ای برتر از خیال و قیاس و گمان و وهم
و از هرچه گفته اند و شنیدیم و خوانده ایم

مجلس تمام گشت و به آخر رسید عمر
ما همچنان در اوّل وصف تو مانده ایم

"سعدی"

دانشگاه تربیت مدرس
دانشکده فنی مهندسی

**رساله دکتری**

مهندسی مکانیک-تبدیل انرژی

# توسعهٔ روش‌های SPH و MPS
# برای
# شبیه‌سازی عددی ارتعاشات ناشی از جریان اطراف یک استوانه دایروی

دانشجو:

**علی طیبی**

استاد راهنما:

**دکتر بهزاد قدیری دهکردی**

استاد مشاور:

**دکتر مهرداد تقی‌زاده منظری**

بهار ۱۳۹۲

بسمه تعالی

# تاییدیه اعضای هیات داوران حاضر در جلسه دفاع از رساله دکتری

**آقای علی طیبی** رساله ۲٤ واحدی خود را **با عنوان توسعه روشهای SPH وMPS برای شبیه سازی عددی ارتعاشات ناشی از جریان اطراف یك استوانه دایروی** در تاریخ ۱۳۹۲/۳/۲۲ ارائه کردند.

اعضای هیات داوران نسخه نهایی این رساله را از نظر فرم و محتوا تایید کرده و پذیرش آنرا برای تکمیل درجه دکتری مهندسی مکانیک – تبدیل انرژی پیشنهاد می کنند.

| عضو هیات داوران | نام و نام خانوادگی | رتبه علمی | امضا |
|---|---|---|---|
| استاد راهنما | دکتر بهزاد قدیری دهکردی | استادیار | |
| استاد مشاور | دکتر مهرداد تقی زاده منظری | استاد | غایب |
| استاد ناظر | دکتر قاسم حیدری نژاد | استاد | |
| استاد ناظر | دکتر محمدرضا انصاری | دانشیار | |
| استاد ناظر | دکتر سید سلمان نورآذر | دانشیار | |
| استاد ناظر | دکتر مسعود میرزایی | دانشیار | |
| استاد ناظر | دکتر محمدرضا انصاری | دانشیار | |

**دستورالعمل حق مالکیت مادی و معنوی در مورد نتایج پژوهشهای علمی دانشگاه تربیت مدرس**

**مقدمه:** با عنایت به سیاست‌های پژوهشی دانشگاه در راستای تحقق عدالت و کرامت انسانها که لازمه شکوفایی علمی و فنی است و رعایت حقوق مادی و معنوی دانشگاه و پژوهشگران، لازم است اعضای هیات علمی، دانشجویان، دانش آموختگان و دیگر همکاران طرح، در مورد نتایج پژوهشهای علمی که تحت عناوین پایان‌نامه، رساله و طرحهای تحقیقاتی که با هماهنگی دانشگاه انجام شده است، موارد ذیل را رعایت نمایند:

**ماده ۱-** حقوق مادی و معنوی پایان نامه‌ها / رساله‌های مصوب دانشگاه متعلق به دانشگاه است و هرگونه بهره‌برداری از آن باید با ذکر نام دانشگاه و رعایت آیین‌نامه‌ها و دستورالعمل‌های مصوب دانشگاه باشد.

**ماده ۲-** انتشار مقاله یا مقالات مستخرج از پایان نامه/ رساله به صورت چاپ در نشریات علمی و یا ارائه در مجامع علمی باید به نام دانشگاه بوده و استاد راهنما مسئول مکاتبات مقاله باشد.

تبصره: در مقالاتی که پس از دانش آموختگی بصورت ترکیبی از اطلاعات جدید و نتایج حاصل از پایان‌نامه/ رساله نیز منتشر می‌شود نیز باید نام دانشگاه درج شود.

**ماده ۳-** انتشار کتاب حاصل از نتایج پایان نامه / رساله و تمامی طرحهای تحقیقاتی دانشگاه باید با مجوز کتبی صادره از طریق حوزه پژوهشی دانشگاه و بر اساس آئین نامه های مصوب انجام می‌شود.

**ماده ۴-** ثبت اختراع و تدوین دانش فنی و یا ارائه در جشنواره‌های ملی، منطقه‌ای و بین‌المللی که حاصل نتایج مستخرج از پایان نامه/ رساله و تمامی طرح‌های تحقیقاتی دانشگاه باید با هماهنگی استاد راهنما یا مجری طرح از طریق حوزه پژوهشی دانشگاه انجام گیرد.

**ماده ۵-** این دستورالعمل در ۵ ماده و یک تبصره در تاریخ ۱۳۸۴/۴/۲۵ در شورای پژوهشی دانشگاه به تصویب رسیده و از تاریخ تصویب لازم الاجرا است و هرگونه تخلف از مفاد این دستورالعمل، از طریق مراجع قانونی قابل پیگیری می شود.

نام و نام خانوادگی: علی طیبی

امضاء

۱۳۹۲/۳/۲۷

**آیین نامه چاپ پایان‌نامه (رساله)های دانشجویان دانشگاه تربیت مدرس**

نظر به اینکه چاپ و انتشار پایان نامه (رساله)های تحصیلی دانشجویان دانشگاه تربیت مدرس، مبین بخشی از فعالیتهای علمی - پژوهشی دانشگاه است بنابراین به منظور آگاهی و رعایت حقوق دانشگاه،دانش آموختگان این دانشگاه نسبت به رعایت موارد ذیل متعهد می‌شوند:

ماده ۱: در صورت اقدام به چاپ پایان نامه (رساله)ی خود، مراتب را قبلاً به طور کتبی به «دفتر نشر آثارعلمی» دانشگاه اطلاع دهد.

ماده ۲: در صفحه سوم کتاب (پس از برگ شناسنامه) عبارت ذیل را چاپ کند:

«کتاب حاضر، حاصل رساله دکتری نگارنده در رشته مهندسی مکانیک – تبدیل انرژی است که در سال ۱۳۹۲ در دانشکده فنی‌مهندسی دانشگاه تربیت مدرس به راهنمایی جناب آقای دکتر بهزاد قدیری دهکردی، و مشاوره جناب آقای دکتر مهرداد تقی‌زاده منظری از آن دفاع شده است.»

ماده ۳: به منظور جبران بخشی از هزینه‌های انتشارات دانشگاه، تعداد یک درصد شمارگان کتاب (در هر نوبت‌چاپ) را به «دفتر نشر آثارعلمی» دانشگاه اهدا کند. دانشگاه می‌تواند مازاد نیاز خود را به نفع مرکز نشر درمعرض فروش قرار دهد.

ماده ۴: در صورت عدم رعایت ماده ۳، ۵۰٪ بهای شمارگان چاپ شده را به عنوان خسارت به دانشگاه تربیت‌مدرس، تأدیه کند.

ماده ۵: دانشجو تعهد و قبول می کند در صورت خودداری از پرداخت بهای خسارت، دانشگاه می‌تواند خسارت مذکور را از طریق مراجع قضایی مطالبه و وصول کند؛ به علاوه به دانشگاه حق می‌دهد به منظور استیفای حقوق خود، از طریق دادگاه، معادل وجه مذکور در ماده ۴ را از محل توقیف کتابهای عرضه شده نگارنده برای فروش، تامین نماید.

ماده ۶: اینجانب علی طیبی دانشجوی رشته مهندسی مکانیک- تبدیل انرژی مقطع دکتری

تعهد فوق وضمانت اجرایی آن را قبول کرده، به آن ملتزم می شوم.

نام و نام خانوادگی: علی طیبی

تاریخ و امضا: ۱۳۹۲/۳/۲۷

تقدیم به:

آفتاب محبت، مادرم

و

کوه ایثار، پدرم

که توانشان رفت تا به توانایی برسم و مویشان سپید گشت تا روی سپید بمانم.

# تشکر و قدردانی

سپاس **خدای** را که سخنوران، در ستودن او بمانند و شمارندگان، شمردن نعمت‌های او ندانند و کوشندگان، حق او را گذاردن نتوانند.
بر خود لازم می‌دانم از استاد راهنمای خوبم جناب آقای **دکتر بهزاد قدیری دهکردی** که در تمام این مدت با راهنمایی‌های ارزنده‌شان و نیز اعتمادی که به من داشتند، موجبات رشد و پیشرفت من در انجام این رساله را فراهم نمودند سپاسگذاری کنم.
از استاد مشاور مهربانم جناب آقای **دکتر مهرداد تقی‌زاده منظری** که در طول این دوره از هیچ گونه کمکی به اینجانب دریغ نفرمودند تشکر ویژه دارم.
از پروفسور مهربان و دلسوز خود **Yee-Chung Jin** که دوره کوتاه مدت فرصت مطالعاتی بدون حمایت‌های بی‌دریغ ایشان برای من مقدور نمی‌بود بسیار ممنونم.
از دوستان خوبم، دکتر علیرضا ولی‌زاده، دکتر روح‌الله فاتحی، دکتر مصطفی صفدری شادلو نیز جهت کمک‌های ارزنده‌شان در طول انجام رساله تشکر می‌کنم. از دوست خیلی خوبم دکتر یونس شکاری که همیشه مشورت با ایشان در هر زمینه‌ای برای من سودمند بوده‌است سپاسگذاری می‌کنم.
از **خانواده‌ی** از جان بهترم نیز کمال تشکر و قدردانی را دارم. بی‌شک حمایت‌های همه‌جانبه ایشان در تمام طول تحصیل، دلیل اصلی رسیدن من به این جایگاه می‌باشد.
امید است که روزی بتوانم گوشه‌ای از زحمات تمامی عزیزان را جبران کنم.

## چکیده

تولید شبکه فرایندی بسیار پرهزینه و مشکل، بخصوص برای مسائل با تغییر شکل زیاد و هندسه‌های پیچیده، می‌باشد؛ از این رو، در سال‌های اخیر توجه ویژه‌ای از طرف محققین مختلف به توسعه‌ی روش‌های بدون شبکه معطوف شده است. روش SPH که یک روش ذره‌ای و کاملاً لاگرانژی بوده و بدون استفاده از شبکه به حل میدان محاسباتی می‌پردازد نیز یکی از این روش‌ها می‌باشد. قابلیت‌های ذاتی این روش در شبیه‌سازی مسائل با تغییر شکل زیاد سبب توسعه‌ی آن به حوزه‌ی FIV در این رساله شده است.

پس از بررسی‌های انجام شده بر روش SPH در این پژوهش، الگوریتم پیش‌بینی-تصحیح کننده‌ای برای شکستن پیوند بین سرعت و فشار در این روش پیشنهاد می‌شود (روش PISO-SPH). پس از آن با بررسی اصول روش MPS نقاط ضعفی از این روش با تعریف کمیتی جدید به عنوان " عدد چگالی جهتی ذره" و فرمول‌بندی مجدد آن برطرف می‌گردد. بدین ترتیب با استفاده از این کمیت و بدون اعمال فرضیه‌ی همگن بودن توزیع ذرات، فرمول‌های این روش دوباره استخراج می‌شوند. طرح‌های منفصل‌سازی حاصل نسبت به روش MPS استاندارد حالت جامع‌تری پیدا می‌کنند. علاوه بر آن، با بکارگیری دیدگاه تراکم‌پذیری ضعیف بر این روش، روشی جدید تحت عنوان MPE معرفی می‌گردد. چگونگی عملکرد روش‌های پیشنهادی با بررسی طیف متنوعی از مسائل استاندارد مکانیک سیالات بررسی و دقت نتایج نشان داده می‌شود.

یکی از مشکلات عمدهٔ روش SPH تراکم‌پذیر ضعیف، تولید نوسانات فشار در میدان محاسباتی می‌باشد. در این تحقیق با اضافه کردن جمله‌ای تحت عنوان دیفیوژن چگالی به معادلهٔ پیوستگی، نوسانات چگالی و در نتیجه فشار تا حد زیادی کنترل می‌شوند.

پس از آن، جریان اطراف یک سیلندر در حالت‌های مختلفی بررسی می‌گردد. سیلندر در حالت ساکن و سیلندر با ارتعاشات آزاد و اجباری به صورت هدفمند با شرایط متنوعی شبیه‌سازی می‌گردند. حالت‌های مختلف به نحوی انتخاب می‌گردند که انواع پدیده‌های مهم حوزه‌ی FIV مثل قفل‌شدگی، رزونانس و رژیم‌های مختلف گردابه از جمله P+S، 2P و 2P+2S را پوشش دهند. کلیه‌ی این پدیده‌ها به صورت مطلوبی شبیه‌سازی و بررسی می‌گردند. دقت نتایج و قابلیت روش SPH در شبیه‌سازی مسائل FIV بسیار مطلوب بوده به طوری‌که علیرغم روش‌های عددی دیگر، قابلیت دیدن رژیم 2P در رینولدزهای پایین را نیز از خود نشان می‌دهد.



**کلیدواژگان:** SPH، MPS، MPE، روش‌های ذره‌ای، FIV، سیلندر، ارتعاشات اجباری، ارتعاشات آزاد

## فهرست مطالب

عنوان صفحه


**فصل ۱: مقدمه ..... ۱**

۱.۱ آشنایی ..... ۲

۲.۱ فیزیک حاکم ..... ۴

۱.۲.۱ سیلندر ساکن ..... ۵

۲.۲.۱ سیلندر متحرک ..... ۶

۳.۱ جمع‌بندی ..... ۱۴

**فصل ۲: مروری بر مطالعات انجام شده ..... ۱۵**

۱.۲ مقدمه ..... ۱۵

۲.۲ روش SPH ..... ۱۵

۳.۲ روش MPS ..... ۲۱

۴.۲ جریان بر روی سیلندر ..... ۲۴

۵.۲ معرفی کار حاضر ..... ۲۹

**فصل ۳: معادلات حاکم ..... ۳۱**

۱.۳ مقدمه ..... ۳۱

۲.۳ معادلات حاکم بر سیال ..... ۳۱

۳.۳ معادلات حاکم بر سازه ..... ۳۲

**فصل ۴: روش‌های حل عددی ..... ۳۵**

۱.۴ مقدمه ..... ۳۵

۲.۴ روش WCSPH ..... ۳۵

۱.۲.۴ گسسته‌سازی به روش SPH ..... ۳۵

۲.۲.۴ تقریب ذرات ..... ۳۶

۳.۲.۴ ساختار تابع همواری ..... ۳۸

۴.۲.۴ مشتقات مکانی ..... ۳۹

۵.۲.۴ دیفیوژن عددی چگالی ..... ۴۰

۶.۲.۴ الگوریتم حل معادلات ..... ۴۱

۳.۴ روش PISO-SPH ..... ۴۲

۱.۳.۴ مقدمه ..... ۴۲

۲.۳.۴ چگونگی اعمال الگوریتم ..... ۴۳

۴.۴ روش MPE ..... ۴۷

۱.۴.۴ مقدمه ..... ۴۷

۲.۴.۴ هستهٔ روش MPS ..... ۴۷

۳.۴.۴ روش پیشنهادی MPE ۴۸
۵.۴ معیار گام زمانی ۵۶
۶.۴ طرح جابجایی ذرات ۵۷
۷.۴ شرایط مرزی ۵۸
۱.۷.۴ مرز جامد ۵۸
۲.۷.۴ سطح آزاد ۶۱
۳.۷.۴ مرزهای باز ۶۱
۸.۴ الگوریتم جستجو ۶۳
۹.۴ جمع‌بندی ۶۵
**فصل ۵: شبیه‌سازی جریان سیالات چند مساله‌ی استاندارد ۶۶**
۱.۵ مقدمه ۶۶
۲،۵ روش PISO-SPH ۶۷
۱.۲.۵ جریان پویزوله ۶۷
۵. ۲. ۲ جریان تیلور-گرین ۶۹
۳.۲.۵ جریان درون حفره ۷۲
۳.۵ روش MPE ۷۶
۱.۳.۵ شکست سد ۷۶
۲.۳.۵ پرش هیدرولیکی ۸۲
۴.۵ نتیجه‌گیری ۸۴
**فصل ۶: جریان اطراف سیلندر ۸۶**
۱.۶ مقدمه ۸۶
۲.۶ سیلندر ساکن ۸۹
۳.۶ سیلندر متحرک ۹۷
۱.۳.۶ ارتعاشات اجباری ۹۸
۱.۳.۶ ارتعاشات آزاد ۱۱۰
۴.۶ جمع‌بندی ۱۱۵
**فصل ۷: جمع‌بندی و نتیجه‌گیری ۱۱۶**
۱.۷ نوآوری‌ها ۱۱۷
۲.۷ پیشنهادات ۱۱۷
**مراجع ۱۱۸**

## فهرست تصاویر

عنوان صفحه


شکل ۱-۱ نقشه‌ی مناطق الگوهای مختلف تشکیل گردابه، محور عمودی دامنه و محور افقی طول موج [۶] ..... ۸
شکل ۱-۲ الگوهای مختلف تشکیل گردابه [۶] ..... ۹
شکل ۱-۳ دامنه پاسخ سیستم در مقابل سرعت نرمال شده برای ارتعاش یک استوانه درون جریان هوا (لوزی‌های توخالی) و آب (مربع‌های توپر) ..... ۱۲
شکل ۱-۴ نمودار پاسخ استوانه با تعیین ارتباط بین شاخه‌ها و الگوهای تشکیل گردابه [۸] ..... ۱۳
شکل ۳-۱ مدل دو بعدی سیلندر مرتعش ..... ۳۳
شکل ۴-۱ ناحیه تأثیر ذرات ..... ۳۷
شکل ۴-۲ فلوچارت محاسباتی روش PISO-SPH ..... ۴۶
شکل ۴-۳ مشخصات مکانی ذرات ..... ۵۰
شکل ۴-۴ ذرات همسایه برای ذره $i$ در حالت متقارن (چپ) و تصادفی (راست) ..... ۵۲
شکل ۴-۵ فلوچارت محاسباتی روش MPE ..... ۵۵
شکل ۴-۶ شرط مرزی ذرات مجازی و پر شدن شعاع همسایگی ..... ۶۰
شکل ۴-۷ شماتیک اولیه میدان حل برای اعمال شرط جریان ورودی/خروجی ..... ۶۳
شکل ۴-۸ چگونگی انجام الگوریتم جستجو به روش لیستهای مرتبط ..... ۶۴
شکل ۵-۱ مقایسهٔ کار حاضر (دایره) با حل تحلیلی (خط) جریان گذرای پویزوله؛ الف) Re=0.01، ب) Re=1، ج) Re=100، د) Re=10000 ..... ۶۹
شکل ۵-۲ بردارهای سرعت ذرات برای جریان تیلور-گرین در رینولدز ۱۰۰ ..... ۷۰
شکل ۵-۳ توزیع ذرات در شبیه‌سازی جریان تیلور-گرین بدون (چپ) و با (راست) استفاده از طرح جابجایی ذرات ..... ۷۱
شکل ۵-۴ مقایسهٔ میرایی بیشترین سرعت در رینولدز ۱۰۰ بین نتایج تحلیلی (خط) و کار حاضر (دایره) ..... ۷۲
شکل ۵-۵ مقایسهٔ بین فشار تحلیلی (راست) و کار حاضر (چپ) در زمان ۲ ثانیه برای رینولدز ۱۰۰ ..... ۷۲
شکل ۵-۶ خطوط جریان درون حفره برای رینولدز ۴۰۰، شبیه‌سازی شده با PISO-SPH ..... ۷۴
شکل ۵-۷ مقایسهٔ پروفیل سرعت درون حفره برای رینولدز ۴۰۰ شبیه‌سازی شده با روش PISO-SPH. سرعت‌ها و فاصله‌ها به ترتیب با سرعت درپوش U، U=1، و طول مربع $L$، $L$=1 بی‌بعد شده‌اند. شکل چپ) سرعت جهت y در طول صفحهٔ افقی میانی حفره؛ شکل راست) سرعت جهت x در طول صفحهٔ عمودی میانی حفره ..... ۷۴
شکل ۵-۸ خطوط جریان درون حفره برای رینولدز ۱۰۰۰، شبیه‌سازی شده با PISO-SPH ..... ۷۵
شکل ۵-۹ مقایسهٔ پروفیل سرعت درون حفره برای رینولدز ۱۰۰۰ شبیه‌سازی شده با روش PISO-SPH. سرعت‌ها و فاصله‌ها به ترتیب با سرعت درپوش $U$، $U$=1، و طول مربع $L$، $L$=1 بی‌بعد شده‌اند. شکل چپ) سرعت جهت $y$ در طول صفحهٔ افقی میانی حفره؛ شکل راست) سرعت جهت $x$ در طول صفحهٔ عمودی میانی حفره ..... ۷۵

شکل ۵-۱۰ شماتیک شکست سد مشابه مطالعهی تجربی [۱۳۷] ..... ۷۷
شکل ۵-۱۱ مقایسه فشار در نقطه A از شکل ۵-۱۰ بین نتایج روش MPE و مقادیر تجربی [۱۳۷] ..... ۷۸
شکل ۵-۱۲ شماتیک رایج شکست سد ..... ۷۹
شکل ۵-۱۳ مقایسهی بین جبههی موج بدست آمده از حل عددی و دادههای تجربی [۱۳۸] ..... ۷۹
شکل ۵-۱۴ مقایسهی شماتیک نتایج حاصل از شبیهسازی شکست سد با روش MPE (چپ) با دادههای تجربی مرجع [۱۳۹] (راست) در زمانهای مختلف ..... ۸۰
شکل ۵-۱۵ تاریخچه فشار محاسبه شده با روش MPE در نقاط B (چپ) و C (راست) از شکل ۵-۱۲ ..... ۸۱
شکل ۵-۱۶ مقایسه فشار در صفحه میانی هندسه شکست سد پس از آرام گرفتن سیال. روش MPE (دایره)، روش WC-MPS (مربع) و فشار هیدرواستاتیک (خط) ..... ۸۲
شکل ۵-۱۷ مقایسه سطح آب بدست آمده توسط روش MPE (دایرهها) با دادههای تجربی [۱۴۱] ..... ۸۳
شکل ۵-۱۸ مقایسه سرعت طولی بدست آمده توسط روش MPE (خط) با دادههای تجربی [۱۴] (مثلث) در سه مقطع الف) $x/y_1=4$، ب) $x/y_1=32$، ج) $x/y_1=64$ ..... ۸۴
شکل ۶-۱ مشخصات ناحیه محاسباتی ..... ۸۷
شکل ۶-۲ چینش ابتدایی ذرات در نزدیکی استوانه (چپ) و دور از آن (راست) ..... ۸۸
شکل ۶-۳ نمودار استقلال از اندازه ذرات با بررسی نیروی درگ اطراف یک استوانه ساکن در رینولدز ۴۰ ..... ۸۸
شکل ۶-۴ مقایسه میدان فشار اطراف استوانه برای رینولدز ۴۰ بدون (بالا) و با پخش چگالی (پایین) ..... ۹۰
شکل ۶-۵ میدان جریان اطراف استوانه در رینولدز ۴۰ بدون پخش چگالی ..... ۹۱
شکل ۶-۶ تاثیر بکارگیری جملهٔ پخش چگالی بر توزیع ضریب فشار در رینولدز ۴۰ و مقایسه با مرجع [۱۴۵] ۹۱
شکل ۶-۷ مقایسه ضریب درگ نتایج کار حاضر با مرجع [۱۴۶] ..... ۹۲
شکل ۶-۸ خطوط جریان در اطراف سیلندر ساکن در رینولدزهای مختلف ..... ۹۵
شکل ۶-۹ مقایسه طول گردابههای تشکیل شده در پشت سیلندر با نتایج مرجع [۱۰۱] ..... ۹۶
شکل ۶-۱۰ توزیع ذرات اطراف استوانه بدون (چپ) و با استفاده از الگوریتم جابجایی ذرات (راست) ..... ۹۷
شکل ۶-۱۱ محدوده قفل شدگی در دامنه و فرکانسهای مختلف ..... ۹۸
شکل ۶-۱۲ ضریب لیفت در محدوده قفل شدگی برای فرکانس ۰/۱۴۶۷. نتایج حاضر (راست) و نتایج مرجع [۱۰۱] (چپ) ..... ۹۹
شکل ۶-۱۳ طیف تبدیل فوریه در محدوده قفل شدگی برای فرکانس ۰/۱۴۶۷. نتایج حاضر (راست)، نتایج مرجع [۱۰۱] (چپ) ..... ۹۹
شکل ۶-۱۴ مقایسه نمودار ضریب لیفت نسبت به موقعیت سیلندر (فضای فاز) با نتایج مقالات [۱۰۱] (شکل سمت چپ) ..... ۱۰۰
شکل ۶-۱۵ ضریب لیفت در خارج از محدوده قفل شدگی برای فرکانس ۰/۲۴۴۵. نتایج حاضر (راست) و نتایج مرجع [۱۰۱] (چپ) ..... ۱۰۱
شکل ۶-۱۶ طیف FFT در خارج از محدوده قفل شدگی برای فرکانس ۰/۲۴۴۵. نتایج حاضر (راست)، نتایج مرجع [۱۰۱] (چپ) ..... ۱۰۱
شکل ۶-۱۷ مقایسه فضای فاز سیلندر کار حاضر (خطوط آبی)، با نتایج مقالات [۱۰۱] (خطوط سیاه) ..... ۱۰۲

شکل ۶-۱۸ ضریب درگ در خارج از محدوده قفل شدگی برای فرکانس ۰/۲۴۴۵ ..... ۱۰۲
شکل ۶-۱۹ ضریب لیفت (راست) و درگ (چپ) برای $(A,f_0)=(1.25,0.2445)$ در محدوده P+S ..... ۱۰۴
شکل ۶-۲۰ طیف FFT (راست) و فضای فاز سیلندر (چپ) برای $(A,f_0)=(1.25,0.2445)$ در محدوده P+S ..... ۱۰۴
شکل ۶-۲۱ میدان چرخش اطراف سیلندر متحرک در رژیم P+S ..... ۱۰۶
شکل ۶-۲۲ ضریب لیفت در محدوده 2P برای $(A,f_0)=(1.,0.1467)$، نتایج حاضر (راست) و نتایج مرجع [۱۰۱] (چپ) ..... ۱۰۷
شکل ۶-۲۳ طیف FFT در محدوده 2P برای $(A,f_0)=(1.,0.1467)$، نتایج حاضر (راست) و نتایج مرجع [۳] (چپ) ..... ۱۰۷
شکل ۶-۲۴ مقایسه فضای فاز سیلندر (شکل سمت راست) در محدوده 2P برای $(A,f_0)=(1.,0.1467)$ با نتایج مقالات [۱۰۱] (شکل سمت چپ) ..... ۱۰۷
شکل ۶-۲۵ میدان چرخش اطراف سیلندر متحرک در رژیم 2P ..... ۱۰۸
شکل ۶-۲۶ ضریب لیفت (راست) و درگ (چپ) برای $(A,f_0)=(1.,0.071394)$ در محدوده 2P+2S ..... ۱۰۹
شکل ۶-۲۷ طیف FFT (راست) و فضای فاز سیلندر (چپ) برای $(A,f_0)=(1.,0.071394)$ در محدوده 2P+2S ..... ۱۰۹
شکل ۶-۲۸ ضرایب لیفت (شکل‌های سمت راست) و درگ (شکل‌های سمت چپ) برای حالتهای مختلف سختی مؤثر $(k^*_{eff})$ ..... ۱۱۱
شکل ۶-۲۹ نمودار جابجایی (شکل‌های سمت راست) و طیف FFT (شکل‌های سمت چپ) برای حالتهای مختلف سختی مؤثر $(k^*_{eff})$ ..... ۱۱۲
شکل ۶-۳۰ ضریب لیفت (شکل سمت راست) و جابجایی (شکل سمت چپ) در حالت $k^*_{eff=}12.97$ ..... ۱۱۳
شکل ۶-۳۱ ضریب لیفت (راست) و درگ (چپ) برای حرکت دو درجه آزادی انتقالی سیلندر ..... ۱۱۴
شکل ۶-۳۲ طیف FFT (راست) و فضای فاز سیلندر (چپ) برای حرکت دو درجه آزادی انتقالی سیلندر ..... ۱۱۴
شکل ۶-۳۳ نمودار مسیر حرکت سیلندر ..... ۱۱۴

# فصل ۱

# مقدمـــــــــــــــــــه

# ۱ مقدمه

## ۱.۱ آشنایی

تولید شبکه فرایندی بسیار پرهزینه و مشکل، بخصوص برای مسائل با تغییر شکل زیاد و هندسه‌های پیچیده، می‌باشد؛ از این رو، به تازگی در حوزه مکانیک محاسباتی علاقهٔ زیادی به گسترش و استفاده از روش‌های بدون شبکه[1] به عنوان چاره‌ای بر روش‌های سنتی مبتنی بر شبکه (مثل اختلاف محدود، حجم محدود، اجزاء محدود و ...) بوجود آمده است. در مقایسه با مشکلات روش‌های سنتی در برخورد با مرزهای پیچیده، در روش‌های بدون شبکه به راحتی می‌توان برای هر گونه مرزی یک نقطه تعریف کرده و رفتار آن مرز را بررسی نمود.

هر دو دیدگاه اویلری و لاگرانژی را می‌توان در روش‌های بدون شبکه بکار برد. در دیدگاه اویلری، نقاط محاسباتی در طول مراحل حل ثابت‌اند؛ در حالی‌که در دیدگاه لاگرانژی، هر نقطهٔ محاسباتی مجاز به جابجایی بر اساس معادلهٔ حرکت است؛ از آنجاییکه در این دیدگاه نقاط مورد نظر تعریف مادی دارند، آنها را ذره می‌نامند و بنابراین، این روش را به عنوان روش ذره‌ای می‌شناسند. روش‌های ذره‌ای را می‌توان به دو کلاس اصلی تقسیم‌بندی کرد: دسته‌ای که بر حسب تقریب زدن میدان هستند، مثل روش المان آزاد گالرکین[2] [۱] و گروه دیگر که بر اساس تقریب کرنل می‌باشند مثل روش SPH[3] و MPS[4] [۱]. لازم به ذکر است که روش MPS در واقع از روش‌های مشتق شده SPH است که در فصل چهارم به صورت مفصل بحث خواهد شد.

---

[1] Meshless

[2] Element Free Galerkin method

[3] Smoothed Particle Hydrodynamics

[4] Moving Particle Semi-implicit

روش SPH از جمله روش‌های بدون شبکه‌ای است که برای هر دو بخش مکانیک سیالات و جامدات مورد استفاده قرار گرفته است. مبنای این روش بدست آوردن حل عددی معادلات دینامیک سیال با استفاده از جایگذاری سیال با یک دستگاه از ذرات است. ذرات SPH از نظر ریاضیاتی، فقط نقاط میان یابی برای محاسبه خواص سیال و از نظر فیزیکی، ذراتی از ماده هستند که همانند هر دسته ذره طبیعی رفتار می‌کنند [۲].

روش SPH به عنوان یک روش بدون المان لاگرانژی دارای مزیت‌های برجسته‌ای نسبت به روش‌های متداول بر پایه شبکه می‌باشد. برخی از مزایای روش SPH را می‌توان به صورت زیر برشمرد [۲, ۳]: ۱- جریان‌هایی که در آنها جابجایی حاکم است و نیز مسائل همراه با تغییر شکل زیاد را به‌خاطر طبیعت لاگرانژی و تطبیقی خود به راحتی مدل می‌کند؛ ۲-علیرغم روش‌های دیگر (مثل اختلاف محدود) سطوح آزاد پیچیده را بدون نیاز به داشتن طرحی جداگانه برای مدل‌سازی سطح آزاد، به راحتی مدل می‌کند؛ ۳-برای محیط‌های ذاتاً ناپیوسته از نظر محاسباتی بسیار به صرفه است زیرا محاسبه فقط در نقاط مورد نظر انجام می‌گیرد؛ ۵- به راحتی با هندسه‌های پیچیده دوبعدی و سه بعدی کنار می‌آید؛ ۶- نسبت به روش‌های دیگر برنامه نویسی ساده‌تری دارد.

بعضی از معایب روش SPH را نیز می‌توان به صورت زیر برشمرد: ۱- اعمال شرایط مرزی کمی مشکل است؛ مثلاً می‌بایست از نفوذ ذرات سیال در مرز جلوگیری به عمل آید؛ ۲- برای مسائل ساده (به طور مثال جریان درون یک حفره)، این روش در مقایسه با روش‌های مبتنی بر شبکه با سرعت کمتری به جواب می‌رسد؛ ۳- از آنجاییکه کرنل‌های مورد استفاده در این روش معمولاً به‌صورت متقارن هستند لذا در حالت ایده‌آل توزیع ذرات نیز باید به‌صورت متقارن باشد، در صورتی‌که در بسیاری از مواقع (بخصوص در مسائل کیهان شناسی) این شرایط وجود ندارد. ۴- ظاهر شدن نوسانات غیرفیزیکی فشار در میدان به خصوص در مناطقی که گرادیان فشار زیاد وجود داشته باشد. جزئیات این روش در فصل چهارم بحث خواهد شد.

به عنوان مقدمه‌ای بر مباحث ارتعاشات ناشی از جریان[1] می‌توان گفت که در بسیاری از مسائل مهندسی پدیده‌ای بسیار مهم بوده و باید مورد توجه ویژه قرار گیرد. این پدیده، همان‌طور که از نام آن پیداست، ارتعاش یک سازه به واسطه‌ی جریان سیال در اطراف آن بوده و می‌تواند باعث ایجاد نوسانات با دامنه

[1] Flow-Induced Vibration (FIV)

بزرگ در سازه شده و آن را ویران نماید. پدیدهٔ ارتعاش ناشی از جریان، از آلات موسیقی گرفته تا آسمان‌خراش‌ها را شامل می‌گردد و به همان اندازه که می‌تواند حرکت‌های سودمند را به وجود آورد می‌تواند باعث ایجاد ارتعاشات ویران‌کننده گردد. باد می‌تواند باعث ویرانی پل‌ها و خطوط انتقال قدرت شود، جریان دریا می‌تواند باعث ویرانی سازه‌های دریایی گردد، مایع خنک‌کنندهٔ هستهٔ نیروگاه‌های هسته‌ای می‌تواند باعث شکست حفاظ شده و مواد مذاب داخل هستهٔ رآکتور را شتاب دهد. در حالت کلی، وقوع FIV در تمامی موقعیت‌هایی که یک سیال در اطراف یک سازه (با سطح مقطعی که سبب جدایش جریان سیال از روی سازه می‌گردد[1]) جریان دارد، محتمل است (مانند پل‌ها، دودکش‌ها، کابل‌های خطوط انتقال برق، پرتابه‌ها و اجسام پرنده، مبدل‌های حرارتی، رایزرهای نفتی، سازه‌های شناور در دریا، خطوط لوله انتقال منابع انرژی). گستردگی احتمال وقوع و اثرات غیرقابل پیش‌بینی FIV سبب شده است که توجه محققین زیادی به آن جلب شود؛ این پدیده، مسأله‌ای از نوع برهم‌کنش سازه و سیال است و حدوداً از سال ۱۹۶۰ مورد توجه محققین مختلف قرار گرفته است. سهم بسیار زیادی از مطالعات انجام شده در این زمینه بصورت آزمایشگاهی بوده است. با پیشرفت تکنولوژی و توسعه‌ی روش‌های عددی، کم‌کم استفاده از شبیه‌سازی عددی در این زمینه نیز همانند بقیهٔ زمینه‌های مهندسی مورد استفاده قرار گرفته است. در همین راستا، روش‌های المان محدود و حجم محدود بیشتر از سایر روش‌های عددی مبتنی بر شبکه بکار رفته‌اند. هر چند که گستردگی استفاده از روش‌های عددی در این زمینه روزبه‌روز بیشتر می‌شود ولی روش بدون شبکهٔ SPH تابحال برای حل این مسائل بکار گرفته نشده است.

## ۲.۱ فیزیک حاکم

برای تشریح فیزیک حاکم بر مسائل این حوزه می‌توان با نگاه کلی آنها را دسته بندی کرده و آنها را توضیح داد. بدین منظور با توجه به وضعیت سیلندر، می‌توان مسائل را به دو دسته‌ی کلی سیلندر ساکن و سیلندر متحرک تقسیم بندی نمود.

[1] Bluff body

### ۱.۲.۱ سیلندر ساکن

بر اساس پژوهش‌های به عمل آمده توسط محققین مختلف، در رینولدزهای پایین، تا Re=۵، خطوط جریان سیال سطح سیلندر را دنبال می‌کنند. در محدوده رینولدزهای ۵<Re<۴۵، جریان از روی سیلندر جدا شده و منجر به تشکیل یک جفت گردابهٔ متقارن خلاف گردش[۱] می‌شود. طول گردابه‌ها در جهت جریان به صورت خطی متناسب با مقدار رینولدز افزایش می‌یابد [۴].

در محدودهٔ رینولدز بالاتر از ۴۵، هنگامی که ذرهٔ سیال به طرف لبهٔ جلویی سیلندر جریان می‌یابد، فشار آن از فشار جریان آزاد تا فشار سکون[۲] افزایش پیدا می‌کند. سیال با فشار بالا در نزدیک لبهٔ جلویی سیلندر، جریان را وادار به حرکت در اطراف سیلندر می‌کند درحالی‌که لایهٔ مرزی از دو طرف گسترش می‌یابد؛ اما، این فشار بالا برای راندن سیال در طرف پشتی سیلندر در اعداد رینولدز بالا کافی نیست. در نزدیکی ضخیم‌ترین بخش از سطح جانبی سیلندر، لایهٔ مرزی از هر دو طرف جدا شده و دو لایهٔ برشی از خود به جا می‌گذارد. از آنجاییکه بخش درونی لایه‌های برشی - که با سیلندر در تماس هستند - نسبت به بخش خارجی آن - که با جریان آزاد در ارتباط است - خیلی آرام‌تر حرکت می‌کنند، لایه‌های مرزی به داخل دنباله غلتیده، بر روی یکدیگر پیچ خورده، با هم ترکیب شده و گردابه‌های چرخشی گسسته تشکیل می‌دهند. بدین ترتیب یک الگوی منظم برای گردابه‌ها، که خیابان گردابه فن‌کارمن[۳] نامیده می‌شود، شکل می‌گیرد.

وجود این گردابه‌ها مفهومی تحت عنوان پدیده ارتعاشات القا شده توسط گردابه[۴] (VIV) که یکی از مباحث مهم در بسیاری از زمینه‌های مهندسی است را رقم می‌زند. VIV زمانی رخ می‌دهد که سازه در اثر نیروهای نوسانی ناشی از گردابه‌های جدا شده از سطح جسم، مجبور به ارتعاش شود. اگر سازه کاملاً صلب و مهار شده باشد، فرکانس تولید گردابه‌ها به صورت تابعی از عدد بی بعد استروهال[۵] قابل تعریف و پیش‌بینی است. آزمایشات نشان می‌دهد که در دامنه نسبتاً گسترده‌ای از اعداد رینولدز $\left(300 \le \mathrm{Re} \le 2\times10^5\right)$ عدد استروهال تقریباً ثابت و نزدیک به ۰/۲ است [۵].

---

[1] Symmetric counter-rotating vortices

[2] Stagnation Pressure

[3] Von Karman vortex Street

[4] Vortex Induced Vibration (VIV)

[5] Strouhal number

### ۲.۲.۱ سیلندر متحرک

در حالتی که سیلندر قابلیت نوسان داشته باشد داستان متفاوتی رقم خواهد خورد. در واقع مفهوم FIV برای سیلندر متحرک معنی پیدا می‌کند. یکی از مهم‌ترین پدیده‌های این قسمت بحث هم‌زمانی یا قفل‌شدگی است.

هم‌زمانی[۱] یا قفل‌شدگی[۲]: حالتی است که فرکانس ریزش گردابه با فرکانس نوسان سازه یکی می‌شود. در واقع در این حالت فرکانس ریزش گردابه از فرکانس عدد استروهال متناظر با سیلندر ساکن ($f_s$) در آن رینولدز دور شده و با فرکانس نوسانات اجباری سازه ($f_0$) یکی شده و اصطلاحاً در آن قفل می‌شود.

در محدوده قفل‌شدگی با افزایش سرعت جریان، فرکانس تولید گردابه‌ها افزایش نمی‌یابد؛ بلکه در فرکانس طبیعی سازه قفل می‌گردد. بار دیگر با افزایش سرعت جریان، ارتعاشات سازه از محدوده قفل‌شدگی خارج شده و فرکانس تولید گردابه‌ها و تغییرات نیروهای هیدرودینامیکی یک جهش ناگهانی را تجربه کرده و پس از آن نیز متناسب با افزایش سرعت جریان، فرکانس تشکیل گردابه‌ها نیز افزایش خواهد یافت. البته باید به خاطر داشت که این نوسانات در دامنه و فرکانس کاملاً ثابتی رخ نمی‌دهد، بلکه در محدوده‌ای از فرکانس‌ها و دامنه‌ها شاهد آن هستیم. این موضوع نیز ناشی از تغییر و تعدیل‌های مداوم و لحظه‌ای پارامترهای متعددی همچون جرم افزوده[۳] است.

اصلی‌ترین الگوهای گردابه در نزدیکی محدوده‌ی قفل‌شدگی الگوهای 2S[۴]، 2P[۵] و P+S[۶] هستند. مخفف 2S به این معنی است که در هر نیم سیکل یک گردابه تولید و به دنباله می‌پیوندد. خیابان گردابه‌ی فن کارمن نمونه‌ی بارز الگوی 2S است. 2P به معنای تشکیل جفت گردابه‌هایی است که به صورت عرضی از محور مرکزی دنباله دور می‌شوند. الگوی P+S نیز نسخه‌ای نامتقارن از الگوی 2P است که سیلندر یک جفت و یک گردابه مجزا در هر سیکل تولید می‌کند. نمادهایی دیگری که با C(2S)[۷] و C(P+S) نشان

---

[1] Synchronization

[2] Lock-in

[3] Added mass

[4] Single

[5] Pair

[6] Pair+Single

[7] Coalescing 2S

داده شده‌اند به ترتیب به معنـای تشـکیل الگوهـای 2S و P+S در نزدیکـی اسـتوانه اسـت درحالیکـه در فاصله‌ی کمی دورتر از سیلندر گردابه‌ی کوچک‌تر نابود می‌شود. محدوده این الگوها را می‌تـوان در شـکل ۱-۱ مشاهده نمود.

ناحیه‌ی مشخص شده با P دنباله‌ای است که از یک جفت گردابه تشکیل شده که در طول دنبالـه جابجـا شده و از یک طرف آن خارج شده (جهت مذکور به تاریخچه‌ی جریـان بسـتگی دارد) و بیشـتر از اینکـه شبیه به دنباله باشد به یک جت مشابه است. الگوی*2P مشابه مفهوم 2P است به غیر از اینکه جفت‌های گردابه در یکی از نیم‌سیکلها از جلوی جسم دور می‌شوند. نهایتاً الگوی گردابه 2P+2S شامل تشـکیل دو جفت گردابه در بالا و پایین جسم، همانند الگوی 2P ولی با این تفاوت که یک گردابه‌ی ساده نیز بعـد از هر جفت تشکیل می‌گردد. محدوده‌ی خالی در این نمودار (شکل ۱-۱) نیز به معنی مشاهده نکردن هـیچ گونه الگوی خاصی در این تحقیق است [۶].