

## شبیه سازی جریان آرام و مغشوش سیال حول دسته لوله ها و اثر عدد رینولدز

منصور طالبی<sup>۱</sup>

Mansour\_talebi@yahoo.com

### چکیده

وقتی جریان سیال از روی دسته لوله ها عبور می کند انرژی سیال به لوله ها انتقال پیدا می کند. نیروهای وارد شده به لوله ها از طرف سیال یکی از مهمترین مسائلی است که در دسته لوله ها وجود دارد. این مسئله باعث ایجاد مشکلات فراوان در سیستمهایی که شامل دسته لوله ها هستند، می شود. در کار حاضر ابتدا برای چک کردن برنامه و روش حل ابتدا جریان آرام حول یک استوانه داخل کانال بررسی می شود. این مسئله در دو عدد رینولدز ۲۰ (جریان دائم) و ۱۰۰ (جریان غیر دائم و پرپودیک) حل شده است. استوانه در مرکز کانال قرار ندارد. بنابراین وجود خارج از مرکزیت باعث می شود که نیروی لیفت وارد شده به استوانه از طرف سیال مخالف صفر شود. در ادامه جریان حول یک دسته لوله با بیست و چهار لوله بررسی می شود. بطوریکه تعداد شش ردیف لوله در جهت جریان که در هر ردیف چهار لوله قرار دارد. این مسئله در عدد رینولدز ۵۰ تا ۴۰۰۰۰ بررسی می شود و پروفیل های سرعت و فشار و الگوی جریان رسم می شود. در انتها جریان مغشوش حول یک دسته لوله با اعمال شرایط مرزی خاص و با استفاده از روش ادیهای بزرگ و برنامه نویسی موازی بررسی می شود. با انتخاب یک یا دو ردیف لوله و اعمال شرایط مرزی خاص، جریان روی دسته لوله ای با آرایش مستطیلی شبیه سازی خواهد شد. با حل جریان سیال و بدست آوردن پارامترهای جریان، میدان سرعت و همچنین نیروهای اعمال شده به لوله ها و تغییرات آنها بررسی شده است. نتایج حاصل، ضمن تطابق با نتایج تجربی جهت مطالعه و طراحی سیستم های شامل دسته لوله کاربرد فراوان دارد.

### کلید واژه:

جریان آرام و مغشوش سیال - شبیه سازی - دسته لوله ها - برنامه نویسی موازی

## ۱- مقدمه

دسته لوله ها در صنعت کاربرد فراوانی دارند. به عنوان مثال، می توان دسته لوله ها را در مبدلهای حرارتی، بویلرها، مولدهای بخار، سیستمهای لوله کشی زیر آب و صنایع دریایی مشاهده نمود. هر یک از این نمونه ها شامل سیالی است که از روی مجموعه ای از لوله ها که با آرایش خاصی کنار هم قرار دارند عبور می کند. ارتعاشات القاء شده به لوله ها<sup>۱</sup> (FIV) در اثر عبور سیال از روی آنها یکی از مهمترین مسائلی است که در دسته لوله ها رخ می دهد. این پدیده باعث بروز مشکلات فراوان در سیستمهایی که شامل دسته لوله ها هستند می شود. جریان حول دسته لوله ها معمولاً جریان متلاطم است. از مشخصه های جریان متلاطم نوسانات سه بعدی و غیر دائم سرعت و همچنین وجود ورتیسیتیته در جریان است. دامنه وسیعی از ادیها (مجموعه ذراتی از سیال با عملکرد مشابه در جریان)، در حد ابعاد مسئله تا ابعاد ریز، در حد طول کولومگروف<sup>۲</sup> در میدان جریان وجود دارد. از آنجا که این ادیها جرم، مومنتوم و انرژی را منتقل می کنند، باعث بروز نوسانات زیاد در جریان می شود که این امر خود باعث بروز نوسانات در نیروهای اعمالی به لوله ها می شود.

به علت هندسه خاص دسته لوله ها و ماهیت جریان متلاطم، نیروهای وارد بر لوله ها نوسان زیادی دارند. نوسان نیروهای هیدرودینامیکی می تواند باعث ارتعاش لوله ها شود. اگر فرکانس نوسان نیروها با فرکانس طبیعی لوله ها یکی شود، پدیده تشدید روی خواهد داد. همچنین نیروهای نوسانی می تواند باعث ایجاد خستگی در لوله ها، خصوصاً در محل های اتصال آنها شود. به تدریج این اتصالات از بین می رود و باعث می شود که لوله ها به اجبار از مدار خارج شوند. این امر باعث کاهش ظرفیت سیستم و در نهایت تعویض کل سیستم دسته لوله می شود. پیدوسیسی<sup>۱</sup> (مروری بر کارهای انجام شده روی دسته لوله ها و ارتعاش القائی توسط سیال روی آنها انجام داد. او نیروهای اعمال شده به لوله ها را بررسی و آنها را دسته بندی کرد. چهار آرایش مختلف از دسته لوله ها را می توان در نظر گرفت که عبارتند از آرایش هم راستا<sup>۳</sup>، شامل آرایش مربعی و آرایش مثلثی چرخشی و همچنین آرایش جابجا شده<sup>۴</sup>، شامل آرایش مربعی چرخش و آرایش مثلثی. در این تحقیق آرایش اول یعنی آرایش هم راستای مربعی مورد بررسی قرار گرفته است. البته

روند کار به گونه ای است که به راحتی قابل توسعه به آرایش های دیگر نیز می باشد. وور و عبدالرابطو<sup>[۲]</sup> جریان آب حول دسته لوله ها با آرایش مربعی و هم راستا را به صورت تجربی بررسی کردند. لوله ها دارای قطر ۲/۵ سانتیمتر و نسبت گام به قطر ۱/۵ بودند. طبق نتایج به دست آمده توسط آنها تا حدود عدد رینولدز ۴۰۰، جریان آرام است و گردابه هایی به صورت جفتی و متقارن بعد از لوله ها وجود دارند. با افزایش عدد رینولدز، جریان از حالت آرام خارج شده و به تدریج متلاطم می شود و گردابه ها غیر متقارن و در هم می شوند. نتایج برای عدد رینولدز ۳۰۰۰ جریانی کاملاً متلاطم نشان می داد. در جریان متلاطم، یک فشار با نوسانات تصادفی روی سطح لوله ایجاد می شود. نوسانات فشار هم مکانی است و هم زمانی. بنابراین هر لوله تحت تاثیر یک نیروی فشاری متغیر و تصادفی قرار می گیرد. مکانیزم تشدید ریزش گردابه ها نیز می تواند عکس عملهایی با دامنه خیلی زیادی در سیستم ایجاد کند. به طور کلی ریزش گردابه ها باعث اعمال نیروهای نوسانی به لوله ها شده که در صورت مشابه شدن فرکانس نوسانات با فرکانس طبیعی لوله ها، می تواند باعث تشدید شده و نیروهای با دامنه بزرگ را ایجاد کند.

از جمله کارهای تجربی دیگر که روی دسته لوله ها انجام شده توسط چن و همکارانش<sup>[۳]</sup> می باشد که روی هفت ردیف لوله (هفت لوله در هر ردیف) داخل کانال صورت گرفته است. آنها جریان با عدد رینولدز حدود ۱۰<sup>۴</sup> الی ۱۰<sup>۶</sup> را تست کردند. از جمله نتایج مهم به دست آمده توسط آنها که وور نیز آن را مشاهده نموده بود، ثابت بودن الگوی جریان از لوله سوم به بعد بود. به طور کلی اکثر مشخصه های جریان از لوله سوم به بعد تغییر چندانی نمی کنند. خصوصاً در اعداد رینولدز بالا این پدیده بیشتر خود را نشان می دهد. در این حالت اثر نوع جریان ورودی و تلاطم اولیه در عمق دسته لوله بسیار کم می شود و جریان با هر نوع تلاطم اولیه نهایتاً به شکل توسعه یافته می رسد. از این نکته در انتخاب تعداد لوله ها برای حل عددی می توان استفاده کرد به گونه ای که حل عددی با اعمال شرایط مرزی مناسب بتواند معیاری برای جریان حول دسته لوله ها باشد. کارهای تجربی دیگری نیز در این زمینه انجام شده است. از جمله کار اونگورن و زیادا<sup>[۴]</sup> که نیروهای اعمال شده بر یک دسته لوله مربعی توسط هوا را بررسی نمودند. و همچنین تیلور و همکارانش<sup>[۵]</sup> که جریان تک فازی و دوفازی حول دسته لوله ها را مطالعه

1- Fluid Induced Vibration (FIV)  
2- Kolmogorov Length Scale  
3- In-Line  
4- Staggered

PSD<sup>۷</sup> را برای نیروی لیفت یک دسته لوله شامل  $2 \times 2$  لوله بررسی کردند. نتایج حاصل نشان داد که جواب حاصل از حل دو بعدی نیز رضایتبخش است و می تواند به عنوان نتایج مناسبی برای پدیده های متلاطم سه بعدی در مسئله مورد بررسی آنها به کار رود. طبق نتایج آنها منحنی به دست آمده برای PSD نیروی لیفت مربوط به دو بعدی و سه بعدی تفاوت چندانی با هم نداشت و حتی حل دو بعدی نیز با نتایج تجربی مطابقت بسیار خوبی داشت. جریان متلاطم در واقع یک پدیده سه بعدی است. برای حل جریانهای پیچیده و مشکل که در هندسه های پیچیده قرار دارند از روشهای سه بعدی استفاده می شود. اما کاوامورا و یا سو [۱۰] نشان دادند که گردابه پشت استوانه در جریان عرضی خیلی نزدیک به حالت دو بعدی می تواند باشد. برازا و همکارانش [۱۱] نیز ابراز داشتند که منشأ این گردابه ها دو بعدی است. گذشته از این تحلیل جریان تراکم پذیر برای ماخ کمتر از ۰/۶ نشان می دهد که فرم دو بعدی در شدت تلاطم غالب است [۱۲]. شکل اولیه ( اصلی ) تلاطم در جریان ناحیه گردابه ها می تواند با دقت خوبی توسط تحلیل دو بعدی نشان داده شود. تحلیل ها توسط کاتو و ایگگواوا نشان داد که یک سری نوسانات فشار در امتداد محور طولی در جریان حول استوانه وجود دارد [۱۳]. این نوسانات فشار که بعد از جدائی لایه مرزی روی می دهد در تحلیل دو بعدی قابل پوشش نمی باشد در نتیجه بعضی از نتایج عددی از حل های دو بعدی، به خصوص نیروهای لیفت و درگ امکان دارد از نتایج تجربی کمی تفاوت داشته باشد. با این حال نیروهای لیفت و درگ را می توان توسط حل میدان جریان در محدوده دقت خوبی توسط حل دو بعدی به دست آورد.

از جمله کارهای عددی جالبی که بر روی دسته لوله ها انجام شده است کار بل و همکارش [۱۴] می باشد. آنها با توجه به شکل پرئودیک جریان غیر دائم و آرام و با استفاده از فقط دو لوله و اعمال شرایط مرزی و اولیه مناسب نتایج خوبی برای جریان آرام و پرئودیک حول دسته لوله ها به دست آوردند. البته باید به این نکته توجه نمود که جریان متلاطم دارای نوسانات و پیچیدگی بیشتری است و استفاده از یک یا دو لوله برای حل عددی در جریان متلاطم مناسب نمی باشد. بنابراین باید در این مورد توجه بیشتری نمود. با توجه به نتایج تجربی حول دسته لوله ها که جریان حول لوله سوم به بعد بدون تغییر است، به نظر می رسد تعداد چهار یا پنج عدد

کارهای عددی که روی دسته لوله ها انجام شده است، معمولاً به دو دسته تقسیم می شوند. یک دسته برای بررسی شکل کلی جریان سیال می باشد و تعداد زیادی لوله را در نظر گرفته، جریان سیال حول آنها را حل می کنند. در این نوع حل جزئیات جریان بین لوله ها مد نظر نمی باشد. بنابراین شبکه حل بسیار ریز نیاز نمی باشد. دسته دیگر بیشتر جزئیات جریان را مورد بررسی قرار می دهند و بنابراین باید شبکه حل به اندازه کافی ریز باشد و یک روش حل عددی قوی و همچنین ابزار کامپیوتری پیشرفته مورد نیاز است. سوپر کامپیوترها در این مورد ابزار مناسبی برای انجام محاسبات عددی مورد نیاز می باشند.

فردی و همکارانش [۶] جریان حول لوله های مولد بخار را به صورت دو بعدی و با استفاده از روش المان محدود و مدل اسمگورینسکی و همچنین تکنیک حل متوالی<sup>۵</sup> حل کردند. آنها خطوط جریان و بردارهای سرعت را برای یک دسته لوله با آرایش هم راستا و تعداد  $7 \times 7$  عدد لوله که داخل یک کانال قرار داشت به دست آوردند. به علت اینکه تعداد لوله ها زیاد فرض شده بود و شبکه حل به اندازه کافی ریز نبود، نهایتاً فقط شکل کلی میدان جریان به دست آمد و جزئیات جریان ( همچون نحوه تولید و ریزش گردابه ها و نیروهای اعمالی به لوله ها) بررسی نشد. بارسامیان و حسن [۷] جریان دو بعدی حول یک دسته لوله که در داخل کانال قرار داشت را با استفاده از کد GUST و سوپر کامپیوتر حل کردند. آنها چهار ردیف هفت تایی لوله را با استفاده از مدل اسمگورینسکی و مدل باردینا حل کردند و تغییرات زمانی نیروهای لیفت و درگ را بدست آوردند. نتایج مدل باردینا در مقایسه با مدل اسمگورینسکی خصوصاً در مورد منحنی های لیفت و درگ اختلاف چندانی نداشت. یاسین و همکارش [۸] نیز جریان حول دسته لوله ای شامل ۱۲ لوله را به صورت عددی حل کردند. آنها مسئله را به صورت دو بعدی و در چهار ردیف لوله با شبکه نسبتاً درشت حل کردند و بردارهای سرعت و خطوط جریان را برای دسته لوله ها رسم کردند. حل آنها با استفاده از کد GUST و همچنین با بهره بردن از سوپر کامپیوتر انجام شده بود.

یاسین و همکارش [۹] مقایسه ای بین حل دو بعدی و سه بعدی جریان حول دسته لوله ها انجام دادند. آنها جریان حول دسته لوله ها را با روش LES<sup>۶</sup> حل کردند و مقادیر

7- Power Spectral Density (PSD)

5- Segregated Solution Technique

6- Large Eddy Simulations (LES)

سازی معادلات از روش حجم محدود استفاده می شود.

## ۲-۱- معادلات مومنتوم

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial u_i u_j}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j \partial x_j} \quad (1)$$

## ۲-۲- معادله پیوستگی

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (2)$$

که در آنها  $u_i$ ،  $u_j$ ، مولفه های سرعت،  $x$ ،  $y$ ، مولفه های مختصات،  $p$ ، فشار،  $\rho$ ، دانسیته و  $\nu$  ویسکوزیته سیال است. در بررسی جریان مغشوش از روش ادی های بزرگ برای مدل کردن اغتشاشات استفاده شده است.

در روش LES هر متغیر جریان مثل  $f$  به دو مولفه فیلتر شده ( $\bar{f}$ ) و نوسانی ( $f'$ ) تفکیک می شود:

$$f(x, t) = \bar{f}(x, t) + f'(x, t) \quad (3)$$

$f$  می تواند هر یک از متغیرهای جریان باشد.  $\bar{f}$  بخشی از  $f$  است که حل می شود و شامل ادیهای که ابعادشان بزرگتر از ابعاد شبکه است (قسمت فیلتر شده متغیرهای جریان)، می شود.  $f'$  بخشی از متغیر  $f$  است که مدل می شود و مربوط به ادیهای جریان متلاطم است که ریزتر از ابعاد شبکه<sup>۸</sup> هستند و شبکه حل نمی تواند آنها را بگیرد. برای به دست آوردن معادلات جریان برای ادیهای بزرگ از طریق انتگرال گیری معادلات حاکم بر جریان بر حسب ابعاد هندسی کوچک و فیلتر کردن معادلات جریان در فرکانسهای بالا در فضای فوریه ادیهای کوچک جریان جدا خواهد شد. با اعمال فیلتر به معادلات ناویراستوکز و جدا کردن ادیهای بزرگ و کوچک معادلات فیلتر شده یا همان معادلات ادیهای بزرگ به صورت زیر خواهد شد:

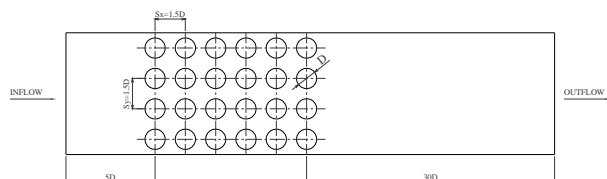
$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial (\bar{u}_i \bar{u}_j)}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 \bar{u}_i}{\partial x_j \partial x_j} - \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} \quad (4)$$

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (5)$$

عبارت  $\tau_{ij}$  معرف خواص ادیهای ریز است و به سه بخش تقسیم می شود. بخش اول تنش لئونارد<sup>۹</sup> ( $L_{ij} = \bar{u}_i \bar{u}_j + \bar{u}_i' \bar{u}_j'$ ) است که بیان کننده اثر ادیهای بزرگ

لوله در یک ردیف تعداد مناسبی باشد. البته باید شرایط مرزی مناسب در این مورد اعمال شود. دسته لوله ها معمولا شامل تعداد زیادی لوله هستند. در این تحقیق با در نظر گرفتن تعداد شش ردیف لوله که در هر ردیف چهار لوله وجود دارد، دسته لوله ها مدل می شوند. البته در این حالت لوله های وسط را می توان به عنوان معیاری از لوله های یک دسته لوله فرض کرد. هرچه تعداد لوله ها بیشتر باشد این شبیه سازی دقت بیشتر دارد. اما باید به این نکته توجه کرد که افزایش تعداد لوله ها باعث افزایش زمان و هزینه محاسبات می شود و علاوه بر آن در جریانهای با عدد رینولدز اصولا امکان بالا بردن حجم دامنه محاسبات محدود می شود.

در کار حاضر علاوه بر بررسی هندسه فوق برای مدل کردن جریان مغشوش حول دسته لوله ها، یک دسته لوله با اعمال شرایط مرزی خاص برای نزدیک شدن به حالت دسته لوله ها نیز بررسی شده است. جریان اشاره شد با در نظر گرفتن یک ردیف لوله با تعداد پنج عدد لوله که با آرایش مربعی (هم راستا) قرار دارند، جریان سیال و اثرات آن روی لوله ها مشخص شده است. شرایط اولیه و مرزی بگونه ای اعمال شده که شرایط دسته لوله بوجود آید. معادلات ناویراستوکز روی شبکه غیر متعامد حل می شود. معادلات به روش المان محدود روی شبکه هم مکان با دقت مرتبه دوگسسته سازی شده است. در شکل (۱) هندسه مسئله نشان داده شده است.



شکل (۱): هندسه کلی جریان حول دسته لوله ها (شامل ۲۴ لوله)

گام طولی و عرضی لوله ها برابر است. جریان ورودی با سرعت یکنواخت از سمت چپ وارد دسته لوله می شود و بعد از عبور از لوله ها از سمت راست خارج می شود.

## ۲ - معادلات حاکم و روش حل

جریان سیال مورد بررسی، دو بعدی و تراکم ناپذیر، بدون حضور نیروهای حجمی و با فرض خواص ثابت است. برای این جریان معادلات حاکم عبارتند از معادلات ناویراستوکس و معادله پیوستگی. معادلات حاکم روی شبکه حل گسسته سازی شده و به صورت یک دستگاه معادلات جبری در خواهند آمد. برای گسسته

روی ادیهای کوچک است. در صورتی که از روش مرتبه دو تفاضل محدود استفاده شود تنش لئونارد قابل صرفنظر کردن است چون با خطای قطع کردن<sup>۱۰</sup> هم مرتبه است [۱۵]. بخش دوم تنش عرضی ( $C_{ij} = \overline{u_i u_j'} + \overline{u_i' u_j}$ ) است و بیان کننده اثر ادیهای بزرگ و کوچک روی همدیگر است. بخش سوم تنش رینولدز ( $R_{ij} = \overline{u_i' u_j'}$ ) است که بیان کننده اثر ادیهای کوچک است و شامل جمله های نوسانی و تصادفی ادیهای کوچک است. این ترم معرف اثر اتلافی ادیهای کوچک روی ادیهای بزرگ است. با مشاهده معادله مومنتم فیلتر شده یا همان معادله مومنتم ادیهای بزرگ، مشاهده می شود که تمام جملات بیان کننده خواص ادیهای بزرگ است به جز جمله تنش اشلهای کوچک ( $\tau_{ij}$ ). این جمله باید بر حسب پارامترهای مربوط به ادیهای بزرگ مدل شود تا بتوان معادله را حل کرد. گر چه تنش اشلهای کوچک به سه بخش ذکر شده تقسیم می شود، ولی معمولاً در هنگام مدل کردن باتوجه به خواص این سه جمله یک مدل کلی برای آن بیان می شود.

### ۲-۳- مدل اسمگورینسکی

معروفترین مدل، مدل ادی ویسکوزیته اسمگورینسکی است [۱۶]. در این مدل با توجه به فرضیه بوزینسک<sup>۱۱</sup> قسمت غیر ایزوتروپیک تنش  $\tau_{ij}$  توسط یک ویسکوزیته متلاطم به میدان کرنش ادیهای بزرگ ( $\overline{S}_{ij}$ ) مربوط می شود.

$$\tau_{ij} - 1/3 \tau_{KK} \delta_{ij} = -2\nu_j \overline{S}_{ij} \quad (۶)$$

بخش باقیمانده و ایزوتروپیک تنش ( $\tau_{KK}/3$ ) در جمله فشار قرار داده می شود. در رابطه فوق تنسور تغییر شکل به صورت زیر بر حسب سرعتهای ادیهای بزرگ قابل نوشتن است:

$$\overline{S}_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial \overline{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \overline{u}_j}{\partial x_i} \right) \quad (۷)$$

ادی ویسکوزیته نیز بر حسب اشل طولی بدین صورت تعریف می شود.

$$\nu_j = l^2 |\overline{S}| \quad (۸)$$

که در آن

$$|\overline{S}| = \sqrt{2\overline{S}_{ij}\overline{S}_{ij}} \quad (۹)$$

می باشد.  $l$  اشل طولی مربوط به ادیهای کوچک است و به صورت ضربی از ابعاد شبکه  $\Delta$  بیان می شود:

$$l = C_s \Delta \quad (۱۰)$$

که در آن  $C_s$  (ثابت اسمگورینسکی) کنترل کننده مقدار تلاطم است و به نوع جریان وابسته است. این ضریب معمولاً بین ۰/۰۶۵ الی ۰/۲۵ بکار برده شده است [۱۷]. مقدار تئوری آن برابر با ۰/۱۶ محاسبه شده است.

### ۲-۴- مدل تشابه ابعادی<sup>۱۲</sup>

مدل اسمگورینسکی اثر تنش های عرضی را به خوبی مدل نمی کند. جمله تنش عرضی معرف اثر ادیهای کوچک و بزرگ روی همدیگر است. به هر حال مدل کردن این جمله با تنشهای ادیهای کوچک مشکل است چون ماهیت آنها با یکدیگر تفاوت دارد. جمله تنش عرضی مربوط به تقابل ادیهای ریز و درشت روی همدیگر و نیروهای بین آنها می شود، در حالی که جمله تنشهای ادیهای ریز بیان کننده اثر اتلافی<sup>۱۳</sup> ادیهای ریز روی میدان جریان فیلتر شده است [۱۸]. با استفاده از مدل تشابه ابعادی باردینا و اضافه کردن اثر تنشهای عرضی در مدل می توان به نتایج دقیقتری دست یافت [۱۹]. ایده مدل تشابه ابعادی بر این اساس است که تقابل بین ادیهای بزرگ و کوچک مشابه است با تقابل بین کوچکترین ادی از ادیهای بزرگ با بزرگترین ادی از ادیهای کوچک. بنابراین مدل تشابه ابعادی با توجه به این مفهوم و تشابه بین این دو اشل به صورت زیر بیان می شود:

$$u_i' = (u_i - \overline{u}_i) \approx (\overline{u}_i - \overline{\overline{u}}_i) \quad (۱۱)$$

$$\tau_{ij} = C_B (\overline{u}_i - \overline{\overline{u}}_i)(\overline{u}_j - \overline{\overline{u}}_j) = C_B (\overline{u}_i \overline{u}_j - \overline{\overline{u}}_i \overline{\overline{u}}_j) \quad (۱۲)$$

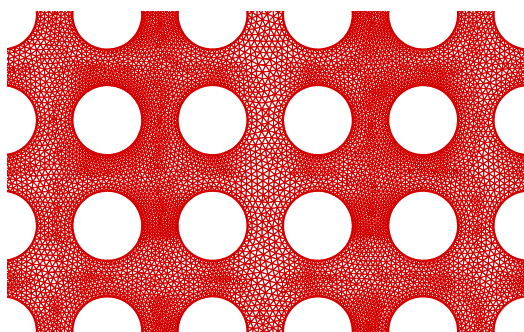
که در آن  $\overline{\overline{u}}_i$  یعنی دوبار فیلتر کردن سرعت و  $C_B$  ثابت باردینا است.

### ۲-۵- مدل ترکیبی<sup>۱۴</sup>

روش فوق به اندازه کافی خاصیت اتلافی ندارد. بنابر این با ترکیب آن با مدل ادی ویسکوزیته اسمگورینسکی مدل ترکیبی حاصل می

لذا حل عددی چنین جریانهایی می تواند راه مناسبی برای بدست آوردن مشخصه های جریان باشد. از طرفی چون دسته لوله ها شامل تعداد زیادی لوله به صورت مجتمع هستند، حل کامل چنین هندسه ای بسیار سنگین و زمانبر خواهد بود. این مشکل زمانی که جریان متلاطم با اعداد رینولدز بالا و مدل های LES مد نظر باشد تشدید می شود. زیرا حافظه و زمان بسیار زیادی برای حل برنامه لازم است. از اینرو با در نظر گرفتن تعداد کمتری لوله و کوچک کردن ناحیه حل امکان بررسی دقیقتر جریان میسر می شود. البته باید تعداد لوله ها و شرایط مرزی بگونه ای باشد که با فرضیات مناسب بتوان نتایجی مطابق با نتایج تجربی بدست آورد. در اینجا ابتدا جریان آرام حول یک سری لوله مطابق شکل (۱) بررسی می شود. در این جریان تعداد شش ردیف لوله در امتداد جریان و در هر ردیف، چهار لوله وجود دارد. گام طولی و عرضی آرایش لوله ها برابر با  $D/5$  است. کل سیستم دسته لوله در داخل یک کانال قرار داده شده است که قسمت ورودی  $D/5$  و قسمت خروجی حدود  $30D$  طول دارد. بدین صورت جریان در خروجی بگونه ای است که می توان شرط مرزی خروجی را اعمال کرد. و گرادیان متغیرها را در خروج صفر فرض کرد. شبکه حل به صورت بی سامان است و البته در نزدیکی سطوح ریزتر شده است. عدد رینولدز بر مبنای سرعت بالا دست از  $50$  شروع شده و زیاد می شود.

شکل (۲) نمونه ای از شبکه حل را نشان می دهد. در شکل های (۳) تا (۵) به ترتیب کانتورهای فشار، خطوط جریان و بردارهای سرعت برای عدد رینولدز  $50$  و در شکل (۶) بردارهای سرعت برای عدد رینولدز  $4000$  رسم شده است. همچنین شکل های (۷) و (۸) بردارهای سرعت را برای اعداد رینولدز  $200$  و  $400$  نشان می دهند.



شکل (۲): بخشی از شبکه حل برای جریان حول دسته لوله ها

شود که هم خاصیت اتلافی دارد و هم اثرات تنشهای عرضی را در خود دارد:

$$\tau_{ij} = B_{ij} - 2\nu_i \overline{S_{ij}} \quad (13)$$

جمله  $B_{ij}$  بیان کننده اثرات تنش لئونارد و تنش عرضی است و به صورت زیر بیان می شود.

$$B_{ij} = -\frac{\Delta^2}{12} \frac{\partial u_i}{\partial u_k} \frac{\partial u_j}{\partial u_k} \quad (14)$$

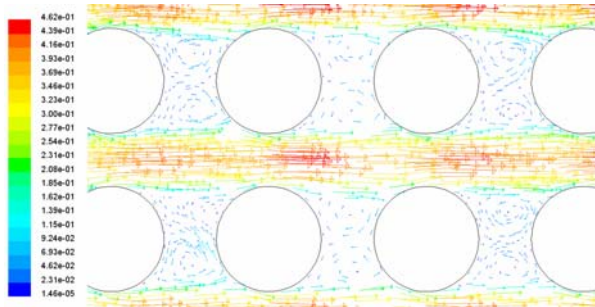
در این حالت ضریب  $C_s$  برابر با  $0.12$  است. مدل فوق علاوه بر خاصیت اتلافی، اثرات ادیهای کوچک روی ادیهای بزرگ و بالعکس را نیز اعمال می کند و در حقیقت تنش های عرضی را در نظر می گیرد. در کار حاضر جریان حول دسته لوله ها با استفاده از مدل های اسمگورینسکی و مدل ترکیبی (به خاطر در نظر گرفتن تنشهای عرضی) بررسی شده است. و نتایج حاصل با یکدیگر و با نتایج تجربی موجود مقایسه شده است.

### ۳- نتایج

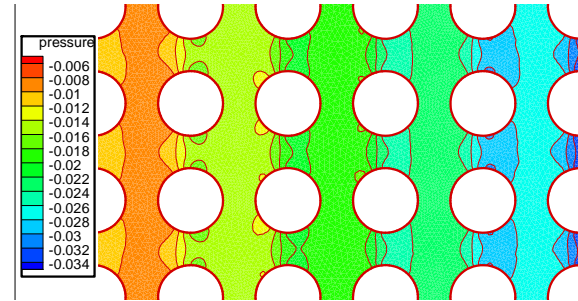
ابتدا برای چک کردن برنامه کامپیوتری جریان حول یک استوانه با مقطع دایره ای که داخل یک کانال به طور نامتقارن قرار دارد بررسی شده است (فاصله استوانه با لبه بالایی و پایینی کانال متفاوت است). این مسئله در عدد رینولدز  $20$  (جریان دائم) و  $100$  (جریان غیر دائم و پرودیگ) مطالعه شده است. ضمناً تاریخچه زمانی جریان و خواص غیر دائم آن نیز بررسی شده و با نتایج تجربی موجود مقایسه شده است. نتایج این قسمت در مرجع [۲۰] آمده است. در ادامه جریان حول یک دسته لوله با  $24$  عدد لوله و اثر افزایش عدد رینولدز روی الگوی جریان بررسی شده است. در انتها نیز جریان مغشوش سیال روی یک دسته لوله با شرایط مرزی خاص با استفاده از روش ادیهای بزرگ و برنامه نویسی موازی بررسی شده است.

#### ۳-۱- جریان حول دسته لوله ها

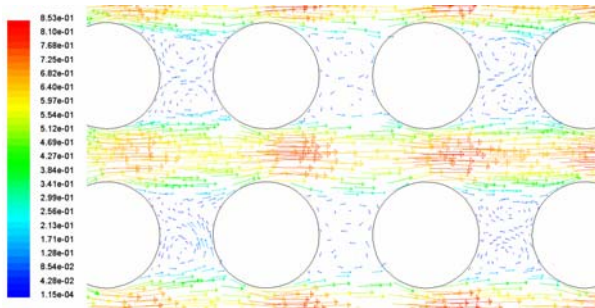
بعد از اینکه کارایی کد برای حل مسائل غیر دائم موازی و همچنین هندسه های غیر متعامد بررسی شد، اکنون جریان متلاطم روی دسته لوله ها مورد بررسی قرار می گیرد. به علت پیچیدگی خاص جریان روی دسته لوله ها معمولاً بررسی تجربی آنها مشکل است.



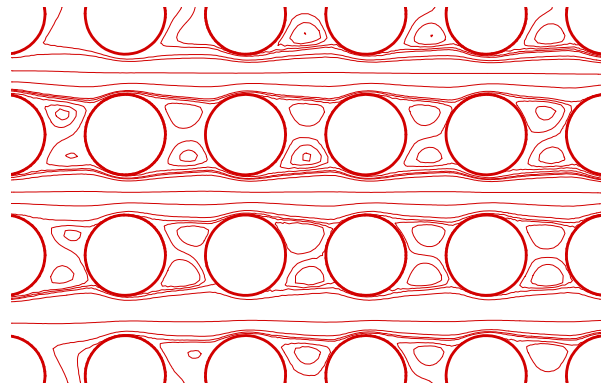
شکل(۷): بردارهای سرعت ( Re = 200 )



شکل(۳): کانتورهای فشار ( Re = 50 )



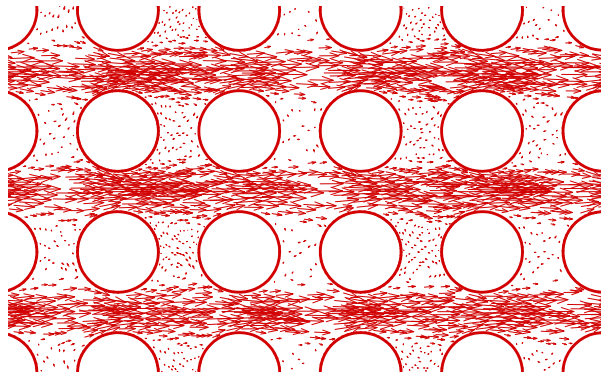
شکل(۸): بردارهای سرعت ( Re = 400 )



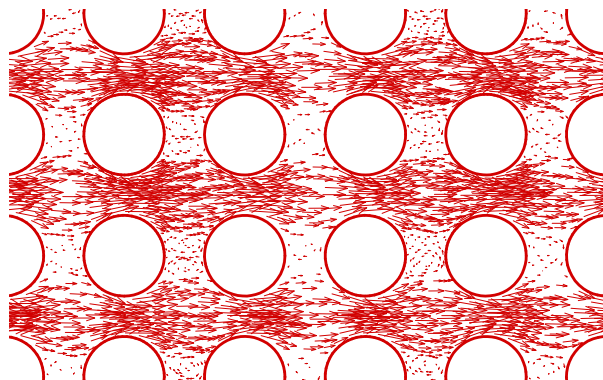
شکل(۴): خطوط جریان ( Re = 50 )

همانطور که ملاحظه می شود با افزایش عدد رینولدز جریان از حالت آرام و تقریباً متقارن در پشت استوانه ها به حالت غیر متقارن و نوسانی میل می کند. در اعداد رینولدز کم ( تا ۱۵۰ ) پشت استوانه ها دو عدد گردابه متقارن بوجود می آید. هرچه عدد رینولدز زیاد شود گردابه ها از حالت متقارن خارج شده و نامتعالی می شوند. در عدد رینولدز حدود ۱۵۰ گردابه ها به سمت حالت غیر دائم میل می کنند. و در عدد رینولدز حدود ۵۰۰ گردابه ها تقریباً حالت مغشوش دارند. در اعداد رینولدز بالاتر جریان پشت استوانه ها کاملاً مغشوش می باشد. (لازم به یاد آوری است که در جریان حول یک استوانه جریان مغشوش در اعداد رینولدز بسیار بالاتری رخ می دهد).

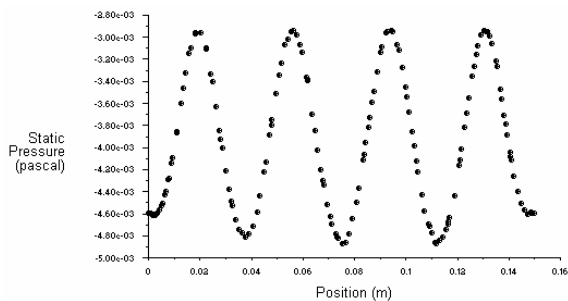
در شکل های (۹) و (۱۰) توزیع فشار در جلو و پشت لوله های ردیف اول رسم شده است. همانطور که ملاحظه می شود قبل از ردیف اول الگوی جریان کاملاً با داخل دسته لوله تفاوت دارد.



شکل(۵): بردارهای سرعت ( Re = 50 )

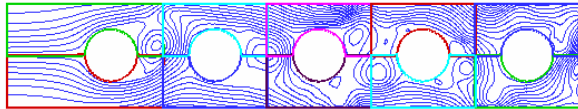


شکل(۶): بردارهای سرعت ( Re = 40000 )



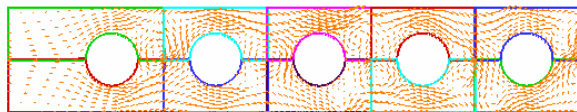
شکل(۹): توزیع فشار قبل از ردیف اول لوله ها

مسئله مشابه کار تجربی زیادا و اونگورن [۴] در نظر گرفته شده است تا بتوان نتایج عددی را با کار تجربی آنها مقایسه کرد. با این شرایط پیش بینی می شود که جریان اطراف لوله چهارم معیار خوبی برای مقایسه باشد.

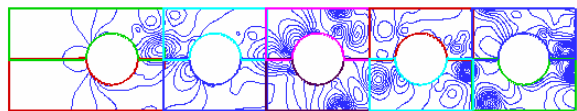


شکل (۱۳): خطوط جریان در ۰/۵ ثانیه

شکل (۱۳) خطوط جریان را در زمان  $t = 0.5$  (Sec) برای این مسئله نشان می دهد. ملاحظه می شود که گردابه هایی با اندازه های متفاوت در جریان وجود دارند. منحنی های بسته نشان دهنده محل گردابه ها است. در این نواحی فشار به صورت محلی کاهش می یابد. شکل (۱۴) بردارهای سرعت و شکل (۱۵) خطوط فشار ثابت مربوط به همین زمان را نشان می دهند.

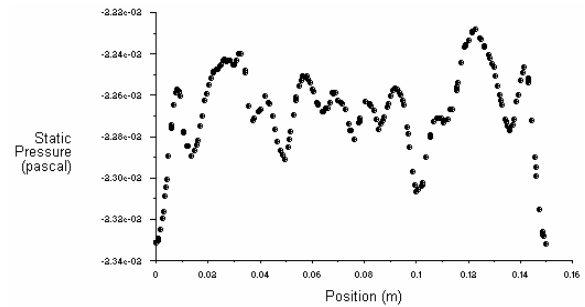


شکل (۱۴): بردارهای سرعت در ۰/۵ ثانیه



شکل (۱۵): خطوط فشار ثابت در ۰/۵ ثانیه

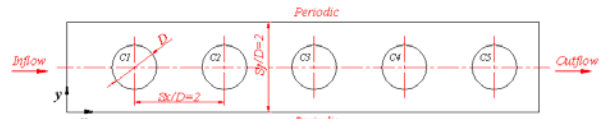
همانطور که ملاحظه می شود خطوط فشار ثابت و بردارهای سرعت بر هم عمود هستند. و ادیپها در نواحی گردابه ای پشت لوله ها<sup>۱۶</sup> مشاهده می شوند. در نواحی گردابه ای، همانطور که از خطوط فشار مشاهده می شود نوسانات فشار زیاد است. در قسمتهایی که خطوط جریان گردابه ای را نشان نمی دهند، خطوط فشار نیز نشان دهنده تغییرات یکنواخت فشار است و گرادیانهای شدید فشار وجود ندارد. در نقاط سکون<sup>۱۷</sup> روی لوله ها گرادیان فشار زیاد است و نیروی فشاری زیادی به لوله ها اعمال می شود. نقاط سکون را می توان با توجه به خطوط جریان و همچنین کانتورهای فشار مشاهده کرد. برای لوله اول به علت ماهیت جریان در جلوی لوله، نقطه سکون در جلوی لوله قرار دارد ولی برای لوله های بعدی نقطه سکون به سمت بالا و پایین تغییر مکان می دهد. در رابطه با الگوی جریان و پیگیری بهتر نحوه تولید، رشد و ریزش گردابه ها، خطوط جریان در ادامه



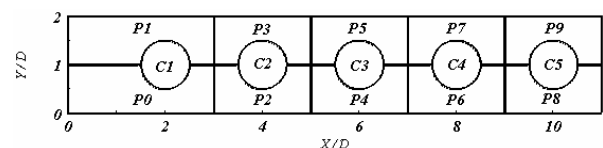
شکل (۱۰): توزیع فشار بعد از ردیف اول لوله ها

### ۲-۳- جریان مغشوش حول یک دسته لوله با روش ادیپهای بزرگ و برنامه نویسی موازی

با توجه به نتایج تجربی وور [۲] و چن و همکارانش [۳] و با ایده گرفتن از کار بل و همکارانش [۱۴] که با دو لوله جریان آرام را بررسی کرد، جریان حول یک دسته لوله با تعداد پنج عدد لوله در یک ردیف در نظر گرفته شده است. برای ناحیه بعد از لوله پنجم از سرعتهای بعد از لوله چهارم استفاده شده و در مورد فشار نیز با توجه به افت فشار در کل مسئله و یا در طول لوله چهارم، فشار بعد از لوله پنجم مشخص شده است. برای مرز بالایی و پایینی دسته لوله شرط پرودیگ اعمال می شود. در شکل (۱۱) هندسه کلی و همچنین شرایط مرزی آن نشان داده شده است. برای حل موازی از ده عدد پردازنده استفاده شده است. تقسیم بندی ناحیه حل برای حل موازی در شکل (۱۲) نشان داده شده است.



شکل (۱۱): هندسه کلی و شرایط مرزی برای حل موازی جریان حول دسته لوله ها



شکل (۱۲): دامنه حل و تفکیک آن به ده زیر دامنه برای حل موازی جریان حول دسته لوله ها

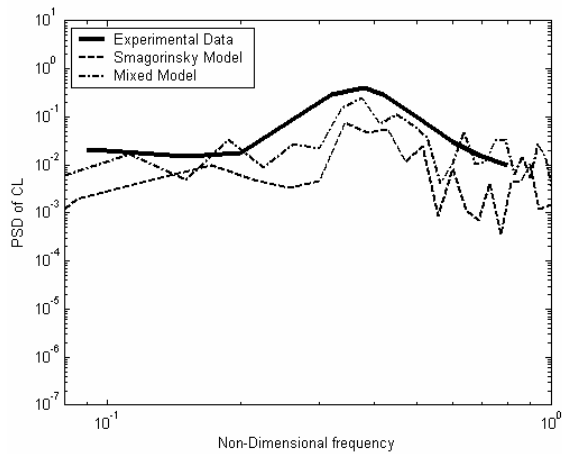
کل ناحیه حل شامل  $62 * 702$  نقطه است و در ناحیه بین دو لوله ریزتر از نواحی دیگر است. محاسبات هر زیر دامنه توسط یک پردازنده انجام می شود و اطلاعات مورد نیاز در حین محاسبات بین پردازنده ها مبادله می شود. قطر لوله ها ۲۰ میلیمتر و گام طولی و عرضی برابر با ۲ است. عدد رینولدز بر مبنای قطر لوله ها و سرعت گپ<sup>۱۵</sup> (سرعت متوسط بین لوله ها)، برابر با ۵۳۳۰۰ است. شرایط

16- Wake  
17- Stagnation Point.

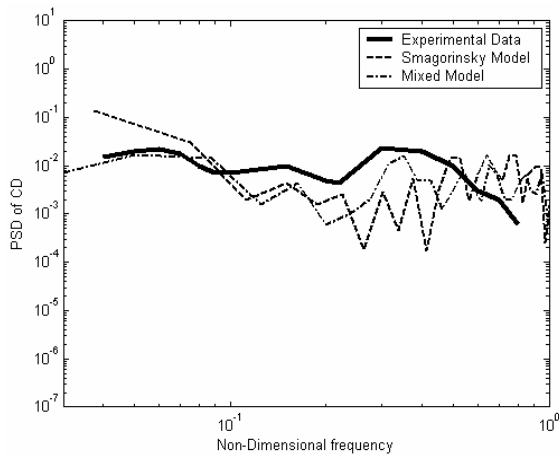
15- Gap Velocity



خود می گذارد به جای یک فرکانس مشخص در حقیقت یک دامنه فرکانسی از نوسانات وجود دارد. همانطور که ذکر شد به علت ماهیت جریان حول دسته لوله ها وتلاطم موجود در آن، نوسانات موجود در نیروهای لیفت و درگ پررودیک نیست. بنابراین نمی توان فرکانس مشخصی را برای نوسانات مشاهده کرد. برای اینکه بتوان چگونگی مشاهده نمود منحنی توزیع طیفی توانی<sup>۱۸</sup> نیروهای لیفت و درگ بر حسب فرکانس بدون بعد شده برای لوله چهارم با استفاده از دو مدل اسمگورینسکی و ترکیبی در شکل های (۱۸) و (۱۹) رسم شده است. در این شکل ها نتایج تجربی زیاده و اونگورن [۴] نیز آورده شده است. برای بدست آوردن منحنی های PSD از بسط فوری در فضای فرکانسی استفاده شده است. همانطور که از منحنی ها مشاهده می شود نتایج مدل ترکیبی به نتایج تجربی نزدیکتر است.

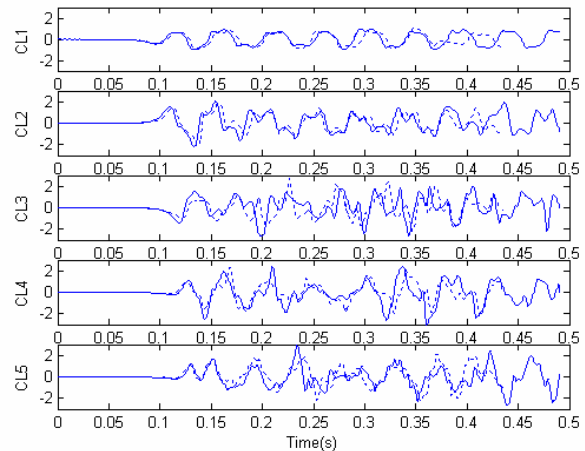


شکل (۱۸): تغییرات PSD بر حسب فرکانس بدون بعد برای نیروی لیفت لوله چهارم مقایسه با نتایج تجربی اونگورن و زیاده [۴]

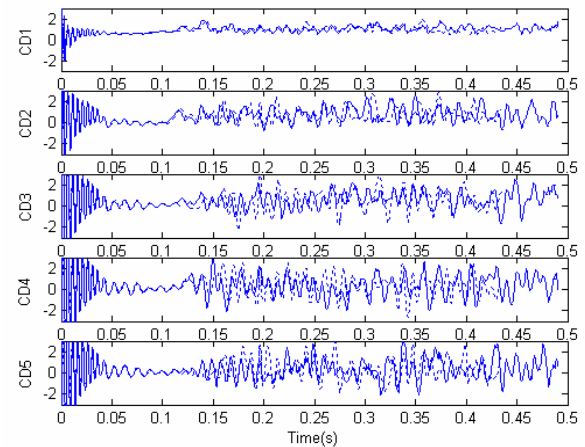


شکل (۱۹): تغییرات PSD بر حسب فرکانس بدون بعد برای نیروی درگ لوله چهارم (مقایسه با نتایج تجربی اونگورن و زیاده [۴])

مطالب بیشتری ذکر خواهد شد. برای بررسی اثر جریان روی لوله ها، نیروهای فشاری و اصطکاکی اعمال شده به تک تک لوله ها محاسبه شده است. برای هر لوله تغییرات زمانی مولفه x (نیروی درگ) و مولفه y (نیروی لیفت) مربوط به نیروهای فشاری و اصطکاکی محاسبه شده و ضرایب لیفت و درگ بدست آمده اند. شکل های (۱۶) و (۱۷) ضرائب لیفت و درگ حاصل را نشان می دهد. در این شکل ها خطوط پیوسته مربوط به مدل ترکیبی و خط چین مربوط به مدل اسمگورینسکی است.



شکل (۱۶): تغییرات ضریب نیروی لیفت روی لوله ها مقایسه روش اسمگورینسکی (خط چین) و روش ترکیبی (خط پر)



شکل (۱۷): تغییرات ضریب نیروی درگ روی لوله ها مقایسه روش اسمگورینسکی (خط چین) و روش ترکیبی (خط پر)

همانطور که مشاهده می شود تغییرات نیروهای اعمال شده به لوله ها بر خلاف جریان حول یک استوانه دارای یک فرکانس مشخص نیست. در جریان حول یک استوانه معمولا جریانی پررودیک و منظم وجود دارد در حالی که در جریان حول دسته لوله ها به علت ماهیت جریان و اثری که هر لوله روی لوله های اطراف

نتایج حاصله قابل استفاده برای بررسی پدیده ارتعاش دسته لوله ها توسط سیال و همچنین طراحی و اصلاح وضعیت کارکرد دسته لوله ها در سیستم هایی چون مبدل های حرارتی، بویلرهاست.

#### ۵- تشکر و قدردانی

این مقاله از نتایج طرح پژوهشی با عنوان: "شبیه سازی عددی جریان سیال حول دسته لوله ها با آرایش مستطیلی و اثر عدد رینولدز"، که در دانشگاه آزاد واحد مجلسی انجام شده، استخراج شده است. جا دارد از ریاست محترم و معاونت محترم پژوهشی دانشگاه آزاد اسلامی واحد مجلسی تشکر و قدردانی کنم.

#### ۶- مراجع

- [1] Paidoussis, M. P., "A Review of Flow-Induced Vibration in Reactor and Reactor Components", Nuclear Engineering.
- [2] Weaver, D. S. and Abd-Rabbo, A., "A Flow Visualization Study of a Square Array of Tubes in Water Cross Flow", Transaction of the ASME, Vol. 107, 1985, pp. 354-363.
- [3] Chen S. S. and Jendrzeczyk J. A., "Fluid Excitation Forces Acting on a Square Tube Array", J. of Fluid Engineering, Vol. 109, 1987, pp. 415-423.
- [4] Oengoeren, A. and Ziada, S., "Unsteady Fluid Forces Acting On a Square Tube Bundle in Air Cross-Flow", Proc. Sympo. Flow Induced Vibration and Noise, 230, 1992, pp. 55-74.
- [5] Taylor C., Pettigrew M., Axisa F. and Villard B., "Experimental Determination of Single and Two Phase Cross Flow Induced Forces on Tube Rows", Flow Induced Vibration, Vol. 104, 1988, pp. 31.
- [6] Freddie J., Davis Jr. and Y. A. Hassan, "A two-Dimensional Finite Element Method Large Eddy Simulation for Application to Turbulent Steam Generator Flow", J. of Nuclear Technology, Vol. 106, 1994, pp. 83-99.
- [7] Barsamian H. R. and Y. H. Hassan, "Large Eddy Simulation of Turbulent Crossflow in Tube Bundles", Nuclear Engineering and Design, Vol. 172, 1997, pp. 103-122.
- [8] Yassin, A. H. and Weal, A. I., "Turbulent Prediction in Two-Dimensional Bundle Flows Using Large-

در دسته لوله ها برای جلوگیری از ارتعاش و بروز پدیده تشدید، باید تدابیری اندیشیده شود تا فرکانس ریزش گردابه ها به فرکانس طبیعی لوله ها نزدیک نشود. در طراحی مبدلها اگر نسبت فرکانس ریزش گردابه ها به فرکانس طبیعی لوله ها بیشتر از ۰/۵ شود، احتمال ایجاد ارتعاش ناشی از گردابه ها وجود دارد. برای جلوگیری از ارتعاش لوله ها باید فرکانس طبیعی آنها را افزایش داد و یا فرکانس محرک را کاهش داد. این کار با استفاده از روشهای مختلف انجام می گیرد. برخی از این روشها عبارتند از: کاهش سرعت سیال عبوری از روی لوله ها، تغییر جنس و ضخامت لوله ها و حتی تغییر آرایش لوله ها.

از منحنی لگاریتمی توزیع فرکانسی PSD نیروهای لیفت و درگ مشاهده می شود که نوسانات دارای یک طیف فرکانسی وسیع است. این طیف فرکانسی ناشی از اثرات تلاطم جریان است. در حقیقت پدیده ریزش گردابه ها به یک سری فرکانس مشخص مربوط است ولی پدیده ارتعاش بواسطه تلاطم به طیف فرکانسی کلی موجود وابسته است.

#### ۴- جمع بندی نتیجه گیری

در این مقاله جریان متلاطم حول دسته لوله ها بررسی شد. معادلات حاکم به روش حجم محدود و روی شبکه حل جداسازی شد و توسط روش برنامه نویسی موازی و استفاده از یک سری کامپیوتر به صورت موازی حل شد. برای مدل کردن اغتشاشات جریان از روش ادی های بزرگ استفاده شد. همچنین اثر افزایش عدد رینولدز و روند تغییرات جریان از آرام به مغشوش بررسی شد و نتایج قابل توجهی بدست آمد. مدل ترکیبی در مدل های ادی های بزرگ به خاطر منظور کردن اثر ادیهای ریز و درشت روی یکدیگر دقت بیشتر دارد. خطوط جریان، خطوط فشار ثابت و بردارهای سرعت به همراه تغییرات زمانی نیروهای اعمال شده به لوله ها بدست آمده است. شکل جریان و نحوه تولید، رشد و ریزش گردابه ها در پشت لوله ها با منحنی های مربوط به تغییرات نیروهای اعمال شده به لوله ها مقایسه شده است. با توجه به شکل جریان حول لوله ها مشاهده می شود که جریان حول لوله اول با بقیه تفاوت زیادی دارد و با حرکت به سمت داخل دسته لوله شکل کلی جریان به سمت یک حالت توسعه یافته میل می کند، بطوری که جریان حول لوله های سوم و چهارم به بعد تغییر چندانی ندارد. منحنی های PSD برای نیروهای اعمال شده به لوله ها نشان دهنده ماکزیمم هایی است که به ریزش گردابه ها مربوط می شود. در عین حال این منحنی ها نشان دهنده وجود یک دامنه فرکانسی وسیع می باشد که مربوط به تلاطم جریان است.

- [15] Shaunan, S., Ferziger, J. H. and Reynolds, W. C., "Numerical Simulation of Turbulence in the Presence of Shear", TF-6, Stanford University Report, 1975.
- [16] Smagorinsky, J., "General Circulation Experiments with the Primitive Equations, I, The Basic Experiment", Mon. Weather Rev., Vol. 91, 1963, pp. 99-165.
- [17] Hassan Y. A. and Barsamian, H. R., "New-Wall Modeling for Complex Flows Using the Large Eddy Simulation Technique in Curvilinear Coordinates", International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 44, 2001, pp. 4009-4026.
- [18] Lee, S. Y., "A Study and Improvement of Large Eddy Simulation (LES) for Practical Application", Ph.D. Dissertation, Texas A and M University, TX. 1992.
- [19] Bardina, J., Ferziger, J. H. and Reynolds, W. C., "Improved Subgrid-Scale Models for Large-Eddy Simulation", AIAA paper, Vol. 80, 1980, pp. 1357.
- [20] طالبی، م، طرح پژوهشی با عنوان: " شبیه سازی عددی جریان سیال حول دسته لوله ها با آرایش مستطیلی و اثر عدد رینولدز"، دانشگاه آزاد واحد مجلسی.
- Eddy Simulation", J. of Nuclear Technology, Vol. 119, 1997, pp. 11-28.
- [9] Yassin, A. H. and Lee, S., "Large-Eddy Simulation of Three-Dimensional Bundle Flows", Termal Hydrallice-General-1, Texas A&M.
- [10] Kawamura, K. and Yasuo, A., "Turbulenc-Induced Vibration of Tube Bundle In Cross and Parallel Jet Mixed Flow", J. Pressure Vessel Technol., Vol. 111, 1989, pp. 352.
- [11] Braza, M., Chassing, P. and Haminh, H., "Prediction of Large-Scale Transition Features in the Wake of the Circular Cylinder", Phys. Fluids, A-2, 1990, pp. 1461.
- [12] Sandham, N. D. and Reynolds, W. C., "Compressible Mixing Layer: Liner Theory and Direct Simulation", AIAA J., Vol. 28, 1990, pp. 616.
- [13] Kato, C. and Ikegawa, M., "Large-Eddy Simulation of Unsteady Turbulent Wake of a Circular Cylinder, Using the Finite Element Method:, Advances in Numerical Simulation of Turbulent Flow", Fluid Engineering Division, Vol. 117, ASME 1991, pp. 49.
- [14] Beale S. B. and Spalding D. B., "A Numerical Study of Unsteady Fluid Flow in In-Line and Staggered Tube Bank", J. of Fluids and Structures, Vol. 13, 1999, pp. 723-754.