

مدل سازی عددی انرژی جنبشی آشفتگی جریان دوبعدی افقی برای شبیه سازی آبشستگی بسترهای رسی و ماسه‌ای اطراف پایه دایره‌ای

سعیدرضا صباغ‌یزدی*^۱ و رضا دهقان نیروی^۲

^۱ استاد دانشکده عمران، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

^۲ فارغ التحصیل کارشناسی ارشد سازه‌های هیدرولیکی، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

(تاریخ دریافت ۱۳۸۷/۱۰/۲۸، تاریخ دریافت روایت اصلاح شده ۱۳۹۰/۰۵/۲۹، تاریخ تصویب ۱۳۹۰/۰۹/۱۰)

چکیده

در کار حاضر حل حجم محدود معادلات آب‌های کم عمق برای محاسبه مؤلفه‌های سرعت دو بعدی و پارامترهای آشفتگی متوسط‌گیری شده در عمق استفاده شده و با ترکیب این پارامترها با روابط تجربی مناسب، عمق آبشستگی در بسترهای رسی و ماسه‌ای اطراف پایه‌های پل با مقطع دایره‌ای محاسبه شده است. گسسته‌سازی معادلات جریان با استفاده از روش رئوس مثلثی همپوشان حجم محدود انجام گرفته است تا جریان اطراف پایه با هر هندسه دلخواه براحتی حل عددی شود. جهت مدل‌سازی آشفتگی جریان در اطراف پایه از مدل آشفتگی $k-\epsilon$ برای جریان با سطح آزاد استفاده شده است. با تلفیق پارامترهای محاسبه شده توسط مدل عددی جریان و آشفتگی با روابط تجربی روش آزمایشگاهی SRICOS نحوه شکل‌گیری آبشستگی اطراف پایه در مسیر جریان و تغییرات تراز بستر مدل می‌شود. در کار حاضر کیفیت نتایج حاصل از این استراتژی مدل‌سازی آبشستگی اطراف پایه با مقطع دایره‌ای برای برخی آزمون‌های آزمایشگاهی با نتایج در دسترس آبشستگی در بسترهای رسی و ماسه‌ای اطراف پایه با مقطع دایره‌ای روی بسترهای رسی و ماسه‌ای مورد ارزیابی قرار گرفته است.

واژه‌های کلیدی: آبشستگی در بسترهای رسی و ماسه‌ای، پایه دایره‌ای، معادلات آب‌های کم عمق، شبکه

بی‌ساختار مثلثی، روش SRICOS، حجم محدود همپوشان، مدل آشفتگی $k-\epsilon$

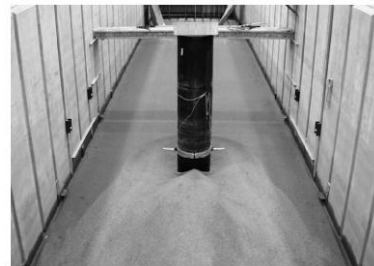
مقدمه

یکی از مدل‌های متداول در ایالات متحده، رابطه دانشگاه آیالتی کلرادو (CSU) می‌باشد [۱]. این رابطه با کمک تحلیل ابعادی پارامترهای مؤثر بر آبشستگی پایه پل و تحلیل داده‌های آزمایشگاهی توسعه داده شده است و رابطه رگرسیونی مشتمل بر نسبت‌های بی‌بعد نتیجه گردید. رابطه مورد بحث برای پایه‌های گرد به صورت زیر است (k_i): عامل تصحیح):

$$y_{me} = 2k_i h_0 Fr^{0.43} \left(\frac{p}{h_0}\right)^{0.65} \quad (1)$$

در این رابطه $Fr = \frac{U_0}{\sqrt{gh_0}}$ عدد فرود بالادست می‌باشد. پژوهشگران ژاپنی فرآیند آبشستگی در اطراف پایه‌های دایره‌ای را با بهره‌گیری از مدلی که بر درکی منطقی از مکانیزم‌های اصلی آن استوار بود توصیف کرده‌اند. آنها با تکیه بر داده‌های آزمایشگاهی به ازای $U_0 < U_c$ نتیجه‌گیری کردند که عمق آبشستگی متعادل در اطراف پایه پل را میتوان با رابطه زیر بدست آورد [۱]:

پدیده آبشستگی در اطراف پایه‌های پل از جمله دلایل اصلی تخریب پل‌ها در مسیر جریان رودخانه‌ها می‌باشد. این مسئله باعث شده است که مطالعه بر روی الگوی آبشستگی اطراف پایه مورد توجه محققین قرار گیرد (شکل ۱). فعالیتهای آزمایشگاهی و اندازه‌گیری‌های میدانی متعددی در این زمینه انجام گرفته است و روابط تجربی متعددی نیز ارائه شده است. برخی از این روابط برای برآورد عمق بیشینه آبشستگی که تماماً تجربی بوده و از آزمایشات مختلف آزمایشگاهی و صحرایی بدست آمده است به شرح زیر می‌باشد.



شکل ۱: نحوه شکل‌گیری آبشستگی در اطراف پایه دایره‌ای در آزمایشگاه [۵]

به ذکر است، معادلات میانگین عمقی با فرض فشار هیدروستاتیک (حذف ممنتوم در جهت قائم) مورد استفاده قرار گرفته است. درجائیکه مقاومت های بستر و جدار غالب نباشند، عموماً جریان آب اطراف پایه ها آشفته می باشد. اضافه کردن مدل آشفتگی مناسب بشکل عبارات پخشودگی شامل مشتقات جزئی مرتبه دوم به معادلات پایستار اندازه حرکت می تواند تنشهای رینولدز را شبیه سازی نماید [۱]. در کار حاضر برای مدل سازی آشفتگی از مدل $k-\epsilon$ استفاده شده است [2]. برای تعیین نرخ فرسایش در بسترهای رسی و ماسه ای، روابط تجربی حاصل از تجربیات آزمایشگاهی E-SRICOS [۶] مورد استفاده قرار گرفته است. در مدل حاضر با ادغام روابط نرخ فرسایش در بستر در مدل عددی توسعه یافته برای جریان آشفته افقی، آبستتگی بسترهای رسی و ماسه ای اطراف پایه دایره ای مدلسازی می شوند.

معادلات و روابط مورد استفاده

در اینجا معادلات حاکم بر جریان آشفته افقی و روابط استفاده شده برای برآورد فرسایش بسترهای رسی و ماسه ای (به منظور مدلسازی پدیده آبستتگی) بررسی و معرفی می گردند. مدل ریاضی مورد استفاده برای مدل سازی جریان را می توان با ترکیب معادلات دو بعدی جریان میانگین گیری شده در عمق [۷]، مدل آشفتگی این جریان (مدل آشفتگی $k-\epsilon$ اصلاح شده برای جریان دوبعدی با سطح آزاد) و روابط تجربی مورد استفاده در محاسبه فرسایش بستر (روابط آزمایشگاهی E-SRICOS روش برای بسترهای ماسه ای و رسی) [۶] ارائه کرد.

۱- معادلات جریان

برای بدست آوردن معادلات [بهای کم عمق، معادلات ناویر استوکس بعنوان مدل ریاضی مناسبی جهت حل مسائل مختلف سیالات تراکم ناپذیر (مانند آب) مورد اصلاح و استفاده قرار گرفته اند. شکل کلی معادلات حاکم بصورت زیر می باشد.

$$1-1 \text{ - معادله پایستار حجم}$$

معادله پایستار حجم میانگین گیری شده در عمق پس از اعمال شرایط مرزی بستر و سطح آزاد آب چنین بدست می آید.

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(hu_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (i=1,2) \quad (5)$$

$$y_{me} = 1.5k_i b \cdot \tanh\left(\frac{h_0}{b}\right) \quad (2)$$

معادله فوق برای دامنه کاملی از $\frac{b}{h_0}$ نتایج خوبی به دست می دهد (k_i : عامل تصحیح).

در حالتی که $0.5 < \frac{U_0}{U_c} < 1$ [۳] Brusers پیشنهاد کرد:

$$y_{me} = 2k_i b \left(\frac{2U_0}{U_c - 1}\right) \tanh\left(\frac{h_0}{b}\right) \quad (3)$$

Brusers [۳] بر مبنای داده های Laursen & Toch [۴] رابطه ای را برای پایه های پل استوانه ای پیدا کرد که به صورت زیر می باشد (k_i : عامل تصحیح):

$$y_{me} = 1.35k_i b^{0.7} h_0^{0.3} \quad (4)$$

این روابط که نمونه هائی از آنها در بالا آمدند، اغلب y_{me} عمق بیشینه آبستتگی متعادل (m) را بر اساس پارامترهای هندسی مجرا و جریان آب، همچون b : عرض پایه پل (m)، h_0 : عمق جریان (m)، U_c : سرعت متوسط بحرانی (m/s) و U_0 : سرعت متوسط α/A (m/s) برآورد می نمایند و به جنس بستر توجهی نمی کنند. در حالیکه پدیده آبستتگی در بسترهای رسی و ماسه ای الگوهای مختلفی را شکل میدهد.

مدل های عددی آبستتگی در اطراف پایه های مسیر جریان که در گذشته توسعه داده می شد کمتر به تأثیر جنس بستر توجه می کردند. در حالیکه شکل گیری آبستتگی در بسترهای رسی و ماسه ای یکسان نمی باشد. اما در سالهای اخیر محققین تلاش می کنند که تأثیر رسی یا ماسه ای بودن جنس بستر را در مدل سازی عددی منظور نمایند [۱۰].

در کار حاضر مدل عددی توسعه داده شده است که بتواند با محاسباتی قابل قبولی جنس رسی یا ماسه ای بستر را در شبیه سازی آبستتگی اطراف پایه در نظر بگیرد. این کار با استفاده از پارامترهای جریان دو بعدی افقی تحلیل شده توسط مدل عددی جریان و آشفتگی در اطراف پایه [۲] و [۵]، فرآیند آبستتگی با بکارگیری روابط حاصل از روابط بدست آمده از نتایج آزمایشگاهی [۶] محاسبه شده است. دسته معادلات مورد استفاده برای جریان آشفته میانگین گیری شده در عمق شامل عبارات مشتقات جزئی مرتبه اول زمانی و مکانی (عبارات انتقالی و ثقلی) بعلاوه عبارات استهلاکی ثابت ناشی از مقاومت بستر می باشند. لازم

در اینجا C_f ضریب اصطکاک بستر بوده و $U = u_i \hat{i} + u_j \hat{j}$ بردار سرعت می‌باشد. برای محاسبه C_f در جریان با بستر هموار می‌توان از رابطه ذیل استفاده نمود. [۷]

$$C_f = 0.027 \left(\frac{v}{hu_i} \right)^{0.25} \quad (۹)$$

در این فرمول v ویسکوزیته سینماتیکی آب است.

۴- معادلات مدل آشفتگی جریان

v_t ضریب چسبندگی آشفتگی (گردابه‌ای) می‌باشد که در مدل آشفتگی دو معادله‌ای k و ε چنین محاسبه می‌شود [۷].

$$v_t = c_\mu k^2 / \varepsilon \quad (۱۰)$$

در رابطه بالا، k نرخ انرژی جنبشی آشفتگی در واحد جرم سیال و ε نرخ استهلاک k می‌باشد. برای تعیین پارامترهای k و ε و مدلسازی آنها برای جریان با سطح آزاد از روابط زیر استفاده می‌شود [۸].

$$\frac{\partial(hk)}{\partial t} + \frac{\partial(huk)}{\partial x} + \frac{\partial(hvk)}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{v_t}{\sigma_k} \frac{\partial(hk)}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\frac{v_t}{\sigma_k} \frac{\partial(hk)}{\partial y} \right] + P_h + P_k - \varepsilon h \quad (۱۱)$$

$$\frac{\partial(h\varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(hu\varepsilon)}{\partial x} + \frac{\partial(hv\varepsilon)}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{v_t}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial(h\varepsilon)}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\frac{v_t}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial(h\varepsilon)}{\partial y} \right] + \frac{\varepsilon}{k} (C_1 P_h - C_2 \varepsilon h) + P_\varepsilon \quad (۱۲)$$

در اینجا پارامترهای P_h, P_k, P_ε چنین تعیین می‌شوند [۸].

$$P_h = \frac{v_t}{h} \left\{ 2 \left[\frac{\partial(hu)}{\partial x} \right]^2 + 2 \left[\frac{\partial(hv)}{\partial x} \right]^2 + \left[\frac{\partial(hu)}{\partial y} + \frac{\partial(hv)}{\partial x} \right]^2 \right\} \quad (۱۳)$$

$$P_k = \frac{g}{C^2} q^3 \quad P_\varepsilon = \frac{C_2 C_\mu^{1/2} g^{5/4} q^4}{h D^{1/2} C^{5/2}}$$

در روابط بالا، $q = \sqrt{u^2 + v^2}$ و C ضریب شزی بوده و به کمک یکی از رابطه‌های زیر محاسبه می‌شود.

در معادله بالا h عمق آب و u مؤلفه سرعت در جهت i می‌باشد.

۱-۲- معادلات پایستار اندازه حرکت

معادله پایستار مقدار حرکت جریانی تراکم‌ناپذیر میانگین-گیری شده در عمق در راستای i پس از اعمال شرایط مرزی بستر آب چنین بدست می‌آید.

$$\frac{\partial(hu_i)}{\partial t} + \frac{\partial(hu_i u_j)}{\partial x_j} + \frac{g \partial(h^2)}{2 \partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} (h v_t \frac{\partial u_i}{\partial x_j}) + \frac{\tau_{bi}}{\rho_w} - g h \frac{\partial z_b}{\partial x_i} \quad (i=1,2) \quad (۶)$$

u_i سرعت میانگین عمقی در راستای $(i=1,2)$ جهات اصلی مسطحه و z_b تراز بستر می‌باشند. v_t ضریب چسبندگی گردابه‌ای جهت مدلسازی آشفتگی منظور گشته است. در این رابطه ترمهای مشتقات مرتبه دوم اثر استهلاکی و ترمهای مشتقات مرتبه اول اثر انتقالی دارند و به همین دلیل به رابطه پخش-انتقال نیز موسوم است.

۲- تأثیر تغییرات تراز بستر در معادلات

از آنجایی که در طی فرآیند مدلسازی آبشستگی مقادیر تراز بستر تحت تأثیر فرسایش در هر نقطه از حوزه حل دستخوش تغییر می‌شود، جهت توصیف این حالت با توجه به معادله مقدار حرکت جریانی در راستای i را می‌توان به صورت زیر ارائه کرد.

$$\frac{\partial(hu_i)}{\partial t} + \frac{\partial(hu_i u_j)}{\partial x_j} + g h \frac{\partial(\eta)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} (h v_t \frac{\partial u_i}{\partial x_j}) + \frac{\tau_{bi}}{\rho_w} \quad (i=1,2) \quad (۷)$$

در رابطه بالا، $\eta = h + z_b$ به ترتیب عمق جریان و z_b مقدار تغییر در تراز بستر می‌باشد.

۳- تنش بستر

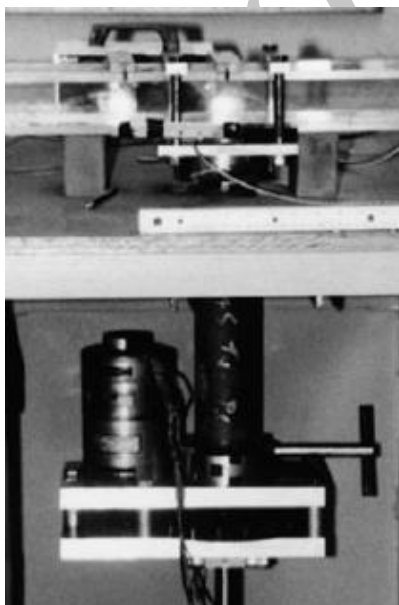
در رابطه (۲) عبارت τ_{bi} ، بیانگر مقاومت در برابر جریان در جهات X و Y می‌باشند. لازم به ذکر است که در حالت تراکم‌ناپذیر این عبارات بر ویسکوزیته آب (ρ) تقسیم می‌شود. تنش‌های کلی ناشی از مقاومت بستر و سطح آزاد (در راستای $i=1,2$) چنین قابل بیان می‌باشند [۷].

$$\tau_{bi} = \rho c_f u_i |U| \quad (۸)$$

این منظور مشخص گردید. در تحقیق حاضر، جهت تعیین عمق آبهستگی از بخشی از نتایج روش *SRICOS-E* استفاده شده است.

جهت تشریح روش کار، ابتدا می‌بایست به روش *SRICOS-E* و نتایج حاصل از آن اشاره نمود. این روش، توسعه یافته روش *SRICOS* می‌باشد که در سال ۱۹۹۹ برای پیش بینی عمق آبهستگی در برابر زمان ارائه شد [۶]. روش *SRICOS*، در ابتدا جهت تعیین عمق آبهستگی در خصوص پایه‌های دایره‌ای و همچنین در حالت سرعت ثابت و بستر با جنس یکنواخت و نیز شرط عمق جریان بزرگتر از دو برابر قطر پایه دایره‌ای، ارائه گردید، ولی این روش در سال ۲۰۰۱ توسعه یافته و قابل استفاده در مورد سایر پایه‌ها با اشکال مختلف و همچنین شرایط مختلف جریان می‌باشد. در این روش ابتدا بوسیله انجام آزمایش‌های *EFA* (دستگاه تابع فرسایش *Erosion Function Apparatus*) تغییرات تابع نرخ آبهستگی (Z^* در برابر تنش برشی هیدرولیکی $\tau(N/m^2)$ تعیین می‌گردد.

در روش *SRICOS-E* ابتدا با استفاده از رابطه (۱۷) مقدار تنش برشی بیشینه و به کمک تنش برشی حاصل، از روی روابط تجربی نرخ آبهستگی متناظر محاسبه شده است. در نهایت با استفاده از رابطه (۱۸)، می‌توان مقدار آبهستگی بیشینه را تعیین نمود. به کمک این آزمون‌ها و با توجه به جنس بستر می‌توان نرخ آبهستگی و تنش برشی بیشینه را در خاک‌های چسبنده و غیر چسبنده تعیین نمود [۶].



شکل ۲: شکل و نحوه انجام آزمایش *EFA* [۶]

$$C = \sqrt{\frac{2g}{C_f}} \quad (14)$$

در رابطه بالا، C_f از رابطه (۹) قابل محاسبه است. مقادیر ثابت موجود در روابط بالا در مدل $k-\epsilon$ استاندارد به صورت زیر است [۸].

$$c_\mu = 0.09 \quad c_{\epsilon_2} = 1.92 \quad c_{\epsilon_1} = 1.44 \quad \sigma_\epsilon = 1.3 \quad \sigma_k = 1.0 \\ D = 1.0$$

۵- روابط فرسایش بستر

اکثر روابط ارائه شده در خصوص آبهستگی، روابط آزمایشگاهی و تجربی می‌باشند. بسیاری از این روابط، به دلیل اینکه فقط سرعت و یا عمق میانگین جریان را در نظر می‌گیرند، قابل استفاده در مدل عددی حاضر که در هر لحظه پارامترهای عمق و سرعت در نقاط مختلف تعیین می‌شوند، نمی‌باشد. لذا با بررسی‌های انجام شده، مشخص گردید می‌توان جهت رفع این مشکل از پارامتر تنش برشی بستر در تعیین میزان فرسایش بستر استفاده کرد و در ادامه به وسیله روش‌هایی که بتوان به کمک آنها با توجه به مقدار تنش برشی، عمق فرسایش را تعیین نمود و بدین ترتیب شکل‌گیری پدیده آبهستگی را مدل نمود. حال در ابتدا به بررسی نحوه تعیین تنش برشی پرداخته می‌شود.

لازم به ذکر است که آبهستگی در اطراف پایه‌ها را در دو حالت آبهستگی بستر فعال و آب زلال مطرح می‌کنند. در حالت آبهستگی بستر فعال فرض بر این است که ذرات بستر در نواحی بالادست پایه به حالت ناپایدار بوده و پتانسیل جابجایی و حرکت به سمت پایه را دارا می‌باشند. در نتیجه به علت وارد شدن این ذرات ناپایدار به داخل گودال آبهستگی ایجاد شده در اطراف پایه احتمال پر شدن مجدد آن دارد. لذا نتایجی که با فرض آب زلال بدست می‌آید، دست بالاتر و دارای ضریب اطمینان بیشتری نسبت به آبهستگی بستر فعال می‌باشد. بنابراین در تحقیق حاضر بستر در بالادست پایه، کاملاً صاف و پایدار فرض شده است، لذا تنها آبهستگی آب زلال مورد بررسی قرار می‌گیرد.

مشاهدات آزمایشگاهی برای استخراج روابط

تجربی

در خصوص برآورد تنش برشی بیشینه و تخمین نرخ فرسایش بستر بررسی‌های متعددی روی نتایج آزمایشگاهی موجود در این زمینه صورت گرفت و در نهایت روشی برای

با نتایج مدل عددی جریان آشفته پرداخته می‌شود. بطور کلی نحوه مدل‌سازی آشفستگی در اطراف پایه‌های پل به این ترتیب می‌باشد که در هر گام زمانی به کمک نتایج حل مدل جریان (u و v مؤلفه‌های میدان دوبعدی سرعت میانگین‌گیری شده در عمق) و همچنین نتایج حل مدل آشفستگی دو معادله ای میانگین عمقی (که توسط مدل عددی تحلیلگر حجم محدود بصورت درگیر حل می‌شوند)، تنش برشی τ محاسبه شده و در صورت افزون شدن تنش برشی از تنش بحرانی τ_c مقدار نرخ آشفستگی (تغییرات تراز بستر) z_b در نقاط مختلف بستر جریان تعیین می‌شود. سپس عمق آشفستگی محاسبه شده در گره به عمق جریان h در آن گره اضافه می‌شود و به عبارت دیگر تراز بستر کاهش داده می‌شود.

۱- تعیین تنش برشی بحرانی بستر

برای محاسبه میزان فرسایش می‌بایست ابتدا تنش برشی بحرانی بستر را تعیین نمود. زیرا معیار شروع آشفستگی، تنش بحرانی می‌باشد. آشفستگی فرسایش بستر زمانی رخ می‌دهد که تنش برشی بستر بیشتر از تنش برشی بحرانی بستر شود. در این حالت ذرات شروع به حرکت و جدایی از کف می‌کنند.

تنش برشی بحرانی بستر کاملاً وابسته به جنس و مشخصات فیزیکی و شیمیایی مصالح بستر دارد. روابط زیادی در خصوص تنش بحرانی بستر وجود دارد که همگی بر اساس نتایج و مشاهدات آزمایشگاهی می‌باشند. یکی از این روابط، رابطه تجربی زیر می‌باشد [۱۱].

$$\tau_c = (\gamma_s - \gamma_w) d_{50} * 0.056 \quad (20)$$

در رابطه بالا، τ_c تنش برشی بحرانی $(\frac{N}{m^2})$ ، γ_s چگالی مصالح بستر $(\frac{N}{m^3})$ ، γ_w چگالی آب $(\frac{N}{m^3})$ ، d_{50} قطر میانه ذرات (m) می‌باشد. رابطه بالا، در خاک‌های ریز دانه و در مواقعی که $Re \rightarrow \infty$ نتایج بسیار خوبی خواهد داد. لذا با توجه به اعداد رینولدز بالا در جریان اطراف پایه، این رابطه مناسب می‌باشد.

۲- تعیین تنش برشی بستر جریان

اگرچه می‌توان از رابطه (۸) برای برآورد میزان تنش بستر موضعی استفاده نمود، اما برای اینکه تأثیر آشفستگی جریان در محاسبه تنش برشی بستر منظور شود، رابطه تنش برشی

۱- روابط تجربی برای تخمین نرخ آشفستگی

بر اساس چندین سری مشاهدات آزمایشگاهی در مورد نرخ فرسایش بستر در حالت بسترهای رسی و ماسه ای روابط زیر ارائه گردیدند [۹].
برای بستر ماسه‌ای

$$\dot{z} = \frac{5.54\tau - 2.77}{\tau + 0.875} + 0.178\tau - 0.0809 \quad (15)$$

برای بستر رسی

$$\dot{z} = 3\tau - 9 \quad (16)$$

۲- رابطه تجربی برای تنش برشی بیشینه

بیشینه تنش برشی هیدرولیکی τ_{max} با استفاده از یک سری مشاهدات آزمایشگاهی در مورد جریان‌ات سه بعدی در پشت پایه‌های دایره‌ای در حالت بستر هموار رودخانه و عمق زیاد (عمق آب بزرگتر از ۵، برابر قطر پایه دایره‌ای) به صورت رابطه زیر ارائه گردید [۱۰].

$$\tau_{max} = 0.094 \rho V^2 \left(\frac{1}{\log R} - \frac{1}{10} \right) \quad (17)$$

۳- رابطه تجربی برای مقدار آشفستگی بیشینه

حداکثر عمق آشفستگی z_{max} با استفاده از مشاهدات حاصل از ۴۳ مدل بر روی بسترهای رسی و ماسه ای، برای هر دو حالت رسی و ماسه‌ای به صورت زیر قابل ارائه می‌باشد. [۹].

$$z_{max} (mm) = 0.18R^{0.635} \quad (18)$$

با توجه به روابط فوق، مقدار عمق آشفستگی Z با توجه به زمان t به صورت زیر ارائه شد [۶].

$$z = \frac{t}{\frac{1}{z_i} + \frac{t}{z_{max}}} \quad (19)$$

z_i : نرخ آشفستگی اولیه که مقدار متناظر z_{max} در نمودار آزمون EFA می‌باشد.

تلفیق مدل عددی جریان باروابط فرسایش

بعد از تشریح روش E-SRICOS حال به نحوه استفاده از روابط حاصل از این روش در مدل حاضر و تلفیق منطقی

مورد استفاده در مدل فرسایش بستر به صورت زیر می‌باشد [۱۱].

$$\tau = \rho u_*^2 \quad (21)$$

در رابطه بالا $u_* = \sqrt{k \cdot c_{\mu}}$ می‌باشد که در آن k مقدار انرژی جنبشی آشفتگی موضعی بوده و از مدل آشفتگی $k-\varepsilon$ میانگین عمقی تشریح شده در بخش قبل محاسبه می‌شود.

گسسته سازی حجم محدود معادلات جریان آشفته

جهت توصیف و گسسته سازی معادلات جریان آشفته اطراف پایه پل که شامل معادلات پایستار حجم و اندازه حرکت و معادلات مدل آشفتگی $k-\varepsilon$ که بطور کلی بصورت معادلات انتقال-پخشودگی (Convection-Diffusion) می‌باشند، از روش حجم محدود با شیوه مناسب شبکه بی‌ساختار مثلثی استفاده شده‌است. در این خصوص رابطه زیر را می‌توان برای کلیه معادلات بیان نمود [۲ و ۵].

$$\frac{\partial W}{\partial t} + \left(\frac{\partial F^c}{\partial x} + \frac{\partial G^c}{\partial y} \right) = \left(\frac{\partial F^d}{\partial x} + \frac{\partial G^d}{\partial y} \right) + S \quad (22)$$

در رابطه بالا، W ، شامل مقادیر متغیر و مجهول معادلات، از جمله h, u, v می‌باشد که با حل همزمان معادلات پایستار حجم و اندازه حرکت حاصل می‌شوند. F^c, G^c ، بردارهای شار انتقالی و F^d, G^d ، بردارهای شار پخشیدگی W در جهات x, y می‌باشند. S ، بردار چشمه و چاه (Sources & Sinks) معادلات می‌باشد. رابطه کلی حجم کنترل به صورت زیر می‌باشد.

$$W_i^{t+\Delta t} = W_i^t - \frac{\Delta t}{\Omega_i} \cdot \sum_{k=1}^{N_{int}} [(F^c \Delta y - G^c \Delta x) - (F^d \Delta y - G^d \Delta x)]_k + S_k \Delta t \quad (23)$$

با توجه به استفاده از روش همپوشان، در رابطه بالا، W_i ، مقدار مشخصه پارامترهای $h, hu, hv, hk, h\varepsilon$ در مرکز حجم کنترل، \bar{F}^c, \bar{G}^c ، مقادیر میانگین بردارهای شار انتقالی روی اضلاع مرزی حجم کنترل F^d, G^d اجزاء کنترل انتگرال اطراف مرکز حجم کنترل می‌باشند.

۱- گام‌زنی زمانی

برای تعیین مقدار Δt در رابطه بالا می‌توان از رابطه زیر استفاده کرد.

$$\Delta t = (CFL) \frac{\Omega}{\lambda} \quad (24)$$

مقدار λ برای هر یال حجم کنترل از رابطه $\lambda = |\bar{U} \cdot \hat{n}| + \sqrt{|\bar{U} \cdot \hat{n}|^2 + C^2 (\Delta x^2 + \Delta y^2)}$ تعیین می‌شود که در آن C سرعت موج محلی بوده و به صورت $C = \sqrt{gh}$ محاسبه می‌شود. \bar{h} مقدار میانگین عمق در دو گره یال و $|\bar{U} \cdot \hat{n}|$ ضرب داخلی بردار سرعت در بردار یکه عمود بر سطح اضلاع مرزی حجم کنترل Ω ، $(\bar{U} \cdot \hat{n} = |\bar{u} \Delta y - \bar{v} \Delta x|)$ می‌باشد. ضریب CFL ، عدد کورانت-فردریش-لوی در این کار یک در نظر گرفته شد و کوچکترین گام زمانی زمانی در حوزه محاسباتی ملاک گام‌زنی زمانی محاسبات قرار گرفت [۲ و ۵].

۲- شرایط اولیه و شرایط مرزی

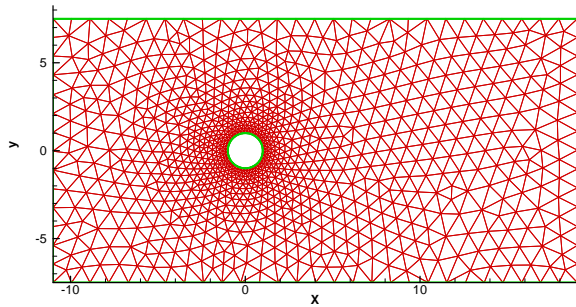
در حل معادلات جریان، هدف تعیین مقادیر سرعت در دو جهت متعامد (u, v) و مقدار عمق (h) در کلیه نقاط محیط گسسته در هر مرحله زمانی می‌باشد. قبل از آغاز محاسبات می‌بایست با توجه به هندسه مدل، شرایط اولیه و مرزی را اعمال نمود.

۲-۱- شرایط اولیه

برای آغاز عملیات محاسبات یک جریان پایدار، در گره‌های محاسباتی، مؤلفه های سرعت جریان در جهت مثبت دو راستای اصلی مختصات برابر ۱۰٪ مقدار مؤلفه های سرعت آزاد جریان در نظر گرفته شد و عمق متوسط اولیه جریان برابر عمق آزاد اعمالی در جریان منظور گشته‌است. بستر مدل در شرائط اولیه هموار و جهت برآورد عمق آبشستگی، بستر در حالت بستر رسی مورد بررسی قرار گرفته‌است.

۲-۲- شرائط مرزی جریان

برای جریان زیر بحرانی، در مرز ورودی جریان (مرز بالادست) مؤلفه های سرعت و در مرز خروجی جریان (مرز پایین دست) عمق اعمال گردیده‌است. برای چنین جریانی، در مرز ورودی جریان عمق و در مرز خروجی جریان سرعت با استفاده از گره‌های درون محیط حل محاسبه می‌گردد [۱].

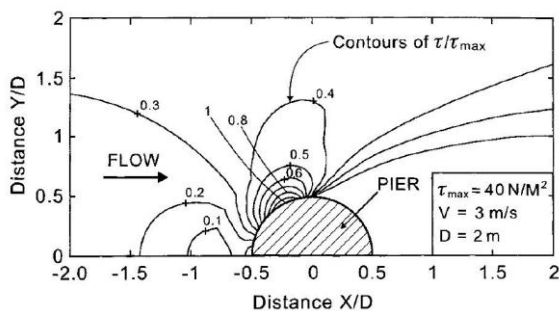


شکل ۳: هندسه و شبکه مثلثی محاسباتی

۱- واسنجی نتایج مدلسازی تنشهای برشی

جهت بررسی دقیق، تأثیر رابطه مورد استفاده برای محاسبه تنش برشی، در این بخش دو رابطه $\tau_{bi} = \rho C_f u_i |U|$ و $\tau_b = \rho u_*^2$ مورد آزمون قرار می‌گیرند. در هر مورد برای نتیجه‌گیری از مدل عددی حاضر، تعداد گام‌های محاسباتی صریح بکار رفته برای رسیدن به وضعیت تقریباً دائمی طی ۸۰ دقیقه با خطای همگرایی کمتر از 10^{-9} پس از حدود ۱۰۱۰۰ تکرار همراه بوده‌است.

ابتدا رابطه $\tau_{bi} = \rho C_f u_i |U|$ با توجه به روابط مختلف $C_f [7]$ ، برای هر گام زمانی محاسبه گردید. جهت صحت‌سنجی نتایج تنش‌های برشی بدست آمده از رابطه $\tau_{bi} = \rho C_f u_i |U|$ ، جهت کنترل صحت مدل، نتایج مدل حاضر با نتایج مدل عددی *CHIMERA-RANS* که یک مدل شبیه‌سازی جریان و آبشستگی بر روی بستر رودخانه می‌باشد و توسط *Wei et al. [8]* ارائه شده است مقایسه می‌گردد. در این مقایسه نسبت تنش برشی بستر به تنش برشی حداکثر در دو محور بی بعد x/D ، y/D مورد مقایسه قرار می‌گیرد. مقایسه دو شکل زیر نشان می‌دهد که مقادیر تنش‌های برشی با کمک رابطه نسبتاً درست محاسبه شده‌اند.



شکل ۴: نسبت تنش برشی بستر به تنش برشی حداکثر با استفاده

از رابطه $\tau_{bi} = \rho C_f u_i |U|$ در مدل عددی محققین قبل

CHIMERA-RANS [8]

۲-۳- شرایط مرزی دیوار نفوذناپذیر

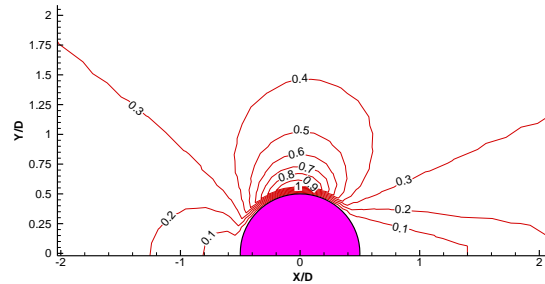
با توجه به مطالب ارائه شده، بر روی سطوح مرزی دو مؤلفه متعامد سرعت (u, v) وجود خواهد داشت. برای مدلسازی سرعت روی سطوح دیواره، مؤلفه عمود بر دیواره سرعت جریان صفر منظور گشته و مؤلفه مماسی در دیواره بدون مقاومت برشی (*Slipping Wall*) حفظ گردیده‌است. بدین ترتیب با فرض کم بودن اصطکاک در دیواره جریان، شرایط دیوار لغزنده در نقاط نواحی جانبی جریان می‌تواند اعمال شود.

صحت سنجی نتایج مدل

با توجه به اینکه نتایج مدل جریان میانگین عمقی بی‌استهلاک و آشفته اطراف اجسام با شکل دلخواه قبلاً واسنجی گردیده‌است [۲ و ۵] در این بخش به صحت‌سنجی نتایج مدل آبشستگی بر مبنای فرسایش بستر از طریق مقایسه با اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی گزارش شده توسط سایر محققین [۹ و ۱۰] پرداخته می‌شود. لذا در اینجا ابتدا نتایج مدلسازی تنش‌های برشی اطراف یک پایه دایره‌ای با استفاده از انرژی جنبشی آشفته محاسبه شده توسط مدل دو معادله‌ای آشفته میانگین عمقی مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. سپس نتایج مدلسازی گودال ناشی از آبشستگی اطراف پایه یاد شده مورد واسنجی قرار می‌گیرد. صحت سنجی نتایج مدلسازی حاضر با مقایسه آنها با اندازه‌گیری‌های آزمون آزمایشگاهی گزارش شده توسط محققین قبلی [۹ و ۱۰] انجام می‌شود.

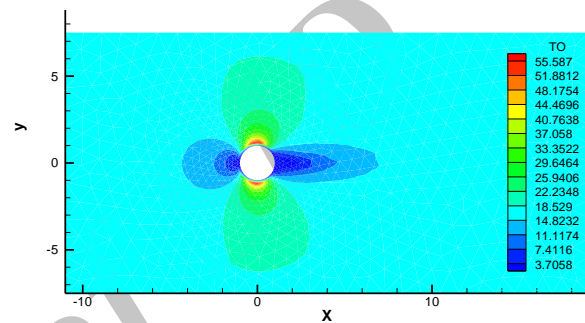
هندسه مدل مورد استفاده در مدلسازی عددی کاملاً منطبق بر آزمون آزمایشگاهی و مطابق شکل (۳) می‌باشد که به کمک اجزای مثلثی گسسته شده است (تعداد گره: ۱۰۶۵، تعداد المان مثلثی: ۲۰۰۶، تعداد گره‌های مرزی محیط مدل: ۸۸، تعداد گره‌های مرزی اطراف پایه: ۳۸). لازم به ذکر است که استفاده از اجزای مثلثی بی‌ساختار امکان مدلسازی هر هندسه دلخواه را فراهم می‌سازد.

لازم به ذکر است که در تمام آزمون‌ها مدل عددی بر روی رایانه‌ای بسیار معمولی با پردازشگر *Celeron* (با سرعت معادل ۲۰۰۰ Mhz) اجرا شده‌است.



$$V = 3 \frac{m}{s} \quad \tau_{\max} = 41.25$$

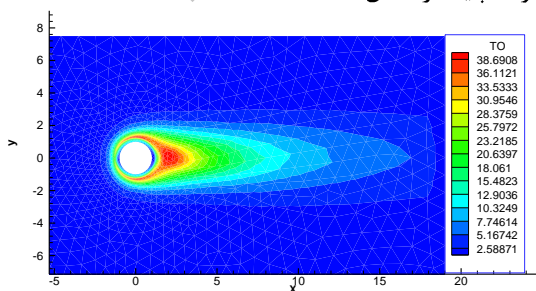
شکل ۵: نسبت تنش برشی بستر به تنش برشی حداکثر با استفاده از رابطه $\tau_{bi} = \rho c_f u_i |U|$ در مدل عددی حاضر



شکل ۶: نحوه توزیع تنش برشی محاسبه شده توسط مدل حاضر با استفاده از رابطه $\tau_{bi} = \rho c_f u_i |U|$

شکل ۷: نحوه شکل‌گیری آبستنگی اطراف پایه در آزمایشگاه با توجه به جنس بستر، بالا: بستر ماسه ای ($PI = 0$) و پایین: بستر رسی ($PI = 20\%$) [۹]

نتایج حاصل از استفاده از مدل حاضر نشان می‌دهد کلیه مشخصات پدیده آبستنگی در این رابطه لحاظ شده‌است. این رابطه تأثیر توأم سرعت و عمق جریان را با حل همزمان معادلات جریان و مدل آشفتگی دو معادله‌ای $k - \epsilon$ میانگین عمقی اعمال می‌کند. جهت صحت سنجی نتایج بدست آمده، به بررسی مقادیر تنش برشی بستر پرداخته می‌شود. جهت مقایسه نتایج مدل‌سازی عددی و آزمایشگاهی آزمون مورد نظر، نتایج مدل‌سازی عددی به صورت کلی در اطراف پایه در شکل (۸) آمده‌است.

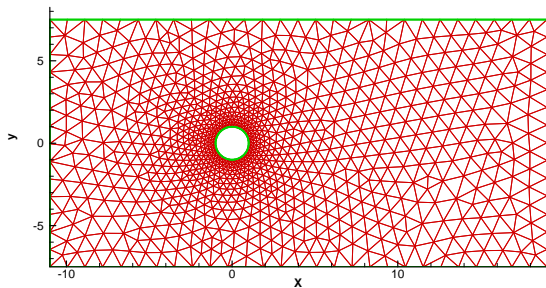


شکل ۸: توزیع تنش برشی اطراف پایه با استفاده از

$$\tau_b = \rho u_{*b}^2$$

اما با مقایسه شکل بالا با شکل زیر که شکل‌های کلی حفره‌های آبستنگی اطراف پایه دایره‌ای را در بسترهای رسی و ماسه‌ای فلوم‌های آزمایشگاهی نشان می‌دهند، می‌توان قضاوت نمود که موقعیت‌های مقادیر تنش بستر شدید با مکان‌های گودشدگی زیاد (که متناظر با فرسایش شدید می‌باشند) تطبیق نداشته و لذا رابطه $\tau_{bi} = \rho c_f u_i |U|$ جهت اعمال در مدل مورد نظر مناسب نمی‌باشد.

رابطه بعدی جهت محاسبه تنش‌های برشی، رابطه $\tau_b = \rho u_{*b}^2$ می‌باشد که بر اساس سرعت برشی بیان می‌شود [۱۱]. این رابطه تنش برشی می‌تواند انرژی جنبشی محاسبه شده توسط مدل آشفتگی $k - \epsilon$ جریان میانگین عمقی را در خود جای دهد.

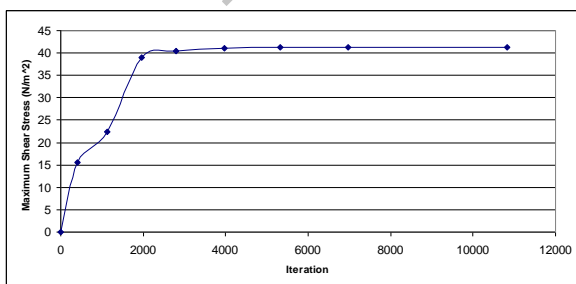


شکل ۹: مدل هندسی آزمون آبشستگی در بستر رسی اطراف پایه استوانه‌ای

جهت مدل‌سازی این آزمون، ابتدا با توجه به مشخصات هندسی موجود، مدل هندسی محدوده حل ایجاد و مطابق شکل (۹)، شبکه بندی می‌شود. در این شبکه تعداد گره: ۱۰۶۵، تعداد المان مثلثی: ۲۰۰۶، تعداد گره‌های مرزی محیط مدل: ۸۸ و تعداد گره‌های مرزی اطراف پایه: ۳۸ عدد می‌باشد.

در این مدل، تعداد گام‌های محاسباتی صریح بکار رفته رسیدن به وضعیت تقریباً دائمی با خطای همگرایی کمتر از 10^{-9} پس از حدود ۱۰۱۰۰ تکرار، مدت در زمان اجرا ۸۰ دقیقه بوده‌است. مدل عددی بر روی رایانه‌ای با پردازشگر Celeron (با سرعت معادل ۲۰۰۰ Mhz) اجرا شده‌است.

در شکل (۱۰) مقادیر تنش برشی بستر بیشینه محاسباتی در کل حوزه حل در تکرارهای مختلف حل نشان داده شده‌است. این نمودار برای نقطه خاصی از مدل تهیه نشده‌است، بلکه در هر گام زمانی مقدار تنش برشی حداکثر برای کل محدوده حل محاسبه شده و نمودار شکل (۱۰) ترسیم شده‌است. علت این امر این است که نتایج مدل آزمایشگاهی مطرح شده، مقدار تنش برشی حداکثر را به صورت کلی محاسبه می‌کند.



شکل ۱۰: نحوه تغییرات تنش برشی بستر بیشینه محاسباتی در کل حوزه حل در گام‌های مختلف

با توجه به اشکال (۷) که شکل کلی حفره‌های آبشستگی اطراف پایه دایره‌ای را در بسترهای رسی و ماسه‌ای فلوم‌های آزمایشگاهی نشان می‌دهند، می‌توان قضاوت نمود که موقعیت‌های مقادیر تنش بستر شدید با مکان‌های گودشدگی زیاد تطبیق داشته و لذا از لحاظ توصیف فیزیک پدیده این رابطه مناسب می‌باشند. اما جهت مقایسه کمی نتایج حاصل از مدل‌سازی آبشستگی با رابطه $\tau_b = \rho U_{*b}^2$ (که بطور ضمنی پارامترهای جریان آشفته را با بکارگیری نتایج مدل عددی میانگین‌گیری شده در عمق منظور می‌نماید)، در ادامه به صحت سنجی نتایج حاصل از این روش از طریق مقایسه نتایج آبشستگی آب زلال در دو جنس بستر مختلف محاسبه شده توسط مدل حاضر با اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی پرداخته می‌شود.

۲- ارزیابی صحت مدل‌سازی آبشستگی در بستر رسی

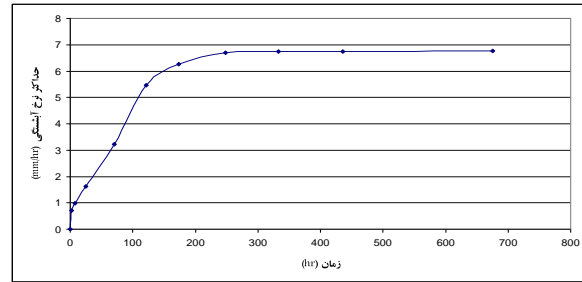
در این بخش صحت سنجی مدل‌سازی آبشستگی در حالت بستر رسی انجام می‌شود. آزمون انتخابی از مواردی است که بصورت کامل بوسیله روش *E-SRICOS* مورد بررسی قرار گرفته‌است [۹]. لذا می‌توان نتایج مدل عددی حاضر را با اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی مقایسه نمود.

در این آزمون یک پایه استوانه‌ای به قطر ۲ متر در نظر گرفته شده و عمق اولیه ۵ متر و سرعت ورودی ۳ متر بر ثانیه می‌باشد. جنس بستر رسی و نتایج آزمون *EFA* در خصوص این خاک موجود می‌باشد. سایر مشخصات خاک بستر در جدول (۱) ارائه شده‌است [۹].

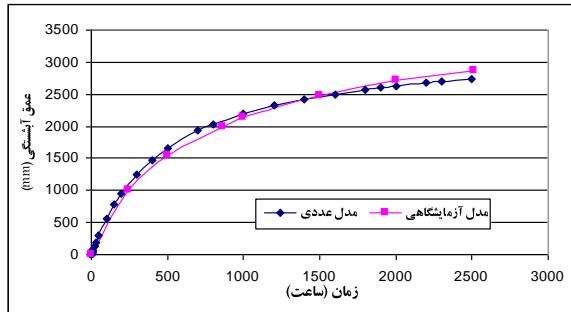
جدول ۱: مشخصات فیزیکی خاک رس بستر فلوم آزمایشگاه [۹]

پارامتر	مقدار
حد روانی %	۳۴٫۴
حد خمیری %	۲۰٫۲
% پلاستیسیته	۱۴٫۱
وزن مخصوص	۲٫۶۱
% درصد آب	۲۸٫۵
قطر میان $d_{50}(mm)$	۰٫۰۰۶۲
ذرات	۰٫۰
% درصد ماسه	۷۵٫۰
% درصد سیلت	۲۵٫۰
% درصد رس	۱۲٫۵
مقاومت برشی <i>kpa</i>	۱۸٫۰
چگالی kN/m^3	

نتایج مدل‌سازی حاضر با روابط روش $E-SRICOS$ که حاصل اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی می‌باشند، ارائه شده‌اند. نتایج روش $E-SRICOS$ برای برآورد آبستگي بیشینه به کمک رابطه (۱۷)، با مقادیر متناظر محاسبه شده از مدل عددی حاضر در جدول (۲) مقایسه شده‌اند. حال می‌توان صحت نتایج مدل حاضر را بررسی نمود.



شکل ۱۱: تاریخچه تغییرات نرخ آبستگي بیشینه در کل محیط حل آزمون در زمان‌های مختلف محاسبات



شکل ۱۲: مقایسه تغییرات عمق آبستگي با زمان در دو روش عددی و روش $E-SRICOS$

با توجه به مقادیر تنش برشی در هر گام زمانی و همچنین رابطه EFA ، مقدار نرخ آبستگي تعیین می‌شود که در هر گام زمانی مقدار حداکثر نرخ آبستگي تعیین می‌شود. در شکل (۱۱) مقادیر نرخ آبستگي بیشینه (متناظر با تنش برشی بستر بیشینه) در گام‌های مختلف حل نشان داده شده‌است.

در اینجا، نتیجه همبستگی تغییرات نرخ آبستگي بیشینه و عمق آبستگي بیشینه با زمان در طی روند مدل‌سازی عددی نشان داده شده‌اند. در شکل (۱۲) مقایسه

جدول ۲: مقایسه نتایج آبستگي بیشینه

عمق آبستگي ماکزیمم $z_{max} (mm)$	نرخ آبستگي متناظر با τ_{max} $z^* (mm/hr)$	تنش برشی ماکزیمم $\tau_{max} (N/m^2)$	پارامتر مورد مقایسه روش مورد استفاده
۳۶۲۶	۶	۴۰	اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی $E-SRICOS$
۳۲۵۸	۶,۷۶۶۳۵۲	۴۱,۲۶۹۵	مدل آبستگي حاضر

جنس بستر رسی و ماسه‌ای که مشخصات فیزیکی آن در جدول زیر ارائه شده‌است.

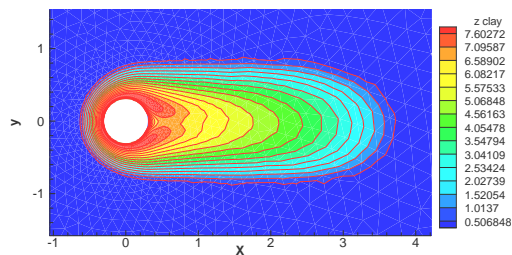
مشخصات شبکه مورد استفاده برای این آزمون در شکل (۱۳) نشان داده شده‌است. در این شبکه تعداد گره: ۲۲۴۷، تعداد المان مثلثی: ۴۲۵۴، تعداد گره‌های مرزی محیط مدل: ۸۰ و تعداد گره‌های مرزی اطراف پایه: ۱۶۰ می‌باشد. در این آزمون‌ها، تعداد گام‌های محاسباتی صریح بکار رفته برای رسیدن به وضعیت تقریباً دائمی با خطای همگرایی کمتر از 10^{-1} پس از حدود ۸۵۰۰ تکرار همراه بوده‌است.

۳- مقایسه آبستگي بسترهای رسی و ماسه‌ای

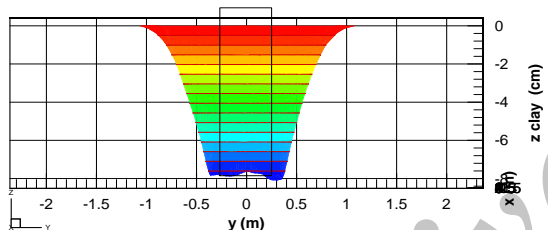
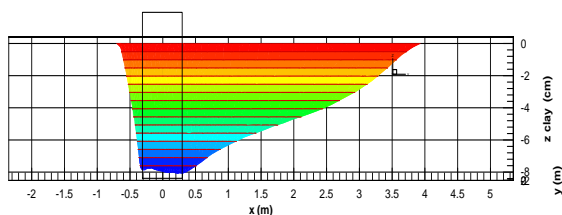
پس از اطمینان از صحت عملکرد مدل حاضر، در این قسمت با توجه به تکنیک‌های ارائه شده جهت تعیین عمق آبستگي و همچنین توزیع و گسترش تنش برشی و آبستگي در بستر رسی و ماسه‌ای مورد مقایسه قرار می‌گیرند. برای این منظور پارامترهای جریان و جنس بستر مطابق آزمون آزمایشگاهی مرجع [۱۰] به شرح زیر منظور می‌شوند.

پایه استوانه‌ای به قطر ۰,۶ متر در نظر گرفته شده و عمق اولیه ۰,۵ متر و سرعت ورودی ۱ متر بر ثانیه می‌باشد.

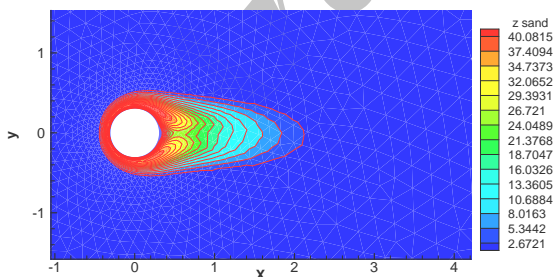
بعد از ۱ ساعت مدل‌سازی می‌باشند، به نمایش گذاشته شده‌اند.



شکل ۱۵: تغییرات عمق آبشستگی در بستر رسی اطراف پایه بعد از ۱ ساعت (مقادیر به سانتیمتر)



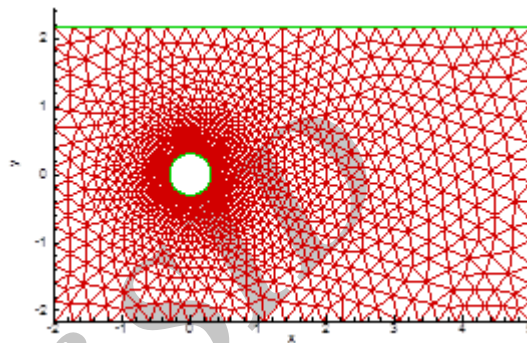
شکل ۱۶: تغییرات تراز بستر رسی بعد از ۱ ساعت در دو مقطع قائم در امتداد محور پایه، بالا: در راستای جریان، پایین: عمود بر جریان



شکل ۱۷: تغییرات عمق آبشستگی در بستر ماسه‌ای اطراف پایه بعد از ۱ ساعت (مقادیر به سانتیمتر)

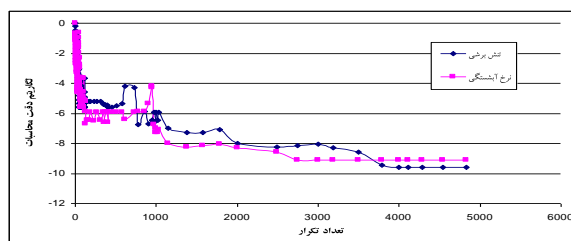
جدول ۳: مشخصات فیزیکی بستر رسی و ماسه ای فلوم آزمایشگاه [۱۰]

جنس بستر	d_{50} بستر	d_{50} بستر ماسه ای	τ_{cr} بستر رسی	τ_{cr} بستر ماسه ای
رس و ماسه	0.005 (mm)	5 (mm)	0.00195 pa	1.95 pa



شکل ۱۳: شبکه مدل‌سازی آبشستگی در بستر رسی و ماسه‌ای اطراف پایه استوانه

در این آزمون‌ها، تعداد گام‌های محاسباتی صریح بکار رفته برای رسیدن به وضعیت تقریباً دائمی با خطای همگرایی کمتر از 10^{-10} پس از حدود ۸۵۰۰ تکرار همراه بوده‌است. مدل عددی بر روی رایانه‌ای با پردازشگر Celeron (سرعت معادل ۲۰۰۰ MHz) اجرا شده‌است و مدت زمان اجرا برای آنالیز جریان و آبشستگی ۲۱۵ دقیقه بوده‌است. در اینجا می‌توان همگرایی و دقت نتایج را بررسی نمود. لذا نمودار لگاریتمی خطای همگرایی بی‌بعد شده جواب‌ها را برای دو پارامتر تنش برشی و عمق آبشستگی مطابق اشکال زیر ارائه نمود.



شکل ۱۴: نمودار همگرایی خطای همگرایی نتایج تنش برشی و نرخ آبشستگی

در اشکال زیر نمونه‌هایی از نتایج مدل حاضر که بیانگر تغییرات عمق آبشستگی در بستر رسی و ماسه‌ای اطراف پایه

۴- ارزیابی صحت مدل‌سازی آبشستگی در بستر ماسه‌ای

به منظور ارزیابی دقت مقدار آبشستگی بیشینه محاسبه شده در بستر ماسه‌ای توسط مدل حاضر، نتایج محاسبه شده توسط آن پس از همگرایی نتایج مدل‌سازی عددی (رسیدن به وضعیت متعادل) با نتایج روابط تجربی متنوعی که توسط محققین مختلف ارائه شده‌اند، مقایسه شده‌اند. این مقایسه در جدول (۴) ارائه شده‌است.

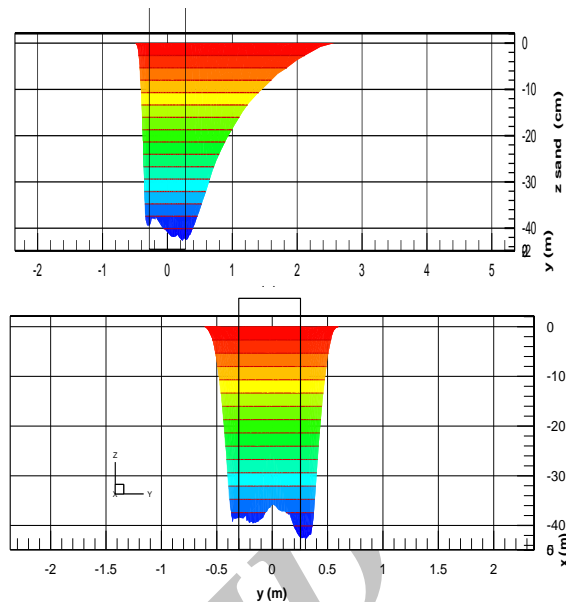
جدول ۴: مقایسه نتیجه روش عددی حاضر با نتایج آبشستگی بیشینه روابط تجربی مختلف ($k_i=1.05$)

روش مورد مطالعه	عمق متعادل آبشستگی Y_{me} (m)
روش CSU [۱] - رابطه (۱)	۰.۷۹۹۸۱
روش ژاپنی [۱] - رابطه (۲)	۰.۶۱۴۰۴
Breusers [۳] - رابطه (۳)	۱.۱۷۴۶۳
Laursen [۴] - رابطه (۴)	۰.۷۶۶۸۹
مدل عددی حاضر	۰.۹۶۵۹۷

نتیجه گیری

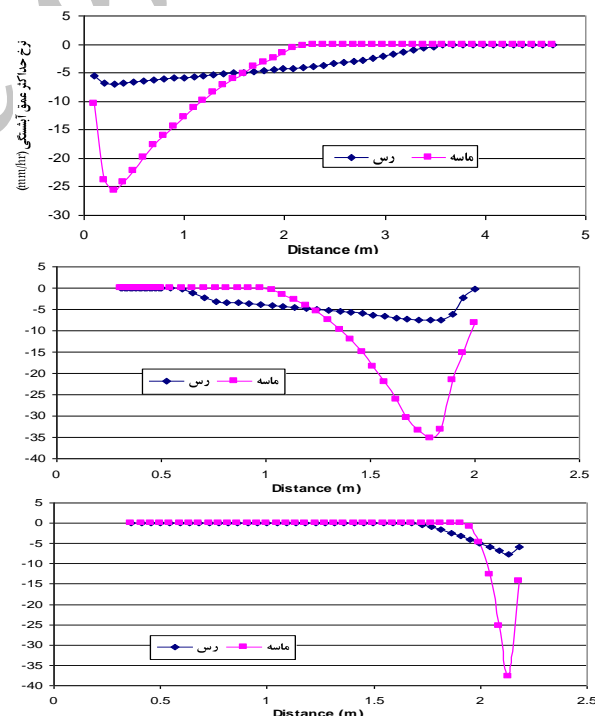
در این کار با ترکیب نتایج تحلیل عددی جریان آشفته میانگین‌گیری شده در عمق و روابط تجربی فرسایش بستر رسی و ماسه‌ای، شبیه‌سازی هندسه پیچیده گودال آبشستگی اطراف پایه با شکل انحنادار با موفقیت انجام شد. انتخاب حل‌گر عددی که با استفاده از روش حجم محدود بی‌ساختار در شبکه مثلثی معادلات جریان و آشفتنگی را حل می‌نماید شبیه‌سازی آبشستگی اطراف پایه با مقطع دایره‌ای را به آسانی میسر نمود. انتخاب مدل آشفتنگی $k-\varepsilon$ ، بکارگیری رابطه‌ای که تنش برشی جریان را با استفاده از انرژی جنبشی آشفتنگی جریان محاسبه می‌نماید، مقذور ساخت.

ترکیب پارامترهای محاسبه شده توسط مدل عددی برای جریان آشفته (معادلات پیوستگی و مقدار حرکت دو بعدی افقی بعلاوه مدل آشفتنگی دو معادله ای $k-\varepsilon$ آب‌های کم عمق) با رابطه $\tau_b = \rho(u_{*b})^2$ برای محاسبه تنش برشی



شکل ۱۸: تغییرات تراز بستر ماسه‌ای بعد از ۱ ساعت در دو مقطع قائم در امتداد محور پایه، بالا: در راستای جریان، پایین: عمود بر جریان

در اشکال زیر نحوه تغییرات تراز بسترهای رسی و ماسه‌ای در مقاطع مختلف برای آزمونهای این بخش مقایسه می‌گردند.



شکل ۱۹: مقایسه تغییرات تراز بستر رسی و ماسه‌ای پس از یک ساعت اجرای مدل (سانتیمتر) در سه مقطع قائم در امتداد محور پایه، بالا: در پایین دست پایه، وسط: بالادست پایه، پایین: کنار پایه

در حالی که از امتیاز بزرگ انعطاف پذیری و عدم محدودیت‌های هندسی و بار محاسباتی بسیار سبک در این نوع شبکه‌بندی بهره‌مند می‌باشد. مدل توسعه یافته با توجه به الگوریتم حل تشریح شده قابلیت تعیین تغییرات بستر در حین آبشستگی در هر دو نوع بستر رسی و ماسه‌ای را با استفاده از تنش‌های برشی قابل محاسبه به کمک پارامترهای محلی جریان آشفته دارد. کار بر روی توسعه این مدل عددی در خصوص انتقال و جابجایی ذرات بستر و تعیین تراز بستر پایین دست با توجه به مقادیر ترسیب مواد حل شده می‌تواند به نتایج کاربردی منجر شود.

(که با تعریف $u_* = \sqrt{k\sqrt{c_\mu}}$ از انرژی جنبشی جریان آشفته میانگین عمقی u_* و استفاده می‌کند) و روابط تجربی $E-SRICOS$ برای محاسبه نرخ فرسایش بستر (رسی):

$$\dot{z} = 3\tau - 9$$
و

$$\dot{z} = [(5.54\tau - 2.77)/(\tau + 0.875)] + 0.178\tau - 0.0809$$
نتایج بسیار امیدوارکننده‌ای را بدست می‌دهند. نتایج بدست آمده از مدل توسعه یافته برای محاسبه تنش برشی جریان و عمق آبشستگی دقت قابل قبولی را از خود به نمایش گذاشتند. مزیت مدل توسعه یافته این است که با وجود استفاده از شبکه بی‌سازمان مثلثی، به کمک ترفندهای حل عددی توانسته است با غلبه بر مشکلات متعارف استفاده از این شبکه‌ها مسائل عملی سیالات را با دقت مناسبی حل نماید.

مراجع

1. Bayat, H. (2001). "Interaction between Hydraulic Structures and Erosion" 1th. Ed. Chapter 2, Amirkabir Pub. Co., Tehran, (Farsi).
2. Sabbagh-Yazdi S. R. (2008). "Simulation of 2D Turbulent Flow around Arbitrary Shaped Piers using SWE Galerkin Finite Volume Solver of *NASIR* Software" Journal of Civil Engineering IAU (Science and Research Branch), Vol. 1, Issue 1, pp. 66-78 (Farsi).
3. Brusers H.N.C., Raudolivi A.J., (1991). "Scouring", A.A.Balkema Publihers.
4. Laursen, E. M. and Toch, A. (1956). "A Generalized Model Study of Scour Around Bridge Piers and Abutments", Proceedings of the International Hydraulics Division, ASCE, Vol. 92 (HY3), pp. 93-118.
5. Sabbagh-Yazdi S.R. and Zounemat-Kermani M. (2008). "Vertex Base Unstructured Finite Volume Solution of Depth Averaged Turbulent Tidal Currents on 3D Bed" Iranian Journal of Science & Technology, Transaction B: Engineering, Vol. 13, No. B5.563-570.
6. Briaud, J.-L., and Oh, S. J. (2010). "Bridge Foundation Scour" Geotechnical Engineering Journal of the SEAGS & AGSSEA, 41 (2), pp. 1- 16.
7. Vallentine H. R., (1967). "Applied Hydrodynamics", Plenum Press.
8. Younes, M., Hanif Chaudhry, M., (1994). "A Depth-Average $k-\epsilon$ Turbulence Model for the Computation of Free Surface Flow", Journal of Hydraulic Research, Vol. 32, No. 3, pp. 415-439
9. Briaud J. L., Ting F. C. K., Chen H. C., Gudavalli R., Perugu S., and Wei G., (1999). "SRICOS: Prediction of Scour Rate In Cohesive Soils at Bridge Piers", Journal of Geotechnic and Geoenvironment Engineering of ASCE, Vol. 125, No. 4, pp. 237-246
10. Briaud J. L., H. C. Chen, Li Y., Nurtjahyo P., and Wang J. (2005). "SRICOS-EFA Method for Contraction Scour in Fine-Grained Soils" Journal of Geotechnic and Geoenvironment Engineering of ASCE, Vol. 131, No. 10, pp. 1283-1285.
11. US. Department of Transportation, (2004). "Enhanced Abutment Scour Studies for Compound Channel", Mclean.