

مدل‌سازی عددی انرژی جنبشی آشفتگی جریان دو بعدی افقی برای شبیه‌سازی آبشنستگی بسترها رسانی و ماسه‌ای اطراف پایه دایره‌ای

سعیدرضا صباغ‌یزدی^{۱*} و رضا دهقان نیری^۲

^۱ استاد دانشکده عمران، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

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

(تاریخ دریافت ۱۰/۰۵/۲۹، تاریخ دریافت روایت اصلاح شده ۱۳۹۰/۰۹/۱۰، تاریخ تصویب ۱۳۹۰/۰۷/۲۸)

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 آبشنستگی در بسترها رسانی و ماسه‌ای اطراف پایه‌های پل با مقاطع دایره‌ای محاسبه شده است. گسسته‌سازی معادلات جریان با استفاده از روش رؤوس مثلثی همپوشان حجم محدود انجام گرفته است تا جریان اطراف پایه با هر هندسه دلخواه برآحتی حل عددی شود. جهت مدل‌سازی آشفتگی جریان در اطراف پایه از مدل آشفتگی $\epsilon - k$ برای جریان با سطح آزاد استفاده شده است. با تلفیق پارامترهای محاسبه شده مدل توسط مدل عددی جریان و آشفتگی با روابط تجربی روش آزمایشگاهی SRICOS نحوه شکل‌گیری آبشنستگی اطراف پایه در مسیر جریان و تغییرات تراز بستر مدل می‌شود. در کار حاضر کیفیت نتایج حاصل از این استراتژی مدل‌سازی آبشنستگی اطراف پایه با مقاطع دایره‌ای برای برخی آزمون‌های آزمایشگاهی با نتایج در دسترس آبشنستگی در بسترها رسانی و ماسه‌ای اطراف پایه با مقاطع دایره‌ای روی بسترها رسانی و ماسه‌ای مورد ارزیابی قرار گرفته است.

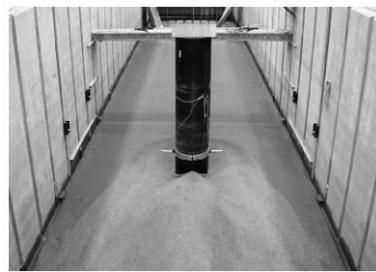
واژه‌های کلیدی: آبشنستگی در بسترها رسانی و ماسه‌ای، پایه دایره‌ای، معادلات آب‌های کم عمق، شبکه بی‌ساختار مثلثی، روش SRICOS، حجم محدود همپوشان، مدل آشفتگی $\epsilon - k$

مقدمه

یکی از مدل‌های متدالو در ایالات متحده، رابطه دانشگاه‌ایالتی کلرادو (CSU) می‌باشد [۱]. این رابطه با کمک تحلیل ابعادی پارامترهای مؤثر بر آبشنستگی 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):

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

پدیده آبشنستگی 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 آبشنستگی اطراف پایه مورد توجه محققین قرار گیرد (شکل ۱). فعالیتهای آزمایشگاهی و اندازه گیری‌های میدانی متعددی در این زمینه انجام گرفته است و روابط تجربی متعددی نیز ارائه شده است. برخی از این روابط برای برآورد عمق بیشینه آبشنستگی که تماماً تجربی بوده و از آزمایشات مختلف آزمایشگاهی و صحرایی بدست آمده است به شرح زیر می‌باشد.



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

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

به ذکر است، معادلات میانگین عمقی با فرض فشار هیدروستاتیک (حذف مننتوم در جهت قائم) مورد استفاده قرار گرفته است. در جاییکه 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 $U - k$ استفاده شده است [۲]. برای تعیین نرخ فرسایش در بستر های 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، آبشستگی بستر های رسی و ماسه ای اطراف پایه دایره ای مدل سازی می شوند.

معادلات و روابط مورد استفاده

در اینجا معادلات حاکم بر جریان آشفته افقی و روابط استفاده شده برای برآورد فرسایش بستر های رسی و ماسه ای (به منظور مدل سازی پدیده آبشستگی) بررسی و معرفی می گردد. 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 $U - k$ اصلاح شده برای جریان دوبعدی با سطح آزاد) و روابط تجربی مورد استفاده در محاسبه فرسایش بستر (روابط آزمایشگاهی E-SRICOS روش برای بستر های ماسه ای و رسی) [۶] ارائه کرد.

۱- معادلات جریان

برای بدست آوردن معادلات آبهای 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.

۱-۱- 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.

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

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

معادله فوق برای دامنه کامل 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] پیشنهاد کرد:

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

[۳] بر مبنای داده های Brusers [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 هایی از آنها در بالا آمدند، اغلب عمق بیشینه آبشستگی متعادل (m) را بر اساس پارامترهای هندسی مجرأ و جریان آب، همچون b : عرض پایه پل (m), h_0 : عمق جریان (m), U_c : سرعت متوسط بحرانی ($\frac{m}{s}$) و U_0 : سرعت متوسط ($\frac{m}{s}$) برآورد می نمایند و به جنس بستر توجهی نمی کنند. در حالیکه پدیده آبشستگی در بستر های رسی و ماسه ای الگوهای مختلفی را شکل میدهد.

مدلهای عددی آبشستگی 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 آبشستگی در بستر های 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 بار محاسباتی قابل قبولی جنس رسی یا ماسه ای بستر را در شبیه سازی آبشستگی 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 آبشستگی 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 $C_f U = u_i \hat{i} + u_j \hat{j}$ بردار سرعت می‌باشد. برای محاسبه C_f در جریان با بستر هموار می‌توان از رابطه ذیل استفاده نمود.

[۷]

$$C_f = 0.027 \left(\frac{V}{hu_i} \right)^{0.25} \quad (9)$$

درین فرمول V ویسکوزیته سینماتیکی آب است.

۴- معادلات مدل آشفتگی جریان

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

$$v_t = c_\mu k^2 / \varepsilon \quad (10)$$

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].

$$\frac{\partial(hk)}{\partial t} + \frac{\partial(huk)}{\partial x} + \frac{\partial(hvk)}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{v_t}{\sigma_k} \frac{\partial(hk)}{\partial x} \right] \quad (11)$$

$$+ \frac{\partial}{\partial y} \left[\frac{v_t}{\sigma_k} \frac{\partial(hk)}{\partial y} \right] + P_h + P_k - \varepsilon h$$

$$\frac{\partial(h\varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(hue)}{\partial x} + \frac{\partial(hv\varepsilon)}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{v_t}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial(h\varepsilon)}{\partial x} \right]_e \quad (12)$$

$$+ \frac{\partial}{\partial y} \left[\frac{v_t}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial(h\varepsilon)}{\partial y} \right] + \frac{\varepsilon}{k} (C_1 P_h - C_2 \varepsilon h) + P_\varepsilon$$

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

$$P_h = \frac{v_t}{h} \left\{ 2 \left[\frac{\partial(hu)}{\partial x} \right]^2 + 2 \left[\frac{\partial(hv)}{\partial x} \right]^2 + \left[\frac{\partial(hu)}{\partial y} + \frac{\partial(hv)}{\partial x} \right]^2 \right\} \quad (13)$$

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

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 جریان تراکمناپذیر میانگین-گیری شده در عمق در راستای i پس از اعمال شرایط مرزی بستر آب چنین بدست می‌آید.

$$\frac{\partial(hu_i)}{\partial t} + \frac{\partial(hu_i u_j)}{\partial x_j} + \frac{g \partial(h^2)}{2 \partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} (hv_i \frac{\partial u_i}{\partial x_j}) + \frac{\tau_{bi}}{\rho_w} - gh \frac{\partial z_b}{\partial x_i} \quad (i=1,2) \quad (6)$$

u_i سرعت میانگین عمقی در راستای ($i=1,2$) جهات اصلی مسطحه و z_b تراز بستر می‌باشند. v_t ضریب چسبندگی گردابی ای جهت مدل‌سازی آشفتگی منظور گشته است. درین 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 آبستنگی 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 جریان در راستای i را می‌توان به صورت زیر ارائه کرد.

$$\frac{\partial(hu_i)}{\partial t} + \frac{\partial(hu_i u_j)}{\partial x_j} + gh \frac{\partial(\eta)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} (hv_i \frac{\partial u_i}{\partial x_j}) + \frac{\tau_{bi}}{\rho_w} \quad (i=1,2) \quad (7)$$

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

۳- تنش بستر

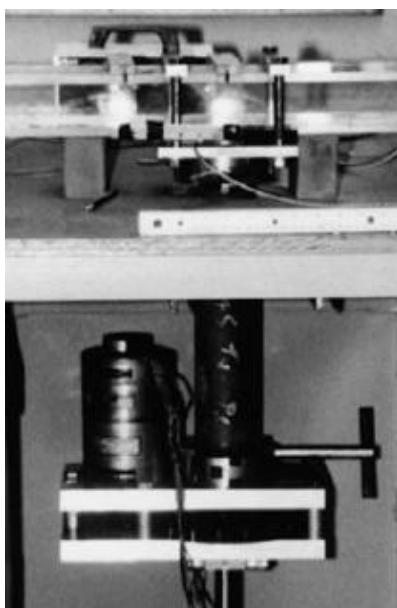
در رابطه (۲) عبارت τ_{bi} ، بیانگر مقاومت در برابر جریان در جهات x و y می‌باشد. لازم به ذکر است که در حالت تراکمناپذیر این عبارات بر ویسکوزیته آب (ρ) تقسیم می‌شود. تنش‌های کلی ناشی از مقاومت بستر و سطح آزاد (در راستای $i=1,2$) چنین قابل بیان می‌باشند [۷].

$$\tau_{bi} = \rho c_f u_i |U| \quad (8)$$

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

جهت تشریح روش کار، ابتدا می‌بایست به روش *E-SRICOS* و نتایج حاصل از آن اشاره نمود. این روش، توسعه یافته روش *SRICOS* می‌باشد که در سال ۱۹۹۹ برای پیش‌بینی عمق آبشتستگی در برابر زمان ارائه شد [۶]. روش *SRICOS*، در ابتدا جهت تعیین عمق آبشتستگی 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 اشكال مختلف و همچنین شرایط مختلف مختلف جریان می‌باشد.

در این روش ابتدا بوسیله انجام آزمایش‌های *EFA* (Dستگاه تابع فرسایش Erosion Function Apparatus) تغییرات تابع نرخ آبشتستگی (Z^{\star}) در برابر تنفس برشی هیدرولیکی (N/m^2) تعیین می‌گردد. در روش *E-SRICOS* ابتدا با استفاده از رابطه (۱۷) مقدار تنفس برشی بیشینه و به کمک تنفس برشی حاصل، از روی روابط تجربی نرخ آبشتستگی متناظر محاسبه شده است. در نهایت با استفاده از رابطه (۱۸)، می‌توان مقدار آبشتستگی بیشینه را تعیین نمود. به کمک این آزمون‌ها و با توجه به جنس بستر می‌توان نرخ آبشتستگی و تنفس 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 E - k استاندارد به صورت زیر است [۸].

$$c_{\mu} = 0.09, c_{\varepsilon^2} = 1.92, c_{\varepsilon^1} = 1.44, \sigma_{\varepsilon} = 1.3, \sigma_k = 1.0$$

$$D = 1.0$$

۵- روابط فرسایش بستر

اکثر روابط ارائه شده در خصوص آبشتستگی، 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 تنفس برشی بستر در تعیین میزان فرسایش بستر استفاده کرد و در ادامه به وسیله روش‌هایی که بتوان به کمک آنها با توجه به مقدار تنفس برشی، عمق فرسایش را تعیین نمود و بدین ترتیب شکل‌گیری پدیده آبشتستگی را مدل نمود. حال در ابتدا به بررسی نحوه تعیین تنفس برشی پرداخته می‌شود.

لازم به ذکر است که آبشتستگی در اطراف پایه‌ها در دو حالت آبشتستگی بستر فعال و آب زلال مطرح می‌کنند. در حالت آبشتستگی 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 آبشتستگی ایجاد شده در اطراف پایه احتمال پر شدن مجدد آن دارد. لذا نتایجی که با فرض آب زلال بdest می‌آید، dest بالاتر و دارای ضریب اطمینان بیشتری نسبت به آبشتستگی بستر فعال می‌باشد. بنابراین در تحقیق حاضر dest در بالادست پایه، کاملاً صاف و پایدار فرض شده است، لذا تنها آبشتستگی آب زلال مورد بررسی قرار می‌گیرد.

مشاهدات آزمایشگاهی برای استخراج روابط تجربی

در خصوص برآورد تنفس 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 آبستنگی در اطراف پایه‌های پل به این ترتیب می‌باشد که در هر گام زمانی به کمک نتایج حل مدل جریان (۶) و ۷ مؤلفه‌های میدان دوبعدی سرعت میانگین‌گیری شده در عمق) و همچنین نتایج حل مدل آبستنگی 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 تنفس برشی از تنفس بحرانی τ_c مقدار نرخ آبستنگی (تغییرات تراز بستر) z_b در نقاط مختلف بستر جریان تعیین می‌شود. سپس عمق آبستنگی محاسبه شده در گره به عمق جریان h در آن گره اضافه می‌شود و به عبارت دیگر تراز بستر کاهش داده می‌شود.

۱- تعیین تنفس برشی بحرانی بستر

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

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

$$\tau_c = (\gamma_s - \gamma_w) d_{50} * 0.056 \quad (۲۰)$$

در رابطه بالا، τ_c تنفس برشی بحرانی (N/m^2)، γ چگالی مصالح بستر (N/m^3)، d_{50} قطر میانه ذرات (m) می‌باشد. رابطه بالا، در خاکهای رسی دانه و در موقعی 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 تنفس برشی بستر جریان

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

۱- روابط تجربی برای تخمین نرخ آبستنگی

بر اساس چندین سری مشاهدات آزمایشگاهی در مورد نرخ فرسایش بستر در حالت بسترها رسى و ماسه اى روابط زير ارائه گردیدند [۹]. برای بستر ماسه‌اي

$$\dot{z} = \frac{5.54\tau - 2.77}{\tau + 0.875} + 0.178\tau - 0.0809 \quad (۱۵)$$

برای بستر رسى

$$\dot{z} = 3\tau - 9 \quad (۱۶)$$

۲- رابطه تجربی برای تنفس برشی بيشينه

بيشينه تنفس برشی هييدروليكي τ_{max} با استفاده از يك سري مشاهدات آزمایشگاهی در مورد جریانات سه بعدی در پشت پایه‌های دایره‌ای در حالت بستر هموار رودخانه و عمق زياد (عمق آب بزرگتر از ۵، ابرابر قطر پایه دایره‌ای) به صورت رابطه زير ارائه گردید [۱۰].

$$\tau_{max} = 0.094\rho V^2 \left(\frac{1}{\log R} - \frac{1}{10} \right) \quad (۱۷)$$

۳- رابطه تجربی برای مقدار آبستنگی بيشينه

حداکثر عمق آبستنگی z_{max} با استفاده از مشاهدات حاصل از ۴۳ مدل بر روی بسترها رسى و ماسه اى، برای هر دو حالت رسى و ماسه‌اي به صورت زير قابل ارائه می‌باشد. [۹].

$$z_{max} (mm) = 0.18R^{0.635} \quad (۱۸)$$

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

$$z = \frac{t}{1} + \frac{t}{z_{max}} \quad (۱۹)$$

؛ z : نرخ آبستنگی اوليه که مقدار متناظر z_{max} در نمودار آزمون EFA می‌باشد.

تلافیق مدل عددی جریان با روابط فرسایش

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

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 $C = \sqrt{g h}$ 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 ، $= |\bar{u} \Delta y - \bar{v} \Delta x|$ 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 گستته در هر مرحله زمانی می‌باشد. قبل از آغاز محاسبات می‌باشد 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، مؤلفه‌های سرعت جریان در جهت مثبت دو راستای اصلی مختصات برابر 10% مقدار مؤلفه‌های سرعت آزاد جریان در نظر گرفته شد و عمق متوسط اولیه جریان برابر عمق آزاد اعمالی در جریان منظور گشته است. بستر مدل در شرایط اولیه هموار و جهت برآورد عمق آبشستگی، بستر در حالت بستر رسی مورد بررسی قرار گرفته است.

۲-۲- شرائط مرزی جریان

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

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

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

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

گسسته سازی حجم محدود معادلات جریان آشفته

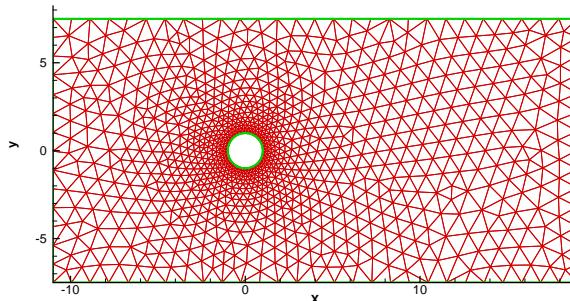
جهت توصیف و گسسته سازی معادلات جریان آشفته اطراف پایه پل که شامل معادلات پایستار حجم و اندازه حرکت و معادلات مدل آشفتگی $k-\epsilon$ که بطور کلی بصورت معادلات انتقال-پخشودگی (Convection-Diffusion) می‌باشد، از روش حجم محدود با شیوه مناسب شبکه بی‌ساختار مثلثی استفاده شده است. در این خصوص رابطه زیر را می‌توان 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 چشمی و چاه معادلات می‌باشد. رابطه کلی حجم کنترل به صورت زیر می‌باشد.

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

با توجه به استفاده از روش همپوشان، در رابطه بالا، W_i ، مقدار مشخصه پارامترهای h, hu, hv, hk, he 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.

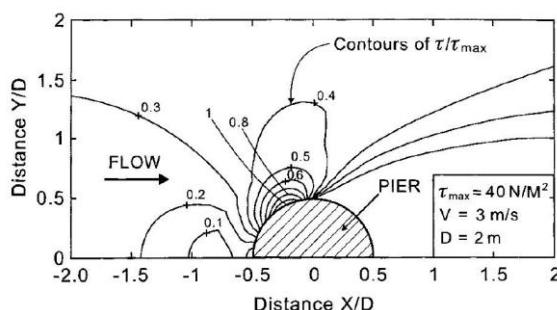


شکل ۳: هندسه و شبکه مثلثی محاسباتی

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 $\tau_b = \rho u_{*b}^2$ 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 همگرائی کمتر از 10^{-9} پس از حدود ۱۰۱۰۰ تکرار همراه بوده است.

ابتدا رابطه $\tau_{bi} = \rho c_f u_i |U|$ با توجه به روابط مختلف C_f [۷]، برای هر گام زمانی محاسبه گردید. جهت صححت‌سنجی 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* [۸] *Wei et al.* می‌باشد و توسط مدل شبه‌سازی جریان و آبشنستگی بر روی بستر رودخانه می‌باشد و توسط [۸] *Wei et al.* 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

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

[۸] *CHIMERA-RANS*

۲-۳- شرائط مرزی دیوار نفوذناپذیر

با توجه به مطالعه 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 گردیده است. 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 قبل از سنجی گردیده است [۲ و ۵] در این بخش به صحت‌سنجی نتایج مدل آبشنستگی 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 آشفتگی محاسبه شده توسط مدل دو معادله‌ای آشفتگی میانگین عمقی موردنظر ارزیابی قرار می‌گیرد. سپس نتایج مدل‌سازی گودال ناشی از آبشنستگی 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.

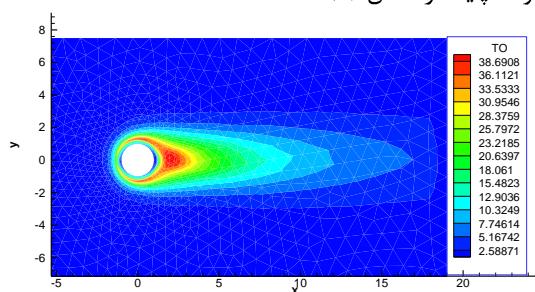
هندرسون مدل مورد استفاده در مدل‌سازی عددی کاملاً منطبق بر آزمون آزمایشگاهی و مطابق شکل (۳) می‌باشد که به کمک اجزای مثلثی گسسته شده است (تعداد گره: ۱۰۶۵، تعداد المان مثلثی: ۲۰۰۶، تعداد گره‌های مرزی محیط مدل: ۸۸، تعداد گره‌های مرزی اطراف پایه: ۳۸). لازم به ذکر است که استفاده از اجزای مثلثی بی ساختار امکان 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 MHz ۲۰۰۰) اجرا شده است.



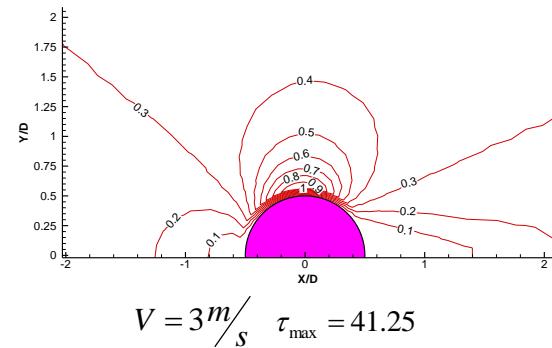
شکل ۷: نحوه شکل‌گیری آبشنستگی اطراف پایه در آزمایشگاه با توجه به جنس بستر، بالا: بستر ماسه ای ($PI = 0$) و پایین: بستر رسی ($PI = 20\%$) [۹]

نتایج حاصل از استفاده از مدل حاضر نشان می‌دهد کلیه مشخصات پدیده آبشنستگی در این رابطه لاحظ شده‌است. این رابطه تأثیر توان سرعت و عمق جریان را با حل همزمان معادلات جریان و مدل آشفتگی دو معادله‌ای $\epsilon - k$ 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.

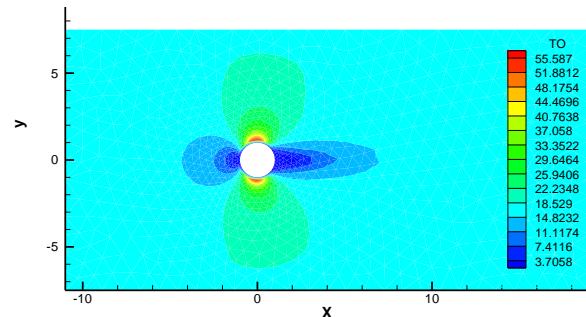


شکل ۸: توزیع تنش برشی اطراف پایه با استفاده از

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



شکل ۹: نسبت تنش برشی بستر به تنش برشی حداکثر با استفاده از رابطه $\tau_{bi} = \rho c_f u_i |U|$ در مدل عددی حاضر

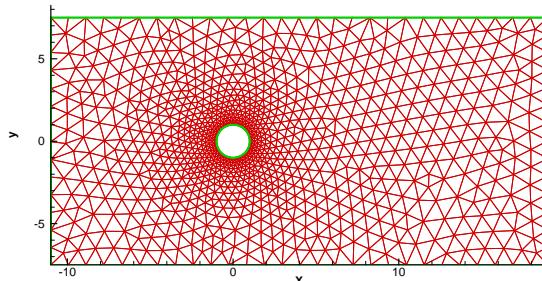


شکل ۱۰: نحوه توزیع تنش برشی محاسبه شده توسط مدل حاضر با استفاده از رابطه

$$\tau_{bi} = \rho c_f u_i |U|$$

اما با مقایسه شکل بالا با شکل زیر که شکل‌های کلی حفره‌های آبشنستگی اطراف پایه دایره‌ای را در بسترها رسانی و ماسه‌ای فلومهای آزمایشگاهی نشان می‌دهند، می‌توان قضاویت نمود که موقعیت‌های مقادیر تنش بستر شدید با مکان‌های گودشگی 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 $\epsilon - k$ -جریان میانگین عمقی را در خود جای دهد.

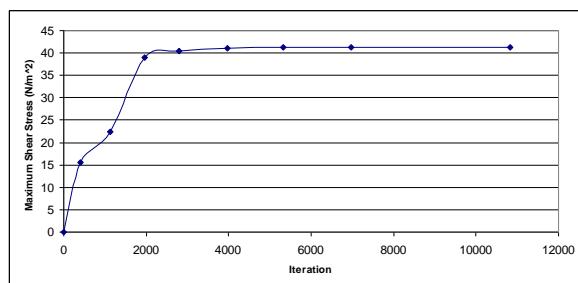


شکل ۹: مدل هندسی آزمون آبشنستگی در بستر رسی اطراف پایه استوانه‌ای

جهت مدل‌سازی این آزمون، ابتدا با توجه به مشخصات هندسی موجود، مدل هندسی محدوده حل ایجاد و مطابق شکل (۹)، شبکه بنده 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 همگرائی کمتر از ۱۰⁻۹ پس از حدود ۱۰۱۰۰ تکرار، مدت در زمان اجرا ۸۰ دقیقه بوده است. مدل عددی بر روی رایانه‌ای با پردازنگر Celeron (با سرعت معادل ۳۰۰۰ MHz) اجرا شده است.

در شکل (۱۰) مقادیر تنش برشی بستر بیشینه محاسباتی در کل حوزه حل در تکرارهای مختلف حل نشان داده شده است. این نمودار برای نقطه خاصی از مدل تهیه نشده است، بلکه در هر گام زمانی مقدار تنش برشی حداکثر برای کل محدوده حل محاسبه شده و نمودار شکل (۱۰) ترسیم شده است. 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 آبشنستگی اطراف پایه دایره‌ای را در بسترهای رسی و ماسه‌ای فلومهای آزمایشگاهی نشان می‌دهند، می‌توان قضاوت نمود که موقعیت‌های مقادیر تنش بستر شدید با مکان‌های گودشده‌گی زیاد تطبیق داشته و لذا از لحاظ توصیف فیزیک پدیده این رابطه مناسب می‌باشند. اما جهت مقایسه کمی نتایج حاصل از مدل‌سازی آبشنستگی با رابطه $\tau_b = \mu u_{*b}^2$ (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 آبشنستگی آب زلال در دو جنس بستر مختلف محاسبه شده توسط مدل حاضر با اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی پرداخته می‌شود.

۲- ارزیابی صحت مدل‌سازی آبشنستگی در بستر رسی

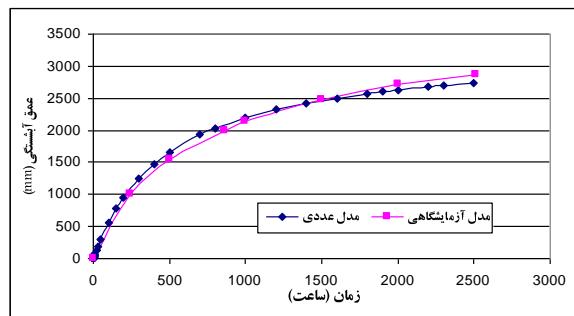
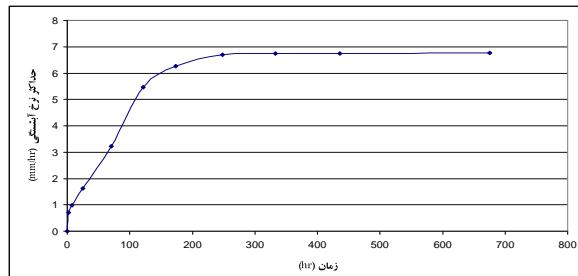
در این بخش صحت سنجی مدل‌سازی آبشنستگی در حالت بستر رسی انجام می‌شود. آزمون انتخابی از مواردی است که بصورت کامل بوسیله روش E-SRICOS بررسی قرار گرفته است [۹]. لذا می‌توان نتایج مدل عددی حاضر را با اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی مقایسه نمود.

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 درخصوص این خاک موجود می‌باشد. سایر مشخصات خاک بستر در جدول (۱) ارائه شده است [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 میانه $d_{50}(mm)$ ذرات	۰,۰۰۶۲
% درصد ماسه	۰,۰
% درصد سیلت	۷۵,۰
% درصد رس	۲۵,۰
kpa مقاومت برشی	۱۲,۵
چگالی kN/m^3	۱۸,۰

نتایج مدل سازی حاضر با روابط روش *E-SRICOS* که حاصل اندازه گیری های آزمایشگاهی می باشند، ارائه شده است. نتایج روش *E-SRICOS* برای برآورد آب شستگی بیشینه به کمک رابطه (۱۷)، با مقادیر متناظر محاسبه شده از مدل عددی حاضر در جدول (۲) مقایسه شده است. حال می توان صحت نتایج مدل حاضر را بررسی نمود.



شکل ۱۲: مقایسه تغییرات عمق آب شستگی با زمان در دو روش عددی و روش *E-SRICOS*

شکل ۱۱: تاریخچه تغییرات نرخ آب شستگی بیشینه در کل محیط حل آزمون در زمان های مختلف محاسبات

با توجه به مقادیر تنفس برشی در هر گام زمانی و همچنین رابطه *EFA*، مقدار نرخ آب شستگی تعیین می شود که در هر گام زمانی مقدار حداقل نرخ آب شستگی تعیین می شود. در شکل (۱۱) مقادیر نرخ آب شستگی بیشینه (متناظر با تنفس برشی بستر بیشینه) در گام های مختلف حل نشان داده شده است.

در اینجا، نتیجه همبستگی تغییرات نرخ آب شستگی بیشینه و عمق آب شستگی بیشینه با زمان در طی روند مدل سازی عددی نشان داده شده است. در شکل (۱۲) مقایسه

جدول ۲: مقایسه نتایج آب شستگی بیشینه

پارامتر مورد مقایسه	روش مورد استفاده	تنفس برشی ماکریم $\tau_{\max} (N/m^2)$	نرخ آب شستگی متناظر با $\tau_{\max} z^* (mm/hr)$	عمق آب شستگی ماکریم $z_{\max} (mm)$
اندازه گیری های آزمایشگاهی <i>E-SRICOS</i>		۴۰	۶	۳۶۲۶
مدل آب شستگی حاضر		۴۱،۲۶۹۵	۶،۷۶۶۳۵۲	۳۲۵۸

جنس بستر رسی و ماسه ای که مشخصات فیزیکی آن در جدول زیر ارائه شده است.

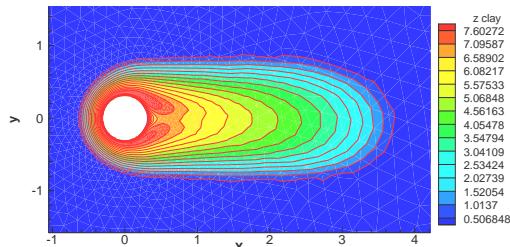
مشخصات شبکه مورد استفاده برای این آزمون در شکل (۱۳) نشان داده شده است. در این شبکه تعداد گره: ۲۲۴۷، تعداد المان مثلثی: ۴۲۵۴، تعداد گره های مرزی محیط مدل: ۸۰ و تعداد گره های مرزی اطراف پایه: ۱۶۰ می باشد. در این آزمون ها، تعداد گام های محاسباتی صریح بکار رفته برای رسیدن به وضعیت تقریباً دائمی با خطای همگرائی کمتر از 10^{-1} پس از حدود ۸۵۰۰ تکرار همراه بوده است.

۳- مقایسه آب شستگی بستر های رسی و ماسه ای

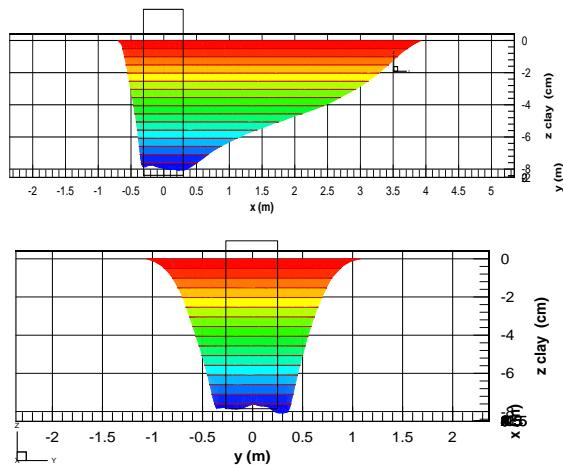
پس از اطمینان از صحت عملکرد مدل حاضر، در این قسمت با توجه به تکنیک های ارائه شده جهت تعیین عمق آب شستگی و همچنین توزیع و گسترش تنفس برشی و آب شستگی در بستر رسی و ماسه ای مورد مقایسه قرار می گیرند. برای این منظور پارامترهای جریان و جنس بستر مطابق آزمون آزمایشگاهی مرجع [۱۰] به شرح زیر منظور می شوند.

پایه استوانه ای به قطر ۶۰ متر در نظر گرفته شده و عمق اولیه ۵۰ متر و سرعت ورودی ۱ متر بر ثانیه می باشد.

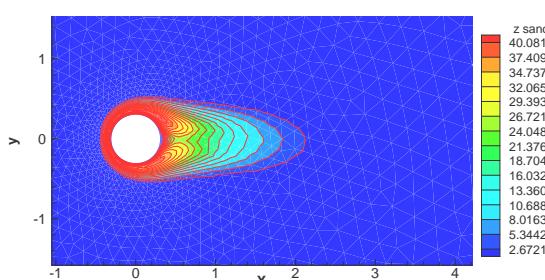
بعد از ۱ ساعت مدل سازی می باشند، به نمایش گذاشتند.



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



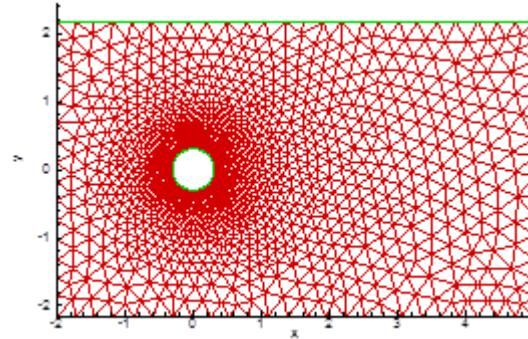
شکل ۱۶: تغییرات تراز بستر رسی بعد از ۱ ساعت در دو مقطع قائم در امتداد محور پایه، بالا: در راستای جريان، پایین: عمود بر جريان



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

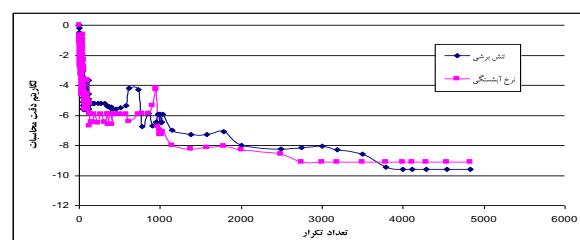
جدول ۳: مشخصات فیزیکی بستر رسی و ماسه‌ای فلوم آزمایشگاه [۱۰]

τ_{cr} بستر ماسه pa	τ_{cr} بستر رسی pa	d_{50} بستر ماسه (mm)	d_{50} بستر رسی (mm)	جنس بستر
1.95	0.00195	5	0.005	رس ۹ ماسه



شکل ۱۸: شبکه مدل سازی آبشنستگی 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 همگرائی کمتر از 10^{-10} پس از حدود ۸۵۰۰ تکرار همراه بوده است. مدل عددی بر روی رایانه‌ای با پردازنشگر Celeron (با سرعت معادل 3000 MHz) اجرا شده است و مدت زمان اجرا برای آنالیز جريان و آبشنستگی ۲۱۵ دقیقه بوده است. در اینجا می‌توان همگرایی و دقت نتایج را بررسی نمود. لذا نمودار لگاریتمی خطای همگرایی بی‌بعد شده جواب‌ها را برای دو پارامتر تنفس برشی و عمق آبشنستگی مطابق اشکال زیر ارائه نمود.



شکل ۱۹: نمودار همگرایی خطای همگرایی نتایج تنفس برشی و نرخ آبشنستگی

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

۴- ارزیابی صحت مدل سازی آبشنستگی در بستر ماسه‌ای

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

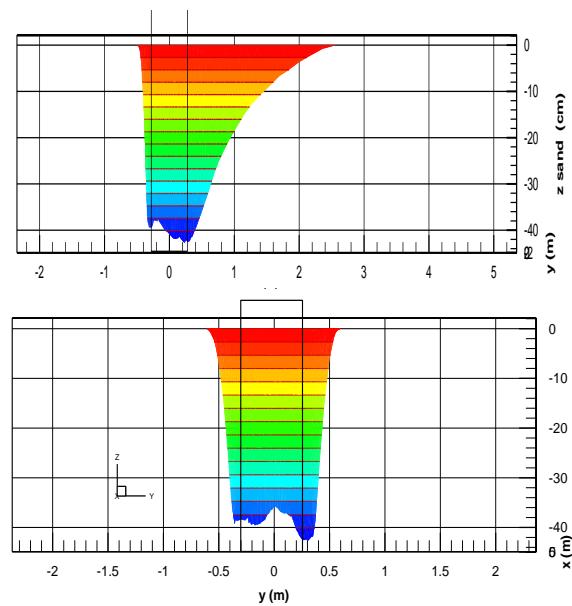
جدول ۴: مقایسه نتیجه روش عددی حاضر با نتایج آبشنستگی بیشینه روابط تجربی مختلف ($k_i = 1.05$)

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

نتیجه گیری

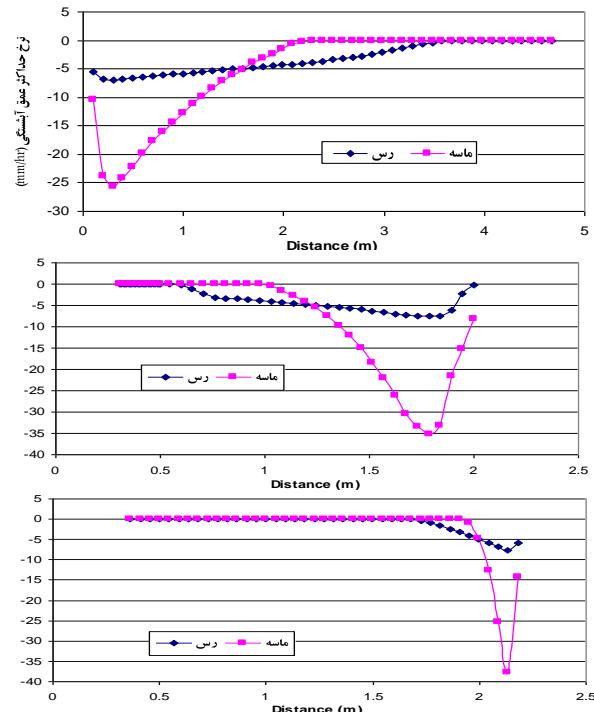
در این کار با ترکیب نتایج تحلیل عددی جریان آشفته میانگین‌گیری شده در عمق و روابط تجربی فرسایش بستر رسمی و ماسه‌ای، شبیه‌سازی هندسه پیچیده گودال آبشنستگی اطراف پایه با شکل انحنایار با موفقیت انجام شد. انتخاب حل‌گر عددی که با استفاده از روش حجم محدود بی‌ساختار در شبکه مثلثی معادلات جریان و آشفتگی را حل می‌نماید شبیه‌سازی آبشنستگی اطراف پایه با مقطع دایره‌ای k ، k را به آسانی می‌سیر نمود. انتخاب مدل آشفتگی E - k ، k بکارگیری رابطه‌ای که تنش برشی جریان را با استفاده از اثری جنبشی آشفتگی جریان محاسبه می‌نمایند، مقدور ساخت.

ترکیب پارامترهای محاسبه شده توسط مدل عددی برای جریان آشفته (معادلات پیوستگی و مقدار حرکت دو بعدی افقی بعلاوه مدل آشفتگی دو معادله ای E - k - 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 بسترها رسمی و ماسه‌ای در مقاطع مختلف برای آزمونهای این بخش مقایسه می‌گردد.



شکل ۱۹: مقایسه تغییرات تراز بستر رسمی و ماسه‌ای پس از یک ساعت اجرای مدل (سانتی‌متر) در سه مقطع قائم در امتداد محور پایه، بالا: در پایین دست پایه، وسط: بالا دست 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 تنש‌های 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 – و استفاده میکند) و روابط تجربی $E - SRICOS$ برای محاسبه نرخ فرسایش بستر (رسی: $\dot{z} = 3\tau - 9$ ماسه‌ای: $\dot{z} = [(5.54\tau - 2.77)/(\tau + 0.875)] + 0.178\tau - 0.0809$) 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., Raudlivi A.J., (1991). "Scouring", A.A.Balkema Publishers.
4. Laursen, E. M. and Toch, A. (1956). " A Generalized Model Study of Scour Around Bridge Piers and Abutments", Proceedings if 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. Valentine H. R., (1967). "Applied Hydrodynamics", Plenum Press.
8. Younes, M. , Hanif Chaudhry, M., (1994). " A Depth-Average $k - \varepsilon$ 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., Nurjahyo 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.