

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشگاه صنعتی اصفهان
دانشکده مهندسی مکانیک

بررسی عددی جریان و انتقال حرارت جابه‌جایی اجباری پیرامون یک و دو استوانه‌ی دوار با
آرایش پهلو به پهلو

پایان‌نامه کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک تبدیل انرژی

حدیث کاظمی پور

استاد راهنما
دکتر محسن ثقفیان



دانشگاه صنعتی اصفهان
دانشکده مکانیک

پایان نامه کارشناسی ارشد رشته تبدیل انرژی خانم حدیث کاظمی پور
تحت عنوان:

بررسی عددی جریان و انتقال حرارت جابه‌جایی اجباری پیرامون یک و دو استوانه‌ی دوار با آرایش
پهلویه پهلوه

در تاریخ ۱۳۹۰/۱۲/۱۰ توسط کمیته تخصصی زیر مورد بررسی و تصویب نهائی قرار گرفت.

- | | |
|------------------------|-------------------------------|
| دکتر محسن ثقفیان | ۱. استاد راهنمای پایان نامه |
| دکتر احمدرضا پیشه‌ور | ۲. استاد مشاور پایان نامه |
| دکتر محمود اشرفی‌زاده | ۳. استاد داور پایان نامه |
| دکتر محمدرضا سلیم‌پور | ۴. استاد داور پایان نامه |
| دکتر محمد رضا سلیم‌پور | سرپرست تحصیلات تکمیلی دانشکده |



Isfahan University of Technology
Department of Mechanical Engineering

**Numerical Investigation of Fluid Flow and Forced Convection
Heat Transfer around One and Two Rotating Cylinders in Side-
by-side Arrangement**

A Thesis

Submitted in partial fulfillment of the requirements
For the degree of Master of Science in the Major of Energy conversion

By

Hadis Kazemipoor

Evaluated and Approved by the Thesis Committee, on February 25, 2012

1- M. Saghafian, Assist. Prof. (Supervisor)

2- A. Pischevar, Prof. (Advisor)

3- M. Ashrafi Zadeh, Assist. Prof. (Examiner)

4- M. R. Salimpour, Assist. Prof. (Examiner)

Department Graduate Coordinator: Assist. Prof. M. R. Salimpour

Numerical Investigation of Fluid Flow and Forced Convection Heat Transfer around One and Two Rotating Cylinders in Side-by-side Arrangement

Hadis Kazemipoor

hkazemipoor65@gmail.com

February 29, 2012

Department of Mechanical Engineering

Isfahan University of Technology, Isfahan 84156-83111, Iran

Degree: M.Sc

Language: Farsi

Supervisor: Dr. Mohsen Saghafian (Saghafian@cc.iut.ac.ir)

Abstract

The flow and forced convection heat transfer from one and two rotating circular cylinders in side by side arrangement is investigated numerically with an Over set grid method. In the case of one rotating cylinder, numerical simulations are performed at Reynolds numbers, Re , 100-1000 and non dimensional rotation rates, α , varying from 0 to 6. The Prandtl number is taken to be 0.7 and 7. As α increase, the flow and thermal field become stabilized and finally the vortex shedding completely suppresses beyond the critical rotation rate, α_I , that shows an increasing trend with Reynolds number. Further increase in rotation rates result in a second unsteady pattern beyond a critical rotation rate, α_{II} and the vortex shedding suppression is observed again beyond a third critical rotation rate, α_{III} and eventually, the flow and thermal field become steady. The second and third critical rotation rates show a decreasing pattern with Reynolds number. As α increase, drag and lift coefficients decrease and increase respectively in all Reynolds numbers. The behavior of the time averaged Nusselt number shows a decreasing pattern with increasing rotation rate and increasing pattern with increasing Re and Pr numbers.

In the case of two inward rotating cylinders, numerical simulations are performed at Reynolds numbers, Re , of 100, 200 and 500 and non dimensional rotation rates, α , varying from 0 to 2. The spacing ratios, T/D , are 1.2, 1.8, 2.5 and 4 and the Prandtl number, Pr , has been taken to be 0.7 and 7. As α increase, the flow and thermal field become stabilized and finally steady beyond the critical rotational speed, α_s , depending on the spacing ratio and Reynolds number. The value of α_s shows an increasing trend with increasing T/D for a fixed Reynolds number. For a fixed spacing ratio, as Re increases, the critical rotational speed increases. Regardless of the spacing ratio, drag and lift coefficients show a decreasing and increasing trend with increasing α , respectively. The value of these coefficients shows no significant changes for different Reynolds numbers. As α increases, Heat transfer from cylinders decreases for all the values of T/D and Re . The behavior of the time and surface averaged Nusselt number has the increasing pattern with increasing Reynolds and Prandtl number.

In the case of two outward rotating cylinders, numerical simulations are performed at Reynolds numbers, Re , of 100 and non dimensional rotation rates, α , varying from 0 to 5. The spacing ratios, T/D , are 1.8, 2.5 and 4 and the Prandtl number, Pr , has been taken to be 0.7 and 7. As α increase, the flow and thermal field become stabilized and finally steady beyond the critical rotational speed, α_s , depending on the spacing ratio and Reynolds number. The value of α_s shows an decreasing trend with increasing T/D . Regardless of the spacing ratio, drag and lift coefficients show a decreasing and increasing trend with increasing α , respectively. As α increases, Heat transfer from cylinders decreases for all the values of T/D . The behavior of the time and surface averaged Nusselt number has the increasing pattern with increasing Prandtl number.

Key Words: Rotating cylinders, Cross flow, Overset grid Method, Drag and lift coefficients, Vortex shedding suppression, Nusselt and Strouhal numbers.

کلیه حقوق مادی مترتب بر نتایج مطالعات، ابتکارات و نوآوری‌های ناشی از تحقیق موضوع این پایان‌نامه (رساله) متعلق به دانشگاه صنعتی اصفهان است.

چکیده

در این پایان‌نامه جریان سیال و انتقال حرارت جابه‌جایی اجباری پیرامون یک استوانه‌ی دوار، دو استوانه‌ی دوار پهلوپه‌پهلو با دوران داخلی و دو استوانه‌ی دوار پهلوپه‌پهلو با دوران خارجی با استفاده از روش عددی برهم‌نهی شبکه‌ها حل می‌شود. هدف این مطالعه بررسی تاثیر پارامترهای عدد رینولدز، سرعت دورانی بی‌بعد، فاصله‌ی بی‌بعد و عدد پراکتل بر روی الگوی جریان و نرخ انتقال حرارت و پارامترهایی نظیر ضرایب متوسط نیرو، عدد استروهل، عدد نوسلت محلی و متوسط است. جریان مورد بررسی آرام و تراکم‌ناپذیر است. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که در هر سه حالت مورد بررسی (یک استوانه، دو استوانه‌ی درون‌گرد و دو استوانه‌ی برون‌گرد) الگوی جریان و انتقال حرارت به شدت تحت تاثیر سرعت دوران استوانه‌ها می‌باشد. جریان غیردائم بوده و با افزایش سرعت دورانی الگوی جریان و ریزش گردابه با توجه به دیگر پارامترهای جریان می‌تواند تغییر کند و یا ثابت بماند و در نهایت پس از یک سرعت دورانی بی‌بعد بحرانی، ریزش گردابه متوقف شده و جریان دائم مشاهده می‌شود. سرعت دورانی بحرانی بی‌بعد یک استوانه‌ی دوار به عدد رینولدز وابسته بوده و برای دو استوانه‌ی دوار علاوه بر عدد رینولدز، فاصله‌ی استوانه‌ها و جهت دوران آنها بر این پارامتر تاثیر به‌سزایی دارد. در جریان پیرامون یک استوانه‌ی دوار، با افزایش سرعت دورانی بی‌بعد سه گذار مشاهده می‌شود. در اولین گذار جریان غیردائم به جریان دائم تبدیل می‌شود. دومین گذار سبب می‌شود که جریان دائم مجدداً غیردائم شده و ریزش گردابه مجدداً مشاهده می‌شود و در نهایت در سومین گذار جریان غیردائم ثانویه به جریان دائم تبدیل می‌شود. توقف ریزش گردابه در جریان عبوری از دو استوانه با دوران داخلی در سرعت دورانی‌های کمتری نسبت به یک استوانه‌ی دوار اتفاق می‌افتد. در این حالت سرعت دورانی بحرانی با افزایش فاصله‌ی استوانه‌ها افزایش یافته و با افزایش رینولدز نیز افزایش می‌یابد. توقف ریزش گردابه در کلیه‌ی فاصله‌ها و اعداد رینولدز بررسی شده مشاهده می‌شود. با تغییر جهت دوران استوانه‌ها و بررسی دوران خارجی مشاهده می‌شود که افزایش سرعت دورانی در ابتدا منجر به افزایش ریزش گردابه از استوانه‌ها شده و سپس کاهش می‌یابد تا در نهایت در سرعت دورانی بحرانی کاملاً متوقف می‌شود. سرعت دورانی بحرانی در این حالت بسیار بیشتر از دوران داخلی است و با افزایش فاصله‌ی استوانه‌ها مقدار آن کاهش می‌یابد و در فواصل زیاد مقدار آن به مقدار سرعت دورانی بحرانی یک استوانه‌ی دوار بسیار نزدیک است. در دوران خارجی توقف ریزش گردابه در فواصل بسیار کم بین دو استوانه مشاهده نمی‌شود.

لغات کلیدی: روش برهم‌نهی شبکه‌ها، استوانه‌های دوار، انتقال حرارت جابه‌جایی اجباری، ضرایب درگ و لیفت، اعداد نوسلت و

استروهل

فهرست مطالب

صفحه

عنوان

فهرست مطالب	هشت
فهرست علائم	یازده
چکیده	۱

فصل اول: مقدمه

۱-۱) مروری بر کارهای انجام شده در زمینه‌ی جریان و انتقال حرارت پیرامون یک استوانه‌ی دوار	۳
۲-۱) مروری بر کارهای انجام شده در زمینه‌ی جریان و انتقال حرارت پیرامون چند استوانه‌ی دوار	۵
۳-۱) مروری بر کارهای انجام شده در زمینه‌ی کاربرد استوانه‌های دوار	۶
۴-۱) کار حاضر	۸

فصل دوم: معادلات حاکم و شرایط مرزی، تکنیک برهم نهی شبکه‌ها

۱-۲) معادلات حاکم بر جریان	۱۱
۲-۲) شرایط مرزی	۱۲
۱-۲-۲) شرایط مرزی شبکه اصلی	۱۲
۲-۲-۲) شرایط مرزی شبکه فرعی	۱۳
۳-۲) روش برهم نهادن شبکه‌ها	۱۳
۱-۳-۲) نقاط خالی	۱۳
۲-۳-۲) نقاط پر	۱۳
۳-۳-۲) الگوریتم جستجو	۱۴

فصل سوم: تحلیل جریان آزاد و انتقال حرارت اجباری پیرامون یک استوانه‌ی دوار

۱-۳) بررسی مشخصات جریان آزاد عبورکننده از یک استوانه‌ی دوار	۱۹
۱-۱-۳) شبکه مورد استفاده	۱۹
۲-۱-۳) مطالعه شبکه	۲۰
۳-۱-۳) بررسی مشخصه‌های سرعت	۲۱
۴-۱-۳) عدد استروهمال	۲۱
۵-۱-۳) ضرایب نیرو	۲۳
۶-۱-۳) ضرایب درگ و لیفت متوسط	۲۵
۲-۳) بررسی انتقال حرارت جابه‌جایی اجباری از استوانه‌ی دوار با دمای سطح ثابت به سیال عبورکننده از آن	۲۶
۱-۲-۳) شبکه مورد استفاده	۲۷

- ۲۷-۲-۳) خطوط ایزوترم ۲۷
- ۲۷-۲-۳) عدد نوسلت محلی و متوسط ۲۷
- ۳-۳) نتیجه گیری و جمع بندی ۳۱
- فصل چهارم: تحلیل جریان آزاد و انتقال حرارت جابه جایی اجباری پیرامون دو استوانه‌ی دوار با آرایش پهلو به پهلو و**

دوران داخلی

- ۱-۴) بررسی مشخصات جریان آزاد عبورکننده از دو استوانه‌ی دوار با آرایش پهلو به پهلو و دوران داخلی ۳۲
- ۱-۱-۴) شبکه مورد استفاده ۳۲
- ۲-۱-۴) مطالعه شبکه ۳۳
- ۳-۱-۴) بررسی مشخصه‌های سرعت ۳۴
- ۴-۱-۴) ضرایب نیرو ۴۷
- ۵-۱-۴) ضرایب درگ و لیفت متوسط ۵۰
- ۶-۱-۴) عدد استروهاال ۵۳
- ۲-۴) بررسی انتقال حرارت جابه جایی اجباری از دو استوانه‌ی دوار با آرایش پهلو به پهلو و دمای سطح ثابت به سیال عبورکننده از آن ۵۶
- ۱-۲-۴) شبکه مورد استفاده ۵۷
- ۲-۲-۴) خطوط ایزوترم ۵۷
- ۳-۲-۴) عدد نوسلت محلی ۵۸
- ۴-۲-۴) عدد نوسلت متوسط ۶۰
- ۳-۴) نتیجه گیری و جمع بندی ۶۱

فصل پنجم: تحلیل جریان آزاد و انتقال حرارت جابه جایی اجباری پیرامون دو استوانه‌ی دوار با آرایش پهلو به پهلو و

دوران خارجی

- ۱-۵) بررسی مشخصات جریان آزاد عبورکننده از دو استوانه‌ی دوار با آرایش پهلو به پهلو و دوران خارجی ۶۴
- ۱-۱-۵) شبکه مورد استفاده ۶۴
- ۲-۱-۵) مطالعه شبکه ۶۵
- ۳-۱-۵) بررسی مشخصه‌های سرعت ۶۶
- ۴-۱-۵) ضریب فشار متوسط ۷۷
- ۵-۱-۵) ضرایب درگ و لیفت متوسط ۷۸
- ۶-۱-۵) عدد استروهاال ۸۲
- ۲-۵) بررسی انتقال حرارت جابه جایی اجباری از دو استوانه‌ی برون گرد با آرایش پهلو به پهلو و دمای سطح ثابت به سیال عبورکننده از آن ۸۳
- ۱-۲-۵) شبکه مورد استفاده ۸۴

۸۴	.....	۲-۲-۵	خطوط ایزوترم
۸۵	.....	۳-۲-۵	عدد نوسلت محلی
۸۶	.....	۴-۲-۵	عدد نوسلت متوسط
۸۸	.....	۳-۵	نتیجه گیری و جمع بندی
۹۰	.....		پیشنهادات
۹۱	.....		مراجع

فهرست علائم

قطر استوانه	D
سرعت در راستای X و Y	u, v
دما	T
عدد رینولدز	Re
عدد پراتل	Pr
علائم یونانی	
ویسکوزیته دینامیکی kg/ms	μ
چگالی، kg/m^3	ρ
دمای بی‌بعد	θ^*
زیرنویس	
جریان آزاد	∞
سطح استوانه	w

فصل اول

مقدمه

جریان و انتقال حرارت پیرامون یک استوانه‌ی دایره‌ای که در مسیر جریان یکنواخت قرار گرفته است از جمله مسائل چالش برانگیز در مکانیک سیالات به شمار می‌رود، چرا که این جریان نشان‌دهنده‌ی تداخل گردابه‌هایی است که در پشت استوانه ریزش می‌کنند. ریزش گردابه‌ها باعث ناپایداری جریان شده و شارش حرارت از استوانه به جریان اطراف آن را افزایش می‌دهد. از طرف دیگر، توقف ریزش گردابه منجر به توقف نوسانات متناوب نیروهای وارد بر استوانه شده و از ارتعاش استوانه جلوگیری می‌کند. بنابراین وجود ریزش گردابه‌ها در پشت استوانه، با توجه به کاربرد مهندسی، می‌تواند مطلوب یا نامطلوب باشد.

جریان عبوری از یک استوانه‌ی دایره‌ای دوار، علاوه بر کمک به فهم دینامیک گردابه در دنباله‌های اجسام غیر پخ، به عنوان مسأله‌ی اساسی در کنترل لایه‌ی مرزی، دنباله‌ی پشت استوانه و ریزش گردابه شناخته شده است. مطالعات زیادی در سالهای اخیر انجام شده که از استوانه‌های دوار برای کنترل ریزش گردابه‌ها در پشت اجسام غیرپخ (مانند ایرفول) استفاده شده است [۱-۳]. کلیه‌ی این مطالعات نشان داده است که استفاده از استوانه‌های دوار، منجر به تزریق ممنوم به جریان لایه‌ی مرزی اجسام غیرپخ شده و ریزش گردابه پشت این اجسام و ضریب درگ را کاهش می‌دهد.

مطالعات نشان داده است این جریان به دو پارامتر اساسی وابسته است. یکی از این پارامترها عدد رینولدز است و پارامتر دیگر سرعت دورانی بی‌بعد نام دارد که به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$\text{Re} = U_{\infty} D / \nu \quad (1-1)$$

$$\alpha = \omega D / 2U_{\infty} \quad (2-1)$$

مطالعه‌ی جریان و انتقال حرارت پیرامون اجسام چندجزئی غیر پخ در آرایش‌ها و چیدمان‌های مختلف از دیدگاه علمی و مهندسی بسیار اهمیت دارد. جریان پیرامون دو استوانه با آرایش پهلو به پهلو یکی از مسئله‌های استاندارد برای فهم رفتار جریان پیرامون اجسام چندجزئی و پیچیده است. نمود کاربردی چنین جریان‌هایی را می‌توان در جریان‌هایی که در ساختارهای مهندسی ارتعاشات ایجاد می‌کنند، مخلوط کردن سیالات و جریان‌های که با تولید نویز همراهند مشاهده کرد. جریان پیرامون دو استوانه‌ی ساکن پهلو به پهلو بسیار مورد مطالعه قرار گرفته است [۴-۱۳]. این مطالعات نشان داده است که چنین جریانی علاوه بر عدد رینولدز به پارامتر دیگری به نام فاصله‌ی بی‌بعد وابسته است که به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$T^* = T / D \quad (3-1)$$

که نشان دهنده‌ی نسبت فاصله‌ی مرکز تا مرکز استوانه‌ها به قطر آنهاست.

۱-۱) مروری بر کارهای انجام شده در زمینه‌ی جریان و انتقال حرارت پیرامون یک استوانه‌ی دوار

کانگ و همکارانش [۱۴] جریان آرام دو بعدی گذرنده از یک استوانه‌ی دایره‌ای که با سرعت زاویه‌ای ثابت می‌چرخد را به صورت عددی مورد بررسی قرار دادند. هدف مطالعه‌ی آنها کنترل ریزش گردابه و فهم دقیق‌تری از مکانیزم جریان بوده است. شبیه‌سازی عددی برای $\text{Re} = 60, 100, 160$ و $0 \leq \alpha \leq 2.5$ انجام شده است. آنها معادلات ناویراستوکس غیردائم دو بعدی را با استفاده از روش گام کوچک کاملاً ضمنی^۱ برای زمان و روش اختلاف مرکزی مرتبه‌ی دوم برای مکان حل کردند. نتایج آنها نشان داد که در مقادیر کوچک سرعت دورانی، ریزش گردابه وجود داشته و منجر به جریان نوسانی نسبت به زمان می‌شود. برای مقادیر $\alpha > \alpha_1$ ریزش گردابه کاملاً از بین می‌رود که سرعت دورانی بحرانی α_1 به عدد رینولدز وابسته است. آنها مقدار سرعت دورانی بحرانی را برای $\text{Re} = 60, 100, 160$ به ترتیب برابر $\alpha_1 = 1.4, 1.8, 1.9$ به دست آوردند.

بارنس و همکارانش [۱۵] ریزش گردابه از یک استوانه‌ی دوار در جریان آزاد را به صورت تجربی مورد بررسی قرار دادند. آزمایشات برای $\text{Re} = 60$ انجام شده است. نتایج به دست آمده از این آزمایشات با نتایج به دست آمده توسط کانگ مطابقت دارد.

^۱ Fully-implicit fractional step

مطالعات عددی بعدی توسط استوجکوویک و همکارانش [۱۶] برای $Re = 60,100,200$ و میتال و کامار در $Re = 200$ [۱۷] نشان داد که دو گذار دیگر جریان وجود دارد. دومین گذار از جریان دائم به غیردائم در α_{II} و سومین گذار در $\alpha_{III} > \alpha$ که جریان غیردائم ثانویه مجدداً به جریان دائم تبدیل می‌شود. آنها دریافتند که جریان غیردائم ثانویه در دامنه‌ی کوچکی از $\alpha_{III} < \alpha \leq \alpha_{II}$ قرار دارد.

یوشیهیرو و همکارانش [۱۸] ساختار جریان عبوری از یک استوانه‌ی دوار را برای $Re = 200,800$ و سرعت دورانی بدون بعد در محدوده‌ی $0 \leq \alpha \leq 6$ به صورت تجربی بررسی کردند. آنها جریان پشت استوانه را بر اساس سرعت دورانی به پنج ساختار مختلف طبقه‌بندی کردند. مشاهدات آنها نشان داد که مقدار انحراف گردابه‌ها و پهنای لایه‌ی برشی با افزایش سرعت دورانی تغییر می‌کند.

آکوری و همکارانش [۱۹] جریان پیرامون استوانه‌ی دایره‌ای دوار را با روش‌های عددی دو و سه بعدی بررسی کردند. مطالعات آنها چنین نتیجه داد که دوران ناپایداری ناشی از گذار جریان دوبعدی به سه‌بعدی را تضعیف کرده و عدد رینولدز بحرانی که در آن این گذار اتفاق می‌افتد را افزایش می‌دهد. در مطالعه‌ی آنها این رینولدز بحرانی برابر با $219/8$ برای $\alpha = 0.5$ به دست آمده است.

یان و همکارانش [۲۰] میدان سرعت و دمای جریان عبوری از یک استوانه‌ی دوار با دمای سطح ثابت را در محدوده‌ی $0 \leq \alpha \leq 1$ ، $Re = 200,218,500,1000$ و $Pr = 0.1, 0.5, 0.71, 1$ به روش عددی و با استفاده از معادله‌ی لاتیس بولتزمن بررسی کردند. نتایج آنها نشان داد که با افزایش سرعت دورانی بی‌بعد، عدم تقارن میدان سرعت و دما بیشتر شده و ضریب درگ، نوسلت محلی و نوسلت متوسط کاهش می‌یابد.

ساچین و همکارانش [۲۱] جریان و انتقال حرارت جابه‌جایی اجباری بر روی یک استوانه‌ی دایره‌ای در حال دوران با دمای سطح ثابت را برای سرعت دوران بی‌بعد ثابت در محدوده $0 \leq \alpha < 6$ و $20 \leq Re \leq 160$ و $Pr = 0.7$ به صورت عددی و در رژیم جریان دو بعدی مورد مطالعه قرار دادند. آنها مشاهده کردند که فرکانس جریان متناوب غیردائم در رژیم ثانویه در مقایسه با رژیم اولیه کاهش می‌یابد ولی دامنه‌ی آن افزایش می‌یابد. مطالعات آنها نشان داد که با افزایش سرعت دورانی بی‌بعد، عدد نوسلت متوسط کاهش یافته و با افزایش رینولدز افزایش می‌یابد. در سال ۲۰۱۰، آنها جریان عبوری از یک استوانه‌ی دوار با شار حرارتی ثابت در سطح را برای $0 \leq \alpha < 6$ و $20 \leq Re \leq 160$ و $Pr = 0.7$ بررسی کردند [۲۲]. نتایج آنها نشان داد که در این حالت نیز عدد نوسلت متوسط با افزایش سرعت دورانی بی‌بعد کاهش یافته و مقدار آن در این شرایط به مقدار آن برای شرط مرزی دمای سطح ثابت بسیار نزدیک است.

دا سیلوا و همکارانش [۲۳] جریان عبوری از یک استوانه‌ی دوار را برای $Re = 60, 100, 200$ به صورت عددی بررسی کردند. نتایج آنها افزایش ضریب درگ را بعد از توقف ریزش گردابه نشان می‌دهد که با نتایج مطالعات گذشته تفاوت دارد.

(۲-۱) مروری بر کارهای انجام شده در زمینه‌ی جریان و انتقال حرارت پیرامون چند استوانه‌ی دوار

موشکین و همکارانش [۲۴] جریان آرام و یکنواخت تراکم ناپذیر عبورکننده از دو استوانه‌ی دوار با آرایش پهلو به پهلو که به فاصله‌ی بی‌بعد $T/D = 2$ از هم قرار گرفته‌اند را برای $Re = 10, 20, 40$ و $0.5 \leq \alpha \leq 2.5$ مورد بررسی عددی قرار دادند. آنها نشان دادند که دوران استوانه‌ها منجر به نیروی درگ صفر بر روی استوانه‌ها شده و این امر منجر به حرکت خود پیش‌ران استوانه‌ها به صورت یک جسم می‌شود، چرا که با افزایش سرعت دورانی درگ وارد بر استوانه‌ها منفی می‌باشد.

وانگ و همکارانش [۲۵] جریان عبوری از دو استوانه‌ی دوار پهلو به پهلو را با هدف بررسی تاثیر تغییرات سرعت دورانی و عدد رینولدز بر ساختار جریان به صورت تجربی بررسی کردند. آنها جریان را برای $425 \leq Re \leq 1130$ و $0 \leq \alpha \leq 4$ و فاصله‌ی $T/D = 1.11$ که T فاصله‌ی مراکز دو استوانه و D قطر استوانه‌هاست، به روش PIV^2 مطالعه کردند. مطالعات آنها نشان داد که با افزایش سرعت دورانی، ریزش گردابه پشت استوانه‌ها کاهش یافته و در یک سرعت دورانی بی‌بعد بحرانی ریزش گردابه‌ها متوقف می‌شود. با توقف ریزش گردابه از هر دو استوانه، جریان پشت استوانه دائم می‌شود.

جو کاویل و همکارانش [۲۶] به منظور افزایش انتقال حرارت، آرایشی از استوانه‌های دوار پهلو به پهلو که به فاصله‌ی مشخص از یکدیگر قرار گرفته‌اند و جریان آرام از روی آنها عبور می‌کند را مورد بررسی عددی قرار دادند. آنها دو پیکربندی را بررسی کردند. در پیکربندی اول جهت دوران همه‌ی استوانه‌ها یکسان است و در پیکربندی دوم استوانه‌های متوالی خلاف جهت یکدیگر دوران می‌کنند. در هر مورد فاصله‌ی بین دو استوانه‌ی متوالی برای دستیابی به بیشترین انتقال حرارت بهینه شده است. نتایج آنها نشان داد که آرایش دوم برای استوانه‌ها، با نرخ انتقال حرارت بیشتری همراه است.

یون و همکارانش [۲۷] جریان دوبعدی و آرام عبورکننده از دو استوانه‌ی دوار پهلو به پهلو را به منظور بررسی تاثیر تغییرات سرعت دورانی و فاصله‌ی بین دو استوانه بر جریان، مورد بررسی عددی قرار دادند. مطالعات آنها برای $0 \leq \alpha \leq 2$ ، $Re = 100$ و $T/D = 1.2, 1.7, 2.5, 4$ انجام شد. نتایج آنها نشان داد که سرعت دورانی بی‌بعد بحرانی

² Particle Image Velocimetry

و عدد استروهال به فاصله‌ی بین دو استوانه وابسته است. آنها همچنین نشان دادند که در یک فاصله‌ی ثابت بین دو استوانه، با افزایش سرعت دورانی بی‌بعد، ضریب لیفت متوسط افزایش یافته و ضریب درگ متوسط کاهش می‌یابد. موشکین و همکارانش [۲۸] انتقال حرارت اجباری از دو استوانه‌ی دوار پهلوه به پهلوه به جریان آرام و دوبعدی عبورکننده از آن را برای $Re \leq 40$ و $0.7 \leq Pr \leq 50$ و در سرعت‌های دورانی مختلف به صورت عددی بررسی کردند. نتایج آنها نشان داد که افزایش سرعت دورانی منجر به کاهش انتقال حرارت از استوانه‌ها می‌گردد و افزایش عدد پراتل افزایش عدد نوسلت متوسط را به دنبال دارد.

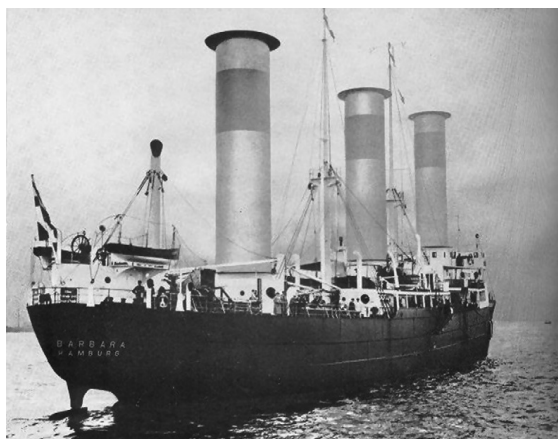
یون و همکارانش [۲۹] انتقال حرارت اجباری دوبعدی از دو استوانه‌ی دوار پهلوه به پهلوه به جریان آرام عبورکننده از آنرا برای $Re = 100$ ، $0 \leq \alpha \leq 2$ ، $T/D = 1.2, 1.7, 2.5, 4$ و $Pr = 0.7$ مورد بررسی عددی دادند. نتایج آنها نشان داد که میدان حرارتی پیرامون استوانه‌ها با افزایش سرعت دورانی در یک سرعت دورانی بی‌بعد بحرانی، پایا می‌شود. آنها نشان دادند که با افزایش سرعت دورانی در همه‌ی فاصله‌ها، عددنوسلت محلی و متوسط روی سطح استوانه‌ها کاهش می‌یابد.

اخیرا کومار و همکارانش [۳۰] جریان آرام عبورکننده از دو استوانه‌ی دوار با آرایش پهلوه به پهلوه را مورد بررسی تجربی قرار دادند. هدف مطالعه‌ی آنها بررسی اثر عدد رینولدز، سرعت دورانی و فاصله‌ی بی‌بعد بر ساختار جریان و سرعت دورانی بی‌بعد بحرانی بوده است. آنها تاثیر تغییر جهت دوران را نیز بر ساختار جریان پشت دو استوانه بررسی کردند. مطالعه‌ی آنها نشان داد که در حالتی که استوانه‌ها دوران داخلی دارند (استوانه‌ی بالایی ساعتگرد و استوانه‌ی پایین تر پادساعتگرد)، توقف ریزش گردابه در کلیه‌ی اعداد رینولدز مشاهده می‌شود. مطالعات آنها نشان داد که در این حالت با افزایش فاصله‌ی استوانه‌ها در یک رینولدز مشخص، سرعت دورانی بحرانی افزایش می‌یابد. همچنین افزایش رینولدز در یک فاصله‌ی ثابت منجر به افزایش سرعت دورانی بحرانی خواهد شد. نتایج آنها برای دوران خارجی استوانه‌ها نشان داد که توقف ریزش گردابه در همه‌ی فاصله‌ها به ویژه در اعداد رینولدز زیاد مشاهده نمی‌شود. سرعت دورانی بحرانی که در یک رینولدز ثابت با افزایش فاصله روند کاهشی از خود نشان داد.

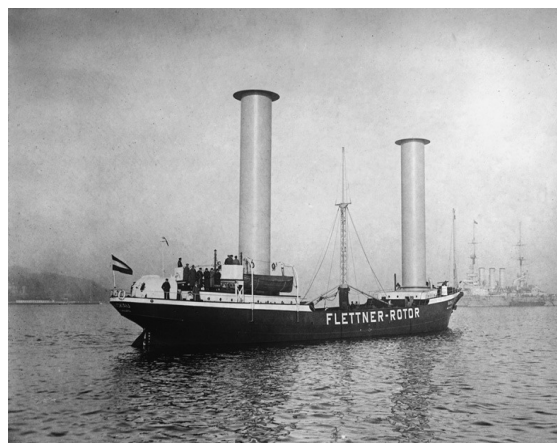
۳-۱) مروری بر کارهای انجام شده در زمینه‌ی کاربرد استوانه‌های دوار

یکی از کاربردهای استوانه‌های دوار که در معرض جریان عرضی سیال قرار دارند در زمینه‌ی تجهیزات دریایی است. در این تجهیزات از نیروی وارد شده بر این استوانه‌ها جهت حرکت این تجهیزات استفاده می‌شود. آنتون فلنتر در سال ۱۹۲۰ از استوانه‌های دواری که با استفاده از موتور حرکت می‌کردند برای حرکت دادن کشتی استفاده کرد. استوانه‌های دوار بر عرشه‌ی کشتی قرار گرفته بودند و حرکت باد جریان عرضی مورد نیاز را فراهم می‌کرد. وی در سال ۱۹۲۶ استوانه‌های دوار را با دو روتور با ۱۸ متر ارتفاع و ۲/۷ متر قطر جایگزین کرد و این کشتی را بادن-بادن

نامید (شکل ۱-۱). این کشتی بسیار موفق بود و سریعتر از کشتی‌های قبل از خود حرکت می‌کرد. کشتی بادن-بادن در سال ۱۹۲۶ از اقیانوس اطلس با موفقیت عبور کرد. پس از این موفقیت سازمان حمل و نقل دریایی آلمان دستور ساخت کشتی روتوری دیگری به نام باربارا را صادر کرد که در شکل ۲-۱ نشان داده شده است. باربارا ۹۲ متر طول داشت و با سه روتور ساخته شده بود که هر کدام ۱۷ متر ارتفاع و ۴ متر قطر داشتند و با سرعت ۱۵۰ دور در دقیقه توسط یک موتور ۲۷ کیلوواتی دوران می‌کردند. باربارا ۳۰۰۰ تن بار و تعدادی مسافر حمل می‌کرد و به مدت شش سال بین هامبورگ و ایتالیا در رفت و آمد بود. البته در صورتی که وزش باد نباشد جریان عرضی نیز وجود نخواهد داشت و کشتی با چنین سیستمی از حرکت باز می‌ایستد [۳۱].



شکل ۲-۱- کشتی باربارا [۳۱]

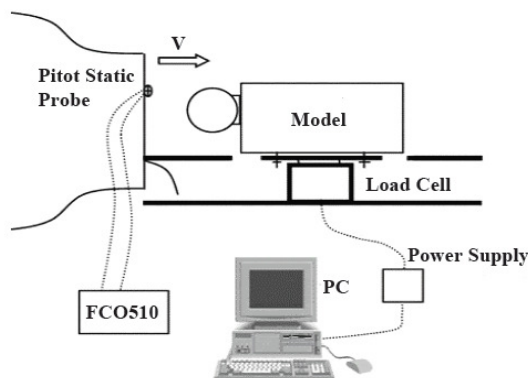


شکل ۱-۱- کشتی بادن-بادن [۳۱]

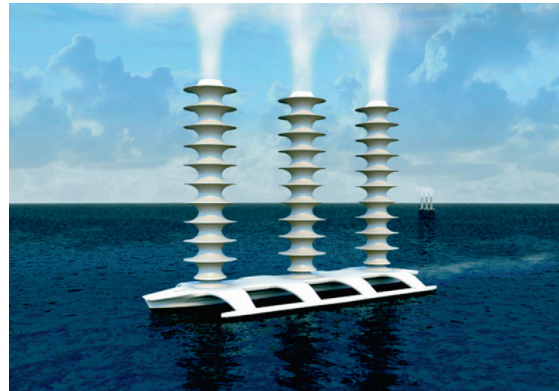
سالتر، سورتنو و لاتمن در سال ۲۰۰۸ امکان استفاده از کشتی‌های روتوری را برای به حرکت درآوردن ناوگانی شامل ۱۵۰۰ کشتی مطرح کردند. هدف این ناوگان اسپری کردن مه رقیقی از آب دریا است که با ایجاد حالت عایق و انعکاس به فضا بر تعادل انرژی تاثیر گذاشته و افزایش گرمای کروی زمین را که ناشی از فعالیت‌های صنعتی است کاهش می‌دهد. تصویر کلی این طرح در شکل ۳-۱ نشان داده شده است. در این طرح باد از سمت راست تصویر می‌وزد، جهت دوران روتورها از نمای بالا ساعتگرد است و نیروی رانشی روتورها به سمت چپ خواهد بود [۳۲].

یکی دیگر از کاربردهای مهم استوانه‌های دوار در زمینه‌ی کاهش درگ وارد شده بر اجسام غیر پخ می‌باشد. در سال ۲۰۰۴ رابسون و همکارانش [۳۳] از یک استوانه‌ی دوار متصل به یک جسم غیر پخ برای کاهش درگ وارد شده بر آن جسم استفاده کردند. شکل ۴-۱ شماتیکی از مدل ساخته شده توسط آنها را نشان می‌دهد. نتایج آنها نشان داد که استفاده از استوانه‌ی دوار درگ وارد شده به جسم را تا ۵۰٪ کاهش می‌دهد. مطالعات تجربی و عددی دیگری در زمینه‌ی استفاده از استوانه‌های دوار برای کاهش ریزش گردابه و نیروهای درگ وارد بر اجسام غیر پخ انجام شده

است. از جمله القارنی و همکارانش از یک استوانه‌ی دوار متصل به ایرفویل دوبعدی ۰۰۲۴ ناسا برای کنترل ریزش گردابه و جریان پشت ایرفویل استفاده کردند [۳۴]. نتایج آنها نشان داد که استفاده از این استوانه‌ی دوار نیروی لیفت را افزایش داده و زاویه‌ی حمله‌ی بحرانی را ۱۶۰٪ به تاخیر می‌اندازد.



شکل ۱-۴- نمای شماتیکی از مدل آزمایش شده توسط رابسون و همکارانش [۳۳]



شکل ۱-۳- نمای شماتیکی از کشتی روتوری اسپری کننده‌ی فلتر [۳۲]

۴-۱) کار حاضر

مطالعات انجام شده در زمینه‌ی جریان و انتقال حرارت پیرامون دو استوانه‌ی دوار با آرایش پهلوپه‌پهلو محدود به سالهای اخیر است. مطالعات تجربی بیشتر به بررسی ساختار جریان و ریزش گردابه و تعیین سرعت دورانی بحرانی پرداخته‌اند و مطالعات عددی موجود تنها برای یک رینولدز مشخص انجام شده است و تاثیر تغییر عدد رینولدز و جهت دوران بر پارامترهای جریان مانند ضرایب لیفت و درگ و عدد نوسلت بررسی نشده است. هدف اصلی این مطالعه بررسی ساختار جریان و انتقال حرارت و تعیین پارامترهایی همچون سرعت دورانی بحرانی، عدد استروهال، ضریب فشار متوسط، ضرایب درگ و لیفت متوسط و اعداد نوسلت محلی و متوسط و بررسی روند تغییرات آنها با سرعت دورانی، فاصله‌ی بی‌بعد و جهت دوران استوانه‌ها می‌باشد.

در این مطالعه جریان و انتقال حرارت اجباری پیرامون یک استوانه‌ی دوار، دو استوانه‌ی پهلوپه‌پهلو با دوران داخلی و دو استوانه‌ی پهلوپه‌پهلو با دوران خارجی به صورت عددی بررسی می‌شود. در روشهای معمول برای حل چنین مسائلی، منطقه جریان توسط روش المان محدود^۳ یا اختلاف محدود^۴ شبکه بندی می‌شود و هر المان یا سلول مطابق با حرکت جسم حرکت می‌کند یا تغییر شکل می‌دهد. در این روشها به یک پروسه شبکه سازی مجدد،

³ Finite-element

⁴ Finite-difference

جهت جلوگیری از شکست محاسبات در اثر تغییر شکل جدی المانها نیاز خواهد بود. برای انجام این وظیفه، برنامه باید شامل یک بخش تولید کننده شبکه باشد که بتواند به طور خودکار و با سرعت، فرایند تولید شبکه را به انجام رساند. البته ایجاد چنین شبکه ساز کارآمدی، کار چندان ساده ای نیست. برای اجتناب از این مشکل، در این پروژه از تکنیک برهم نهادن شبکه ها^۵ برای تحلیل جریان استفاده می شود. در این روش نیازی به شبکه سازی مجدد نبوده و تعمیم مسئله به حالت جریان حول چند جسم نیز ساده می باشد.

لازم به ذکر است که در کار حاضر جریان آرام، دو بعدی و تراکم ناپذیر مورد بررسی قرار می گیرد، معادلات جریان به روش سیمپل سی^۶ حل می شوند و شبکه ها از نوع هم مکان^۷ هستند. آنچه در فصول بعد آورده می شود به ترتیب زیر است:

فصل بعد (فصل دوم) به بحث راجع به معادلات حاکم، شرایط مرزی، تکنیک برهم نهادن شبکه ها، الگوریتم جستجو و روش میان یابی اطلاعات اختصاص دارد.

در فصل سوم، جریان و انتقال حرارت جابه جایی اجباری پیرامون یک استوانه‌ی دوار در اعداد رینولدز مختلف بررسی شده و تاثیر سرعت دورانی استوانه بر ساختار جریان و پارامترهایی مانند ضرایب درگ و لیفت و عدد نوسلت به دست می آید.

در فصل چهارم به بررسی ساختار جریان و انتقال حرارت جابه جایی اجباری پیرامون دو استوانه‌ی دوار پهلو به پهلو با دوران داخلی پرداخته می شود. ساختار جریان با تغییر سرعت دورانی و فاصله‌ی دو استوانه بررسی شده و تغییرات پارامترهایی نظیر ضرایب نیرو، عدد استروهل، سرعت دورانی بی بعد بحرانی و عدد نوسلت گزارش می شود.

در فصل پنجم نیز به بررسی ساختار جریان و انتقال حرارت جابه جایی اجباری پیرامون دو استوانه‌ی دوار پهلو به پهلو با دوران خارجی پرداخته می شود. ساختار جریان با تغییر سرعت دورانی و فاصله‌ی دو استوانه بررسی شده و تغییرات پارامترهایی نظیر ضرایب نیرو، عدد استروهل، سرعت دورانی بی بعد بحرانی و عدد نوسلت گزارش می شود.

⁵ Overset grid

⁶ SIMPLEC

⁷ Colocated

فصل دوم

معادلات حاکم و شرایط مرزی

تکنیک برهم نهی شبکه ها

در این پروژه از روش برهم نهادن شبکه ها (Overset grid) برای بررسی دوران یک و دو استوانه‌ی پهلویبه پهلودر مسیر جریان استفاده می شود. در روش برهم نهادن شبکه ها، شبکه جداگانه ای (شبکه فرعی) برای هر قسمت از ناحیه حل که گرادیان بالا دارد، روی شبکه اصلی قرار داده می شود. بدین ترتیب برای حل مسئله مورد نظر از یک شبکه اصلی استفاده می شود که در این مورد یک شبکه کارتیزین است (شبکه از نوع H). این شبکه ثابت بوده و تمام ناحیه حل را می پوشاند. یک شبکه فرعی نیز حول استوانه (ناحیه ای که در آن گرادیان فشار و سرعت زیاد است) ایجاد شده که بر روی شبکه اصلی قرار می گیرد. این شبکه از نوع O و منطبق بر بدنه¹ است و همراه با جسم حرکت می کند. در شکل ۱-۲ شبکه های اصلی و فرعی به همراه جسم نشان داده شده اند. به منظور حل جریان حول استوانه، معادلات جریان در هر دو شبکه فرعی و اصلی به صورت جداگانه حل می شوند و اطلاعات بدست آمده در نقاط خاصی مبادله می شوند. در مورد شبکه اصلی، نقاطی که اطلاعات را از شبکه فرعی دریافت می کنند. نزدیک ترین نقاط به مرز جسم هستند که خارج از محدوده جسم قرار می گیرند. برای شبکه فرعی، نقاط دریافت کننده اطلاعات، نقاط واقع بر مرز خارجی شبکه فرعی هستند. (چنانچه در ادامه گفته می شود این دو دسته نقاط، نقاط پر نامیده می شوند).

¹ Body fitted