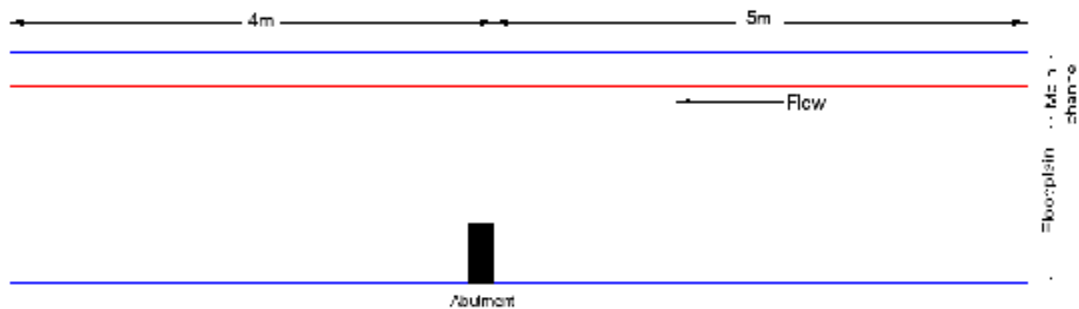
آزمایش‌های این تحقیق در فلومی به طول 9 متر و عرض 1 متر در آزمایشگاه هیدرولیک دانشکده مهندسی علوم آب دانشگاه شهید چمران اهواز انجام شد (رعضانی و قمشی 1393). عرض دشت سیلابی 70 سانتی‌متر، عرض آبراهه اصلی 30 سانتی‌متر و اختلاف ارتفاع کف آبراهه اصلی و کف دشت سیلابی 15 سانتی‌متر در نظر گرفته شد (شکل‌های 2 و 3). دبی ورودی با استفاده از شیر ورودی تنظیم و به وسیله یک سرریز مثلثی شکل واسنجی شده اندازه‌گیری شد. عمق جریان نیز با استفاده از دریچه انتهایی تنظیم گردید. چند آرام‌کننده جریان در ابتدای فلوم به منظور کاهش تلاطم آب نصب شد.

سه‌بعدی در مقابل تکیه‌گاه با تأکید بر اثر آن بر روی تنش‌های برشی و گرادیان‌های فشار مورد تجزیه تحلیل قرار گرفته و میزان پتانسیل آبشستگی آن‌ها مورد بحث قرار گرفت.

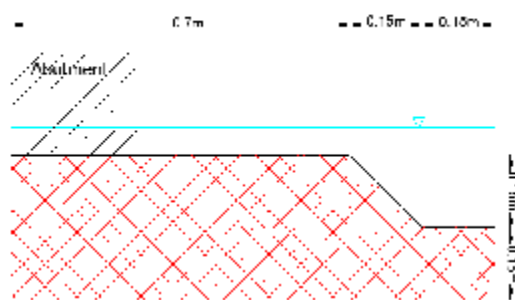
با توجه به محدودیت‌های استفاده از مدل فیزیکی، مدل‌های عددی به دلیل سهولت استفاده از آن‌ها کاربرد فراوانی می‌یابند. مسئله مهم در مدل‌های عددی صحت نتایج آن‌ها هست. تنها راهی که به کمک آن یک محقق می‌تواند دید لازم را برای قضاوت در مورد صحت نتایج یک مدل عددی به دست آورد، تهیه مدل‌های آزمایشگاهی گوناگون، انجام اندازه‌گیری و مقایسه نتایج آن‌ها با یکدیگر هست.

بیشتر تحقیقات در زمینه تکیه‌گاه پل‌ها در کانال‌های مستطیلی انجام گرفته است. حال آنکه بیشتر تکیه‌گاه پل‌ها در دشت سیلابی قرار گرفته‌اند و قرار گرفتن تکیه‌گاه در مجرای اصلی کمتر رایج است (بی‌نام 2004).

بنابراین، هدف این تحقیق، مقایسه نتایج آزمایشگاهی و شبیه‌سازی عددی تنش برشی بستر



شکل 2- طرح فلوم آزمایشگاهی مورد مطالعه.



شکل 3- مقطع عرضی فلوم آزمایشگاهی مورد مطالعه.

اندازه‌گیری نوسان مؤلفه‌های سرعت 30 ثانیه برای هر نقطه در نظر گرفته شد.

### مدل عددی FLOW-3D

مدل FLOW-3D یکی از مدل‌های بسیار قوی در زمینه دینامیک سیالات محاسباتی<sup>9</sup> (CFD) است. این مدل قابلیت تحلیل سه‌بعدی میدان جریان را داشته و محدوده کاربردی بسیار وسیعی را در مسائل مربوط به سیالات دارد.

اساس معادلات حاکم برای حل جریان‌های آرام و متلاطم یکسان بوده و از معادلات پیوستگی و ناویر-استوکس استفاده می‌شود. با این تفاوت که برای حل جریان متلاطم، معادلات ناویر-استوکس را متوسط‌گیری زمانی می‌کنند. با این عمل یک سری عبارت‌های اضافی در معادلات ناویر-استوکس ظاهر می‌شود که از نوع تنش تقسیر می‌شوند و آن‌ها را تنش‌های آشفتگی (تنش‌های رینولدزی) می‌نامند. مدل‌های آشفتگی برای حل عبارت-های اضافی ظاهر شده در معادلات ناویر-استوکس، مورد استفاده قرار می‌گیرند.

برای بررسی جریان آشفته بهتر است ابتدا خصوصیات لحظه‌ای جریان (برای مثال مؤلفه‌های سرعت و فشار) به یک مقدار میانگین و یک مقدار نوسانی تجزیه شوند:

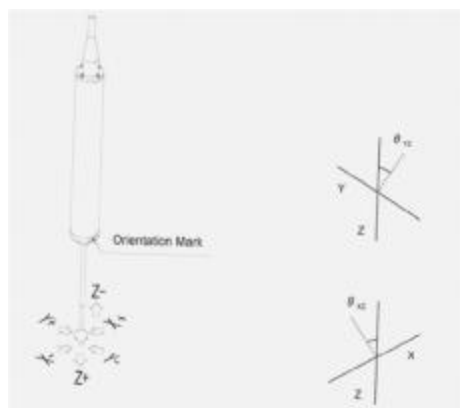
$$u_i = \bar{u}_i + u'_i \quad [1]$$

$$p = \bar{p} + p' \quad [2]$$

در روابط بالا، پارامترهای  $\bar{u}_i$  و  $\bar{p}$  به ترتیب عبارت‌اند از مقادیر متوسط زمانی سرعت و فشار و پارامترهای  $u'_i$  و  $p'$  عبارت‌اند از مقادیر نوسان آن‌ها. دلیل تجزیه‌های بالا این است که بتوان با استفاده از معادلات ناویر-استوکس به مطالعه جریان‌های آشفته پرداخت. چون برای مطالعه جریان‌های آشفته با استفاده از فرم معمولی معادلات ناویر-استوکس، نیاز خواهد بود که ابعاد سلول و گام‌های زمانی حل، بسیار ریز باشد.

بیشتر شرایط واقعی تکیه‌گاه پل‌ها در محدوده طول متوسط طبقه‌بندی ملویل (1992) قرار می‌گیرند. بنابراین، در این تحقیق از تکیه‌گاهی با دیواره عمودی و در محدوده طول متوسط طبقه‌بندی ملویل (1992) استفاده شد. با توجه به عرض آبراهه و عرض دشت سیلابی، تکیه‌گاهی به طول 26 سانتی‌متر در آزمایش‌ها مورد استفاده قرار گرفت. عرض تکیه‌گاه (در جهت جریان) نیز 12 سانتی‌متر انتخاب شد.

سرعت جریان به وسیله سرعت‌سنج 3 بعدی الکترومغناطیس اندازه‌گیری شد. در شکل 4 نحوه اندازه‌گیری و جهت محورهای سرعت‌سنج نشان داده شده است. اندازه‌گیری سرعت در مرکز گوی سرعت‌سنج الکترومغناطیس انجام می‌شود. قطر این گوی 2 سانتی‌متر هست. اندازه‌گیری‌های سرعت در دبی 30 لیتر بر ثانیه و عمق 8/3 سانتی‌متر در دشت سیلابی انجام پذیرفت.



شکل 4- نحوه اندازه‌گیری و جهت محورهای سرعت‌سنج سه‌بعدی الکترومغناطیس.

شبکه‌بندی اندازه‌گیری سرعت در راستای عرض کانال در فواصل 5 سانتی‌متر، در راستای طول کانال در فواصل 6 سانتی‌متر در نقاط نزدیک به تکیه‌گاه و 10 سانتی‌متر در نقاط دورتر از تکیه‌گاه و در راستای عمق جریان به فواصل 5 میلی‌متر در حد فاصل عمق جریان 2 تا 6 سانتی‌متر روی دشت سیلابی انجام پذیرفت. زمان

<sup>9</sup> Computational fluid dynamics

انتخاب مناسبی برای فرموله کردن  $\mu_t$  است تردید وجود دارد ولی با توجه به واحد لزجت گردابی که عبارت است از  $[m^2/s]$ ، بهترین انتخاب می‌تواند مقیاس سرعت و مقیاس طول باشد. بنابراین رابطه زیر برای لزجت گردابی دینامیکی ارائه شده است:

$$\mu_t = C\rho v_t L \quad [9]$$

به طوری که C عبارت است از یک ضریب ثابت،  $\rho$  دانسیته سیال،  $v_t$  مقیاس سرعت و L نیز مقیاس طول است.

### انواع مدل‌های آشفتگی

مدل‌های آشفتگی زیادی توسط محققان مختلف برای شبیه‌سازی جریان‌های آشفتگی تدوین شده است. این مدل‌ها بر اساس روش عمل و تعداد معادلات دیفرانسیل مورد استفاده برای کمیت‌های آشفتگی، به دسته‌های مدل‌های صفر معادله‌ای، مدل‌های یک معادله‌ای، مدل‌های دو معادله‌ای، مدل‌های دارای معادله تنش و مدل‌های شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ تقسیم می‌شوند.

شبیه‌سازی آشفتگی در FLOW-3D با استفاده از یکی از پنج مدل آشفتگی مورد استفاده توسط این نرم‌افزار صورت می‌گیرد. مدل‌های آشفتگی مورد استفاده توسط FLOW-3D عبارت‌اند از: طول اختلاط پرانتل<sup>10</sup>، یک معادله‌ای انرژی جنبشی آشفتگی<sup>11</sup>، مدل دو معادله‌ای k- $\epsilon$ <sup>12</sup>، مدل گروه‌های نرمال شده RNG و مدل شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ<sup>13</sup>

### شبکه‌بندی و شرایط مرزی مدل

به منظور تهیه هندسه کانال از نرم‌افزار AutoCAD استفاده شد. ابتدا هندسه کانال توسط این نرم‌افزار دقیقاً مطابق شرایط آزمایشگاهی ترسیم و سپس به فرمت Stl که فرمت قابل استفاده در نرم‌افزار FLOW-3D هست تبدیل گردید. بازه شبیه‌سازی دقیقاً منطبق بر شرایط آزمایشگاهی هست.

با جاگذاری روابط 1 و 2 در معادلات ناویر-استوکس و پیوستگی و متوسط‌گیری زمانی از روابط حاصل، روابط زیر به دست می‌آید.

پیوستگی:

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{w}}{\partial z} = 0 \quad [3]$$

ناویر-استوکس:

$$\rho \left( \frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} + \bar{w} \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} \right) = F_x - \quad [4]$$

$$\frac{\partial \bar{p}}{\partial x} + \mu \Delta \bar{u} - \rho \left( \frac{\partial \bar{u}\bar{u}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{u}\bar{v}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{u}\bar{w}}{\partial z} \right)$$

$$\rho \left( \frac{\partial \bar{v}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} + \bar{w} \frac{\partial \bar{v}}{\partial z} \right) = F_y - \quad [5]$$

$$\frac{\partial \bar{p}}{\partial y} + \mu \Delta \bar{v} - \rho \left( \frac{\partial \bar{u}\bar{v}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{v}\bar{v}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{v}\bar{w}}{\partial z} \right)$$

$$\rho \left( \frac{\partial \bar{w}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{w}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{w}}{\partial y} + \bar{w} \frac{\partial \bar{w}}{\partial z} \right) = F_z - \quad [6]$$

$$\frac{\partial \bar{p}}{\partial z} + \mu \Delta \bar{w} - \rho \left( \frac{\partial \bar{u}\bar{w}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{v}\bar{w}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{w}\bar{w}}{\partial z} \right)$$

عبارت‌های آخر در سمت راست معادلات ناویر-استوکس متوسط‌گیری شده زمانی عبارت‌اند از تنش‌های رینولدزی.

تنها تفاوت رابطه بالا با فرم معمولی معادلات ناویر-استوکس، اضافه شدن عبارت مربوط به تنش‌های رینولدزی است. مدل‌های آشفتگی به دنبال یافتن راه‌حل مناسب برای تخمین مقدار این عبارت هستند.

در اغلب مدل‌های آشفتگی از فرضیه بوزینسک برای حل تنش‌های رینولدزی استفاده می‌شود. این فرضیه با استفاده از ضریبی به نام لزجت گردابی، تنش‌های رینولدزی را به گرادیان‌های سرعت نسبت می‌دهد.

$$\overline{u_i u_j} = \nu_t \left[ \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right] \quad [7]$$

$$\tau_{i,j} = \rho \overline{u_i u_j} = \mu_t \left[ \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right] \quad [8]$$

به طوری که  $\nu_t$  و  $\mu_t$  به ترتیب عبارت‌اند از لزجت گردابی سینماتیکی و دینامیکی و  $\mu_t = \rho \nu_t$  است. چون لزجت گردابی برای برآورد تنش‌های آشفتگی به کار می‌رود لذا باید تابعی از خصوصیات جریان آشفتگی باشد. در خصوص اینکه کدام یک از خصوصیات جریان آشفتگی،

<sup>12</sup> Two equation k- $\epsilon$  model

<sup>13</sup> Large eddy simulation model

<sup>10</sup> Prandtl mixing-length model

<sup>11</sup> One equation turbulent energy model

دی و باربویا (2005a) از تنش‌های رینولدزی برای محاسبه تنش برشی بستر اطراف تکیه‌گاه در یک فلوم مستطیلی و بستر صاف به صورت زیر استفاده کردند:

$$t_0 = \sqrt{t_x^2 + t_y^2} \quad [10]$$

$$t_x = -r \frac{u_{\text{avg}} + u_{\text{avg}}}{\sqrt{u_{\text{avg}}^2 + v_{\text{avg}}^2}} \quad [11]$$

$$t_y = -r \frac{v_{\text{avg}} + v_{\text{avg}}}{\sqrt{u_{\text{avg}}^2 + v_{\text{avg}}^2}} \quad [12]$$

که در آن  $t_0$  تنش برشی بستر و  $\rho$  چگالی آب هست. دوان (2009) نیز بر اساس رابطه 10 به محاسبه تنش برشی کف اطراف آبشکن در یک فلوم مستطیلی و بستر صاف پرداخت.

با توجه به عمق کم جریان در دشت سیلابی، سرعت سنج الکترومغناطیس توانایی اندازه‌گیری نوسان-های سرعت نزدیک بستر را دارا نبود. بنابراین، در این تحقیق برای محاسبه تنش برشی بستر پیرامون تکیه‌گاه از رابطه 10 و برای محاسبه تنش‌های رینولدزی کف کانال  $u_{\text{avg}}$ ،  $v_{\text{avg}}$  و  $w_{\text{avg}}$  به دلیل عمق کم جریان در دشت سیلابی، از روش برون‌یابی تنش‌های رینولدزی به کف کانال استفاده شده است.

در شکل‌های 5 تا 7، نوسان مؤلفه‌های سرعت دماغه تکیه‌گاه پل به عنوان نمونه آورده شده است.

در شکل‌های 8 تا 10، با برون‌یابی تنش‌های رینولدزی دماغه تکیه‌گاه به کف کانال، تنش‌های رینولدزی بستر  $u_{\text{avg}}$ ،  $v_{\text{avg}}$  و  $w_{\text{avg}}$  نشان داده شده است. در جدول 1 نیز تنش برشی بستر دماغه تکیه‌گاه محاسبه شده است.

شبکه‌بندی مدل با استفاده از اجزاء مکعبی قائمه امکان‌پذیر است. توصیه می‌شود که در نواحی با گرادیان بالا، از اجزاء ریزتری استفاده شود. در این تحقیق به منظور افزایش دقت محاسبات، از شبکه‌بندی 1 سانتی-متری در هر سه جهت X، Y و Z استفاده گردیده است. شرط مرزی دبی جریان و ارتفاع سیال در  $X_{\text{min}}$  و  $X_{\text{max}}$  که به ترتیب ورودی و خروجی کانال می‌باشند استفاده شده است. در  $Y_{\text{min}}$  و  $Y_{\text{max}}$  (دیواره‌های کانال) و  $Z_{\text{min}}$  (کف کانال) شرط مرزی دیواره صلب (Wall) و در  $Z_{\text{max}}$  که سطح آزاد جریان هست، شرط مرزی تقارن (Symmetry) اعمال شده است.

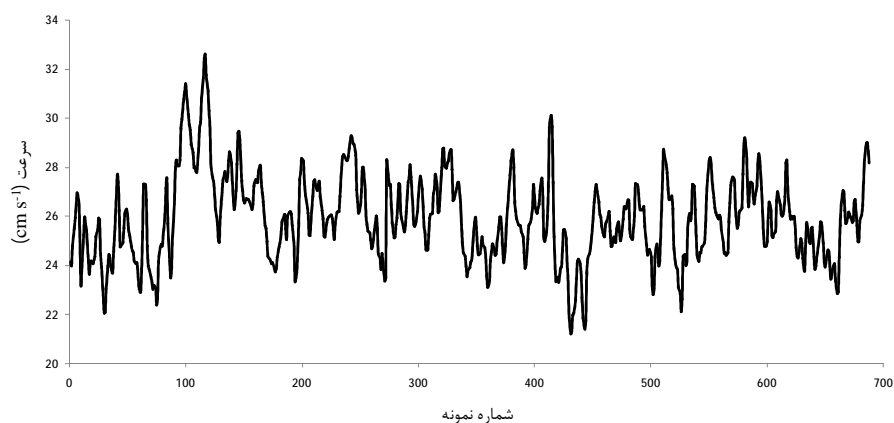
## نتایج و بحث

### محاسبه تنش برشی بستر پیرامون تکیه‌گاه پل توسط اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی

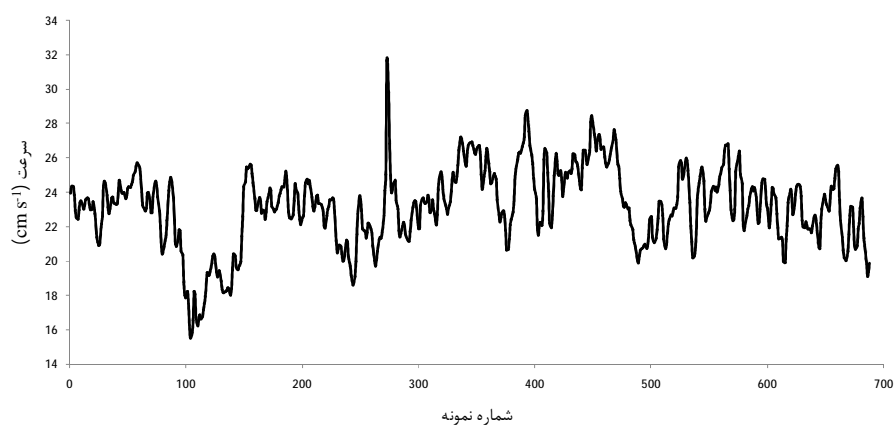
دو روش برای استفاده از تنش‌های رینولدزی به منظور محاسبه تنش برشی بستر وجود دارد (اورسیک 2011):

1- استفاده از تنش‌های رینولدزی نزدیک بستر که نیاز به اندازه‌گیری نوسان‌های سرعت در  $y/y_f=0/1$  (عمقی معادل 10 درصد عمق کل جریان) دارد.

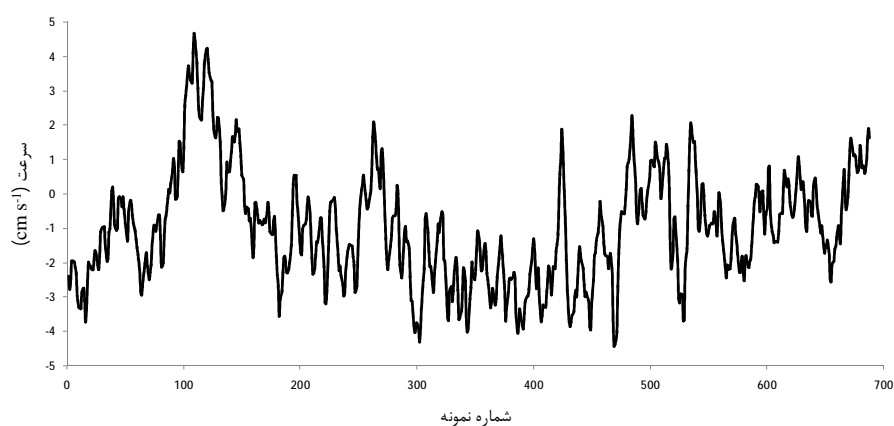
2- محاسبه تنش رینولدزی در اعماق مختلف و برون‌یابی آن‌ها به بستر. در این روش با اندازه‌گیری نوسان‌های سرعت در نقاط مختلف یک امتداد قائم، پروفیل تنش‌های رینولدزی در عمق کانال ترسیم شده و می‌توان با برون‌یابی تنش‌های رینولدزی به بستر کانال، تنش برشی بستر را محاسبه نمود.



شکل 5- نوسان‌های مؤلفه سرعت a در دماغه تکیه‌گاه.

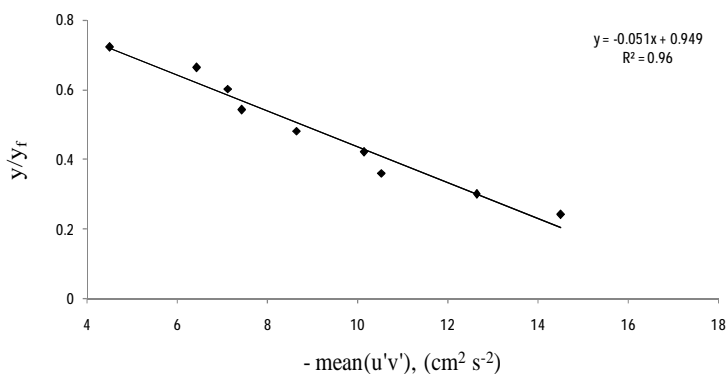


شکل 6- نوسان‌های مؤلفه سرعت v در دماغه تکیه‌گاه.

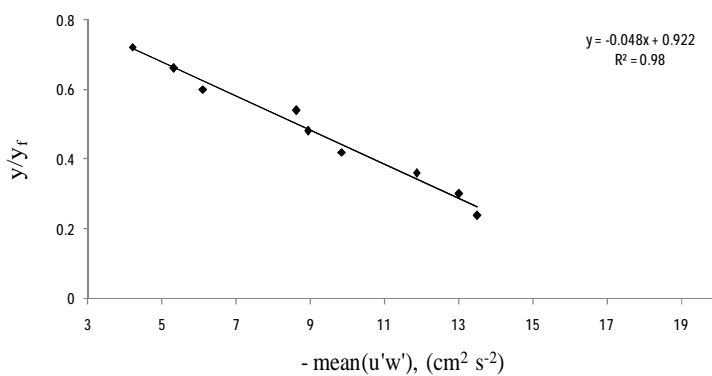


شکل 7- نوسان‌های مؤلفه سرعت w در دماغه تکیه‌گاه.

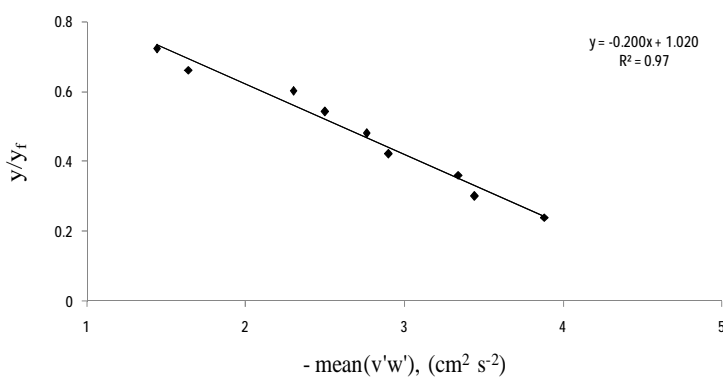




شکل 8- برون‌یابی تنش‌های رینولدزی  $\overline{u'v'}$  دماغه تکیه‌گاه.



شکل 9- برون‌یابی تنش‌های رینولدزی  $\overline{u'w'}$  دماغه تکیه‌گاه.



شکل 10- برون‌یابی تنش‌های رینولدزی  $\overline{v'w'}$  دماغه تکیه‌گاه.

جدول 1- محاسبه تنش برشی بستر دماغه بالادست تکیه‌گاه.

$\overline{u'v'}$ ( $\text{cm}^2 \text{s}^{-2}$ )	$\overline{u'w'}$ ( $\text{cm}^2 \text{s}^{-2}$ )	$\overline{v'w'}$ ( $\text{cm}^2 \text{s}^{-2}$ )	$t_x$ ( $\text{N m}^{-2}$ )	$t_y$ ( $\text{N m}^{-2}$ )	$t_0$ ( $\text{N m}^{-2}$ )
-17/5	-18/8	5/1	3/63	1/24	3/84

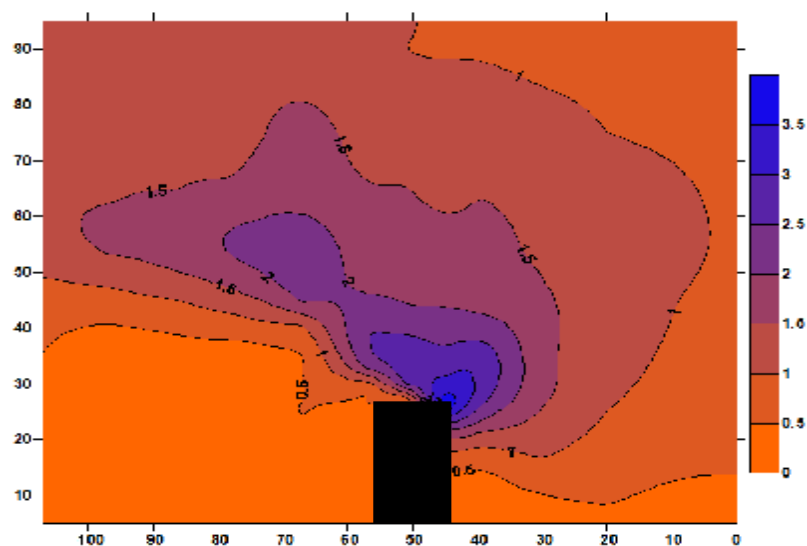
تکیه‌گاه نیز به دست آمد که نتایج آن در شکل 11 نشان داده شده است.

همان‌گونه که مشاهده می‌شود بیشترین تنش برشی بستر در دماغه بالادست تکیه‌گاه هست که با نتایج مولیناس و همکاران (1998) و دی و باربویا (2005a) مطابقت دارد. همچنین، توسعه تنش برشی تحت یک زاویه مایل حدوداً 45 درجه نسبت به دماغه بالادست تکیه‌گاه مشاهده گردید. این الگوی توسعه تنش برشی بستر در اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی توپوگرافی آبشستگی پیرامون تکیه‌گاه پل (شکل 12) قابل تأیید است. هرچایی که تنش برشی بیشتری محاسبه شده باشد بالطبع باید آبشستگی بیشتری نیز رخ داده باشد که این امر توسط توپوگرافی آبشستگی برداشت‌شده در بستر فرسایش پذیر در این تحقیق قابل تأیید است.

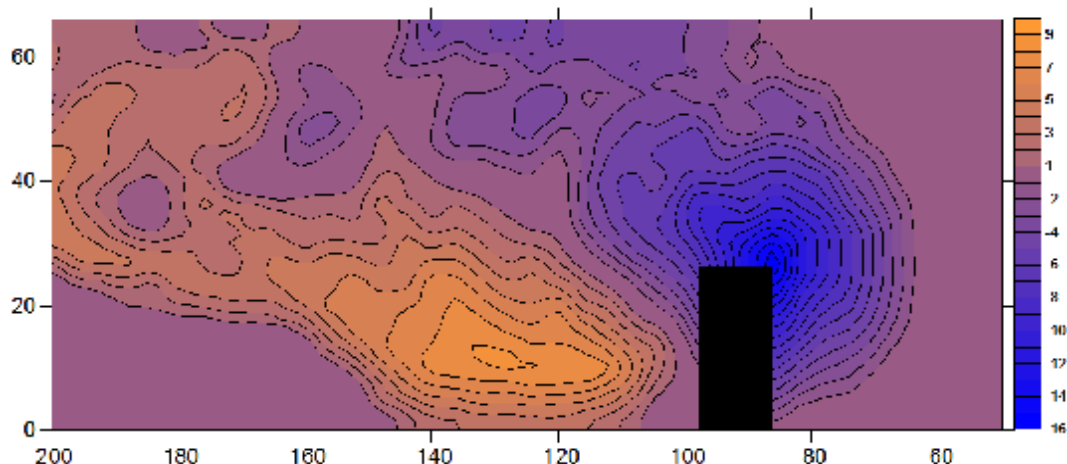
در شکل 13، با استفاده از مؤلفه‌های سرعت اندازه‌گیری شده توسط سرعت‌سنج الکترومغناطیس و با به‌کارگیری نرم‌افزار Tecplot، الگوی جریان پیرامون تکیه‌گاه نیز به دست آمده است.

با استفاده از رابطه 10، تنش برشی دماغه بالادست تکیه‌گاه،  $3/84$  نیوتن بر مترمربع به دست آمد. البته ذکر این نکته لازم است که به دلیل اندازه‌گیری سرعت جریان در مرکز گوی 2 سانتی‌متری سرعت‌سنج الکترومغناطیس، امکان اندازه‌گیری سرعت دقیقاً در دماغه بالادست تکیه‌گاه وجود نداشت. بنابراین، اندازه‌گیری سرعت در فاصله 1 سانتی‌متری از دماغه بالادست تکیه‌گاه انجام گرفت. همان‌طور که قبلاً ذکر شد، طبق اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی و مشاهده توپوگرافی آبشستگی پیرامون تکیه‌گاه توسط محققان مختلف، بیشینه تنش برشی در دماغه بالادست تکیه‌گاه مشاهده گردیده است. با توجه به مطالب فوق می‌توان نتیجه گرفت که تنش برشی بیشینه در دماغه بالادست تکیه‌گاه، کمی بیشتر از مقدار به دست آمده  $3/84$  نیوتن بر مترمربع هست.

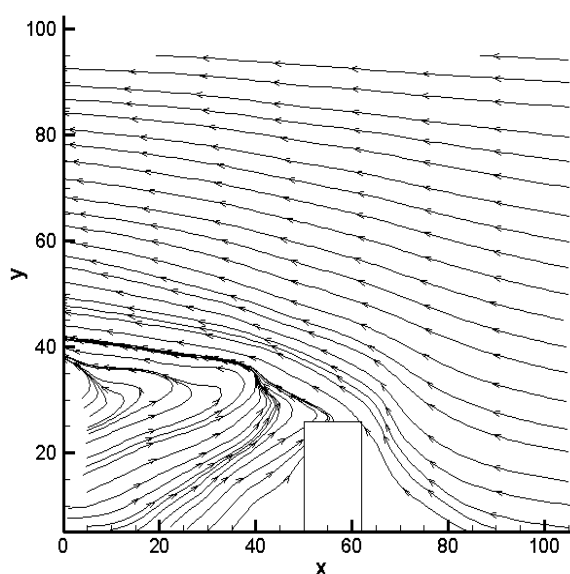
همانند محاسبه تنش برشی بستر در دماغه بالادست تکیه‌گاه، تنش برشی در سایر نقاط پیرامون



شکل 11- تنش برشی بستر پیرامون تکیه‌گاه پل (جهت جریان از راست به چپ).



شکل 12- توپوگرافی آبخستگی پیرامون تکیه‌گاه پل در بستر فرسایش پذیر.



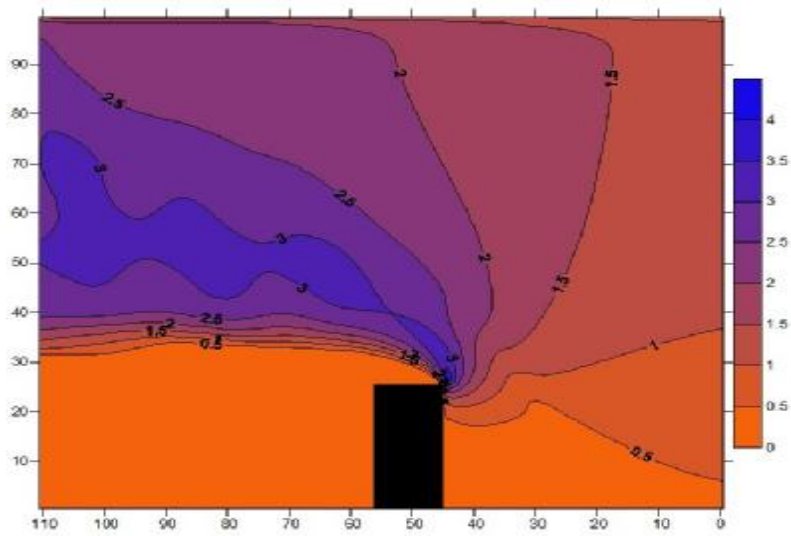
شکل 13- الگوی جریان پیرامون تکیه‌گاه پل.

محاسبه تنش برشی بستر پیرامون تکیه‌گاه پل توسط

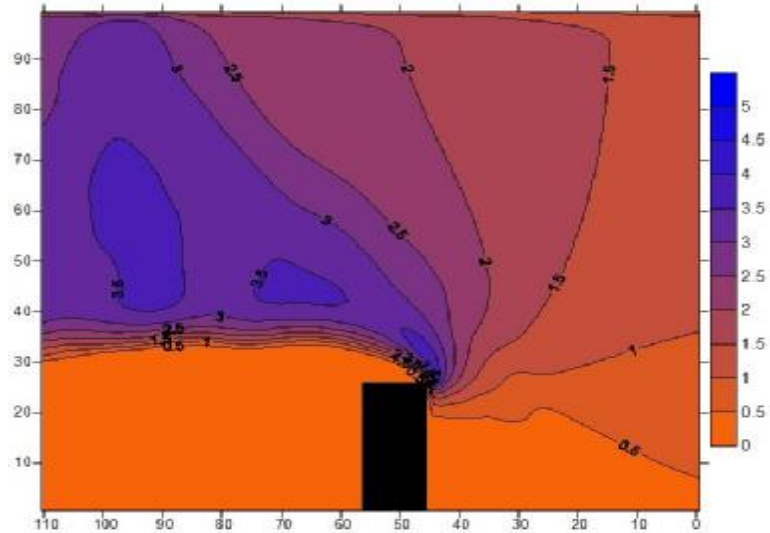
#### مدل عددی FLOW-3D

پس از شبکه‌بندی و اجرای مدل عددی در مدل‌های آشفستگی مختلف، نتایج تنش برشی بستر استخراج و ترسیم شدند که نتایج در شکل‌های 14 تا 18 نشان داده شده است.

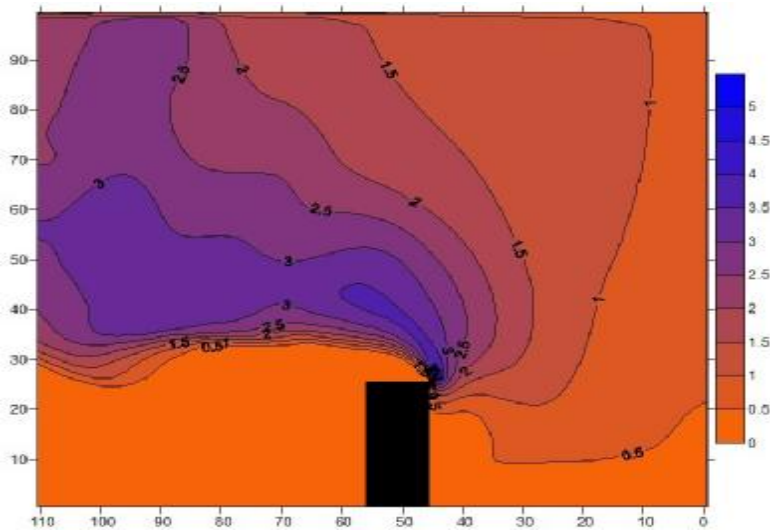
با توجه به الگوی جریان پیرامون تکیه‌گاه (شکل 13)، در پشت تکیه‌گاه یک ناحیه جدا شده چرخشی با سرعت کم به شکل یک گردباد مشاهده شد که باعث رسوبگذاری در این ناحیه گردیده است (شکل 12). تنش برشی محاسبه شده نیز برای این ناحیه بسیار کم هست (شکل 11).



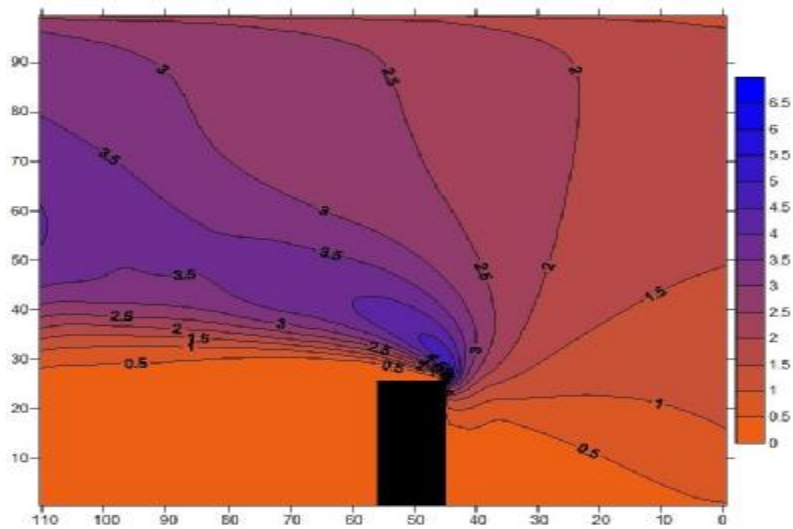
شکل 14- تنش برشی بستر پیرامون تکیه‌گاه در مدل آشفته‌گی RNG.



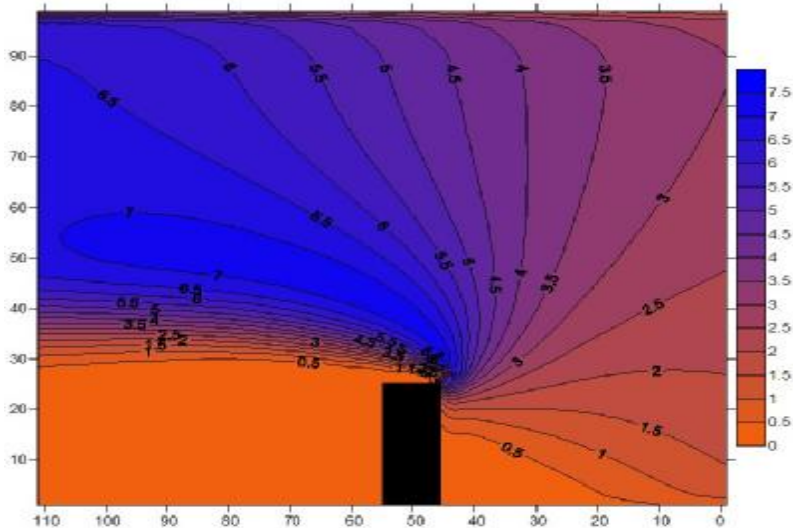
شکل 15- تنش برشی بستر پیرامون تکیه‌گاه در مدل آشفته‌گی k-ε.



شکل 16- تنش برشی بستر پیرامون تکیه‌گاه در مدل آشفته‌گی گردابه‌های بزرگ.



شکل 17- تنش برشی بستر پیرامون تکیه‌گاه در مدل آشفتگی انرژی جنبشی آشفتگی.



شکل 18- تنش برشی بستر پیرامون تکیه‌گاه در مدل آشفتگی طول اختلاط پراختل.

توسعه تنش برشی بستر در اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی تحت یک زاویه مایل حدوداً 45 درجه نسبت به دماغه بالادست تکیه‌گاه مشاهده گردید که مدل‌های آشفتگی RNG و  $k-\epsilon$  توانایی بیشتری برای پیش‌بینی الگوی موردنظر نشان دادند.

دلیل اختلاف نتایج مدل‌های عددی، تفاوت در روش عمل و تعداد معادلات دیفرانسیل برای کمیت‌های آشفتگی به‌منظور تخمین تنش‌های رینولدزی هست.

مدل طول اختلاط پراختل جزء مدل‌های صفر معادله‌ای است و در آن برای تعیین کمیت‌های آشفتگی از معادلات دیفرانسیلی استفاده نمی‌شود. این مدل نسبتاً

با توجه به شکل‌های 14 تا 18، تمامی مدل‌های آشفتگی بیشترین تنش برشی بستر را در دماغه بالادست تکیه‌گاه محاسبه نمودند. تنش برشی بستر در دماغه بالادست تکیه‌گاه توسط مدل آشفتگی RNG به میزان  $4/6$ ، توسط مدل آشفتگی  $k-\epsilon$  به میزان  $5/21$ ، توسط مدل آشفتگی گردابه‌های بزرگ به میزان  $5/46$ ، توسط مدل آشفتگی انرژی جنبشی آشفتگی به میزان  $6/54$  و توسط مدل آشفتگی طول اختلاط پراختل به میزان  $7/25$  نیوتن بر مترمربع محاسبه شدند. همان‌طور که قبلاً ذکر شد، تنش برشی دماغه بالادست تکیه‌گاه توسط اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی نیز  $3/84$  نیوتن بر مترمربع به‌دست آمد.

استحصال معادلات متوسط گیری شده برای کمیت‌های آشفتگی نظیر انرژی جنبشی آشفتگی و نرخ اتلاف آن است. مدل RNG از روابطی نظیر روابط موجود در مدل  $k-\varepsilon$  استفاده می‌کند. با این تفاوت که ضرایب ثابت موجود در مدل  $k-\varepsilon$  که به روش تجربی استخراج می‌شدند، در مدل RNG به صورت صریح محاسبه می‌شوند.

### نتیجه‌گیری کلی

در این تحقیق شبیه‌سازی عددی تنش برشی بستر پیرامون تکیه‌گاه پل با دیواره عمودی در مقطع مرکب توسط مدل FLOW-3D در 5 مدل آشفتگی مختلف صورت پذیرفت. به منظور استخراج نتایج تنش برشی بستر آزمایشگاهی، سرعت جریان در ترازهای مختلف عمق آب در دشت سیلابی، به وسیله سرعت‌سنج 3 بعدی الکترومغناطیس اندازه‌گیری شد. برای محاسبه تنش‌های رینولدزی، از روش برونیابی تنش‌های رینولدزی به کف کانال استفاده شد. با توجه به اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی، بیشترین میزان تنش برشی در دماغه بالادست تکیه‌گاه مشاهده و میزان آن 3/84 نیوتن بر مترمربع محاسبه گردید. البته همان‌طور که قبلاً ذکر گردید، به دلیل عدم امکان اندازه‌گیری سرعت 3 بعدی دقیقاً در دماغه بالادست تکیه‌گاه، مقدار تنش برشی بیشینه در دماغه بالادست تکیه‌گاه، کمی بیشتر از مقدار به‌دست آمده 3/84 نیوتن بر مترمربع هست. تمامی مدل‌های آشفتگی بیشترین میزان تنش برشی بستر را در دماغه بالادست تکیه‌گاه محاسبه نمودند. توسعه تنش برشی بستر در اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی تحت یک زاویه مایل حدوداً 45 درجه نسبت به دماغه بالادست تکیه‌گاه مشاهده گردید که مدل‌های آشفتگی  $k-\varepsilon$  و RNG توانایی بیشتری برای پیش‌بینی الگوی موردنظر نشان دادند. مقایسه نتایج نشان می‌دهد تمامی مدل‌های آشفتگی، تنش برشی بستر پیرامون تکیه‌گاه را بیشتر از مقدار اندازه‌گیری شده توسط مشاهدات آزمایشگاهی محاسبه نموده‌اند. نزدیک‌ترین جواب‌ها توسط مدل

ساده بوده و بر اساس داده‌های تجربی و آزمایشگاهی تدوین شده است.

مدل انرژی جنبشی آشفتگی جزء مدل‌های یک معادله‌ای است که در این مدل‌ها برای محاسبه لزجت گردابی دینامیکی به منظور تخمین تنش‌های رینولدزی، از یک رابطه‌ی دیفرانسیلی بر حسب کمیت آشفتگی  $k$  استفاده می‌شود. بنابراین مجهول‌های آشفتگی به  $k$  و  $L$  تبدیل می‌شوند. کمیت  $k$  با حل معادله ناویر-استوکس برای این پارامتر قابل تعیین است.

در مدل شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ ایده‌ی اساسی بر این است که تمام ساختارهای تلاطم که قابل محاسبه با استفاده از شبکه محاسباتی هستند به طور مستقیم محاسبه شوند و فقط ساختارهای ریزی که قابل محاسبه نیستند تقریب زده شوند. برای مثال در بررسی جریان آشفتگی با استفاده از مدل LES در اطراف یک ساختمان بزرگ، علاوه بر تنش‌های متوسط باد، تخمینی از بزرگی و انحراف معیار نوسان‌های نیروی حاصل از جریان آشفتگی نیز قابل حصول است.

مدل آشفتگی  $k-\varepsilon$  یک مدل دو معادله‌ای است که مقیاس طول در این مدل، برخلاف مدل‌های یک معادله‌ای، بدون تکیه بر روابط تجربی برآورد می‌شود. در این مدل‌ها، از کمیت‌های آشفتگی که از حل معادلات دیفرانسیلی استخراج می‌شوند برای تخمین مقیاس طول و مقیاس سرعت استفاده می‌شود. در این مدل، کمیت آشفتگی دیگری نیز تعریف شده و مشابه  $k$  با استفاده از معادله‌ی ناویر-استوکس برآورد می‌شود. از جمله کمیت‌های تعریف شده در این مدل، کمیت اتلاف آشفتگی یا  $\varepsilon [m^2 s^{-3}]$  است. کمیت  $\varepsilon$  نماینده مقیاس طول است. در حقیقت، مقیاس طول بیانگر اندازه گردابه‌های بزرگ دارای انرژی جنبشی است که سبب انتقال آشفتگی در توده سیال می‌شود.

مدل آشفتگی RNG جزء مدل‌های دارای معادله تنش است که بر پایه گروه‌های نرمال شده رینولدز استوار است. این رویکرد شامل روش‌های آماری برای

آشفتگی RNG به دست آمد که مطابقت بیشتری با نتایج آزمایشگاهی داشت.

سپاسگزاری: این تحقیق در قالب طرح پژوهشی به شماره ابلاغیه 1393/د/21368 مورخ 1393/11/4 و با

استفاده از اعتبارات پژوهشی دانشگاه بیرجند انجام شده است که بدین وسیله تشکر و قدردانی می‌شود.

#### منابع مورد استفاده

- رضضانی ی و قمشی م، 1393. مطالعه تنش برشی بستر پیرامون تکیه‌گاه پل در حضور پوشش گیاهی صلب غیر مستغرق روی دشت سیلابی. مجله هیدرولیک، جلد 9، شماره 1، صفحه‌های 45 تا 57.
- Ahmed F and Rajaratnam N, 2000. Observations on flow around an abutment. *Journal of Engineering Mechanics* 125(1): 51-59.
- Barbhuiya A K and Dey S, 2003. Vortex flow field in a scour hole around abutments. *International Journal of Sediment Research* 18(4): 310-325.
- Barbhuiya A K and Dey S, 2004. Local scour at abutments: a review. *Sadhana, Indian Academy of Sciences* 29(139): 449-476.
- Dey S and Barbhuiya A K, 2005a. Flow field at a vertical-wall abutment. *Journal of Hydraulic Engineering ASCE* 131(12): 1126-1135.
- Dey S and Barbhuiya A K, 2005b. Turbulent flow field in a scour hole at a semicircular abutment. *Canadian Journal of Civil Engineering* 32(1): 213-232.
- Dey S and Barbhuiya A K, 2006a. 3D flow field in a scour hole at a wing-wall abutment. *Journal of Hydraulic Research* 44(1): 33-50.
- Dey S and Barbhuiya A K, 2006b. Velocity and turbulence in a scour hole at a vertical-wall abutment. *Journal of Flow Measurement and Instrumentation* 17(1): 13-21.
- Duan J G, 2009. Mean flow and turbulence around a laboratory spur dike. *Journal of Hydraulic Engineering ASCE* 135(10): 803-811.
- Anonymous, 2004. Enhanced abutment scour studies for compound channels. Publication No. FHWA-RD-99-156.
- Kwan F, 1984. Study of abutment scour. Report No. 328, School of Engineering, University of Auckland, New Zealand.
- Kwan F, 1988. Study of abutment scour. Report No. 451, School of Engineering, University of Auckland, New Zealand.
- Melville B W, 1992. Local scour at bridge abutments. *Journal of Hydraulic Engineering ASCE* 118(4): 615-631.
- Melville B W, 1995. Bridge abutment scour in compound channels. *Journal of Hydraulic Engineering ASCE* 121(12): 863-868.
- Molinas A, Kheireldin K and Baosheng W, 1998. Shear stress around vertical wall abutments. *Journal of Hydraulic Engineering ASCE* 124(8): 822-830.
- Teruzzi A, Ballio F and Armenio V, 2009. Turbulent Stresses at the Bottom Surface near an Abutment: Laboratory-Scale Numerical Experiment. *Journal of Hydraulic Engineering ASCE* 135(2): 106-117.
- Ursic M C, 2011. Quantification of shear stress in a meandering native topographic channel using a physical hydraulic model. M.Sc. Thesis, Fort Collins, Colorado, USA.