



مرکز پژوهش‌های مطالعات دریایی

سازمان بنادر و دریانوردی به عنوان تنها مرجع حاکمیتی کشور در امور بندری، دریایی و کشتی‌رانی بازرگانی به منظور ایفای نقش مرجعیت دانشی خود و در راستای تحقق راهبردهای کلان نقشه جامع علمی کشور مبنی بر "حمایت از توسعه شبکه‌های تحقیقاتی و تسهیل انتقال و انتشار دانش و سامان‌دهی علمی" از طریق "استانداردسازی و اصلاح فرایندهای تولید، ثبت، داوری و سنجش و ایجاد بانک‌های اطلاعاتی یکپارچه برای نشریات، اختراعات و اکتشافات پژوهشگران"، اقدام به ارایه این اثر در سایت SID می‌نماید.



سازمان بنادر و دریانوردی



مدل سازی عددی سه بعدی جریان نوسانی در اطراف پایه‌های استوانه‌ای شکل

یاسین آقای سلمانی

دانشجوی دکتری سازه‌های هیدرولیکی دانشگاه صنعتی سهند

حیب حکیمزاده

دانشیار دانشکده عمران دانشگاه صنعتی سهند

hakimzadeh@sut.ac.ir

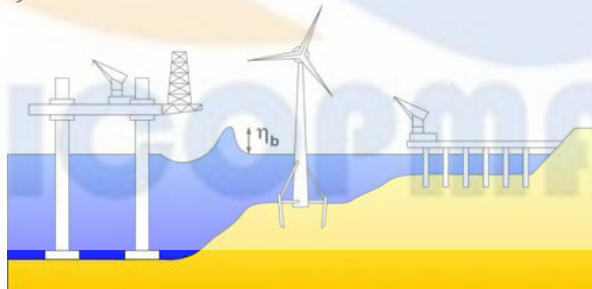
y_aghaee@sut.ac.ir

خلاصه

در این مقاله به جزئیات شبیه سازی عددی سه بعدی جریان نوسانی در اطراف پایه‌های استوانه‌ای شکل پرداخته شده است. معادلات حاکم استفاده شده در این شبیه سازی، معادلات متوسط گیری شده در زمان ناویر-استوکس (معادلات رینولدز) بوده و گسسته سازی این معادلات به روش حجم محدود بر روی یک شبکه با ساختار انجام گرفته است. برای حل معادلات گسسته سازی شده از روش صریح گام به گام پیشگویی اصلاح مک کورمک که یک روش عددی با دقت مرتبه دوم در زمان و مکان می‌باشد، استفاده شده است. جهت مدلسازی آشفتگی از مدل طول اختلاط پرانتال استفاده شده است. مدل عددی تهیه شده برای عددهای کولگان کارپنتر (KC) متفاوت اجرا شده است. در نهایت نتایج شبیه سازی‌ها با داده‌ها و نتایج سایر پژوهشگران مقایسه شده است.

مقدمه

پایه‌های استوانه‌ای شکل از جمله اعضای سازه‌ای هستند که جزء اصلی اغلب سازه‌های دریایی می‌باشند (شکل ۱). فرآیند آبشستگی و نیروهای وارده بر سازه‌های دریایی مانند پایه سکوها و یا اسکله‌ها، ناشی از امواج و جریان از موضوعات بسیار مهم در علم مهندسی دریا می‌باشند. شکل گیری حفره آبشستگی در اطراف سازه‌های ساحلی کاملاً در تعامل با شاخصه‌های الگوی جریان و امواج در اطراف پایه و در مجاورت بستر می‌باشد. مشخصات جریان اطراف پایه‌های استوانه‌ای شکل به صورت سه بعدی و پیچیده می‌باشد. در خصوص بررسی جریان نوسانی در اطراف پایه‌ها مطالعات آزمایشگاهی و عددی متعددی صورت گرفته است. از جمله محققین می‌توان به (*Summer et al., 1997*، *yuhi & Ishida, 2000* و *Chern et al., 2007*) [۱-۳] اشاره نمود. بسیاری از تحقیقات عددی دریل زمینه به صورت دو بعدی بوده و صرفاً معطوف به تعیین نیروهای لیفت و درگ و تعیین ضرایب مربوطه بوده است. توجه به پیچیدگی جریان اطراف اینگونه سازه‌ها و به خصوص جریان‌های ثانویه ناشی از موج و جریان همانند پیچک نعل اسبی و فرافکنی پیچک در پشت پایه و تاثیر آنها بر تنش برشی بستر، اهمیت بررسی سه بعدی این پدیده‌ها را نمایان می‌سازد. در این مقاله بر آن شدیم که با تهیه یک مدل عددی سه بعدی با استفاده از روش حجم محدود به بررسی الگوی جریان‌های نوسانی اطراف پایه و مشخصات سه بعدی آن و تاثیر آن بر تنش برشی بستر در عددهای کولگان کارپنتر (KC) متفاوت بپردازیم.



شکل ۱: انواع سازه‌های دریایی در معرض جریان و امواج [۴]

جریان نوسانی

در این تحقیق جریان نوسانی سینوسی اطراف یک پایه استوانه‌ای شکل قائم واقع بر روی بستر صاف مورد بررسی قرار گرفته است. سرعت اصلی جریان نوسانی به صورت زیر بیان می‌شود که در مرز ورودی جریان اعمال می‌گردد:

$$U = U_m \sin(2\pi t / T) \quad (1)$$

در عبارت فوق T پریود موج و U_m ، حداکثر مقدار سرعت اریتمالی می‌باشد که وابسته به عدد بی بعد کولگان کارپنتر KC می‌باشد. عدد بیانگر نسبت فاصله طی شده توسط ذره سیال در طول زمان پریود موج می‌باشد:

$$KC = \frac{U_m \times T}{D} \quad (2)$$

در رابطه فوق D بُعد سازه در برابر جریان موج می‌باشد که در مورد پایه استوانه‌ای شکل برابر با قطر پایه می‌باشد. در جریان نوسانی با توجه به نتایج مطالعات و مشاهدات آزمایشگاهی باید به این نکته توجه داشت که ابعاد پیچک‌های نعل اسبی و پیچک‌های دنباله‌ر کامه الا در تعامل با عدد بی‌بعد KC می‌باشند [۱]. بنابراین محور مطالعات در مقاله حاضر بر روی تغییرات عدد بی‌بعد KC و با یک عدد رینولدز ثابت برای پایه متمرکز شده است [۲].

معادلات حاکم بر جریان

در این پژوهش معادلات ناویر-استوکس متوسط گیری شده در زمان برای شبیه‌سازی جریان با فرض توزیع فشار هیدرواستاتیکی در عمق (فرض ساده شونده در حل معادلات آب‌های کم عمق) استفاده شده است. به این ترتیب معادلات حاکم عبارتند از:

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (۳)$$

(۴)

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial \bar{u}_i \bar{u}_j}{\partial x_j} = f_i - g \frac{\partial \zeta}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 \bar{u}_i}{\partial x_j \partial x_j} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x_j} (\tau_{ij})$$

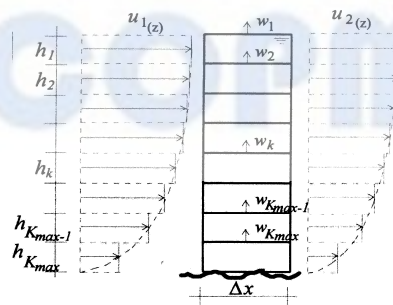
روابط (۳) و (۴) به ترتیب معادلات پیوستگی و ناویه-استوکس می‌باشند. در روابط بالا \bar{u}_i مولفه‌های سرعت جریان متوسط گیری شده در زمان در جهات X ، Y و Z می‌باشند. f_i نیروهای حجمی وارد بر کل سیال در جهات اصلی مختصات می‌باشند که ناشی از موقعیت جغرافیایی سیستم مورد نظر و تأثیرات چرخش زمین می‌باشند و معمولاً در مدل محیط‌های آبی بزرگ در نظر گرفته می‌شوند. k تغییرات سطح آزاد آب، ν لزجت، ρ چگالی و τ_{ij} عبارات تنش برشی ناشی از اغتشاش جریان می‌باشد. این عبارات به گرادیان‌های تنش‌های رینولدز مربوط بوده که ناشی از عبارات غیر خطی در فرآیند متوسط‌گیری زمانی برای جریان آشفته می‌باشند. برای یافتن تنش‌های رینولدز، نظریه ویسکوزیته گردابی جهت حل استفاده می‌گردد [۷]:

$$-\overline{u'_i u'_j} = \nu_t \left[\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right] - \frac{2}{3} k \delta_{ij} \quad \nu_t = 0.41 u_* z (1 - z/H), \quad (۵)$$

که در آن k ضریب انرژی جنبشی می‌باشد. δ_{ij} دلتای کرونیکر و ν_t لزجت گردابی سینماتیکی می‌باشد که در این پژوهش از مدل طول اختلاط پراندتل جهت تعیین مقدار آن استفاده شده است. Z ارتفاع از کف، H عمق آب، τ_0 تنش برشی بستر و u_* سرعت برشی بستر می‌باشد.

کاربرد معادله پیوستگی برای لایه سطحی

با در نظر گرفتن این واقعیت که پروفیل سرعت در عمق به صورت لگاریتمی یا پارابولیک می‌باشد، سرعت افقی در هر لایه بصورت انتگرال گیری شده برای یک جزء ستونی جریان سیال نشان داده شده است (شکل ۲). با این تعریف برای هر لایه یک مقدار $\Delta u = u_2 - u_1$ و $\Delta v = v_2 - v_1$ خواهیم داشت. با توجه به توازن جرم برای هر لایه میانی دلخواه (k)، سرعت قائم w_k به صورت زیر به دست خواهد آمد:



شکل ۲: پروفیل لگاریتمی سرعت در کانال با چند لایه [۶]

$$w_k \cdot \Delta x \Delta y = - \sum_{k=K}^{k=K_{\max}} (\Delta u_k \cdot \Delta y + \Delta v_k \cdot \Delta x) h_k \quad (۶)$$

اکنون معادله پیوستگی را برای لایه سطحی با در نظر گرفتن این مطلب که گرادیان زمانی تغییرات سطح آب برابر با سرعت قائم سطح آب است (شرط سینماتیکی جریان در سطح آزاد $w_1 = \frac{D\zeta}{Dt}$)، به کار می‌بریم:

$$\gamma \frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (7)$$

رابطه فوق معادله پیوستگی می باشد که برای تعیین تراز سطح آب در زمان های مختلف استفاده می شود. که در آن $\gamma = \frac{1-\Gamma}{\Delta z_1}$ می باشد. Δz_1 عمق لایه سطحی و $w_2 = \Gamma w_1$ است [6].

مدل عددی

معادلات حاکم بر جریان با انتگرال گیری بر روی حجم کنترل هایی که مجموعشان تمام حجم میدان فیزیکی را تحت پوشش قرار می دهند با استفاده از روش حجم محدود گسسته سازی و حل می شوند:

$$\frac{\partial U_m}{\partial t} = -\frac{1}{V} \int_{\Gamma} H \cdot n \, ds \quad \rightarrow \quad \frac{\partial U_m}{\partial t} = -\frac{1}{V} \left(\sum_{r=1}^6 H_{r,+} \cdot s_r \right) \quad (8)$$

در رابطه اخیر U_m معرف مقادیر متوسط متغیرها در مرکز هر سلول با حجم V می باشد. H_r بردارهای شار برای متغیرهای جریان بر روی سطوح حجم کنترل می باشد که اندیس r نشان دهنده سطوح مربوطه می باشد که برای یک حجم کنترل سه بعدی تعداد آن 6 می باشد. s_r بردارهای سطوح مربوط به حجم کنترل هستند. برای حل معادلات حاکم از روش پیشگویی-اصلاح مک کورمک که یک روش صریح با دقت مرتبه دوم در زمان و مکان می باشد استفاده شده است. گسسته سازی با استفاده از روش یاد شده به صورت زیر می باشد:

$$\hat{U}_m^{n+1} = U_m^n - \frac{\Delta t}{V} \sum_{r=1}^3 (H_{r,+} \cdot s_r + H_{r,-} \cdot s_{r,-}) \quad (1-9)$$

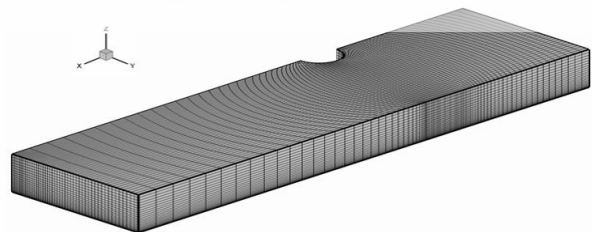
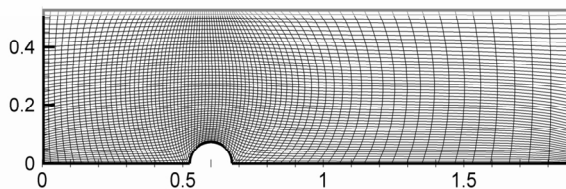
$$\tilde{U}_m^{n+1} = U_m^n - \frac{\Delta t}{V} \sum_{r=1}^3 (\hat{H}_{r,+} \cdot s_r + \hat{H}_{r,-} \cdot s_{r,-}) \quad (2-9)$$

\hat{U}_m و \tilde{U}_m به ترتیب نشان دهنده مرحله پیش گویی و مرحله اصلاح می باشد. $H_{r,+}$ و $H_{r,-}$ ، $H_{r,+}$ به ترتیب مقادیر بردار شار در مراکز حجم کنترل های بالادست ، میانی و پایین دست بوده و $s_{r,+}$ و $s_{r,-}$ بردارهای سطح در بالادست و پایین دست حجم کنترل می باشند. با توجه به اینکه روش مک کورمک در هر دو مرحله پیش گویی و اصلاح می تواند بصورت تنها پیشرو و پسرو و یا توأمان باشد، هشت حالت مختلف برای این روش می توان در مدل عددی اعمال نمود. امکان استفاده از این حالات در مدل عددی حاضر فراهم شده است که از میان این حالات، حالتی که دارای کمترین خطای عددی است انتخاب گردیده است. پس از یافتن مقادیر متوسط متغیرها در مراکز سلول در دو مرحله پیش گویی و اصلاح، روند حل برای گام زمانی بعدی به صورت زیر ادامه می یابد: [7]

$$U_m^{n+1} = \frac{1}{2} (\hat{U}_m^{n+1} + \tilde{U}_m^{n+1}) \quad (10)$$

شبکه بندی

شبکه بندی میدان محاسباتی با استفاده از روش تولید شبکه با معادلات دیفرانسیل بیضوی (پواسون) انجام شده است که یک شبکه با ساختار ایجاد می نماید که دارای قابلیت فشردگی در مجاورت مرزهای جامد می باشد [8]. شبکه ایجاد شده دارای 80 گره در راستای محور x ، 50 گره در راستای محور y و 25 گره در راستای محور z (عمق جریان) می باشد (شکل 3).



شکل 3 شبکه بندی ایجاد شده با استفاده از روش معادلات دیفرانسیل بیضوی

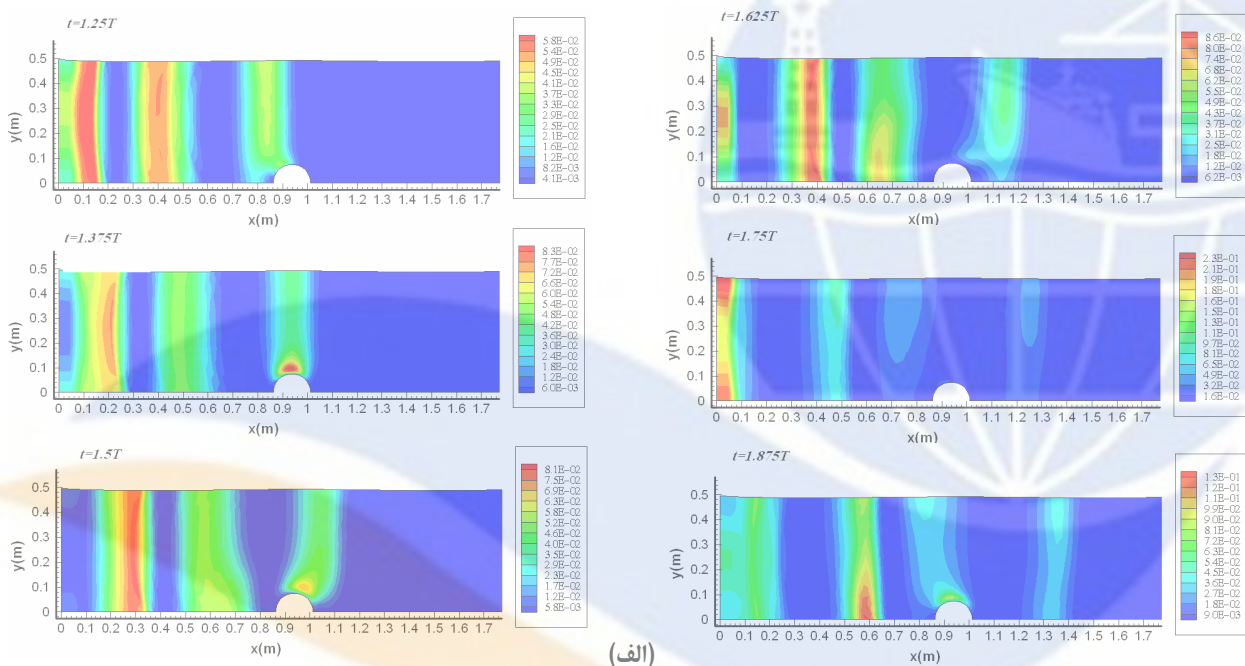
شرایط مرزی

مقادیر سرعتها و تغییرات تراز سطح آب بطور صریح از حل معادلات مومنتم و پیوستگی با استفاده از روش مک-کورمک به دست می آیند. در حل معادلات حاکم نیاز به اعمال شرایط مرزی می باشد که عبارتند از، شرط ورودی جریان در بالادست ($u = U_m \sin(2\pi/T), v = w = 0$) ، شرط مرزی خروجی جریان در پایین دست (گرادیان های متغیرهای جریان در جهت x برابر صفر می باشد) و برای شرط مرزی سطح آزاد، شرط

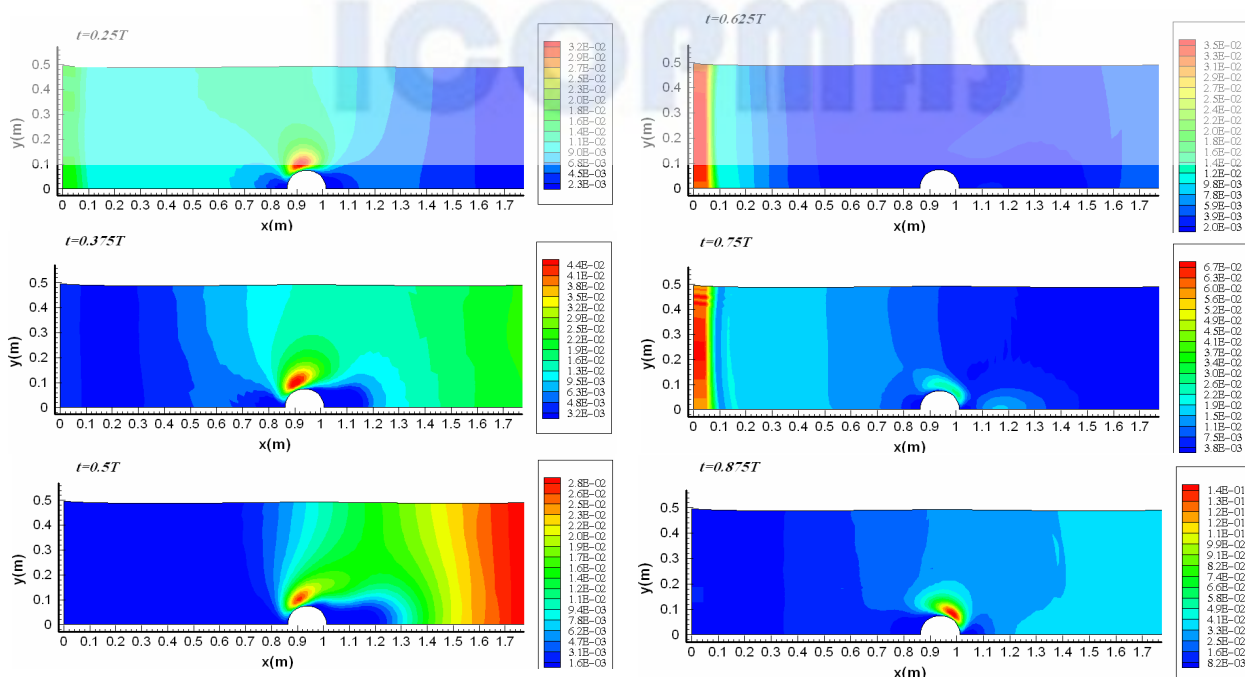
مرزی تقارن و شرط سینماتیکی سطح آزاد اعمال شده است. شرایط مرزی دیواره (شرط مرزی لغزش نسبی برای پایه، شرط مرزی لغزشی آزاد برای دیواره میدان فیزیکی و شرط مرزی تقارن در محور تقارن). [۷]

نتایج مدل عددی

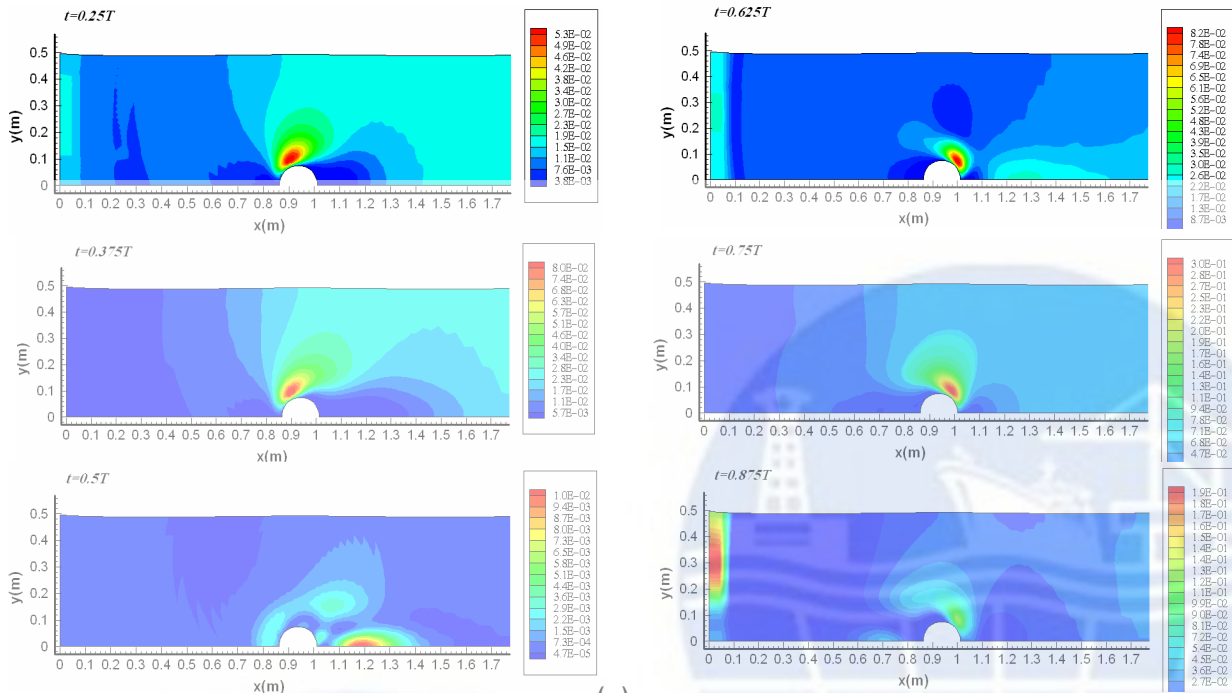
برای محاسبات جریان نوسانی سینوسی اطراف پایه، سه عدد ۱، ۱۰ و ۲۰ برای مقدار عدد بی بعد کولگان-کارپنتر (KC) در نظر گرفته شده است. همچنین نسبت عمق جریان به قطر پایه (H/D) در این تحقیق برابر ۲ در نظر گرفته شده است. ابعاد میدان محاسباتی برابر است با $12.5D \times 3.5D \times 2D$ که به ترتیب از چپ برابر با طول، عرض و عمق جریان می باشد. عدد رینولدز پایه (Re_D) در مدل عددی حاضر برابر با ۵۰۰ می باشد که مقدار آن از رابطه ($U_m D / \nu$) محاسبه می گردد. با توجه به ثابت بودن عدد رینولدز در محاسبات، سه پریود زمانی متفاوت 0.4π ، 1.4π و 2.4π ثانیه برای موج نوسانی برای سه عدد کولگان کارپنتر ذکر شده فوق، تعیین شده است پیش از انجام مدلسازی موج نوسانی در تحقیق حاضر و جهت صحت یابی، نتایج مدل عددی تهیه شده برای جریان یکنواخت اطراف پایه، با نتایج مدل آزمایشگاهی درگاهی (Dargahi, 1989) مقایسه گردیده است [۹]. نتایج مربوط به جریان موج نوسانی در زیر ارائه شده است. شکل (۴) تغییرات تنش برشی بستر در محور تقارن پایه را برای سه عدد KC نشان می دهد. این نتایج در فازهای زمانی مختلف موج نوسانی سینوسی می باشد.



(الف)



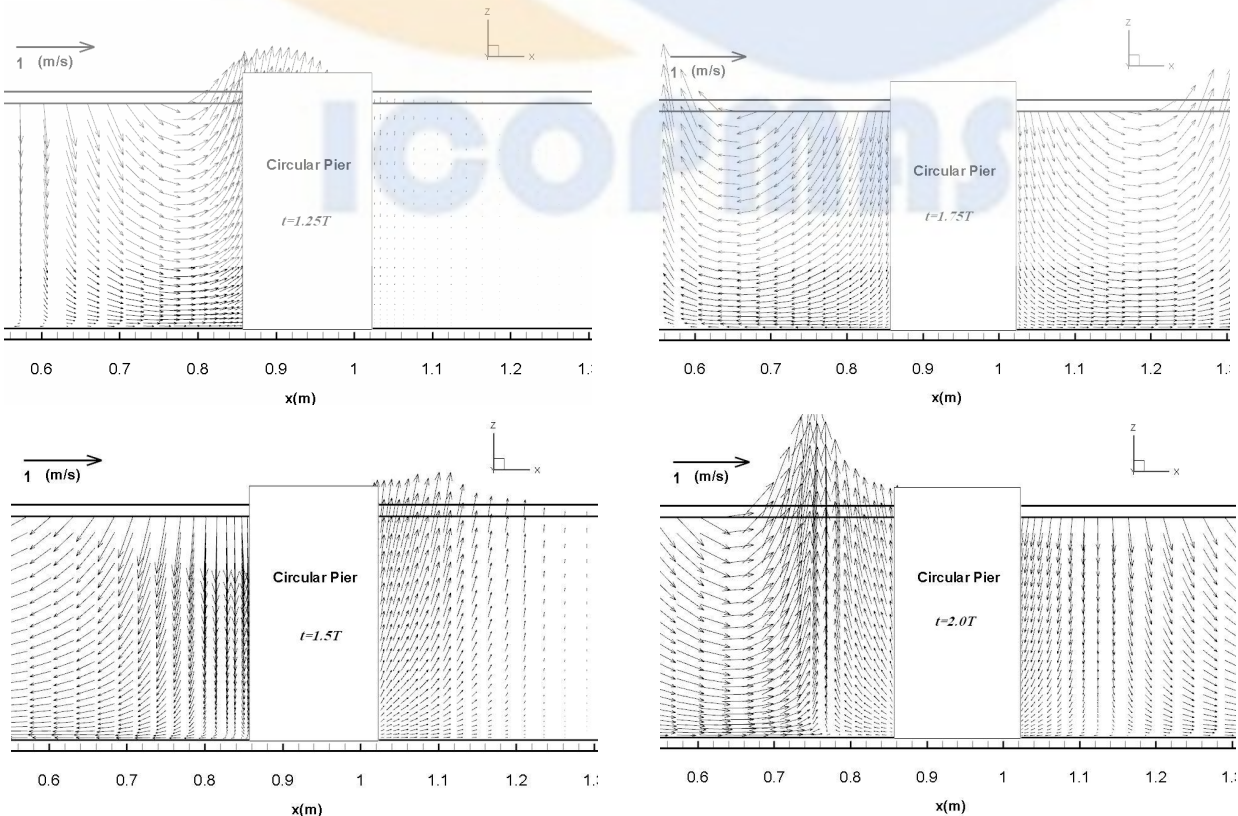
(ب)



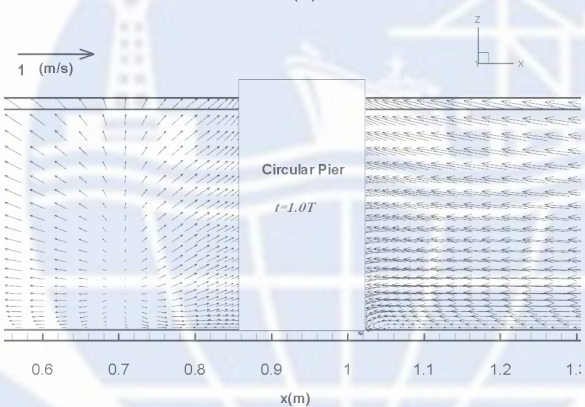
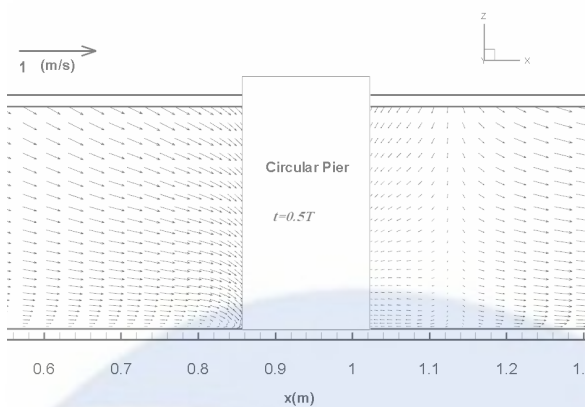
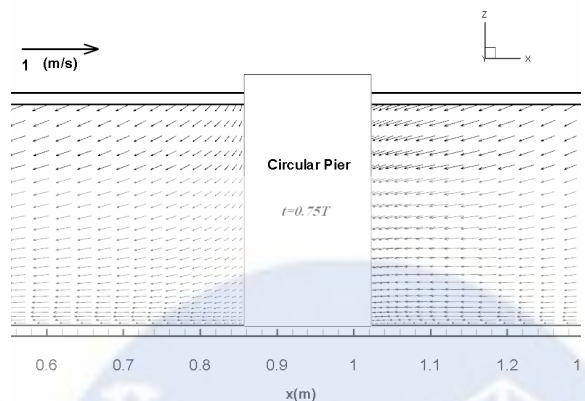
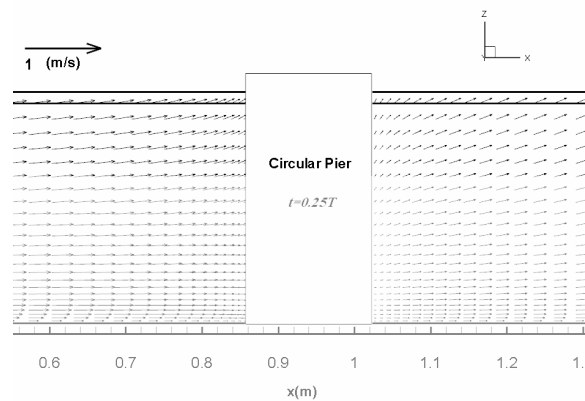
(ج)

شکل (۴): تغییرات تنش برشی بستر (بر حسب N/m^2) با تغییرات فاز موج نوسانی سینوسی برای عددهای $KC=10$ (ب)، $KC=20$ (ج)، $KC=1$ (الف) متفاوت،

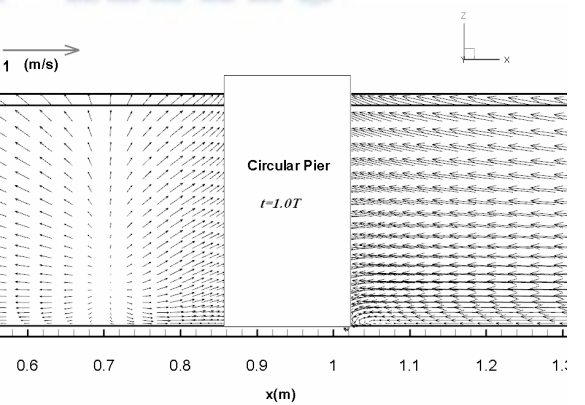
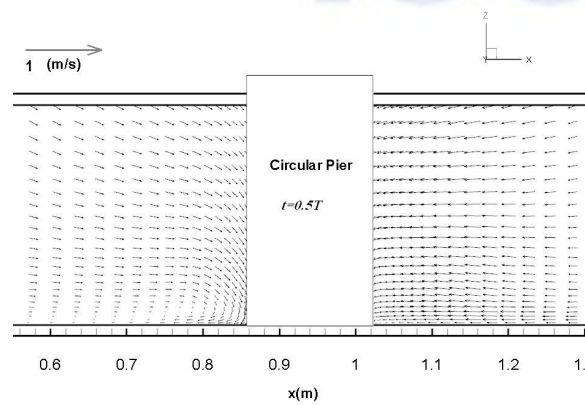
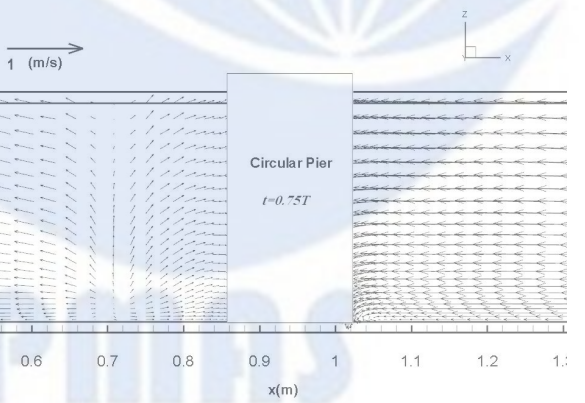
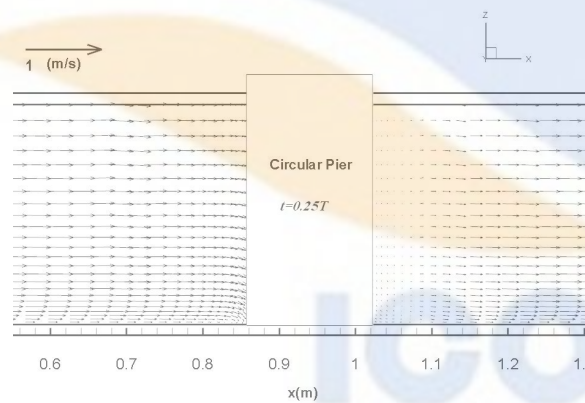
همانگونه که در شکل (۴) مشاهده می‌شود، تنش برشی در میدان محاسباتی بصورت نوسانی در اطراف پایه تغییر می‌نماید. با توجه به نتایج تنش برشی حداکثر در مجاورت پایه با افزایش KC ، افزایش یافته و موقعیت آن به بالادست پایه (برای فاز نوسانی کوچکتر از $T/2$) و پایین دست پایه (برای فاز نوسانی بزرگتر از $T/2$) تغییر می‌یابد. در شکل (۵) الگوی جریان در مقطع قائم و در محور تقارن پایه برای فازهای مختلف زمانی سرعت برای عدد KC متفاوت نشان داده شده است.



(الف)



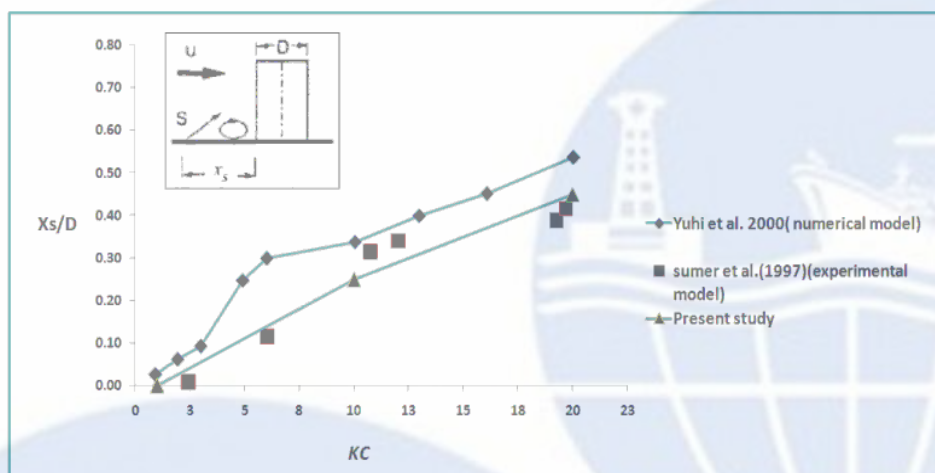
(ب)



(ج)

شکل (۵): الگوی جریان در مقطع قائم در محور تقارن پایه در فازهای مختلف زمانی سرعت برای عددهای بی بعد متفاوت، (الف) $KC=1$ ، (ب) $KC=10$ ، (ج) $KC=20$

مقادیر KC کوچک به این معنی است که حرکت اریتمالی ذرات آب نسبت به قطر پایه کوچک است. با توجه به شکل فوق در مقادیر کوچک KC پیچک نعل اسبی نمی‌تواند تشکیل گردد و این بدان علت است که قدرت و دوام جریان نوسانی در هر نیم پریود برای جدایش لایه مرزی جریان نزدیک شونده به پایه کافی نمی‌باشد. در زیر جریان برگشتی در جلوی پایه، تنش برشی دارای مقدار منفی می‌باشد و این مقدار منفی شکل گیری پیچک نعل اسبی را سبب می‌شود. همچنین با افزایش عدد KC جریان برگشتی بزرگتر و در نتیجه پیچک نعل اسبی بزرگتری تشکیل می‌گردد که خود نشان دهنده این مطلب است که جریان نزدیک شونده به پایه در فاصله بیشتری نسبت به پایه دچار جدایش لایه مرزی جریان شده است. در شکل (۶) تغییرات فاصله جدایش جریان در جلوی پایه با تغییرات عدد KC نشان داده شده است. لازم به ذکر است که فاصله جدایش در مدل عددی حاضر در فاصله زمان $t = \frac{3}{8}T$ (زمانی که موج با حداکثر سرعت نوسانی خود با توجه به طول میدان فیزیکی به پایه رسیده است) ارائه شده است.



شکل(۶): فاصله جدایش برای پیچک نعل اسبی در جلوی پایه استوانه‌ای شکل

نتیجه‌گیری

در این مقاله به بررسی تأثیرات تغییر عدد بی‌بعد کولگان-کارپنتر (KC) بر تنش برشی بستر، تغییرات الگوی جریان و فاصله جدایش جریان نوسانی در اطراف پایه پرداخته شد. مدل عددی حاضر با توجه فرضیات ساده کننده از جمله فرض فشار هیدرواستاتیکی به نحو قابل قبولی توانسته به پیش‌بینی الگوی سه بعدی جریان نوسانی اطراف پایه استوانه‌ای شکل و هیدرودینامیک این نوع جریان‌ها بپردازد. که با توجه به نتایج حاصل از مدل عددی نتایج زیر ارائه می‌شود:

- بزرگی دوام پیچک نعل اسبی در اطراف پایه کاملاً وابسته به عدد بی‌بعد KC می‌باشد.
- با افزایش KC جدایش جریان در جلوی پایه در فاصله بیشتری نسبت به پایه صورت می‌گیرد و پیچک نعل اسبی بزرگتری تشکیل می‌شود.
- در عدد $KC=1$ هیچگونه جدایش و در نتیجه پیچک نعل اسبی و پیچک دنباله‌دار مشاهده نمی‌گردد.
- با افزایش KC پیچک دنباله‌دار بزرگتری در پشت پایه تشکیل می‌شود.
- با افزایش KC تنش برش τ حداکثر در اطراف پایه بطور نوسانی در بالادست و پایین دست پایه افزایش می‌یابد.
- با افزایش KC خصوصیات جریان نوسانی شباهت بیشتری به جریان نیکنواخت پیدا می‌کند.
- با افزایش تنش برش τ حداکثر، پتانسیل آبشستگی در اطراف پایه افزایش می‌یابد. در مورد جریان‌های نوسانی جهت و بزرگی پیچک نعل اسبی بطور نوسانی در اطراف پایه تغییر می‌نماید. به این ترتیب آبشستگی در اطراف پایه به صورت همزمان در هر نیم پریود موج می‌تواند صورت بگیرد.

مراجع:

- [1] Sumer, B.M., Christiansen, N. and Fredsoe, J (1997), The horseshoe vortex and vortex shedding around a vertical wall-mounted cylinder exposed to waves. Journal of Fluid Mechanics 332:41-70.
- [2] Yuhi, M., Ishida, H. and S. Umeda. (2000), A numerical study of three-dimensional flow fields around a vertical cylinder mounted on a bed, Coastal structures, 99, 783-792.

- [3]Chern, M.J, Lu, Y.J, Shang, S.C and Cheng, L.C. (2007), Interaction of oscillatory flows with a square cylinder, *Journal of Mechanics*, Vol. 23, No. 4.
- [4]Weihua, Mo., Kai Irschik, Hocine, O., Philip L.F.Lio, (2007), A 3D numerical model for computing non-breaking wave forces on slender piles, *Journal of Engineering Math.* 58:19–30.
- [5]Falconer, R. A. (1993), *An introduction to nearly horizontal flow*, Coastal, Estuarial and Harbor Engineer's Reference Book. Edit by M. B. Abbott and W. A. Price. Published in 1993 by Chapman & Hall, 2-6 Boundary Row, London SE1 8HN.ISBN 0 419 15430 2.
- [6]Ghiassi, R. (1995), *Three Dimensional Coastal Flow Modeling Using the Finite Volume Method*, PhD Thesis, University of Bradford, Bradford, UK.
- [7]Tseng, M. H., Yen, C. L. and Song, C.S (2000), Computational three-dimensional flow around square and circular piers, *International journal for numerical methods in fluids*, 34, 207-227.
- [8]Thompson, J.F, Soni, B.K, and Weatherill, N.P, (1999), *Handbook of Grid Generation*, CRC Press, Boca Raton London, New York, Washington, D.C.
- [9]Dargahi, B. (1989), The turbulent flow field around a circular cylinder, *Journal of Experiment in Fluids*, 8, 1-12.
- [10]Aghae, Y. and Hakimzadeh, H, (2008), Three-dimensional numerical modelling of flow around circular piers using the finite volume method, 4th National Conference of Civil Engineering, Tehran Univ. Iran (in Persian).

