مدلسازی عددی الگوی جریان اطراف لوله های فرا ساحل تحت اثر جریان یکطرفه

مرتضی زنگانه[۱]، دکتر عباس یگانه بختیاری[۲]

۱- دانشجوی دکترای مهندسی عمران-آب، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران

۲- استادیار دانشکده مهندسی عمران، قطب علمی هیدروانفورماتیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران

mzanganeh@iust.ac.ir

خلاصه

تنش برشی کف و گسترش گردابه های جریان از عوامل بسیار موثر در میزان آبشستگی پای لوله های انتقال مستقر بر کف دریا می باشند که به ترتیب نقش موثری در مراحل تونل فرسایش و فرسایش lee-wake از آب شستگی ایفا می کنند. در این مقاله یک مدل عددی بر مبنای روش عددی احجام محدود ترکیبی با مدل آشفتگی وابسته $k-\varepsilon$ جهت تعیین میزان تنش برشی کف به ازای نسبت های مختلف فاصله لوله از کف توسعه داده شد. برای صحت سنجی مدل عددی توسعه داده شده از نتایج آزمایشگاهی Oner و همکاران (۲۰۰۹) که در آن پروفیل سرعت اطراف لوله قرار داده شده بر روی بستر استفاده می شود. نتایج مدل حاکی از آن است که با افزایش نسبت فاصله ازکف به قطر لوله باعث کاهش موثر درتنش برشی می گردد. از طرف دیگر، به منظور بررسی بسامد تشکیل گردابه های جریان در پشت لوله، از پارامتر بی بعد عدد استروهال استفاده شده است که با استفاده از منحنی توان طیف چگالی (PSD) برای نسبت فاصله ازکف به قطر لوله (۰/۳۷ میزان عدد استروهالe/D) برابر ۰/۱۵۸ بدست آمده است.

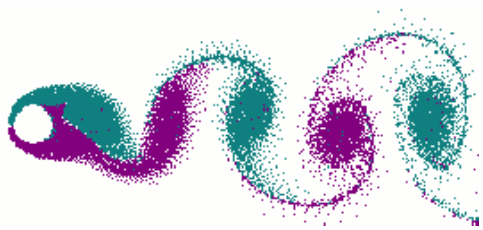
کلمات کلیدی: مدلسازی عددی، روش احجام محدود، لوله های فراساحل، تنش برشی، کشیدگی گردابه ها

۱. مقدمه

مدلسازی عددی پدیده های فیزیکی یکی از پرکاربرد ترین روش ها جهت شناخت هر چه بهتر این پدیده ها می باشد. بنابراین، با توجه به هزینه کم آنها در مقایسه با مدلهای فیزیکی می توانند به عنوان یک جایگزین مناسب جهت تعیین پارامترهایی که اندازه گیری آنها در آزمایشگاه دشوار می باشد، مورد توجه قرار گیرند. یکی از مهمترین مسائل در مهندسی نفت و پتروشیمی در ایران، طراحی قابل اطمینان خطوط لوله انتقال نفت و گاز در منطقه فراساحل در مقابل جریان یکطرفه می باشند، به طوری که کمترین خطر آسیب دیدگی و متعاقب آن نشت نفت و گاز را در دریا داشته باشند. از جمله مسائل مهم در طراحی خطوط لوله در جریان یک طرفه بررسی الگوی جریان اطراف لوله به لحاظ کمی و کیفی می باشد. بنابراین، تاکنون روش های زیادی جهت بررسی جریان اطراف لوله مورد استفاده قرار گرفته است که عمدتا مبتنی بر روش های آزمایشگاهی (Bearman و Zdrakovich (۱۹۷۸)، Jensen (۱۹۷۸) و Oner و همکاران، ۲۰۰۸) و مدل های عددی (Liang و همکاران، ۲۰۰۴، Kirkgoz و همکاران، ۲۰۰۹) می باشند. همچنین با توجه به اهمیت مساله در ایران از جمله کارهای انجام شده در ایران می توان به کار های گل پرور (۱۳۸۳)، ولی پور (۱۳۸۴) و موسوی (۱۳۸۳) اشاره کرد.

از آنجایی که، مدل های فیزیکی توسعه داده شده در آزمایشگاه قابلیت برقرای تشابه کامل سینماتیکی و دینامیکی بین مدل و الگو را ندارند و از طرف دیگر اندازه گیری بعضی پارامتر ها در محیط آزمایشگاه دشوار بوده و دارای هزینه برداشت زیادی می باشد. در سالهای اخیر استفاده از مدلهای عددی مبتنی بر تفاضل محدود، اجزا محدود و احجام محدود به عنوان گزینه های جایگزین مدلهای آزمایشگاهی مطرح شده اند که در مراحل اولیه می باشند. عموما در این مدلها، بعد از واسنجی مدل با نتایج آزمایشگاهی بدست آمده به استخراج پارامترهای موثر و مجهول مربوط به پدیده پرداخته می شود. از موثرترین پارامترها در تحلیل آبشستگی پای لوله ها فراساحل تحت اثر جریان تخمین میزان تنش برشی زیر لوله به ازای نسبت های متفاوت فاصله لوله از کف می باشد. پارامتر دیگری که در تحلیل آبشستگی پای لوله مطرح می باشد پریود گسترش گردابه ها می باشد که به طور متناوب و با فاصله زمانی کمی در بالا و پایین لوله همچنان که در شکل (۱) نمایش داده شده، اتفاق می افتد. هر یک از این دو فرآیند بترتیب بیانگر دو مرحله آبشستگی تونل فرسایش و فرسایش lee-wake می باشند که به ترتیب در طی فرآیند آبشستگی اتفاق می افتند. بنابراین هدف از این تحقیق نه تنها تعیین

میزان تنش برشی به ازای مقادیر مختلف فاصله لوله از کف ، بلکه تعیین بسامد حاکم برکشیدکی گردابه می باشد که با پارامتر بی بعدی تحت عنوان عدد استروهال بیان می شود. به همین منظور، این مقاله را می توان به چهار بخش زیر تقسیم کرد: در بخش اول که شامل مقدمه می باشد به رویکرد مقاله از نظر تاریخچه ای، اهمیت و تعریف مسئله پرداخته شد. در بخش دوم معادلات حاکم بر مسئله که شامل معادلات ناویر–استوکس ترکیب شده با مدل وابسته آشفتگی $k-\varepsilon$ حاکم بر پدیده بررسی می شود. فصل سوم نیز به بررسی شرایط مرزی و چگونگی کالیبره کردن مدل اختصاص پیدا می کند، در حالی که فصل چهارم به بررسی و بحث در مورد نتایج استخراجی و قابلیت بکارگیری مدل توسعه داده شده در موارد مشابه می پردازد.



شکل ۱- روند گسترش گردابه ها به صورت متناوبی

۲. معادلات حاکم

در مدل سازی هر پدیده شناخت معادلات حاکم بر آن پدیده از مهمترین مسائل می باشد. جریان اطراف لوله نیز با توجه به ماهیت آشفته آن از این مساله مستثنی نمی باشد. معادلات حاکم بر این پدیده شامل معادلات بقای جرم و ممنتوم می باشند که تحت عنوان معادلات ناویر–استوکس رینولدز متوسط (RANS) می نامند. همچنین به منظور مدلسازی پدیده آشفتگی اطراف لوله با توجه به بالا بودن عدد رینولدز از مدل وابسته $k-\varepsilon$ بکار برده می شود که بیانگر میزان تولید و استهلاک انرژی در سیستم می باشد که با توجه به موارد ذکر شده در بالا به ترتیب این معادلات را می توان به صورت زیر عنوان کرد:

$$\frac{\partial U}{\partial x}+\frac{\partial V}{\partial y}=0 \qquad (۱)$$

$$\frac{\partial U}{\partial t}+U\frac{\partial U}{\partial x}+V\frac{\partial U}{\partial y}=-\frac{1}{\rho}\frac{\partial P}{\partial x}+\frac{\partial}{\partial x}\left[2\Gamma\frac{\partial U}{\partial x}\right]+\frac{\partial}{\partial y}\left[\Gamma\left(\frac{\partial U}{\partial y}+\frac{\partial V}{\partial x}\right)\right] \qquad (۲)$$

$$\frac{\partial V}{\partial t}+U\frac{\partial V}{\partial x}+V\frac{\partial V}{\partial y}=-\frac{1}{\rho}\frac{\partial P}{\partial y}+\frac{\partial}{\partial x}\left[\Gamma\left(\frac{\partial U}{\partial y}+\frac{\partial V}{\partial x}\right)\right]+\frac{\partial}{\partial y}\left(2\Gamma\frac{\partial V}{\partial y}\right)+g \qquad (۳)$$

$$\frac{\partial k}{\partial t}+U\frac{\partial k}{\partial x}+V\frac{\partial k}{\partial y}=\frac{\partial}{\partial x}\left[\left(\nu+\frac{\nu_t}{\sigma_k}\right)\frac{\partial k}{\partial x}\right]+\frac{\partial}{\partial y}\left[\left(\nu+\frac{\nu_t}{\sigma_k}\right)\frac{\partial k}{\partial y}\right]+p_r-\varepsilon \qquad (۴)$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t}+U\frac{\partial \varepsilon}{\partial x}+V\frac{\partial \varepsilon}{\partial y}=\frac{\partial}{\partial x}\left[\left(\nu+\frac{\nu_t}{\sigma_\varepsilon}\right)\frac{\partial \varepsilon}{\partial x}\right]+\frac{\partial}{\partial y}\left[\left(\nu+\frac{\nu_t}{\sigma_\varepsilon}\right)\frac{\partial \varepsilon}{\partial y}\right]+\frac{\varepsilon}{k}\left(c_{1\varepsilon}p_r-c_{2\varepsilon}\varepsilon\right) \qquad (۵)$$

$$p_r=\nu_t\left[2\left(\frac{\partial U}{\partial x}\right)^2+2\left(\frac{\partial V}{\partial y}\right)^2+\left(\frac{\partial U}{\partial x}+\frac{\partial V}{\partial y}\right)^2\right] \qquad (۶)$$

$$\nu_t=C_\mu\frac{k^2}{\varepsilon} \qquad (۷)$$

$$\Gamma=\nu+\nu_t \qquad (۸)$$

که در معادلات بالا U و V به ترتیب سرعت متوسط در جهت افقی و عمودی، ν_t لزجت گردابه ای، k انرژی جنبشی آشفتگی ε ، میزان اتلاف انرژی جنبشیآشفتگی، p_r ، میزان تولید انرژی آشفتگی ناشی از تنش برشی در سیال، g ، شتاب گرانش وضرایب C_μ ، σ_k ، σ_ε ، $C_{1\varepsilon}$ $C_{2\varepsilon}$ ثوابت مدل آشفتگی وابسته $k-\varepsilon$ می باشند که در جدول (۱) زیر مقادیر آنها ارائه شده است. به منظور تحلیل معادلات حاکم از روش گسسته سازی احجام محدود (FVM) که یک روش مبتنی بر دیدگاه اویلری می باشد با بهره گیری از الگوریتم ترکیب نمودن میدان فشار و میدان سرعت از روش SIMPLE، برای حل عددی معادلات حاکم استفاده می شود.

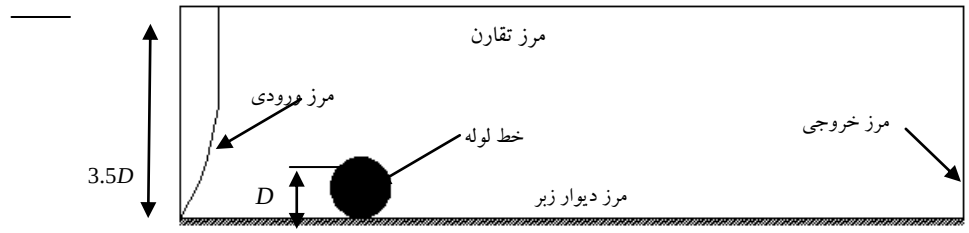
جدول ۱- ثابت های مدل وابسته آشفتگی $k-\varepsilon$ استاندارد

C_μ	σ_k	σ_ε	$c_{1\varepsilon}$	$c_{2\varepsilon}$
0.09	1.0	1.3	1.44	1.92

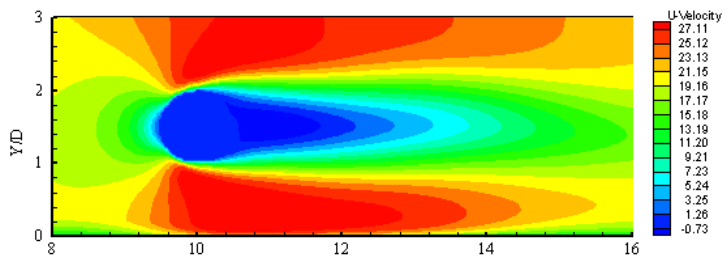
۳. مدلسازی و صحت سنجی مدل جریان

پس از تعیین معادلات حاکم بر پدیده مورد نظر در این قسمت سعی در توسعه مدل عددی بر مبنای روش احجام محدود و ارزیابی کیفی و کمی در محیط FORTRAN می شود. به منظور ارزیابی مدل توسعه داده شده از نتایج آزمایشگاهی گزارش شده توسط Jensen (۱۹۷۸) و Oner و همکاران (۲۰۰۹) استفاده می شود. اما از آنجایی که در توسعه هر مدل عددی اعمال شرایط مرزی، تعیین دامنه محاسباتی موردنظر و چگونگی مش بندی این دامنه از اهمیت خاصی برخوردار می باشد، لذا در این قسمت دامنه محاسباتی مطابق شکل زیر در نظر گرفته می شود. این دامنه همانطور که در شکل (۲) نمایش داده شده با توجه به قطر لوله (D) دارای $30D$ عرض و $3.5D$ عمق می باشد که لوله ای به قطر D در نقطه ای به فاصله $10D$ از بالا دست قرار دارد. همچنین شرایط مرزی به گونه ای می شود که یک شرط مرزی ورودی با سرعت یکنواخت در نظر گرفته می شود که با ورود به دامنه محاسباتی پروفیل آن به پروفیل لگاریتمی تبدیل می شود. در قسمت خروجی نیز شرایط بگونه ای در نظر گرفته گرادیان تغییرات پارامتر های سرعت و فشار در جهت افقی صفر می باشد. در کف نیز شرط مرزی دیوار زبر در نظر گرفته می شود که پروفیل سرعت لگاریتمی را به دامنه محاسباتی اعمال می کند به صورت زیر اعمال می کند. علاوه بر این، قسمت بالای دامنه نیز دارای شرط مرزی تقارن بوده که در آن تغییرات میزان سرعت افقی در ارتفاع صفر می باشد.

یکی از مهمترین مسائل در بکارگیری مدل های عددی در مدلسازی یک پدیده فیزیکی، بررسی صحت مدل توسعه داده شده در مقایسه با نتایج قابل استنباط از آن مدل در مدلسازی آن پدیده فیزیکی می باشد. بنابر این، در این بخش به منظور صحت سنجی مدل در گام نخست با قراردادن لوله در وسط دامنه محاسباتی به بررسی چگونگی مدلسازی پدیده توسط مدل عددی مذکور پرداخته می شود. همانطور که در شکل (۳) نمایش داده شده است مدل توسعه داده شده احجام محدود به همراه مدل وابسته آشفتگی $k-\varepsilon$ توزیع سرعت در اطراف لوله را به صورت متقارن استخراج کرده است. در حالیکه این مدل همچنانکه در شکل (۳) مشاهده می شود شرط مرزی تقارن را که شامل عدم تغییر مشتق سرعت افقی در جهت قائم می باشد را به لحاظ کیفی به خوبی نمایش داده است. همچنین در کف نیز تابع دیوار بکار گرفته شده به لحاظ کیفی چگونگی سرعت افقی را که دارای توزیعی لگاریتمی می باشد را نمایش داده است. لازم به تذکر است که در این مدل سرعت جریان ۰٫۱۹۷ متر بر ثانیه می باشد و قطر لوله ۵ سانتی متر که معادل عدد رینولذ ۹۵۰۰ می باشد. همچنین گامهای زمانی (Δt) ۰٫۰۱ در حالی که اندازه شبکه مدل توسعه داده شده در این قسمت ۱۵۰۰×۲۶۰ می باشد.



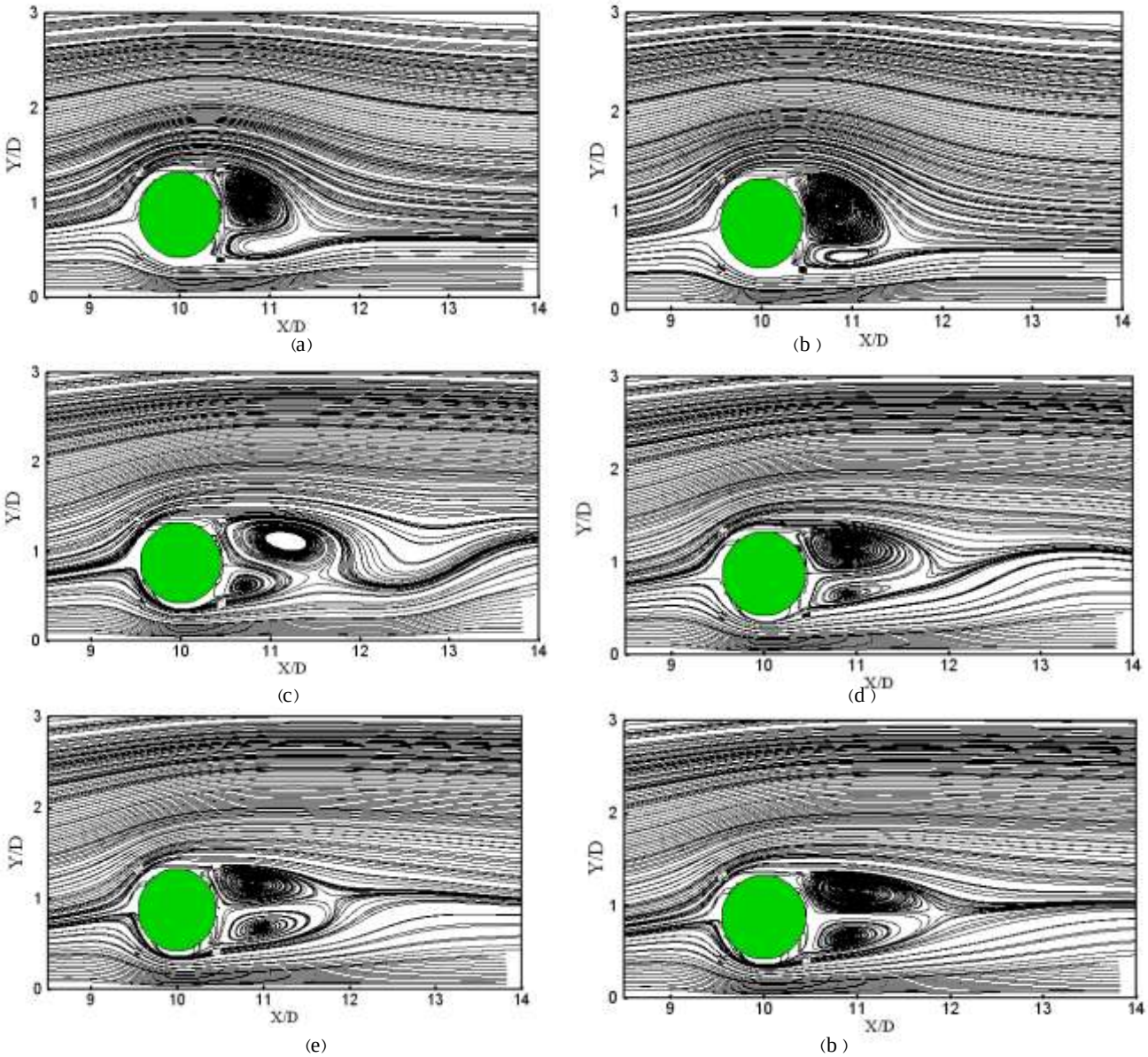
شکل ۲- دامنه محاسباتی در نظر گرفته برای تحلیل سیال



شکل ۳- توزیع سرعت افقی متوسط زمانی با قرار دادن لوله در وسط دامنه محاسباتی (سانتی متر بر ثانیه)

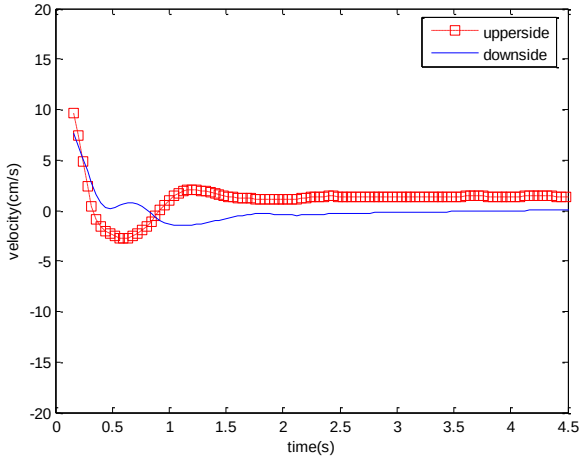
نکته دیگری که در کنترل کیفی نتایج مدل عدد توسعه داده شده حائز اهمیت است بحث تشکیل و گسترش گردابه ها در اطراف لوله انتقال فرا ساحل می باشد. در همین راستا، با قرار دادن لوله در فاصله ۰٫۳۷ قطر لوله بر اساس آزمایشات Bearman و Zdrakovich (۱۹۷۸)، Jensen (۱۹۷۸)

به بررسی پیدایش گردابه ها پرداخته می شود. همچنانکه در شکل (۴) نمایش داده شده است با قرار دادن لوله در دامنه محاسباتی دو گردابه به طور متناوب در اطراف لوله تشکیل می شود که با کشیدن تغییرات سرعت با زمان در مدت زمان ۴,۵ ثانیه در شکل (۵) چنین مشخص می شود که گردابه ها به طور متناوب تشکیل می شوند و تغییرات سرعت در بالا و پایین لوله به گونه ای خواهد بود که اگر به طور مثال در نقطه بالای لوله اگر سرعت حداکثر باشد در نقطه پایینی حداقل را دارا می باشد. علاوه بر این میزان تغییرات سرعت تا فاصله ای به اندازه ۸ برابر قطر می باشد.

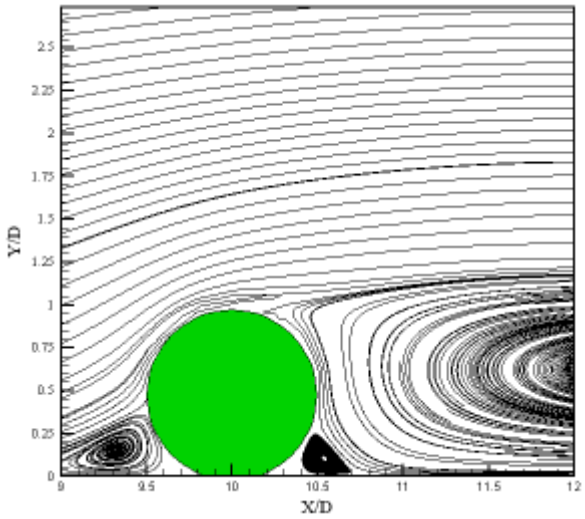


شکل ٤- چگونگی تشکیل گردابه های متناوب اطراف لوله در نسبت فاصله کف به قطر لوله ۰/۳۷ از کف در زمان ٤/٥ ثانیه

(a) $t = 0.5s$ (b) $t = 1.0s$ (c) $t = 2.0s$ (d) $t = 3.0s$ (e) $t = 4.0s$ (f) $t = 4.5s$



شکل ۵- تغییرات سرعت افقی در بالا و پایین لوله با زمان (سانتی متر بر ثانیه)

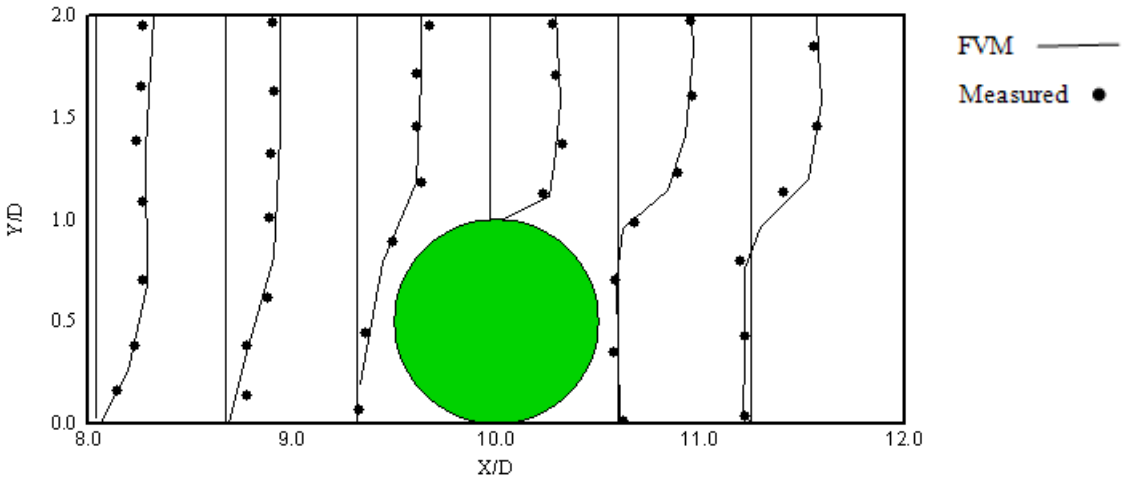


شکل ٦- چگونگی تشکیل گردابه های در اطراف چسبیده به کف

تاکنون هر آنچه بحث شد مربوط به حالتی بود که لوله در فاصله ای از کف قرار داشت. اما در این قسمت به بررسی الگوی گردابه در حالتی که لوله چسبیده به بستر باشد، پرداخته می شود. شکل (۶) چگونگی خطوط جریان متوسط زمانی را نمایش می دهد که شبیه نتایج بدست آمده توسط Oner و همکاران (۲۰۰۹) می باشد. با این تفاوت که گردابه پایین دست اندکی کوچکتر می باشد که ایم مسئله برآمده از تفاوت زمان میانگین گیری می باشد.

۴. نتایج و بحث

از جمله موارد مهم در بکارگیری و توسعه مدل های عددی استخراج اطلاعات جدیدی در مورد پدیده می باشدکه اندازه گیری آنها در آزمایشگاه مشکل و یا دارای هزینه بسیاری می باشد. اما از آنجایی که بدست آوردن چنین اطلاعاتی مستلزم واسنجی مدل از دیدگاه کمی می باشد در این قسمت نتایج بدست آمده از مدل عددی با نتایج کمی بدست آمده از نتایج آزمایشگاهی می باشد. بنابراین، به منظور اطمینان از کارایی مدل با مقایسه توزیع سرعت افقی بدست آمده از مدل عددی احجام محدود ترکیب شده با مدل وابسته آشفتگی $k-\varepsilon$ در شکل (۷) در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی Oner و همکاران (۲۰۰۹) چنین مشخص می شود که مدل عددی توسعه داده شده دارای دقت قابل قبولی در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی می باشد.

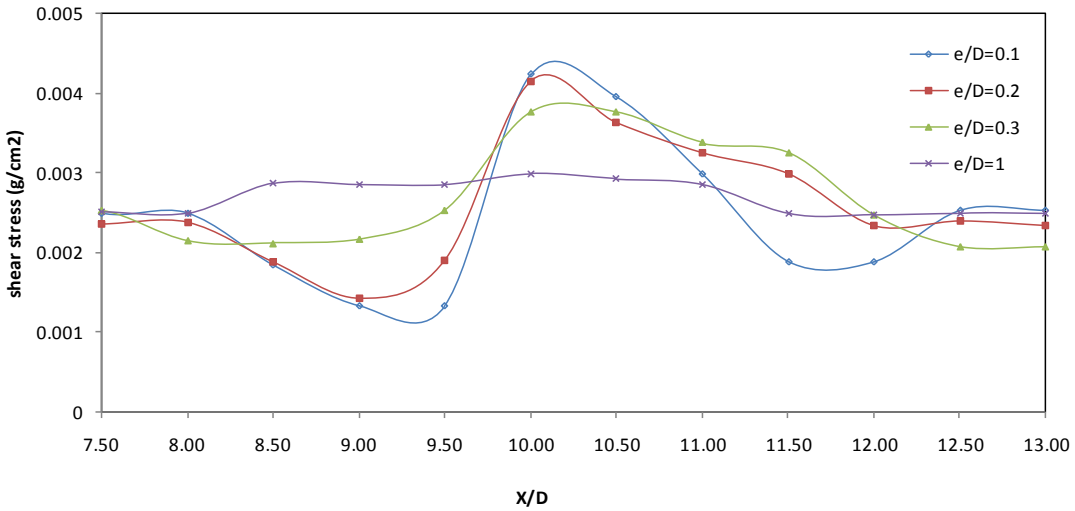


شکل ۷- توزیع سرعت افقی اطراف لوله چسبیده به کف در مقایسه با نتایج Oner و همکاران (۲۰۰۹)

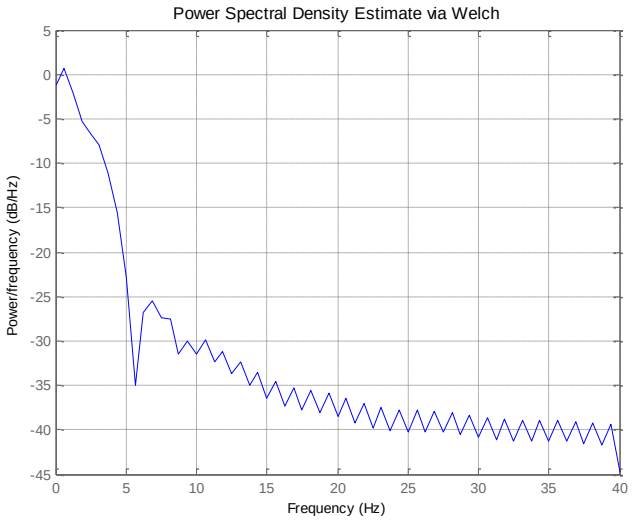
. بنابراین با توضیحات ارائه شده در بالا چه از نظر کیفی که مرتبط با نتایج بدیعی مدل می باشد و چه از نظر کمی این چنین می توان استنباط کرد که مدل عددی توسعه داده شده را می توان به عنوان یک آزمایشگاه عددی قابل اعتماد مورد استفاده قرار داد. در همین راستا، در این قسمت با توجه به اهمیت شناخت فرآیندهای مانند تونل فرسایش و فرسایش lee-wake در پدیده آبشستگی از مدل توسعه داده شده به منظور استخراج پارامتر تنش برشی و عدد اشتروهال استفاده می شود. شکل (۸) میزان تنش برشی را به ازای مقادیر متفاوت فاصله به قطر لوله نمایش می دهد که با افزایش فاصله از کف این میزان تنش برشی در کف کاهش پیدا می کند. همچنین در نسبت ۰,۱ با توجه سرعت کم زیر لوله در این حالت این میزان کم می باشد. همچنین، همچنانکه شکل (۹) نمایش می دهد میزان عدد اشتروهال با استفاده از نمودار چگالی طیفی توان (PSD) برای نسبت فاصله به قطر ۰,۳۷، ۰,۱۵۸ هم برای بالای لوله و هم برای پایین حاصل می شود که این نتیجه در مقایسه با نتیجه بدست آمده توسط Oner و همکاران برای نسبت فاصله به قطر لوله ۰,۳ به هم نزدیک می باشند. لازم به ذکر است که مقدار عدد اشتروهال (St) از رابطه زیر محاسبه می شود:

$$St = \frac{fD}{u_0} \qquad (۹)$$

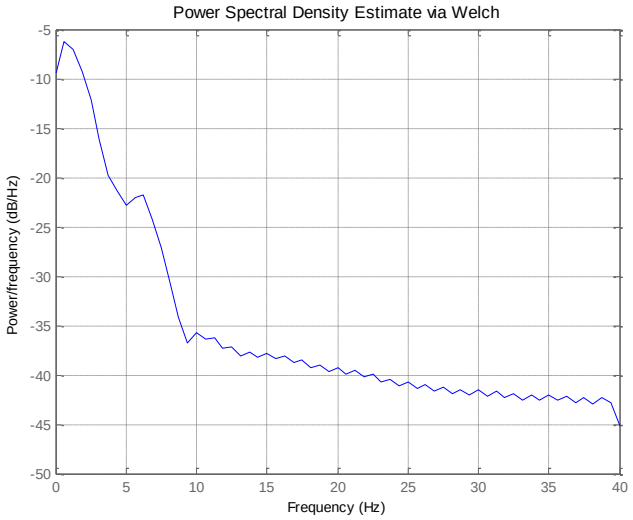
که در آن f ، فرکانس، u_0، سرعت متوسط و D، قطر لوله می باشد.



شکل ۸- توزیع تنش برشی کف بازای مقادیر متفاوت نسبت فاصله لوله از کف به قطر لوله



(a)



(b)

شکل ۹- نمودار چگای طیفی توان (PSD) در بالا (a) و پایین لوله بر حسب سرعت افقی (b)

۵. نتیجه‌گیری

مدلسازی جریان اطراف لوله های انتقال مستقر بر روی بستر دریا از اهمیت زیادی در مهندسی سواحل جهت نگهداری و طراحی این سازه ها برخوردار می باشد. در این مقاله مدل یک مدل عددی بر اساس روش احجام محدود ترکیب شده با یک مدل آشفتگی وابسته $k-\varepsilon$ توسعه داده شده که بر مبنای آن پارامتر های موثر در فرآیند آبشستگی مانند تنش برشی بستر و عدد اشتروهال که به ترتیب عوامل مهم در آب شستگی در مرحله تونل فرسایشی و فرسایش lee-wake محاسبه شده است. بر اساس نتایج بدست آمده از مدل چنین استنباط می شود که مدل مذکور می تواند به عنوان ابزار مناسبی جهت تحلیل مسائل با شرایط گوناگون موج و جریان پس از انجام صحت سنجی کامل در دریا مورد استفاده قرار گیرد. از طرف دیگر نتایج مدل حاکی از آن است که با افزایش نسبت فاصله ازکف به قطر لوله باعث کاهش موثر درتنش برشی می گردد. از طرف دیگر، به منظور بررسی بسامد تشکیل گردابه های

جریان در پشت لوله، از پارامتر بی بعد عدد استروهال استفاده شده است که با استفاده از منحنی توان طیف چگالی (PSD) برای نسبت فاصله ازکف به قطر لوله (۰/۳۷ میزان عدد استروهالe/D) برابر ۰/۱۵۸ بدست آمده است.

۶. مراجع

1. Alper Oner, A., Salih Kirkgoz and Sami Akoz, M., 2008. “Interaction of current with circular cylinder near rigid bed”. J. of Ocean engineering, pp. 1492-1504
2. Jensen, B.L., 1987. “Large-scale vortices in the wake of a cylinder placed near a wall”. Proc. 2nd International conference on laser anemometry-advances and applications, Strathclyde, UK. pp. 153–163.
3.Kirkgoz, M.S., Alper Oner, A. and Sami Akos, M.,.” Numerical modeling of interaction of a current with a circular cylinder near rigid bed”. Advances in Engineering Software. pp. 1191-1199
4. Zdravkovich M M. Review of flow interference between two circular cylinders in various arrangements. J Fluids Eng 1977; 99:618-33.
5. Liang D, Cheng L. Numerical modeling of flow and scour below a pipeline in currents Part I. Flow simulation. J Coastal Eng 2005; 52:25-42

۶. ولی پور، رضا ، «شبیه سازی عددی نیروهای هیدرودینامیکی موثر بر خط لوله نصب شده روی بستر دریا به منظور تعیین حداکثر طول مجاز دهانه آزاد»؛ پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران, دانشگاه علم و صنعت ایران، ۱۳۸۴.

۷. موسوی، میرعماد، «مدل سازی فیزیکی آبشستگی موضعی اطراف لوله های فراساحلی»؛ پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران, دانشگاه علم و صنعت ایران، ۱۳۸۳.

۸. گل پرور فرد, مانی, «مدل سازی دو فازه جریان – بستر برای آبشستگی موضعی پای لوله های انتقال فراساحلی»؛ پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران, دانشگاه علم و صنعت ایران، ۱۳۸۳.