مدلسازي آبشستگي بستر رسي اطراف پايه‌هاي دايره‌اي به كمک حل حجم محدود جريان آشفته افقی

سعيدرضا صباغ يزدي[i] ؛ رضا دهقان نيري[ii] ؛ سيد سعيد اشرف واقفي[iii]*

چکيده

معادلات آبهاي کم عمق از جمله مدلهاي رياضي کارآمد برای توصيف دو بعدي و رفتار جريان در برخورد به موانع مسير جريان مي‌باشد. در کار حاضر برای مدلسازي عددي جريان در اطراف پايه پلها، گسسته سازي معادلات با استفاده از روش رئوس مثلثي همپوشان احجام محدود انجام گرفته است. برای مدلسازي جريان آشفته در اطراف پايه از مدل آشفتگي $k-\varepsilon$ برای حالت جريان با سطح آزاد استفاده شده است. در ادامه، با تلفيق مدل عددي جريان و آشفتگي و فرمولهای تجربی حاصل از روش E-SRICOS (روشی آزمايشگاهي برای برآورد شستگی ناشی از جريان آب)، چگونگی شکل گيري آبشستگي در اطراف پايه دايره‌اي و تغييرات تراز بستر با زمان شبيه سازی مي‌شود. کيفيت نتايج حاصل از اين مدل براي برخي آزمونهاي مشابه با نتايج در دسترس، در حالت بستر رسي مورد ارزيابي قرار گرفته است. نتايج مدلسازی آبشستگی با استفاده از مدل دو بعدی افقی جريان آب با روابط تجربی برای شستگی کف، دقت مناسبي بدست مي‌دهد.

کلمات کليدي

معادلات آبهاي کم عمق، مدل آشفتگي $k-\varepsilon$، حل حجم محدود همپوشان، شبکه بي ساختار مثلثي، روش E-SRICOS .

Numerical Simulation Scouring in Cohesive Bed around Circular Piers using Finite Volume Solution of Horizontal Turbulent Flow

S.R. Sabbagh-Yazdi; R. Dehghan-Naieri; S.S. Ashraf-Vaghefi;

ABSTRACT

Numerical solution of depth averaged equations is one of the best ways for describing of two dimensional horizontal flow and behavior of flow around circular piers. In this paper, governing equations of turbulent shallow water flow are converted to discrete form using overlapping finite volume method on triangular unstructured mesh. The equations include to the depth average equation of continuity and motion for flow model and $k-\varepsilon$ equation for turbulence model. For simulation of scouring in cohesive bed, the results of the flow solver model are combined with the empirical relations obtained from the E-SRICOS bed scouring method which is a laboratory base method for determining rate of flow induced scouring.

KEYWORDS

Shallow Water Equations, Flow around Piers, E-SRICOS Method, Overlapping Finite Volume, $k-\varepsilon$ Turbulent Model

---

تاريخ دريافت مقاله:۱۳۸۷/۲/۲۰

تاريخ اصلاحات مقاله:۱۳۸۸/۵/۶

[i] دانشياردانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتي خواجه نصيرالدين طوسي، Email: syazdi@kntu.ac.ir

[ii] دانش آموخته کارشناسي ارشد سازه‌هاي هيدروليکي، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتي خواجه نصيرالدين طوسي، Email: rezadehghannayeri@yahoo.com

[iii] *نويسنده مسئول و دانشجوي دکتري مهندسی آب، دانشکده عمران و محيط زيست، دانشگاه صنعتی اميرکبير (پلی تکنيک تهران)، Email: saeedzruse@yahoo.com

۱- مقدمه

پديده آبشستگي در اطراف پايه‌هاي پل از جمله دلايل اصلي تخريب پلها در مسير جريان رودخانه‌ها مي‌باشد. فعاليتهاي آزمايشگاهي فراوانی در اين زمينه انجام گرفته است و روابط تجربي زيادی نيز ارائه شده است. در خصوص مدلهاي عددي نيز در داخل کشور، مطالعات گوناگون با فرضيات مختلفي انجام شده است[۱]. در اين پژوهش استفاده از مدل عددي براي مدلسازي جريان و آشفتگي در اطراف پايه و در ادامه تدوين مدل آبشستگي با استفاده از نتايج مدل جريان و نتايج آزمايشگاهي، بررسی شده است.

معادلات جريان و آشفتگي، شامل عبارات مشتقات جزئي مرتبه اول زماني و مکاني (عبارات انتقالي و ثقلي) بعلاوه عبارات استهلاکي ثابت ناشي از مقاومت بستر مي‌باشند. شايان گفتن است، معادلات ميانگين عمقي با فرض فشار هيدروستاتيک (با ناچيز دانستن مقدار حرکت در راستای قائم جريان) مورد استفاده قرار گرفته است. با اضافه کردن مدل آشفتگي مناسب به شکل عبارات پخشودگي شامل مشتقات جزئي مرتبه دوم به معادلات پايستار اندازه حرکت مي‌تواند تنشهاي رينولدز افقی را نيز شبيه‌سازي نمود. در کار حاضر براي مدلسازي آشفتگي از مدل $k-\varepsilon$ استفاده شده است [۱].

براي تعيين عمق آبشستگي در اطراف پايه، در آغاز نتايج روش آزمايشگاهي E-SRICOS (که در ادامه تشريح مي‌گردد) مورد بررسي قرار گرفته است[۳، ۴]. آنگاه با بکارگيري روابط نرخ آبشستگي نتيجه شده از تجربيات آزمايشگاهي در مدل عددي توسعه يافته براي جريان آشفته افقی، آبشستگي بستر رسي اطراف پايه دايره‌اي به کمک مولفه‌های جريان افق تعيين مي‌شود.

۲- معادلات و روابط مورد استفاده

در اينجا معادلات و روابط حاکم بر پديده آبشستگي بررسي مي‌گردد. معادلات مورد استفاده را مي‌توان بطور جداگانه با عنوان معادلات دو بعدي جريان، آشفتگي و روابط مورد استفاده در مدل آبشستگي، ارائه کرد.

۲-۱- معادلات جريان

براي بدست آوردن معادلات آبهاي کم عمق، معادلات ناوير استوکس بعنوان مدل رياضي مناسبي برای حل مسائل مختلف سيالات تراکم ناپذير(مانند آب) مورد اصلاح و استفاده قرار گرفته‌اند. شکل کلي معادلات حاکم عبارتند از:

۲-۱-۱- معادله پايستار حجم

$$\frac{\partial h}{\partial t}+\frac{\partial (hu_i)}{\partial x_i}=0 \qquad (i=1,2) \tag{۱}$$

در معادله شماره ۱، h عمق آب و u مؤلفه سرعت جريان در جهت i مي‌باشد.

۲-۱-۲- معادلات پايستار اندازه حرکت

$$\frac{\partial (hu_i)}{\partial t}+\frac{\partial (hu_iu_j)}{\partial x_j}+\frac{g\partial (h^2)}{2\partial x_i}= \\ \frac{\partial}{\partial x_i}(hv_t\frac{\partial u_i}{\partial x_j})+\frac{\tau_{bi}}{\rho_w}-gh\frac{\partial x_3}{\partial x_i} \qquad (i=1,2) \tag{۲}$$

u_i سرعت ميانگين عمقي در راستاي (i = ۱و۲) جهات اصلي مسطحه، و x_3 راستاي مختصات در جهت عمق مي‌باشند. v_t لزجت گردابه‌اي برای مدلسازي آشفتگي منظور گشته است. دراين رابطه جملات مشتقات مرتبه دوم اثر استهلاکي و جملات مشتقات مرتبه اول اثر انتقالي دارند و به همين دليل رابطه پخش-انتقال ناميده می‌شود.

۲-۱-۳- مقاومت بستر

در رابطه ۲ عبارت τ_{bi}، بيانگر مقاومت در برابر جريان در جهات x وy مي‌باشند. گفتنی است که در حالت تراکم‌ناپذير اين عبارت بر ويسکوزيته آب (ρ) تقسيم مي‌شود. تنشهاي کلي ناشي از مقاومت بستر و سطح آزاد (در راستاي ۲و۱ = i) به صورت رابطه شماره ۳ قابل بيان مي‌باشند[۱].

$$\frac{\tau_{bi}}{\rho_w}=C_f u_i|U| \tag{۳}$$

در رابطه ۳، C_f ضريب اصطكاك بستر بوده و $U=u_i\hat{i}+u_j\hat{j}$ بردار سرعت است. براي محاسبه C_f در جريان با بستر هموار مي‌توان از رابطه ٤ استفاده نمود[۲].

$$C_f=0.027\,(\frac{\nu}{hu_i})^{0.25} \tag{٤}$$

در رابطه شماره ٤، ν ويسکوزيته سينماتيکي آب است. براي محاسبه C_f مي‌توان از رابطه شماره ۵ استفاده نمود [۲].

$$C_f=\frac{gn}{h^{0.33}} \tag{۵}$$

که در آن n ضريب مانينگ و g شتاب ثقل مي‌باشد.

۲-۲- معادلات مدل آشفتگي جريان

v_t ضريب لزجت آشفتگي (گردابه‌اي) در مدل آشفتگي دو معادله‌اي k و ε بصورت رابطه ٦ محاسبه مي‌شود[۲].

$$v_t=c_\mu k^2/\varepsilon \tag{٦}$$

در رابطه شماره ٦، k نرخ انرژي جنبشي آشفتگي در واحد جرم سيال و ε نرخ استهلاک k مي‌باشد. براي تعيين

پارامترهاي k و ε و مدلسازي آنها براي جريان با سطح آزاد از روابط شماره ۷ و۸ استفاده مي‌شود[۲، ٦].

$$\frac{\partial(hk)}{\partial t}+\frac{\partial(huk)}{\partial x}+\frac{\partial(hvk)}{\partial y}=\frac{\partial}{\partial x}\left[\frac{\nu_t}{\sigma_k}\frac{\partial(hk)}{\partial x}\right]+\frac{\partial}{\partial y}\left[\frac{\nu_t}{\sigma_k}\frac{\partial(hk)}{\partial y}\right]+P_h+P_k-\varepsilon h \quad (۷)$$

$$\frac{\partial(h\varepsilon)}{\partial t}+\frac{\partial(hu\varepsilon)}{\partial x}+\frac{\partial(hv\varepsilon)}{\partial y}=\frac{\partial}{\partial x}\left[\frac{\nu_t}{\sigma_\varepsilon}\frac{\partial(h\varepsilon)}{\partial x}\right]_\varepsilon+\frac{\partial}{\partial y}\left[\frac{\nu_t}{\sigma_\varepsilon}\frac{\partial(h\varepsilon)}{\partial y}\right]+\frac{\varepsilon}{k}\left(C_1P_h-C_2\varepsilon h\right)+P_\varepsilon \quad (۸)$$

در اينجا پارامترهاي P_h, P_k, P_ε چنين تعيين مي‌شوند[۲، ٦]:

$$P_h=\frac{\nu_t}{h}\left\{2\left[\frac{\partial(hu)}{\partial x}\right]^2+2\left[\frac{\partial(hv)}{\partial x}\right]^2+\left[\frac{\partial(hu)}{\partial y}+\frac{\partial(hv)}{\partial x}\right]^2\right\} \quad (۹)$$

$$P_\varepsilon=\frac{C_2C_\mu{}^{1/2}g^{5/4}q^4}{hD^{1/2}C^{5/2}} \qquad P_k=\frac{g}{C^2}q^3 \quad (۱۰)$$

در رابطه (۱۰)، $q=\sqrt{u^2+v^2}$ و C ضريب شزي بوده و از رابطه شماره ۱۱ محاسبه مي‌شود.

$$C=\sqrt{\frac{8g}{f}} \quad (۱۱)$$

در رابطه شماره ۱۱، f ضريب اصطكاك مي‌باشد كه از روي نمودار مودي قابل تعيين است. مقادير ثابت موجود در روابط ياد شده در مدل $k-\varepsilon$ استاندارد عبارتند از [٦]:

$\sigma_k=۱,\quad \sigma_\varepsilon=۱/۳,\quad c_{\varepsilon1}=۱/٤٤,\quad c_{\varepsilon2}=۱/۹۲\quad c_\mu=۰/۰۹\quad \mathrm{D}=1$

۲-۳- معادلات مدل آبشستگي

بيشتر روابط ارائه شده براي آبشستگي تجربي هستند. بسياري از اين روابط، به دليل اينكه فقط سرعت و يا عمق ميانگين جريان را در نظر مي‌گيرند، قابل استفاده در مدل عددي حاضر نمي‌باشد. زيرا در هر لحظه پارامترهاي عمق و سرعت در نقاط مختلف تعيين مي‌شوند. بررسي‌هاي انجام شده نشان داد كه براي برطرف شدن اين مشكل مي‌توان از پارامتر تنش برشي بستر در تعيين آبشستگي استفاده نمود. در ادامه به وسيله روشهايي كه بتوان به كمك آنها با توجه به مقدار تنش برشي، عمق فرسايش را تعيين نمود، شكل گيري پديده آبشستگي مدل گرديد. در اينجا، ابتدا به بررسي چگونگي تعيين تنش برشي كه منشاء آبشستگی مي‌باشد، پرداخته مي‌شود.

۲-۳-۱- تعيين تنش برشي بستر

قبل از بررسي تنش برشي بستر، در آغاز بايد تنش برشي بحراني بستر را تعيين نمود. زيرا معيار شروع آبشستگي، تنش بحراني مي‌باشد. به طوركلي، آبشستگي زماني رخ مي‌دهد كه تنش برشي بستر بيشتر از تنش برشي بحراني بستر شود. در اين حالت ذرات شروع به حركت كردن و جدا شدن از كف مي‌كنند. آبشستگي در اطراف پايه ها را در دو حالت آبشستگي بستر فعال و آب زلال مطرح مي‌كنند. در تحقيق حاضر نيز فرض شده است، كه آب جاري از روي بستر در بالادست پايه، صاف بوده، لذا تنها آبشستگي آب زلال مورد بررسي قرار مي‌گيرد. تنش برشي بحراني بستر به جنس و مشخصات فيزيكي و شيميايي مصالح بستر وابسته است. روابط زيادي درباره تنش بحراني بستر وجود دارد كه همگي بر اساس نتايج و يافته‌هاي آزمايشگاهي مي‌باشند. يكي از اين روابط، رابطه تجربي شماره ۱۲ مي‌باشد[۸].

$$\tau_C=(\gamma_s-\gamma_w)d_{50}*0.056 \quad (۱۲)$$

در رابطه ۱۲ ، τ_c تنش برشي بحراني $\left(N/m^2\right)$، γ_s چگالي مصالح بستر $\left(N/m^3\right)$، γ_w چگالي آب $\left(N/m^3\right)$، d_{50} قطر ميانه ذرات (m) مي‌باشد. رابطه ۱۲، در خاكهاي ريزدانه و در موارد نامحدود شدن RE ($RE\to\infty$) با نتايج بسيار خوبي همراه خواهد بود. لذا كاربرد آن در جريانهای طبیعی در اطراف پايه با اعداد رينولدز بالا، كاربرد اين رابطه مناسب مي‌باشد. رابطه تنش برشي مورد استفاده در مدل آبشستگي به صورت رابطه ۱۳ مي‌باشد.[۷].

$$\tau=\frac{u_*{}^2}{\rho}\quad,\quad u_*=\sqrt{k\sqrt{c_\mu}} \quad (۱۳)$$

در رابطه ۱۳، k مقدار انرژي جنبشي آشفته مي‌باشد كه در كار حاضر از مدل آشفتگي $k-\varepsilon$ تعيين مي شود.

۲-٤- تاثير تغييرات تراز بستر در معادلات

همانطور كه گفته شد در مدل آبشستگي از مقاديرسرعت و عمق بدست آمده از مدل جريان و همچنين پارامترهاي آشفتگي مدل $k-\varepsilon$، استفاده مي‌شود. همچنين اشاره شد كه در هر گام محاسباتي مقادير عمق آبشستگي براي هر گره محاسبه مي‌شود، و در نتيجه تراز بستر در تمامي محدوده مدل، بويژه در اطراف پايه‌ها، دستخوش تغييرات خواهد شد. نكته قابل توجه در اين باره، چگونگي تاثير پذيري معادلات جريان از تغييرات بستر در گامهاي محاسباتي مي‌باشد. براي بيان اين حالت با توجه به معادلات جريان (۱) و(۲)، مي‌توان رابطه شماره ١٤ را ارائه كرد.

$$\frac{\partial(hu_i)}{\partial t}+\frac{\partial(hu_iu_j)}{\partial x_j}+gh\frac{\partial(\eta)}{\partial x_i}=\frac{\partial}{\partial x_i}\left(h\nu_t\frac{\partial u_i}{\partial x_j}\right)+\frac{\tau_{bi}}{\rho_w} \quad (١٤)$$

در روابط ١٤، $\eta=h+z_b$، h، عمق جريان و z_b ، مقدار تغيير در تراز بستر مي‌باشد. در هر گام محاسباتي حل، بايد مقدار η را محاسبه نمود. و براي گام بعد، در معادله (١٤) جايگذاري شود.

۳- نحوه مدلسازي آبشستگي

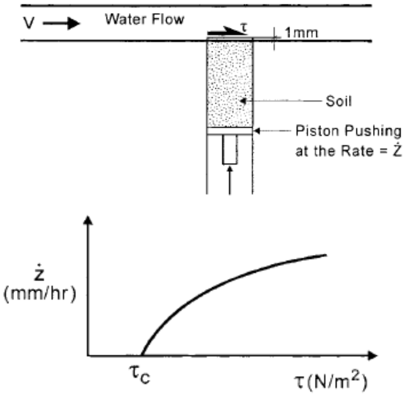
بعد از تعيين تنش برشي بستر، با توجه به مقادير تنش

برشي، مقدار عمق آبشستگي در اطراف پايه‌ها محاسبه مي‌شود. در اين خصوص اولين گام، تعيين رابطه‌اي بين تنش برشي و تغييرات عمق آبشستگي مي‌باشد. دراين مورد بر اساس نتايج آزمايشگاهي موجود، بررسي‌هاي زيادي انجام شد و در نهايت روشي براي تعيين رابطه تنش برشي و عمق آبشستگي مشخص گرديد. در تحقيق حاضر، براي تعيين عمق آبشستگي از بخشي از نتايج روش E-SRICOS استفاده شده است. براي تشريح روش كار، ابتدا مي‌بايست به روش E-SRICOS [۳، ٤] و نتايج حاصل از آن اشاره نمود. در ادامه، چگونگي تلفيق روش عددي حاضر با اين روش آزمايشگاهي تشريح خواهد شد.

۳-۱- برآورد عمق آبشستگي **E-SRICOS**

اين روش، توسعه يافته روشSRICOS مي‌باشد كه در سال ۱۹۹۹ براي پيش بيني عمق آبشستگي در برابر زمان ارائه شد[۳، ٤]. روش، SRICOS در ابتدا براي تعيين عمق آبشستگي در خصوص پايه هاي دايره‌اي و همچنين در حالت سرعت ثابت و بستر با جنس يكنواخت و نيز شرط عمق جريان بزرگتر از دو برابر قطر پايه دايره‌اي، ارائه گرديد. ولي اين روش در سال ۲۰۰۱ توسعه يافته و قابل استفاده در مورد ساير پايه‌ها با اشكال مختلف و همچنين شرايط مختلف جريان مي‌باشد.

در اين روش ابتدا بوسيله انجام آزمايش EFA (دستگاه تابع فرسايش) تغييرات تابع نرخ آبشستگي $Z^{\bullet}(mm/hr)$ در برابر تنش برشي هيدروليكي $\tau(N/m^2)$ تعيين مي‌گردد. شكل كلي آزمايش در شكل (۱) و (۲) مشخص شده است [۳].



شكل۱:شكل و چگونگي انجام آزمايش **EFA** [۳]

۳-۲- تشريح روش آزمايشگاهي **E-SRICOS** در تعيين عمق آبشستگي

دستگاه آزمايش EFA، شامل محفظه‌اي لوله‌اي و قائم است كه داخل آن نمونه بستر مورد نظر قرار داده مي‌شود. اين لوله از پايين به يك پيستون متصل بوده و از بالا داخل يك مجراي افقي به سطح مقطع مستطيل مي‌شود. داخل اين مجرا جريان آب با سرعت معين وجود دارد. در اين آزمايش، به محفظه از پايين بوسيله پيستون فشار وارد شده تا بر روي لوله كه در داخل مجراي آب قرار دارد ۱ ميليمتر برآمدگي ايجاد گردد. اين برآمدگي درتماس با جريان آب داخل مجرا قرار خواهد گرفت. حال زمان مورد نياز براي فرسايش ۱ mm از خاك بستر كه در تماس با آب با سرعت ثابت v است را تعيين مي‌كنند. با توجه به رابطه شماره ۱۵ نرخ آبشستگي خاك مورد نظر محاسبه مي‌شود[۳].

$$Z^{\bullet} = \frac{1}{t}(mm/hr) \qquad (۱۵)$$

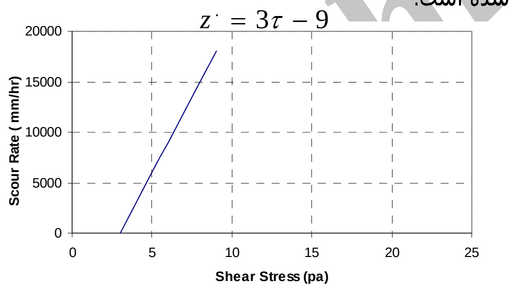
$Z^{\bullet}$: نرخ آبشستگي بستر

مقدار تنش برشي هيدروليكي كه بر روي سطح نمونه تشكيل مي‌شود از رابطه (١٦) تعيين مي‌شود[۳].

$$\tau = \frac{1}{8} f\rho V^2 \qquad (١٦)$$

در رابطه ياد شده، D قطر هيدروليكي لوله جريان آب، ρ دانسيته آب (kg/m^3)، V سرعت متوسط جريان آب لوله (m/s)، f ، ضريب اصطكاك بستر و ν ويسكوزيته سينماتيكي آب $(10^{-6}\ m^2/s)$ مي‌باشد.

به كمك اين آزمون، با توجه به جنس بستر مي‌توان پتانسيل آبشستگي را در خاكهاي چسبنده و غير چسبنده تعيين نمود و به صورت نمودار تنش برشي و نرخ آبشستگي برابر شكل(۱)، ارائه نمود. نتايج اين آزمون در مورد خاك رسي در شكل (۳) ارائه شده است.



شكل۲: نتايج **EFA** براي بستر رسي.[۳]

۳-۳- تلفيق مدل عددي باروش **E-SRICOS**

بعد از تشريح روش E-SRICOS اينك به چگونگي كاربرد نتايج اين روش در مدل حاضر و تلفيق منطقي با نتايج مدل عددي پرداخته مي‌شود. بطور كلي چگونگي مدلسازي آبشستگي در اطراف پايه هاي پل به اين ترتيب مي‌باشد كه در هر گام زماني و در هر گره محدوده حل، به كمك نتايج حل مدل جريان و همچنين نتايج مدل آشفتگي اعمال شده در معادلات

جريان، تنش برشي از رابطه (۱۳) محاسبه شده و با توجه به نمودار شكل (۲)، با توجه به جنس بستر، در هر گام زماني مقدار نرخ آبشستگي گره‌ها تعيين مي‌شود. در ادامه نمودار تغييرات حداكثر نرخ آبشستگي با زمان در زمان كوتاه (چند ثانيه) ترسيم و رابطه همبستگي اين نمودار تعيين مي‌گردد. از اين رابطه براي محاسبه عمق آبشستگي در دراز مدت استفاده مي‌گردد. سپس عمق آبشستگي در هر گره محاسبه شده به عمق جريان در آن گره اضافه مي‌شود. به عبارت ديگر تراز بستر كاهش داده مي‌شود. چگونگي اعمال تغييرات تراز بستر در معادلات جريان و آشفتگي پيشتر تشريح شده است. در پايان مي‌توان با توجه به كل زمان طي شده تا مرحله مورد نظر مقدار عمق آبشستگي را تعيين نمود.

٤- مدل حجم محدود معادلات جريان

براي بيان و گسسته سازي معادلات كاربردي در مدلسازي جريانات اطراف پايه پل كه شامل معادلات پايستار حجم و اندازه حركت و بطور كلي معادلات انتقال – پخشودگي $(Convection-Diffision)$، و معادلات مدل آشفتگي $k-\varepsilon$، از روش حجم محدود استفاده شده است. در اين باره رابطه شماره ۱۷ را مي‌توان براي كليه معادلات بيان نمود [۱].

$$\frac{\partial W}{\partial t}+(\frac{\partial F^{c}}{\partial x}+\frac{\partial G^{c}}{\partial y})=(\frac{\partial F^{d}}{\partial x}+\frac{\partial G^{d}}{\partial y})+S \qquad (۱۷)$$

در رابطه شماره ۱۷، W، شامل مقادير متغير و مجهول معادلات، از جمله h,u,v مي‌باشد كه با حل همزمان معادلات پايستار حجم و اندازه حركت حاصل مي‌شوند. F^{c},G^{c}، بردارهاي شار انتقالي و F^{d},G^{d}، بردارهاي شار پخشيدگي W در جهات x,y مي‌باشند. S، بردار چشمه و چاه $(Sources\ \&\ Sinks)$ معادلات مي‌باشد. رابطه كلي مدل حجم محدود براى حل عددى به روش صريح به صورت رابطه شماره ۱۸ مي‌باشد.

$$W_{i}^{t+\Delta t}=W_{i}^{t}-\frac{\Delta t}{\Omega_{i}}.\sum_{k=1}^{N_{sides}}[(\overline{F}^{c}\Delta y-\overline{G}^{c}\Delta x)- (F^{d}\Delta y-G^{d}\Delta x)]_{k}^{t}+S_{k}^{t}\Delta t \qquad (۱۸)$$

با توجه به استفاده از روش‌همپوشان، در رابطه ياد شده، W_{i}، مقدار مشخصه پارامترهاي $h,hu,hv,hk,h\varepsilon$ در مركز حجم كنترل، $\overline{F}^{c},\overline{G}^{c}$، مقادير ميانگين بردارهاي شار انتقالي روي اضلاع مرزي حجم كنترل، F^{d},G^{d}، اجزاء كنترل انتگرال اطراف مركز حجم كنترل مي‌باشند. براي تعيين مقدار گام زمانى صريح Δt در رابطه ۱۸ مي‌توان از رابطه ۱۹ استفاده كرد.

$$\Delta t=(CFL)\frac{\Omega}{\lambda} \qquad (۱۹)$$

در رابطه شماره ۱۹، مقدار λ براي هر يال حجم كنترل از رابطه $\lambda=\left|\vec{U}.\hat{n}\right|+\sqrt{\left|\vec{U}.\hat{n}\right|^{2}+C^{2}\left(\Delta x^{2}+\Delta y^{2}\right)}$ تعيين مي‌شود كه در آن C سرعت موج محلي بوده و به صورت $C=\sqrt{g\bar{h}}$ محاسبه مي‌شود. $\bar{h}$ مقدار ميانگين عمق در دو گره يال و $\left|\overline{U}.\hat{n}\right|$ ضرب داخلي بردار سرعت در بردار يكه عمود بر سطح اضلاع مرزي حجم كنترل Ω، ($\vec{U}.\hat{n}=\left|\bar{u}\Delta y-\bar{v}\Delta x\right|$) مي باشد. ضريب CFL، عدد كورانت-فردريش-لوي است كه در اين تحقيق معادل يك در نظر گرفته شد [۱].

٤-۱- شرايط اوليه و شرايط مرزي

در حل معادلات جريان، هدف تعيين مقادير سرعت در دو جهت متعامد (u,v) و مقدار عمق (h) در كليه نقاط محيط گسسته در هر مرحله زماني مي‌باشد. قبل از آغاز محاسبات مي‌بايد با توجه به هندسه مدل، شرايط اوليه و مرزي را اعمال نمود.

٤-۱-۱- شرايط اوليه

براي آغاز عمليات محاسبات يك جريان پايدار، در گره‌هاي محاسباتي، مولفه‌هاي سرعت جريان در جهت مثبت دو راستاي اصلي مختصات برابر ۱۰% مقدار مولفه هاي سرعت آزاد جريان در نظر گرفته شد و عمق متوسط اوليه جريان برابر عمق آزاد اعمالي در جريان منظور گشته است. بستر مدل در شرائط اوليه هموار و براي برآورد عمق آبشستگي، بستر در حالت بستر رسي مورد بررسي قرار گرفته است.

٤-۱-۲- شرايط مرزي جريان

براي جريان زير بحراني، در مرز ورودي جريان (مرز بالادست) مولفه‌هاي سرعت و در مرز خروجي جريان(مرز پايين دست) عمق اعمال گرديده است. براي چنين جرياني، در مرز ورودي جريان عمق و در مرز خروجي جريان سرعت با استفاده از گره هاي درون محيط حل محاسبه مي‌گردد [۱].

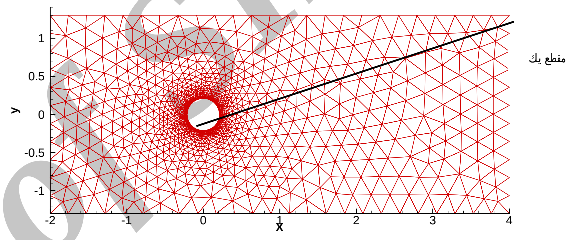
٤-۱-۳- شرايط مرزي ديوار نفوذناپذير

با توجه به مطالب ارائه شده، بر روي سطوح مرزي دو مولفه متعامد سرعت (u,v) وجود خواهد داشت. براي مدلسازي سرعت روي سطوح ديواره، مولفه عمود بر ديواره سرعت جريان صفر منظور گشته و مولفه مماسي در ديواره بدون مقاومت برشي $(Slipping\ Wall)$ حفظ گرديده است. بدين ترتيب با فرض كم بودن اصطكاك در ديواره جريان، شرايط ديوار لغزنده در نقاط نواحي جانبي جريان مي‌تواند اعمال شود.

۵- سنجش درستي نتايج مدل

با توضيحات ارائه شده تا اين بخش، درستي نتايج بدست آمده از مدل، در دو بخش نتايج جريان و نتايج آبشستگي مورد ارزيابي قرار مي‌گيرد. سنجش درستي مدل جريان در دو حالت جريان لزج و جريان غير لزج انجام شده است. در حالت جريان غير لزج از حل تحليلي و در جريان لزج از مقايسه كيفي با مدلهاي عددي مشابه استفاده شده است. سنجش درستي نتايج آبشستگي نيز با آزمونهاي آزمايشگاهي در حالت بستر رسي انجام شده است. لذا نتايج آزمون آزمايشگاهي با مشخصات به شرح جدول (۱)، براي سنجش درستي استفاده مي‌شود. هندسه مدل مورد استفاده در مدلسازي عددي برابر آزمون آزمايشگاهي و شكل (۳) مي‌باشد.

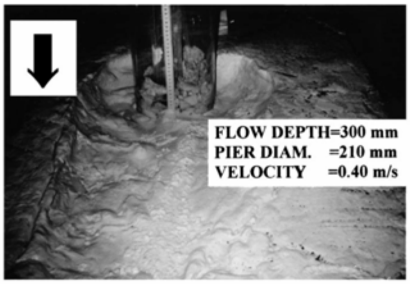
شرايط اوليه حل در مدل عددي با مدل آزمايشگاهي برابر جدول شماره (۱) مي‌باشد.



شكل(۳) : هندسه پايه و شبكه مثلثي ميدان محاسباتي جريان

جدول(۱) : مشخصات آزمون آزمايشگاهي آبشستگي[٤]

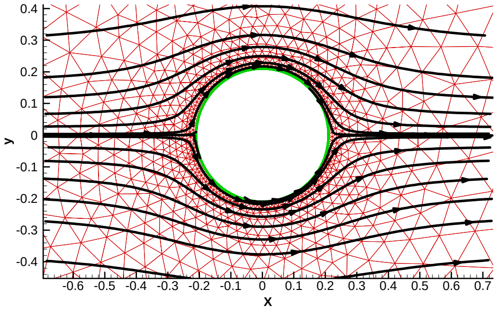
قطر پايه mm	سرعت اوليه جريان m/s	عمق اوليه جريان m	جنس بستر	قطر ميانه ذرات $d_{50}(mm)$	عرض فلوم m
۲۱۰	۰/۴	۰/۳۰	رسي	۰/۰۰۶۲	۲



شكل(۴) : شكل گيري آبشستگي در بستر رسي آزمايشگاه[٤]

۵-۱- سنجش درستي نتايج مدل جريان غيرلزج

از آنجا كه رفتار جريانهای آب با اعداد رينولدز خيلی زياد همانند جريان‌های غيرلزج مي‌باشد، در ابتدا نتايج مدل جريان در حالت جريان غير لزج (آشفته با عدد رينولدز زياد) با نتايج حل تحليلي مقايسه مي‌شوند. اين آزمون كارآيی و دقت مدل عددی در حل مسائل با غلبه اينرسی انتقالی جريان را نمايش مي‌دهد. در حالت جريان غير لزج، هيچ گردابه‌اي در پشت پايه نبايد ايجاد گردد (شكل ۵).



شكل (۵) : شكل گيري جريان در اطراف پايه در حل عددي

۵-۱-۱- حل تحليلي جريان غيرلزج در اطراف پايه

جريان اطراف پايه دايره اي را مي‌توان به وسيله توابع پتانسيل و جريان نشان داد. در منابع مختلف، توابع پتانسيل و جريان در اطراف يك استوانه به صورت رابطه شماره ۲۰ مي‌باشد .[۵].

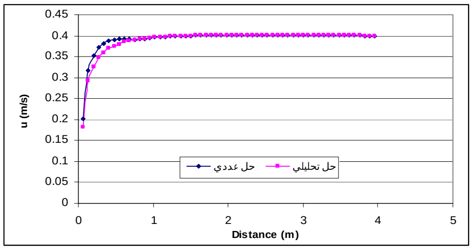
$$\Psi = -Uy(1-\frac{{R_0}^2}{R^2}) \qquad و \qquad \phi = -Ux(1+\frac{{R_0}^2}{R^2}) \qquad (۲۰)$$

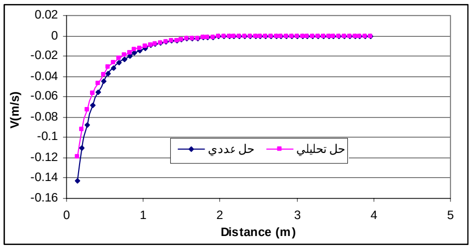
در روابط ياد شده، U،سرعت اوليه جريان $\left(m/s\right)$، R_0، شعاع استوانه (m) و R، فاصله شعاعي هر نقطه در اطراف استوانه از مبدا مختصات مي‌باشد. و به صورت $(R^2 = x^2 + y^2)$ تعريف مي‌شود. براي تعيين مقادير سرعت در اطراف پايه در حل تحليلي از رابطه (۲۱)، استفاده مي‌شود.

$$v = -\frac{\partial \psi}{\partial x} \qquad u = \frac{\partial \psi}{\partial y} \qquad (۲۱)$$

۵-۱-۱-۲- مقايسه مدلسازي عد دي با حل تحليلي

به منظور ارزيابي دقت نتايج مدل توسعه يافته براي حل معادلات جريان تراكم‌ناپذيرغير لزج، نتايج محاسبه شده با حل تحليلي جريان در مقطع شماره (۱) مقايسه شده است. شكل گيري جريان در مدلسازي عددي برابر شكل (۵) مي‌باشد.



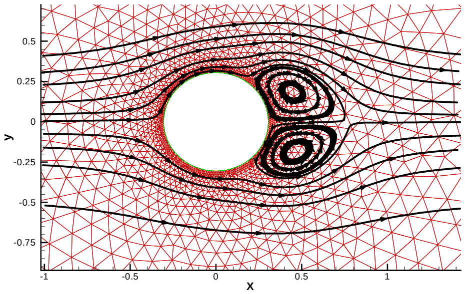


شکل(٦): نتايج پارامترهاي جريان مدل عددي و حل تحليلي (١- سرعت در جهت **x** ، ٢- سرعت در جهت **y** ،)

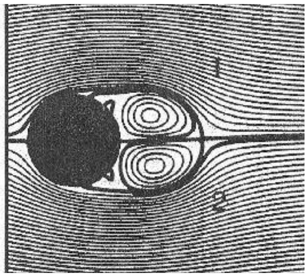
از اين مقايسه مي توان نتيجه گرفت درستي نتايج مدل تدوين شده در چگونگي شکل گيري جريان با خطاي کمتر از ٤ درصد نسبت به حل تحليلي، مورد پذيرش است.

٥-٣- سنجش درستي نتايج مدل جريان لزج

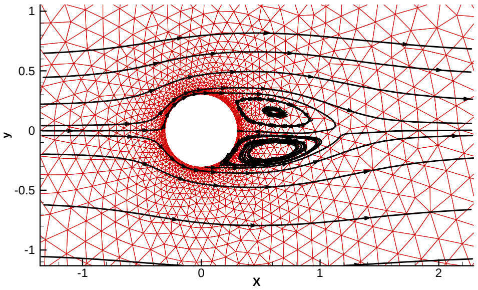
براي سنجش درستي نتايج حل عددی جريان با غلبه لزجت، جريان لزج در اطراف پايه از مدلهاي عددي موجود در اين زمينه استفاده شده است. مدل عددي استفاده شده براي کنترل، مدل G. Alfonsi مي‌باشد[٩]. البته به علت ارائه نشدن مقادير کمي پارامترهاي جريان، تنها شکل گيري جريان به صورت کيفي مورد مقايسه قرار گرفته است. براي مقايسه دقيق تر مدلسازي عددي حاضر و مدل عددي Alfonsi در زمانهاي مختلف چگونگي شکل گيري جريان در دو مدل مقايسه شده است. شکل گيري جريان لزج در زمان ۶ ثانيه در دو روش عبارتست از: (طبق اشکال شماره ۹-۷ خواهد بود):



شکل (٧) : شکل گيري جريان لزج در مدل حاضر(٥,٩٨ ثانيه)

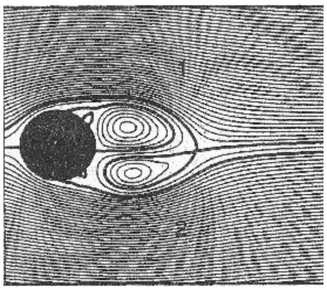


شکل(٨): شکل گيري جريان لزج در مدل عددي **G. Alfonsi** (٦ ثانيه) [١]



شکل (٩) : شکل گيري جريان لزج در مدل حاضر(٩,٩٩ ثانيه)

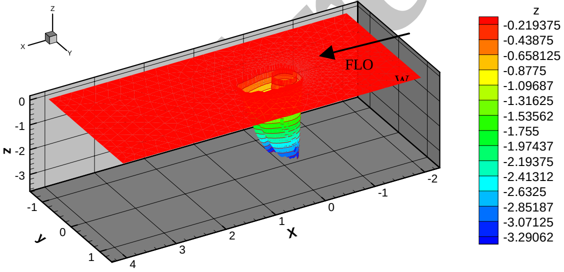
همانطور که در اشکال ارائه شده مشخص است، چگونگي شکل گيري جريان در حالت لزج در مدل عددي حاضر با مدل عددي G. Alfonsi مشابه بوده و همخواني مناسبي دارد. از اين نتايج مي‌توان به درستي نتايج مدلسازي جريان لزج در اطراف پايه دايره‌اي پي برد.



شکل (١٠) : شکل گيري جريان لزج در مدل عددي **G. Alfonsi** (١٠ثانيه). [٩]

٥-٤- سنجش درستي نتايج مدل آبشستگي

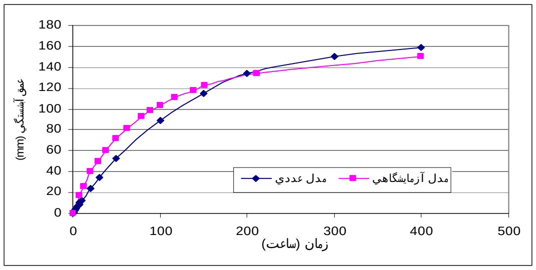
در ادامه نتايج مدل عددي براي تعيين عمق آبشستگي با آزمون آزمايشگاهي مرجع [٤] مقايسه مي‌شود. براي نمونه نتايج مدلسازی عددی آبشستگی بستردر شکل (١١) در زمان ١٠ ساعت ارائه شده است.



شکل(١١) :مدل سه بعدي تغييرات تراز بستر در اثر آبشستگي در زمان ١٠ ساعت (سانتيمتر)

نرخ تغييرات عمق آبشستگي در روش عددي و آزمون آزمايشگاهي در شکل (١٢) ارائه شده است. مقايسه نتايج مدل محاسباتی با اندازه‌گيري‌های آزمايشگاهی و محاسبه خطای مدل عددی بعد از رسيدن به تعادل، در جدول (٢) ارائه شده

است. این نتایج براي بستر رسي بدست آمده‌اند. با توجه به جدول یاد شده، درستي نتایج مدل آبشستگي باتوجه به درصد خطاي محاسبه، بسیار خوب برآورد مي‌شود.



شکل (۱۲): تغییرات عمق آبشستگي با زمان در پشت پایه

جدول(۲) : مقایسه نتایج دو روش مورد مطالعه

پارامتر مورد مقایسه روش مورد استفاده	تنش برشي حداکثر $\tau_{\max}(N/m^2)$	نرخ آبشستگي متناظر با $\tau_{\max}$ $z^{\bullet}(mm/hr)$	عمق آبشستگي حداکثر $z_{\max}(mm)$
مدل آزمایشگاهي	۲/.	۲/۵	۱۸۰
مدل عددي حاضر	۲/۲۳۹۵	۲/۸۰۱۴	۱۹۵/۶۵
درصد خطا	۱۱/۹۵	۱۲/۰۰	۸/۷۰

همانگونه که در جدول (۲) دیده مي‌شود، از میزان خطاي محاسبه شده و شکلهاي (۴) و (۱۲) مي‌توان نتیجه گرفت مدل تدوین شده در تعیین عمق آبشستگي و چگونگي شکل‌گیري آن در اطراف پایه دایره‌اي در بستر رسي،موفق عمل کرده و قابل استفاده در مسائل کاربردي مي‌باشد.

٦- نتیجه گیري

در تحقیق حاضر، با استفاده از روش حجم محدود همپوشان رئوس شبکه مثلثي، حل عددي معادلات پایستار حجم و مقدار حرکت آبهای کم عمق به همراه دو معادله انرژی جنبشي آشفتگي و نرخ استهلاک آن با دقت انجام گرفت. با ترکیب نتایج مدل تحلیل جریان افقی (میدان سرعت جریان گردابی و انرژی آشفتگی) با روابط تجربی برای شستگی بستر (که برای فرسایش بستر افقی در غیاب پایه در آزمایشگاه استخراج شده‌اند)، مدلسازی آبشستگي بستر رسی در اطراف پایه استوانه‌ای با موفقیت انجام شد. نتایج بدست آمده از مدل توسعه یافته داراي دقت قابل قبولي در حد کمتر از ٤ درصد خطا براي مدل جریان و ۱۲ درصد خطاي متوسط براي مدل آبشستگي مي‌باشد. مدل توسعه یافته با توجه به الگوریتم حل تشریح شده قابلیت تعیین تغییرات بستر در حین آبشستگي را با استفاده از تنشهاي برشي قابل محاسبه به کمك سرعتهاي محلي و انرژی آشفتگی جریان گردآبی افقی را دارد. با توجه به تقریب خوب و بار محاسباتی کم این مدل دوبعدی، استفاده از آن براي استفاده در برآورد عمق آبشستگی اطراف پایه پلها نسبت به کاربرد مدلهای سه بعدی برتری دارد. قابلیت مدل عددی تدوین شده در استفاده از شبکه بی‌ساختار مثلثی کاربرد آنرا برای مدلسازی آبشستگی اطراف پایه های با شکل دلخواه امکان پذیر می‌سازد.

۷- مراجع

[۱] . صباغ یزدي، سعید رضا؛ "شبیه سازي جریان آشفته دو بعدي در اطراف پایه ها بوسیله حل عددي معادلات میانگین عمقي روي شبکه بدون ساختار مثلثي"، چهارمین کنفرانس بین المللي سواحل،بنادر و سازه هاي دریایي،مجتمع بندري شهید رجائي،بندر عباس،ایران،آبان ماه ۱۳۷۹.

[۲] Younes, M., Hanif Chaudhry, M. ,"A Depth-Averaged $k-\varepsilon$ Turbulence Model for the Computation of Free Surface Flow ", Journal of Hydraulic Research, Vol,.32 , No . 3 , pp. 415–439, 1994.

[۳] Briaud J. L., Chen H. C., Kwak K. W., Han S. W.,and Ting F. C. K.,Multiflood And Multilayer Method for Scour Rate Predication at Bridge Piers", Journal of Geothechnic and Geoenvironmental Engineering , pp125, February 2001.

[۴] Briaud J .L., Ting F .C. K., Chen H. C., Gudavalli R., Perugu S. and Wei G. "SRICOS: Prediction of Scour Rate in Cohesive Soils at Bridge Piers", Journal of Geotechnic and Geoenvironmental Engineering , pp101, April 1999.

[۵] Vallentine H. R., (Applied Hydrodynamics), Butterworths و London , 1969 .

[۶] Rodi, W., "Turbulence Models and their Application in Hydraulics", 3^{Th} Ed, IAHR Monograph, Balkema, Rotterdam, The Netherland.1999.

[۷] Balas L. and Ozhan E. " An Implicit Three-Dimensional Numerical Modeling to Simulate Transport Processes in Coastal Water Bodies ", International Journal for Numerical Methods in Fluids, Vol. 34, pp. 307–339, 2000.

[۸] U.S. Department of Transportation (Enhanced Abutment Scour Studies for Compound Channel) , Mclean, 2004.

[۹] G. Alfonsi, A. Giorgini ,"The Use of a Mixed Spectral-Finite Analytic Numerical Technique for the Analysis of the Vortex Shedding Past a Circular Cylinder" School of Civil Engineering, Purdue University West Lafayette, Indiana 47906, 1987.