





دانشکده فنی و مهندسی

گروه مهندسی مکانیک

پایان نامه جهت دریافت

درجه کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک\_ تبدیل انرژی

موضوع : بررسی تأثیر زاویه و فاصله صفحه جداکننده بر جریان حول  
استوانه چرخان

استاد راهنما: دکتر محمد سفید

استاد مشاور: دکتر شهرام طالبی

پژوهش و نگارش: علی محمد کتیبه

دی ماه ۱۳۹۲

# دانشگاه یزد

دانشکده فنی و مهندسی

گروه مهندسی مکانیک

پایان نامه جهت دریافت

درجه کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک\_ تبدیل انرژی

موضوع: بررسی تأثیر زاویه و فاصله صفحه جداکننده بر جریان حول  
استوانه چرخان

استاد راهنما: دکتر محمد سفید

استاد مشاور: دکتر شهرام طالبی

پژوهش و نگارش: علی محمد کتیبه

دی ماه ۱۳۹۲

تقديم به :

مادر و پدر عزيزم

نهایت تشکر و سپاسگزاری را از اساتید گرامی، جناب آقای دکتر سفید و جناب آقای دکتر طالبی دارم که همواره از راهنمایی‌های ارزنده ایشان بهره‌مند بوده‌ام.

## چکیده

تاکنون تحقیقات فراوانی در زمینه جریان حول استوانه ساکن انجام شده است. بسیاری از آن‌ها برای کنترل پدیده ریزش گردابه و کاهش ضریب درگ از صفحه‌ای افقی در پشت استوانه استفاده کرده و با تغییر فاصله، نیروی درگ بهینه را بدست آورده‌اند. از طرف دیگر جریان حول استوانه چرخان در نرخ‌های چرخش مختلف (نسبت سرعت چرخشی استوانه به سرعت جریان آزاد  $\alpha = \frac{U_{\theta}}{U_{\infty}} = \frac{R\omega}{U_{\infty}}$ ) و تأثیر آن بر مشخصات جریان از جمله ضرایب لیفت و درگ توسط دانشمندان بررسی شده است. برای اولین بار در گزارش حاضر جریان حول استوانه ساکن و چرخان با یک صفحه در پشت آن به وسیله نرم افزار دینامیک سیالاتی ANSYS-CFX شبیه سازی و بررسی شد. یک بار صفحه‌ای افقی و بار دیگر صفحه‌ای خمیده در فواصل گوناگون پشت استوانه قرار داده شده تا بیشترین ضریب لیفت و یا کم‌ترین ضریب درگ روی آن بدست آید. عدد رینولدز جریان برابر  $Re=60,000$  بوده و نرخ چرخش در بازه [۰-۲] تغییر می‌کند.

با بررسی جریان مشاهده شد که با افزایش نرخ چرخش، به طور کلی ضریب لیفت در هر سه حالت استوانه تنها، استوانه با صفحه افقی و استوانه با صفحه خمیده افزایش می‌یابد. از طرف دیگر ضریب درگ برای استوانه تنها و استوانه با صفحه افقی سیر نزولی داشته، در حالی که برای استوانه با صفحه خمیده تغییر چندانی ندارد. سپس در ادامه تغییرات پارامترها نسبت به فاصله صفحه از انتهای استوانه نیز بررسی شد. بیشترین کاهش ضریب درگ توسط صفحه افقی پشت استوانه ساکن ایجاد شده و مقدارش نسبت به مقدار متناظر برای استوانه تنها به میزان ۴۹٪ کاهش یافته است. همچنین بیشترین افزایش نیروی لیفت نیز توسط صفحه خمیده و در نرخ چرخش  $\alpha=2$  به وجود آمده و مقدارش نسبت به مقدار متناظر برای استوانه تنها به اندازه ۲۶٪ افزایش یافته است. بیشترین ضریب لیفت نیز در همین حالت رخ می‌دهد. اما کم‌ترین ضریب درگ را خود استوانه تنها و در نرخ چرخش  $\alpha=2$  ایجاد کرده است.

## فهرست ها

### فهرست مطالب

|   |    |
|---|----|
| فهرست ها.....   | أ  |
| فهرست مطالب .....   | أ  |
| فهرست تصاویر .....  | ج  |
| فهرست جداول .....   | ز  |
| فهرست علائم و نمادهای یونانی .....  | ح  |
| فصل اول – مقدمه.....  | ۱  |
| ۱-۱ فیزیک جریان حول استوانه ساکن و چرخان.....   | ۱  |
| ۱-۱-۱ جریان پتانسیل.....  | ۱  |
| ۱-۱-۲ جریان واقعی حول استوانه ساکن و چرخان .....  | ۷  |
| ۲-۱ مروری بر تحقیقات انجام شده .....  | ۸  |
| ۱-۲-۱ جریان حول استوانه ساکن و چرخان.....   | ۸  |
| ۳-۱ کاربرد استوانه چرخان به عنوان پره در توربین بادی محور افقی با نیروی لیفت ناشی از اثر مگنوس..... | ۱۴ |
| ۴-۱ تعریف مسئله و اهداف این پایان نامه .....  | ۱۵ |
| فصل دوم – صفحه و کاربرد آن در کنترل جریان.....  | ۱۷ |
| ۱-۲ مروری بر تحقیقات انجام شده در زمینه جریان حول استوانه با صفحه جدا از انتهای آن.....             | ۱۸ |
| فصل سوم – شبیه سازی عددی.....   | ۲۷ |
| ۱-۳ دامنه محاسبات و شبکه بندی.....  | ۲۷ |
| ۲-۳ شرایط مرزی.....   | ۲۸ |

|          |  |
|----------|--|
| ۲۹.....  | ۳-۳ مدل‌های توربولانسی و عملکرد آن در نرم افزار ANSYS-CFX                                |
| ۴۲ ..... | فصل چهارم- نتایج و بحث پیرامون آن  |
| ۳۴.....  | ۱-۴ نتایج شبیه سازی جریان روی استوانه ساکن و چرخان                                       |
| ۴۱.....  | ۲-۴ نتایج شبیه سازی جریان روی استوانه ساکن و چرخان با صفحه افقی و خمیده در فواصل گوناگون |
| ۴۲.....  | ۱-۲-۴ بررسی مشخصات جریان حول استوانه با صفحه افقی  |
| ۵۲.....  | ۲-۲-۴ بررسی مشخصات جریان حول استوانه با صفحه هادی خمیده                                  |
| ۵۹.....  | ۳-۲-۴ بررسی تأثیر نرخ چرخش بر مشخصات جریان حول استوانه چرخان با صفحه افقی و خمیده        |
| ۶۳.....  | ۴-۲-۴ مقایسه مشخصات جریان حول استوانه با صفحه افقی و خمیده                               |
| ۷۰ ..... | فصل پنجم - نتیجه گیری و پیشنهادات  |
| ۶۸.....  | منابع و مأخذ   |



## فهرست تصاویر

- شکل (۱-۱): نحوه عملکرد یک پره استوانه‌ای. (الف) - مدل دینامیک سیالاتی. (ب) - تصویر مرجع جهت تحلیل پدیده دینامیک سیالات جریان روی استوانه چرخان. (ج) - نحوه محاسبه نیروی وارد بر استوانه. (د) - نحوه عملکرد روتور یک پره استوانه‌ای [۱]..... ۲
- شکل (۲-۱): (الف): تحلیل تغییرات توزیع فشار روی سطح خارجی استوانه ناشی از سرعت چرخشی، خطوط بالا و پایین به ترتیب توزیع فشار روی سطوح بالا و پایین استوانه و خطوط میانی، فشار خالص روی کل سطح را نشان می‌دهند، (ب): نمای بزرگ شده از توزیع فشار روی سطح پایینی. [۱]..... ۶
- شکل (۳-۱):  $Re=200$ ، جریان عبوری از روی استوانه چرخان، تاریخچه زمانی ضریب لیفت برای مقادیر مختلف  $\alpha$  [۷]. دایره‌های توپر حاصل نتایج محاسباتی بدر و همکارانش (۱۹۹۳) [۹] می‌باشد. .... ۱۰
- شکل (۴-۱):  $Re=200$ ، جریان عبوری از روی استوانه چرخان، تغییرات مقادیر متوسط زمانی ضرایب (الف) لیفت و (ب) درگ،  $r.m.s$  ضرایب (ج) لیفت و (د) درگ، (ز) ضریب توان و (و) عدد استروهمال بر حسب نرخ چرخش. نمودارهای (الف)، (ب) و (ز) مقادیر متوسط زمانی برای شبیه‌سازی‌های ناپایدار و شبیه‌سازی‌های با حل پایدار از طریق حذف بخش‌های ناپایداری در معادله حاکم را نشان می‌دهد. [۷]..... ۱۱
- شکل (۵-۱): خطوط جریان متوسط زمانی میدان سرعت برای نرخ چرخش در بازه  $0 \leq \alpha \leq 2$ . (چرخش پادساعتگرد) [۲۲]..... ۱۳
- شکل (۶-۱): نمودار ضرایب (الف) لیفت و (ب) درگ بر حسب نرخ چرخش. در این نمودارها مقایسه‌ای میان نتایج آزمایشگاهی الملیگ [۲۱]، نتایج عددی آوکی و ایتو [۲۰]، نتایج عددی کارابلاس [۲۳] انجام شده است. در تمامی آن‌ها  $Re=60,000$  می‌باشد. .... ۱۳
- شکل (۷-۱): (الف) شکل شماتیک و نحوه عملکرد توربین مگنوس. ۱- پره استوانه‌ای ۲- صفحه انتهایی ۳- شافت اصلی توربین ۴- پایه.  $F$ : نیروی لیفت مولد گشتاور حول شافت اصلی. (ب) سطح مقطع پره استوانه‌ای، جریان عبوری از روی استوانه چرخان با سرعت  $V$  باعث تولید نیروی لیفت در جهت  $Y$  می‌شود. (ج) نمای شماتیک از جریان عبوری بر روی توربین. [۱]..... ۱۵
- شکل (۱-۲): نمای شماتیک استوانه و صفحه در پایین دست آن [۲۷]..... ۱۹
- شکل (۲-۲): تغییرات  $C_D$  بر حسب  $G/D$ .  $Re=30$  (◇).  $Re=100$  (□).  $Re=160$  (∇) [۲۸]..... ۲۰
- شکل (۳-۲): تغییرات  $St$  با  $G/D$ .  $Re=100$  (□).  $Re=160$  (∇) [۲۸]. نتایج تجربی اوزنو در  $Re=6700$  (Δ) [۲۷]..... ۲۰
- شکل (۴-۲): متوسط زمانی خطوط جریان ناپایدار برای  $Re=100$ ، (الف)  $G/D = 2$ . (ب)  $G/D = 2/7$ . (ج)  $G/D = 2/7$  [۲۸]..... ۲۱

- شکل (۲-۵): کانتورهای ورتیسسته عرضی آنی ( $\omega'$ ) در بازه‌های زمانی ثابت در طول یک سیکل ریزش گردابه،  $Re=160$ ،  $G/D = 2/6$ . در اینجا  $T$  دوره تناوب ریزش گردابه و  $\Delta\omega'd/U\infty = 0.056$  می‌باشد [۲۸]. ..... ۲۱
- شکل (۲-۶): کانتورهای ورتیسسته عرضی آنی ( $\omega'$ ) در بازه‌های زمانی ثابت در طول یک سیکل ریزش گردابه،  $Re=160$ ،  $G/D = 2/7$ . در اینجا  $T$  دوره تناوب ریزش گردابه و  $\Delta\omega'd/U\infty = 0.056$  می‌باشد [۲۸]. ..... ۲۲
- شکل (۲-۷): تغییرات ضریب درگ و لیفت با تغییر محل صفحه منحرف کننده در  $Re=100$  (الف) ضریب درگ، (ب) قدر مطلق دامنه ضریب لیفت [۲۹]. ..... ۲۳
- شکل (۲-۸): دامنه محاسباتی و صفحات جدا کننده در بالا و پایین دست استوانه [۳۱]. ..... ۲۴
- شکل (۲-۹): تغییرات ضریب درگ بر حسب فاصله صفحه پایین دست  $G2/D$ ، در جریان با  $Re=100$  و فاصله ثابت صفحه بالادستی  $G1/D = 1/5$  برای جریان حول استوانه با دو صفحه در بالادست و پایین دست (□). در این شکل همچنین تغییرات ضریب درگ بر حسب فاصله صفحه در پایین دست برای حالتی که تنها یک صفحه جدا کننده وجود داشته باشد ( $\Delta$ )، رسم شده است. [۳۱]. ..... ۲۴
- شکل (۲-۱۰): تأثیر عدد رینولدز بر فاصله بحرانی.  $6/7 \times 10^4$  ( $\Delta$  و  $\nabla$ )،  $1/7 \times 10^4$  (● و ○)،  $2/5 \times 10^4$  (× و □)  $St$ ،  $C_{pb}$ ،  $\Delta$ ،  $\circ$ ،  $\times$  [۲۷]. ..... ۲۵
- شکل (۳-۱): نمای شماتیک و ابعاد تونل باد. ..... ۲۷
- شکل (۳-۲): نمای شماتیک و شرایط مرزی تونل باد. (الف): استوانه با صفحه افقی - (ب): استوانه با صفحه خمیده. ..... ۲۷
- شکل (۳-۳): شبکه بندی هندسه جریان حول استوانه و صفحه افقی و خمیده. ..... ۲۸
- جدول (۲-۴): مقایسه نتایج ضریب درگ برای حل غیر دائم در حالت های مختلف (گام زمانی و دقت های مختلف). حالت دوم به عنوان پیش فرض برای گزارش حاضر انتخاب شده است. ..... ۳۵
- شکل (۴-۱): نمودار متوسط ضرایب (الف) لیفت و (ب) درگ بر حسب نرخ چرخش. نتایج حاضر (خط ممتد) با نتایج آزمایشگاهی المیلیگ (□) [۲۱]، نتایج عددی آوکی و ایتو (- - -) [۲۰]، نتایج عددی کارابلاس با  $Re=60,000$  ( $\Delta$ ) [۲۲] و نتایج عددی کارابلاس با  $Re=140,000$  (○) [۲۳] مقایسه شده است. در تمامی آن‌ها به جز مورد آخر  $Re=60,000$  می‌باشد. ..... ۳۷
- شکل (۴-۲): کانتور نسبت لزجت توربولانسی ( $\mu_t/\mu$ ) برای جریان روی استوانه ساکن ..... ۳۷
- شکل (۴-۳): (الف) مقایسه ضریب فشار روی سطح استوانه بر حسب زاویه در نرخ های چرخش  $\alpha=0, 1, 2$ . (ب) نحوه محاسبه زاویه مورد استفاده در قسمت (الف). ..... ۳۸

شکل (۴-۴) : خطوط جریان (شکل های سمت چپ) و کانتور فشار (شکل های سمت راست) حول استوانه برای نرخ های چرخش مختلف..... ۴۰

شکل (۵-۴) : تغییرات ضرایب (الف) لیفت و (ب) درگ، دامنه نوسانات ضرایب (ج) لیفت و (د) درگ و (ه) عدد استروهال نسبت به فاصله صفحه افقی از انتهای استوانه ساکن ( $\alpha=0$ )..... ۴۳

شکل (۶-۴) : مقایسه خطوط جریان (شکل های بالایی) و کانتور فشار (شکل های پایینی). (الف) جریان حول استوانه تنها و (ب) - جریان حول استوانه با صفحه افقی ( $\alpha=0$ )..... ۴۴

شکل (۷-۴) : متوسط زمانی خطوط جریان ناپایدار برای  $Re=100$  ، (الف)  $x/D = 2$  . (ب)  $x/D = 2/6$  (ج)  $x/D = 2/7$  [۲۸]. صفحه در حالت های (الف) و (ب) قبل از فاصله بحرانی و در حالت (ج) بعد از آن قرار دارد..... ۴۵

شکل (۸-۴) : مقایسه خطوط جریان حول استوانه ساکن با صفحه افقی ( $\alpha=0$ ). (الف) صفحه قبل از فاصله بحرانی. (ب) صفحه بعد از فاصله بحرانی..... ۴۵

شکل (۹-۴) : تغییرات (الف) ضریب درگ، (ب) دامنه نوسان ضریب لیفت و (ج) عدد استروهال نسبت به فاصله صفحه افقی از انتهای استوانه ساکن و مقایسه با نتایج دهکردی ( $\Delta$ ) [۲۹] ، هوانگ ( $\square$ ) [۲۸] و اوزنو ( $\circ$ ) [۲۷]. تمام نتایج در  $Re=100$  می باشد..... ۴۷

شکل (۱۰-۴) : تأثیر عدد رینولدز بر عدد استروهال و فاصله بحرانی. نتایج حاضر با  $Re=60,000$  (خط ممتد)، هوانگ با  $Re=100$  ( $\square$ ) [۲۸]، اوزنو با اعداد رینولدز  $Re=6700$  (x) ،  $Re=17,000$  ( $\circ$ ) [۲۷] ( $\Delta$ )  $Re=25,000$ ..... ۴۸

شکل (۱۱-۴) : تغییرات ضرایب (الف) لیفت و (ب) درگ، دامنه نوسانات ضرایب (ج) لیفت و (د) درگ و (ه) عدد استروهال نسبت به فاصله صفحه افقی از انتهای استوانه چرخان با نرخ چرخش  $\alpha=1$ ..... ۴۹

شکل (۱۲-۴) : مقایسه خطوط جریان حول استوانه چرخان با صفحه افقی ( $\alpha=1$ ). (الف) صفحه قبل از فاصله بحرانی. (ب) صفحه بعد از فاصله بحرانی..... ۵۰

شکل (۱۳-۴) : تغییرات ضرایب (الف) لیفت و (ب) درگ نسبت به فاصله صفحه افقی از انتهای استوانه با نرخ چرخش  $\alpha=2$ ..... ۵۱

شکل (۱۴-۴) : مقایسه خطوط جریان حول استوانه چرخان با صفحه افقی ( $\alpha=2$ ) در فواصل گوناگون..... ۵۲

شکل (۱۵-۴) : تغییرات ضرایب (الف) لیفت و (ب) درگ، دامنه نوسانات ضرایب (ج) لیفت و (د) درگ و (ه) عدد استروهال نسبت به فاصله صفحه خمیده از انتهای استوانه ساکن ( $\alpha=0$ )..... ۵۳

شکل (۱۶-۴) : خطوط جریان (شکل های بالایی) و کانتور فشار (شکل های پایینی) حول استوانه ساکن ( $\alpha=0$ ) با صفحه خمیده در فواصل گوناگون..... ۵۴

- شکل (۴-۱۷): تغییرات ضرایب (الف) لیفت و (ب) درگ، دامنه نوسانات ضرایب (ج) لیفت و (د) درگ و (ه) عدد استروهاال نسبت به فاصله صفحه خمیده از انتهای استوانه چرخان با نرخ چرخش  $\alpha=1$  ..... ۵۶
- شکل (۴-۱۸): خطوط جریان حول استوانه و صفحه هادی خمیده ( $135^\circ$ ) برای فواصل مختلف و نرخ چرخش  $\alpha=1$  ..... ۵۷
- شکل (۴-۱۹): خطوط جریان حول استوانه و صفحه هادی  $135^\circ$  در فاصله  $x/D = 0/5$  و زمان‌های مختلف در یک سیکل ریزش گردابه و در  $\alpha=1$  ..... ۵۷
- شکل (۴-۲۰): تغییرات ضرایب (الف) لیفت و (ب) درگ نسبت به فاصله صفحه خمیده از انتهای استوانه چرخان با نرخ چرخش  $\alpha=2$  ..... ۵۸
- شکل (۴-۲۱): خطوط جریان (شکل های بالایی) و کانتور فشار (شکل های پایینی) حول استوانه و صفحه هادی  $135^\circ$  برای فواصل مختلف و نرخ چرخش  $\alpha=2$  ..... ۵۹
- شکل (۴-۲۲): تغییرات ضرایب (الف) لیفت و (ب) درگ، دامنه نوسانات ضرایب (ج) لیفت و (د) درگ و (ه) عدد استروهاال نسبت به نرخ چرخش برای استوانه با صفحه افقی در فواصل مختلف ..... ۶۰
- شکل (۴-۲۳): تداخل گردابه های فرو ریخته از استوانه و صفحه افقی،  $\alpha = 1$  و  $x/D = 1/5$  ..... ۶۱
- شکل (۴-۲۴): تغییرات ضرایب (الف) لیفت و (ب) درگ نسبت به نرخ چرخش برای استوانه با صفحه خمیده در فواصل مختلف ..... ۶۳
- شکل (۴-۲۵): مقایسه ضرایب (الف) لیفت و (ب) درگ برای استوانه با صفحه افقی و خمیده در فاصله  $x/D = 1/5$  ..... ۶۴

## فهرست جداول

- جدول (۱-۳): تعریف ابعاد هندسی و پارامترهای جریان ..... ۲۸
- جدول (۲-۳): شرایط مرزی ..... ۲۹
- جدول (۱-۴): مقایسه ضریب درگ برای استوانه ساکن برای حل دائم و غیر دائم ..... ۳۵
- جدول (۳-۴): مقایسه نتایج ضرایب لیفت و درگ برای سه شبکه بندی مختلف برای استوانه با نرخ چرخش  $\alpha=1$  ..... ۳۹
- جدول (۴-۴): مقایسه نتایج متوسط برآیند ضرایب لیفت و درگ کلی بر روی استوانه با صفحه افقی و خمیده، در نرخ چرخش  $\alpha = 1$  و فاصله  $x/D = 0.5$  برای سه شبکه بندی مختلف ..... ۴۱

## فهرست علائم و نمادهای یونانی

### فهرست علائم

|                                     |  |
|-------------------------------------|--|
| A.....                              | سطح تصویر استوانه.....                           |
| R.....                              | شعاع استوانه.....                                |
| D.....                              | قطر استوانه.....                                 |
| $U_{\theta}$ , $U_{\theta s}$ ..... | سرعت خطی استوانه.....                            |
| $U_r$ .....                         | سرعت شعاعی.....                                  |
| Re.....                             | عدد رینولدز.....                                 |
| $U_{\infty}$ .....                  | سرعت جریان باد.....                              |
| P.....                              | فشار جریان سیال.....                             |
| $P_{\infty}$ .....                  | فشار جریان آزاد.....                             |
| $C_p$ .....                         | ضریب فشار.....                                   |
| $L'$ .....                          | نیروی لیفت بر واحد طول استوانه.....              |
| $D'$ .....                          | نیروی درگ بر واحد طول استوانه.....               |
| $F_L$ .....                         | نیروی لیفت.....                                  |
| $F_D$ .....                         | نیروی درگ.....                                   |
| $F_{L/total}$ .....                 | برآیند نیروی لیفت روی صفحه و استوانه.....        |
| $F_{D/total}$ .....                 | برآیند نیروی درگ روی صفحه و استوانه.....         |
| $C_L$ .....                         | ضریب لیفت.....                                   |
| $C_D$ .....                         | ضریب درگ.....                                    |
| $C_{L/total}$ .....                 | برآیند ضریب لیفت روی صفحه و استوانه.....         |
| $C_{D/total}$ .....                 | برآیند ضریب درگ روی صفحه و استوانه.....          |
| St.....                             | عدد استروهاال.....                               |
| f.....                              | فرکانس ریزش گردابه.....                          |
| b.....                              | پهنای جسم.....                                   |
| $L_f$ .....                         | طول ناحیه تشکیل گردابه.....                      |
| $C_p$ .....                         | ضریب توان.....                                   |
| $C_p$ .....                         | ضریب فشار.....                                   |
| F.....                              | نیروی لیفت مولد گشتاور حول شافت اصلی توربین..... |
| G.....                              | فاصله افقی صفحه از انتهای استوانه.....           |
| Z.....                              | فاصله عمودی صفحه از انتهای استوانه.....          |
| $C_{pb}$ .....                      | ضریب مکش پایه.....                               |
| $P_o$ .....                         | متوسط زمانی فشار در نقطه سکون استوانه.....       |
| $P_b$ .....                         | متوسط زمانی فشار در نقطه عقبی استوانه.....       |
| L.....                              | طول صفحه.....                                    |
| $P'$ .....                          | فشار اصلاح شده.....                              |

|                       |                              |
|-----------------------|------------------------------|
| $K$ .....             | انرژی جنبشی توربولانس        |
| $Tu$ .....            | شدت توربولانس                |
| $Re_{\theta t}$ ..... | عدد رینولدز ضخامت ممتموم     |
| $Re_{xt}$ .....       | عدد رینولدز گذار             |
| $x$ .....             | فاصله صفحه از انتهای استوانه |

### فهرست نمادهای یونانی

|                     |                       |
|---------------------|-----------------------|
| $\alpha$ .....      | نرخ چرخش استوانه      |
| $\omega$ .....      | سرعت زاویه‌ای استوانه |
| $\Gamma$ .....      | قدرت ورتکس            |
| $k$ .....           | قدرت دابلت            |
| $\rho$ .....        | چگالی                 |
| $\mu$ .....         | لزجت دینامیکی         |
| $\nu$ .....         | لزجت سینماتیکی        |
| $\phi$ .....        | تابع پتانسیلی         |
| $\omega'$ .....     | ورتیسیته عرضی آنی     |
| $\mu_{eff}$ .....   | لزجت موثر توربولانس   |
| $\mu_t$ .....       | لزجت توربولانسی       |
| $\varepsilon$ ..... | نرخ تلفات توربولانس   |
| $\omega$ .....      | فرکانس توربولانس      |

## فصل اول – مقدمه

### ۱-۱ فیزیک جریان حول استوانه ساکن و چرخان

#### ۱-۱-۱ جریان پتانسیل

برای شناخت جریان حول استوانه ساکن و چرخان بایستی ابتدا به تحلیل جریان پیوسته ، تراکم ناپذیر و غیر لزج پرداخت. علت بررسی غیر لزج جریان این است که فرض کرده‌ایم عدد رینولدز جریان بسیار بزرگ است. در واقع عدد رینولدز رابطه میان نیروهای اینرسی و نیروهای لزج را به صورت  $\frac{U_{\infty} D}{\nu}$  مشخص می‌کند، که  $U_{\infty}$  سرعت جریان آزاد ،  $D$  قطر استوانه و  $\nu$  لزجت سینماتیکی سیال ( $10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$  برای هوا در  $15^{\circ}\text{C}$  و فشار اتمسفر) می‌باشد. تحت این شرایط تئوری سیال غیر لزج یک ارزیابی کافی از توزیع فشار روی جسم صلب ، نیروی لیفت و میدان جریانی که استوانه در آن غوطه‌ور است را بدست می‌دهد. بعلاوه، بر اساس داده های تجربی، امکان تنظیم رفتار ایده آل فرضی و تصحیح آن جهت دستیابی به ارزیابی واقعی تر وجود دارد.

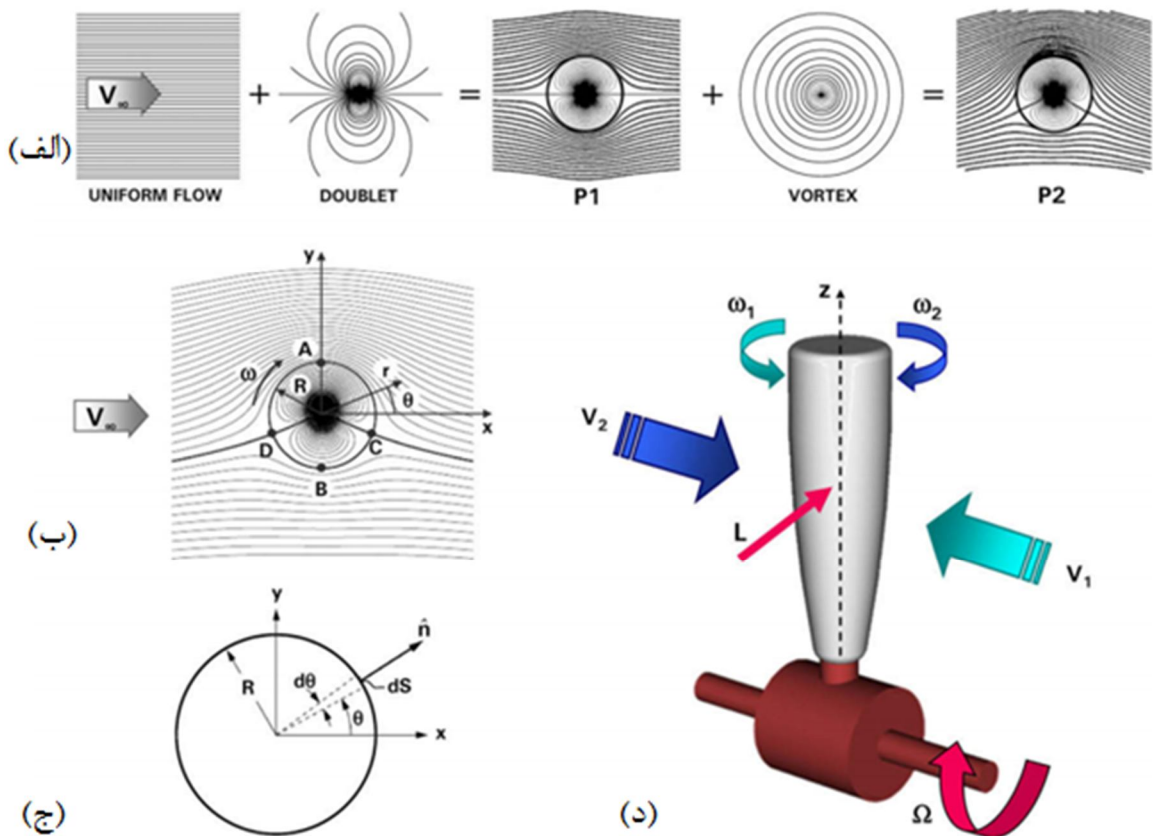
در نهایت جریان به صورت یکنواخت و پایدار فرض می‌شود.

با صرف نظر کردن از تأثیر لزجت، امکان مطالعه پدیده دینامیک سیالات مورد نظر در زمینه جریان غیر چرخشی یا به عبارت دیگر جریان پتانسیل فراهم می‌شود. در این نوع جریان تابعی به نام تابع سرعت پتانسیلی تعریف می‌شود. با این روش مدل سازی را می‌توان به صورت خطی انجام داد، و در نتیجه اجازه استفاده از برهم نهی اثرات انواع مختلف سیالات وجود دارد. این مطلب به وضوح در شکل (۱-۱) - (الف) مشاهده می‌شود، تحلیل دو بعدی پدیده ، اثرات برهم نهی



یک جریان یکنواخت ، یک دابلت و یک ورتکس را نشان می‌دهد. برهم نهی جریان یکنواخت با یک دابلت ( دابلت ترکیبی از یک کوپل چشمه و چاه است که فاصله آن‌ها به سمت صفر میل می‌کند) شرایط استوانه‌ای ثابت را ایجاد می‌کند که در جریان غوطه‌ور است ( پدیده  $P_1$  در شکل (۱-۱) - (الف)). با اضافه کردن یک ورتکس به آن‌ها ، به طوری که مرکز آن با مرکز دابلت منطبق باشد ( که محور استوانه را می‌سازد) ، شرایط یک استوانه چرخان حول محور خود و غوطه‌ور در جریان را ایجاد می‌کند ( پدیده  $P_2$  در شکل (۱-۱) (الف)).

با فرض جریان پتانسیلی، امکان تعریف تابع اسکالر سرعت پتانسیلی  $\Phi(x,y,z)$  را فراهم می‌آورد، به طوری که گرادیان آن معرف میدان سرعت می‌باشد:  $U = \text{Grad } \Phi$ .



شکل (۱-۱) : نحوه عملکرد یک پره استوانه‌ای. (الف) - مدل دینامیک سیالاتی. (ب) - تصویر مرجع جهت تحلیل پدیده دینامیک سیالات جریان روی استوانه چرخان. (ج) - نحوه محاسبه نیروی وارد بر استوانه. (د) - نحوه عملکرد روتور یک پره استوانه‌ای [۱]

با کاهش ابعاد تحلیل پدیده به دو بعد و استفاده از مختصات قطبی با انتخاب مبدأ در مرکز استوانه ، مؤلفه‌های شعاعی و مماسی سرعت به صورت زیر بدست می‌آید:

$$U_r = \frac{\partial \phi}{\partial r} \quad , \quad U_\theta = \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial \phi}{\partial \theta} \quad (1-1)$$

در مورد برهم نهی جریان یکنواخت با یک دابلت (پدیده P1 در شکل (1-1)-(الف)) ، سرعت پتانسیلی به صورت زیر بدست می آید:

$$\phi = U_\infty r \cos \theta + \frac{k \cos \theta}{2\pi r} = U_\infty r \cos \theta \left( 1 + \frac{R^2}{r^2} \right) \quad ; \quad R^2 = \frac{k}{2\pi U_\infty} \quad (2-1)$$

که  $U_\infty$  سرعت جریان آزاد و  $k$  قدرت دابلت می باشد. از رابطه 1-1 میدان سرعت به صورت زیر در می آید:

$$U_r = U_\infty \cos \theta \left( 1 - \frac{R^2}{r^2} \right) \quad , \quad U_\theta = -U_\infty \sin \theta \left( 1 + \frac{R^2}{r^2} \right) \quad (3-1)$$

برای رابطه 3-1 با  $r = R$  داریم:

$$U_r = 0 \quad , \quad U_\theta = -2U_\infty \sin \theta \quad (4-1)$$

روی سطح استوانه ،  $U_r$  همیشه و برای هر  $\theta$  صفر است. با توجه به جریان ، این محیط دایره با این شعاع مانند یک سطح صلب ( نفوذ ناپذیر ) عمل کرده و در نتیجه پروفیل یک استوانه با شعاع  $R$  و غوطه ور در جریان حول آن را نشان می دهد. رابطه 4-1 سرعت جریان روی سطح استوانه را بیان می کند: مؤلفه شعاعی همیشه صفر است، مؤلفه مماسی به ماکزیمم مقدار خود ( $2U_\infty$ ) در دو نقطه با مختصات قطبی  $(R, \pi/2)$  و  $(R, -\pi/2)$  می رسد، که محور مبدأ زاویه ها موازی جریان تنظیم می شود.

با برهم نهی یک ورتکس با قدرت  $\Gamma$  و با مبدأ مشابه روی سیستم جریان یکنواخت و دابلت ، شرایط یک استوانه چرخان با شعاع  $R$  که حول محور خودش با سرعت زاویه ای  $\omega = \frac{\Gamma}{2\pi R^2}$  می چرخد ایجاد می شود. همان طور که در شکل (1-1)-(ب) نیز مشخص شده است.

در این مورد سرعت پتانسیلی به صورت زیر بیان می شود:

$$\phi = U_\infty r \cos \theta + \frac{k \cos \theta}{2\pi r} - \frac{\Gamma}{2\pi} \theta = U_\infty r \cos \theta \left( 1 + \frac{R^2}{r^2} \right) - \omega R^2 \theta \quad (5-1)$$

از رابطه 1-1 میدان سرعت این جریان بدست می آید:

$$U_r = U_\infty \cos \theta \left( 1 - \frac{R^2}{r^2} \right) \quad , \quad U_\theta = -U_\infty \sin \theta \left( 1 + \frac{R^2}{r^2} \right) - \frac{\omega R^2}{r} \quad (6-1)$$

و از رابطه 6-1 برای  $r = R$  داریم:

$$U_r = 0, \quad U_\theta = -2U_\infty \sin \theta - \omega R \quad (7-1)$$

بنابراین روی محیط پیرامونی با شعاع  $R$ ،  $U_r$  همیشه و برای هر  $\theta$  صفر می‌باشد. با توجه به جریان، این محیط مانند یک سطح صلب نفوذ ناپذیر رفتار می‌کند، که سطح استوانه‌ای به شعاع  $R$  را تشکیل می‌دهد، و رابطه ۷-۱ سرعت جریان روی سطح استوانه را بیان می‌کند.

در مختصات قطبی نقاط  $(R, \pi/2)$  و  $(R, -\pi/2)$ ، که قبلاً در مورد استوانه ثابت بررسی شد، (در شکل (۱-۱)-ب) به صورت دو نقطه  $A$  و  $B$  نشان داده شده است، مؤلفه‌های شعاعی سرعت همیشه صفر است، در حالی که مؤلفه‌های مماسی مقدار  $2U_\infty \pm U_{\theta s}$  را داراست، که  $U_{\theta s} = R\omega$  سرعت جانبی استوانه می‌باشد ( $\Gamma = 2\pi R^2 \omega = 2\pi R U_{\theta s}$ ).

توزیع فشار روی سطح استوانه را می‌توان از معادله برنولی بدست آورد. با نشان دادن فشار جریان آزاد برابر  $P_\infty$  و چگالی سیال با  $\rho$ ، ضریب فشار به صورت زیر بیان می‌شود:

$$C_p(\theta) = \frac{p(\theta) - p_\infty}{\frac{1}{2}\rho U_\infty^2} = 1 - 4 \sin^2 \theta - \frac{\Gamma \sin \theta}{\pi R U_\infty} - \left( \frac{\Gamma}{2\pi R U_\infty} \right)^2 \quad (8-1)$$

که توزیع فشار روی سطح استوانه به صورت زیر در می‌آید:

$$p(\theta) = p_\infty + \frac{1}{2}\rho U_\infty^2 \left[ 1 - 4 \sin^2 \theta - \frac{2U_{\theta s} \sin \theta}{U_\infty} - \left( \frac{U_{\theta s}}{U_\infty} \right)^2 \right] \quad (9-1)$$

برای این جریان، توزیع فشار فقط نسبت به محور عمودی عبوری از مرکز استوانه متقارن است. به عبارت دیگر استوانه با حرکت چرخشی تقارن نسبت به محور افقی را حذف می‌کند. (تقارن نسبت به محور افقی برای استوانه ثابت وجود دارد). مکان نقاط سکون  $C$  و  $D$  در شکل (۱-۱)-ب) به همین منظور نشان داده شده است. اما در مورد استوانه ثابت، این نقاط روی محور افقی قرار دارد (پدیده  $P_1$  در شکل (۱-۱)-الف)). برای استوانه چرخان، این نقاط در زوایایی ( $\theta$ هایی) وجود دارد که رابطه دوم ۷-۱ را صفر کند ( $U_\theta = 0$ ). اگر فرض  $\omega$  مثبت را برای چرخش ساعتگرد در نظر بگیریم، نقاط سکون  $C$  و  $D$  در ربع سوم و چهارم دایره مثلثاتی که زیر محور افقی قرار دارد، واقع می‌شوند.

به علت همین عدم تقارن ناشی از چرخش استوانه، توزیع فشار در نواحی بالا و پایین آن نامتقارن می‌شود. برای محاسبه نیروی ناشی از این اختلاف فشار، به شکل (۱-۱)-ج) توجه نمایید. نیرو بر واحد طول در راستای محور  $Z$  (طول استوانه) را در نظر بگیرید، این برآیند را می‌توان توسط بردار زیر بیان کرد:

$$\vec{R}' = D' \hat{x} + L' \hat{y} = \oint (p - p_\infty) \hat{n} ds \quad (10-1)$$

که  $D'$  و  $L'$  به ترتیب نیروی درگ و لیفت بر واحد طول استوانه هستند.

با در نظر گرفتن رابطه ۱-۱۰ ضرایب لیفت و درگ در مورد استوانه به صورت زیر بیان می‌شود:

$$C_L = \frac{L'}{\frac{1}{2} \rho U_\infty^2 \cdot 2R} \quad , \quad C_D = \frac{D'}{\frac{1}{2} \rho U_\infty^2 \cdot 2R} \quad (11-1)$$

برای محاسبه این ضرایب بر حسب ضریب فشار  $C_p = \frac{p - p_\infty}{\frac{1}{2} \rho U_\infty^2}$  از روابط زیر استفاده می‌شود:

$$C_L = \frac{1}{2} \int_0^{2\pi} -C_p(\theta) \sin \theta d\theta \quad , \quad C_D = \frac{1}{2} \int_0^{2\pi} -C_p(\theta) \cos \theta d\theta \quad (12-1)$$

با جاگذاری ضریب فشار از رابطه ۱-۸ در رابطه ۱-۱۲ و انتگرال گیری ، مقادیر زیر برای ضرایب لیفت و درگ بدست می‌آید:

$$C_L = \frac{\Gamma}{U_\infty R} = \frac{2\pi U_\infty \theta_s}{U_\infty} \quad , \quad C_D = 0 \quad (13-1)$$

قسمت دوم رابطه ۱-۱۳ تصدیق می‌کند که نیروی درگ روی استوانه غوطه‌ور در یک سیال غیر لزج و تراکم ناپذیر همیشه صفر است، و فرقی میان استوانه چرخان و ثابت وجود ندارد. برعکس، آنچه با چرخش استوانه تغییر می‌کند شرایط نیروی لیفت است، که دیگر صفر نخواهد بود بلکه بر حسب نیرو در واحد کشیدگی محوری به صورت زیر بیان می‌شود:

$$L' = \frac{1}{2} \rho U_\infty^2 \times 2RC_L = \rho U_\infty \Gamma \quad (14-1)$$

این مطلب نتایج کلی‌تر قضیه کوتا-ژوکوفسکی را بیان می‌کند [۳،۲]، که بر اساس آن نیروی لیفت بر واحد طول محوری برای یک جسم دو بعدی با سیرکولاسیون حول آن جسم رابطه مستقیم دارد (در شرایط حاضر، سیرکولاسیون همان قدرت ورتکس  $\Gamma$  می‌باشد و پیرامون یک حلقه بسته حول مبدأ آن در نظر گرفته می‌شود).

با در نظر گرفتن یک استوانه با طول  $b$  و شعاع  $R$  ، که با سرعت زاویه‌ای  $\omega$  حول محور خود می‌چرخد، می‌توان با استفاده از رابطه ۱-۱۴ نیروی لیفت را به صورت زیر محاسبه کرد:

$$L = 2\pi \rho U_\infty (R^2 \omega b) \quad (15-1)$$

از روابط ۱-۶ و ۱-۷ می‌توان میدان سرعت جریان حول استوانه و روی سطح آن و از رابطه ۱-۹ توزیع فشار روی سطح برای استوانه غوطه‌ور در جریان آب با سرعت  $U_\infty = 2 \text{ m/s}$  را بدست آورد که