

دانشکده فنی مهندسی مکانیک

گروه مهندسی مکانیک

پایان نامه

جهت دریافت درجه کارشناسی ارشد در رشته مکانیک گرایش تبدیل انرژی

عنوان

تحقیق پیرامون بازچرخش جریان در داخل پروانه یک پمپ گریز از مرکز

استاد راهنما

دکتر میر بیوک احقایی

استاد مشاور

دکتر اسماعیل رضوی

پژوهشگر

امید جهانتاب

شهریور ۸۹

استاد راهنما: دکتر میر بیوک احقاقی

استاد مشاور: دکتر اسماعیل رضوی

مقطع تحصیلی: کارشناسی ارشد

رشته: مهندسی مکانیک

دانشگاه: تبریز

تعداد صفحات: ۸۳

تاریخ فارغ التحصیلی: ۸۹/۶/۳۱

**کلید واژه ها:** پمپ گریز از مرکز، شبیه سازی عددی، بازچرخش، جدایش جریان، کارکرد پمپ در شرایط بار-پایین، توزیع سرعت در داخل پروانه گریز از مرکز

### چکیده:

زمانی که یک پمپ گریز از مرکز در خارج از شرایط طراحی و در دبی کمتر از دبی BEP کار می کند، الگوهای جریان داخل پاساژ با شرایط طراحی کاملاً فرق خواهد کرد؛ در این شرایط جریان بطور کامل سه بعدی بوده و پدیده جدایی در جریان رخ داده و در ورود و خروج چرخ شاهد سیرکیولاسیون جریان خواهیم بود. در چنین شرایطی منحنی Q-H پمپ و نیروهای محوری و رادیال آن کاملاً دچار تغییرات شدیدی شده و احتمال افزایش سر و صدای پمپ و پدیده کاویتاسیون قوت می گیرد. تحلیل و درک شرایط پیچیده فوق ایجاب می کند که مطالعات زیادی در این مورد صورت بگیرد. در این پروژه ضمن مطالعه تئوریک پدیده جدایی و سیرکیولاسیون در پمپ و مرور کارهای صورت گرفته در این زمینه، سعی خواهیم کرد پدیده فوق را با استفاده از نرم افزارهای موجود تحلیل نموده و شرایطی را برای درک بهتر الگوی جریان در شرایط کارکرد بار-پایین<sup>۱</sup> فراهم کنیم.

در این تحقیق به بررسی و تحلیل جریان در داخل پروانه پمپ گریز از مرکز ۲۰۰-۶۵ در حین انتقال آب و با استفاده از نرم افزار فلونت<sup>۲</sup> پرداخته شده است. ابتدا هندسه پمپ گریز از مرکز ۲۰۰-۶۵ در نرم افزار گمبیت<sup>۳</sup> و cfturbo v5 ترسیم شده و سپس برای تحلیل به نرم افزار فلونت منتقل شده است. تحلیل جریان بصورت سه بعدی، تراکم ناپذیر، آشفته و در شرایط پایا انجام گرفته است.

در دبی طراحی نتایج نشان دهنده وجود جریان یکنواخت می باشد که در آن خطوط جریان در راستای پروفیل پره می باشد. در این دبی تقریباً هیچ گونه جدایش و برگشت جریان در داخل پاساژ دیده نمی شود. با کاهش دبی، کم کم برگشت جریان (جدایش) در چند پاساژ، در میانه های سطح فشاری پره اتفاق می افتد. این جدایش رفته رفته با کاهش دبی تا نزدیکی های خروجی پروانه رشد کرده و بازچرخش<sup>۴</sup> جریان در این ناحیه اتفاق می افتد. با کاهش هر چه بیشتر دبی، بازچرخش تمامی خروجی پاساژ را تحت تأثیر قرار داده و موجب

<sup>1</sup> Part-load

<sup>2</sup> FLUENT

<sup>3</sup> Gambit

<sup>4</sup> Recirculation

بسته شدن کامل ناحیه مربوطه می شود. در اثر انسداد خروجی پاساژ و برگشت جریان تا ورودی پاساژ، هیچ جریانی در دبی های پایین از لوله مکش وارد این پاساژها نمی شود. انسداد ورودی برخی از پاساژها موجب انتقال آب از دیگر پاساژها شده و بهمین علت، خطوط جریان در این پاساژها کاملاً در راستای پروفیل پره خواهد بود. در این تحقیق تقریباً هیچ گونه جدایش و برگشت جریان در ورودی پروانه دیده نمی شود.

## تشکر و قدردانی

اکنون که تحقیق حاضر با موفقیت به اتمام رسیده است لازم است از کلیه سرورانی که در این پایاننامه، به بنده مساعدت و یاری نمودند مراتب تشکر و قدردانی را بعمل بیاورم.

در وحله اول، تمام موفقیت هایم را مدیون خانواده گرامیم مخصوصا پدر دلسوز و مادر فداکار و مهربانم می باشم که همواره مشوق و امید دهنده من هستند.

از زحمات فراوان و راهنمایی های بی دریغ استاد ارجمندم جناب آقای دکتر احقایی در هدایت این پایاننامه صمیمانه تشکروسپاسگزاری می نمایم.

همچنین از جناب آقای دکتر رضوی جهت قبول زحمت مشاوره این پایاننامه کمال تشکر را دارم.

در پایان از کمک های سرکار خانم دکتر باهری و آقایان دکتر امین سلطانیه، دکتر قرایی و کلیه دوستان عزیزم، مخصوصا آقایان ، مهندس حسین ذاکری، مهندس بهنام خورشیدی، مهندس علی شاهینی و کلیه عزیزانی که در این پایاننامه به بنده مساعدت نمودند تشکر و قدردانی می نمایم.

## فهرست عناوین

چکیده ..... xii

### فصل اول: مقدمه و پیشینه پژوهش ..... ۳-۱۴

مقدمه ..... ۲

۱-۱ مکانیزم های جریان داخل پروانه ..... ۲

۲-۱ بازچرخش در داخل پروانه ..... ۵

۱-۲-۱ بازچرخش در ورودی پروانه ..... ۶

۲-۲-۱ بازچرخش جریان در خروجی پروانه ..... ۷

۳-۱ پیشینه پژوهش ..... ۷

### فصل دوم: مواد و روش ها ..... ۱۶-۲۲

مقدمه ..... ۱۶

۱-۲ معادلات حاکم ..... ۱۶

۱-۱-۲ معادلات حاکم (محورهای لخت) ..... ۱۶

۲-۱-۲ معادلات حاکم (محورهای چرخان) ..... ۱۶

۲-۲ جریان آشفته ..... ۱۷

۱-۲-۲ مدل آشفتگی ..... ۱۷

۲-۲-۲ مدل RNG k-ε ..... ۱۹

۱-۲-۲-۲ معادلات انتقال برای مدل RNG k-ε : ..... ۱۹

۲-۲-۲-۲ مدل سازی لزجت موثر ..... ۲۰

۳-۲-۲-۲ تصحیح پیچش RNG ..... ۲۰

۴-۲-۲-۲ محاسبه اعداد پرانتل موثر معکوس ..... ۲۱

۵-۲-۲-۲ عبارت  $R_\epsilon$  در معادله  $\epsilon$  ..... ۲۱

۶-۲-۲-۲ ثابت های مدل ..... ۲۲

## فصل سوم: مدلسازی با نرم افزار.....۲۴-۳۴

۲۴	مقدمه.....
۲۴	۱-۳ هندسه پمپ ۲۰۰-۶۵.....
۲۴	۱-۱-۳ پروانه.....
۲۵	۲-۱-۳ حلزونی.....
۲۶	۲-۳ مش بندی.....
۲۷	۱-۲-۳ توابع اندازه.....
۲۹	۳-۳ کارهای انجام شده در نرم افزار فلونت.....

## فصل چهارم: نتایج، بحث و پیشنهادات.....۳۶-۸۳

۳۶	مقدمه.....
۳۶	۱-۴ فشار کل در ورودی و خروجی.....
۳۸	۲-۴ منحنی هد-دبی.....
۳۸	شکل(۳-۴) - منحنی هد-دبی، تجربی و عددی.....
۳۹	۳-۴ بردارهای سرعت در داخل پروانه.....
۴۰	شکل(۴-۴) - شماره تخصیص یافته به هر پاساژ.....
۴۱	۱-۳-۴ بردارهای سرعت در دبی $55\text{m}^3/\text{hr}$ .....
۴۴	۲-۳-۴ بردارهای سرعت در دبی $30\text{m}^3/\text{hr}$ .....
۴۸	۳-۳-۴ بردارهای سرعت در دبی $10\text{m}^3/\text{hr}$ .....
۵۱	۴-۴ نمودارهای سرعت شعاعی مطلق.....
۵۴	۱-۴-۴ نمودار سرعت شعاعی در کناره توپی.....
۵۴	۱-۱-۴-۴ نمودار سرعت شعاعی-موقعیت زاویه ای در کناره توپی و در شعاع $0.04\text{m}$ .....
۵۶	۲-۱-۴-۴ نمودار سرعت شعاعی-موقعیت زاویه ای در کناره توپی و در شعاع $0.07\text{m}$ .....
۵۸	۳-۱-۴-۴ نمودار سرعت شعاعی-موقعیت زاویه ای در کناره توپی و در شعاع $0.1\text{m}$ .....
۶۰	۲-۴-۴ نمودار سرعت شعاعی در صفحه میانی.....
۶۰	۱-۲-۴-۴ نمودار سرعت شعاعی-موقعیت زاویه ای در صفحه میانی و در شعاع $0.07\text{m}$ .....
۶۲	۲-۲-۴-۴ نمودار سرعت شعاعی-موقعیت زاویه ای در صفحه میانی و در شعاع $0.1\text{m}$ .....

۶۴	.....	نمودار سرعت شعاعی در پوشش جلویی
۶۴	.....	نمودار سرعت شعاعی-موقعیت زاویه ای در پوشش جلویی و در شعاع 0.06m
۶۶	.....	نمودار سرعت شعاعی-موقعیت زاویه ای در پوشش جلویی و در شعاع 0.07m
۶۸	.....	نمودار سرعت شعاعی-موقعیت زاویه ای در پوشش جلویی و در شعاع 0.1m
۷۰	.....	نمودار سرعت مماسی مطلق
۷۱	.....	نمودار سرعت مماسی/سرعت خطی محلی-موقعیت زاویه ای، برش شعاعی 0.07m
۷۳	.....	نمودار سرعت مماسی/سرعت خطی محلی- موقعیت زاویه ای در برش شعاعی 0.1m
۷۶	.....	خلاصه ای از نتایج بدست آمده
۸۱	.....	نتیجه گیری و بحث
۸۳	.....	پیشنهادات
۸۴	.....	مراجع

## فهرست اشکال

- شکل (۱-۱) - الگوهای بازچرخش جریان در مقطع نصف النهاری..... ۷
- شکل (۱-۳) - نمایی از هندسه پروانه..... ۲۵
- شکل (۲-۳) - نمایی از هندسه حلزونی..... ۲۶
- شکل (۳-۳) - نمایی کلی از شبکه بندی هندسه..... ۲۸
- شکل (۴-۳) - نمایی از شبکه بندی داخلی هندسه..... ۲۹
- شکل (۱-۴) - نمودار  $\Delta P$  بر حسب دبی..... ۳۶
- شکل (۲-۴) - کانتورهای فشار استاتیکی..... ۳۷
- شکل (۳-۴) - منحنی هد-دبی، تجربی و عددی..... ۳۸
- شکل (۴-۴) - شماره تخصیص یافته به هر پاساژ..... ۴۰
- شکل (۵-۴) - بردارهای سرعت نسبی، دبی  $55\text{m}^3/\text{hr}$ ..... ۴۳
- شکل (۶-۴) - بردارهای سرعت نسبی، دبی  $30\text{m}^3/\text{hr}$ ..... ۴۶
- شکل (۷-۴) - بردارهای سرعت نسبی، دبی  $10\text{m}^3/\text{hr}$ ..... ۵۰
- شکل (۸-۴) - نمودارهای سرعت شعاعی در کناره توپی در شعاع  $0.04\text{m}$  و در دبی های مختلف..... ۵۵
- شکل (۹-۴) - نمودارهای سرعت شعاعی در کناره توپی در شعاع  $0.07\text{m}$  و در دبی های مختلف..... ۵۷
- شکل (۱۰-۴) - نمودارهای سرعت شعاعی در کناره توپی در شعاع  $0.1\text{m}$  و در دبی های مختلف..... ۵۹
- شکل (۱۱-۴) - نمودارهای سرعت شعاعی در صفحه میانی، در شعاع  $0.07\text{m}$  و در دبی های مختلف..... ۶۱
- شکل (۱۲-۴) - نمودارهای سرعت شعاعی در صفحه میانی، در شعاع  $0.1\text{m}$  و در دبی های مختلف..... ۶۳
- شکل (۱۳-۴) - نمودارهای سرعت شعاعی در پوشش جلویی در شعاع  $0.06\text{m}$  و در دبی های مختلف..... ۶۵
- شکل (۱۴-۴) - نمودارهای سرعت شعاعی در پوشش جلویی و در شعاع  $0.07\text{m}$  و در دبی های مختلف..... ۶۷
- شکل (۱۵-۴) - نمودارهای سرعت شعاعی در پوشش جلویی و در شعاع  $0.1\text{m}$  و در دبی های مختلف..... ۶۹
- شکل (۱۶-۴) - نسبت سرعت مماسی در شعاع  $0.7\text{m}$  در داخل پروانه..... ۷۲
- شکل (۱۷-۴) - نسبت سرعت مماسی در شعاع  $0.1\text{m}$  در داخل پروانه..... ۷۴
- شکل (۱۸-۴) - نمودار سرعت شعاعی در پاساژ ۶..... ۷۷
- شکل (۱۹-۴) - نمودار سرعت مماسی در پاساژ ۶..... ۷۹



## فهرست جداول

جدول (۱-۳)- ابعاد اصلی اجزای تشکیل دهنده.....	۲۴
جدول (۲-۳)- توابع اندازه بکار رفته در شبکه بندی هندسه.....	۲۷
جدول (۳-۳)- نوع و تعداد المان های بکار رفته در شبکه بندی هندسه.....	۲۸
جدول (۴-۳)- متدهای بکار گرفته شده در مقالات مطالعه شده.....	۳۰
جدول (۵-۳)- روند حل جریان در فلوئنت.....	۳۰
جدول (۱-۴)- فشار کل در ورودی و خروجی، نتایج عددی.....	۳۶
جدول (۲-۴)- هد پمپ در دبی های مختلف، نتایج عددی.....	۳۸
جدول (۳-۴)- شعاع های مورد مطالعه در نمودارها.....	۵۱
جدول (۴-۴)- موقعیت پاساژ در بازه زاویه ای.....	۵۱

## فهرست علائم و اختصارات

سطح مقطع	A
پهنای گذرگاه	b
شتاب گریزاز مرکز	$b_z$
شتاب کوریولیس	$b_c$
سرعت مطلق	c
قطر خارجی چرخ متحرک	$D_2$
هد	H
هد اولر	$H_E$
هد تئوری	$H_{th}$
شدت آشفتگی	I
انرژی جنبشی جریان آشفته	K
طول	L
سرعت دورانی چرخ متحرک	N
سرعت مخصوص	$n_s$
فشار استاتیک	P
اختلاف فشار	$\Delta P$
آهنگ جریان حجمی (دبی پمپ)	Q
مختصات شعاعی، شعاع چرخ متحرک	r
شعاع ورودی چرخ متحرک	$r_1$
شعاع خارجی چرخ متحرک	$r_2$
شعاع انحنای مسیر	$R_{sl}$
عدد رینولدز	Re
سرعت محیطی)	U
بردار سرعت	V
سرعت اختلاط	$V_t$
سرعت نسبی سیال نسبت به چارچوبه مرجع چرخان	$\vec{v}_r$
سرعت نسبی	w
مولفه های سرعت در جهات مختلف	w, v, u
نوسانات سرعت در جهات مختلف	$u', v', w''$
مولفه های سرعت میانگین سیال	$\bar{u}, \bar{v}, \bar{w}$

## علائم یونانی

زاویه خروجی پره	$\beta_2$
اضمحلال	$\varepsilon$
بازده پمپ	$\eta$
بازده هیدرولیکی پمپ	$\eta_h$
لزجت دینامیکی	$\mu$
لزجت دینامیک آشفتگی	$\mu_t$
لزجت سینماتیکی	$\nu$
لزجت سینماتیکی آشفتگی	$\nu_t$
مشخصه عدد پیچش	$\Omega$
ضریب لغزش	$\sigma$
سرعت زاویه ای چرخ متحرک	$\omega$
چگالی	$\rho$
عدد فشار	$\psi$
عدد دبی	$\phi$

## چکیده

در شرایط کارکرد پمپ در دبی های پایین، با افزایش زاویه حمله و "کاهش سرعت" در داخل پاساژ، جریان از سطح پره جدا شده و ما شاهد وامانش و برگشت جریان در این نواحی خواهیم بود. رفته رفته با کاهش بیشتر دبی، ناحیه جدایش بزرگتر شده و سرعت برگشت جریان نیز افزایش یافته و بازچرخش در این نواحی ایجاد می شود. این بازچرخش کم کم در کل عرض پاساژ گسترش یافته و در دبی های نزدیک به صفر موجب بسته شدن پاساژ مربوطه می شود. در این شرایط جریان ورودی از لوله مکش برای عبور از پروانه، ناگزیر از پاساژهای دیگر عبور می کند و به این ترتیب ما شاهد جریانی کاملا یکنواخت در این پاساژها خواهیم بود.

فصل اول این پایان نامه، به بررسی بازچرخش در ورودی و خروجی پروانه و نحوه تأثیر آن بر عملکرد پمپ در کارکرد بار-پایین اشاراتی شده و مقالات مرتبط با آن ارائه گردیده است. فصل دوم شامل مطالعه معادلات حاکم بر جریان، بررسی مدل های آشفتگی و چگونگی حل معادلات حاکم بر جریان می باشد.

فصل سوم به نحوه ترسیم و مش بندی پمپ سانتریفوژ نوع 200-65 در نرم افزار گمبیت و همچنین شبیه سازی آن در نرم افزار فلونت اختصا دارد. در فصل چهارم، داده های خروجی نرم افزار فلونت برای تحقیق حاضر ارائه شده و جداول، نمودارها، کانتورهای فشار و سرعت رسم و نشان داده شده است. در پایان نتایج حاصله مورد بحث و بررسی قرار گرفته و برای تحقیقات بعدی مرتبط با موضوع حاضر پیشنهاداتی ارائه شده است.

# فصل اول

مقدمه و پیشینه

پژوهش

## مقدمه

پمپ های روتودینامیک برای انتقال جریان هایی از دبی  $0.001 \text{ m}^3/\text{s}$  تا  $50 \text{ m}^3/\text{s}$  و ایجاد هدهایی بین 1m تا 50m ساخته شده اند که در رنج توانی بین 0.05kw تا 50000kw کار می کنند. برای پوشش چنین بازه ای از هد ودبی، این گونه پمپ ها در انواع مختلفی از نوع گریز از مرکز با دبی پایین و هد بالا تا پروانه های محوری با دبی بالا و هد پایین، از پمپ های یک طبقه تا چند طبقه، از پروانه هایی با یک ورودی و دو ورودی و با حلزونی و یا دیفیوزر ساخته شده اند. کاربردهای مختلف پمپ ها در شرایط متفاوت تأثیر بسزایی بر طراحی هیدرولیکی پمپ ها مانند بازده ماکزیمم، کاویتاسیون، شکل منحنی هد-دبی، اندازه پمپ، سادگی ساخت (هزینه ها) و ... دارد.

یک پمپ با منحنی هد دبی ناپایدار مورد قبول مصرف کننده نمی باشد، حتی اگر بازده پمپ بالا بوده و قیمت آن پایین باشد. بنابراین در طراحی هیدرولیکی پمپ- از همان ابتدای کار- نباید تمرکز فقط بر روی BEP باشد بلکه برای یک طراحی ایده آل، باید تمامی منحنی هد-دبی تا دبی صفر و شرایط جلوگیری از کاویتاسیون مدنظر قرار بگیرد.

## ۱-۱ مکانیزم های جریان داخل پروانه

پدیده سه بعدی جریان نه تنها تعیین کننده افت های هیدرولیکی در داخل پروانه و کار انتقالی از تیغه ها به سیال می باشد بلکه بهبود فشار و افت آن در دیفیوزر و حلزونی را نیز مشخص می کند چرا که کارکرد این اجزا بشدت تحت تأثیر جریان خروجی از پروانه و بالعکس می باشد. در تمامی آزمایشات متعددی که به بررسی جریان در داخل پمپ ها پرداخته شده است، سخن از گوناگونی الگوهای جریان بخصوص در شرایط کارکرد بار-پایین در میان است که دسته بندی و تفسیر این جریان ها را در داخل پمپ دشوار می سازد. بنابراین امکان مرتبط ساختن توزیع جریان در خروجی پروانه و سرعت مخصوص، امری محال به نظر می رسد. کمبود اطلاعات در زمینه جریان داخل پمپ، نتیجه گیری درست از آزمایشات مربوطه برای پیشرفت طراحی را امری دشوار می سازد. در کل، تحلیل های حاصل از آزمایشات متعدد این گونه نشان می دهد که الگوی جریان در داخل پروانه ها وابسته به تعادل نیروهایی است که تغییرات جزئی در هندسه پمپ باعث تغییر در تعادل آنها خواهد شد.

سیال داخل پمپ از دید ناظری در چارچوب مرجع مطلق، در یک مسیر منحنی شکل جریان دارد که این در صورتی امکانپذیر خواهد بود که گرادیان فشار عمود بر جهت جریان نیرویی را در جهت مرکز منحنی برای حفظ جریان در مسیر منحنی شکل خود، ایجاد کند.

این گرادیان فشار در جهت مرکز آنی مسیر منحنی شکل جریان خواهد بود. جدای از کاهش سرعت نسبی در راستای خطوط جریان، این مؤلفه یکی از مکانیزم های اصلی افزایش فشار استاتیکی در پمپ های گریز از مرکز می باشد. این پدیده بیان می دارد که چرا جریان از یک ناحیه با فشار استاتیکی پایین به یک ناحیه با فشار بالا جریان می یابد و اینکه چرا فشار استاتیکی علیرغم افزایش سرعت در سیستم مطلق، افزایش می یابد.

فشار محلی در هر ناحیه به گونه ای است که موجب تعادل شتاب کوریولیس  $2\omega w$ ، شتاب گریز از مرکز ناشی از گردش  $\omega^2 r$  و شتاب گریز از مرکز ناشی از انحنای خط جریان  $w^2/R_{sl}$  (شعاع  $R_{sl}$  آنی خط جریان می باشد) در جریان داخل پروانه می شود. فرض کنید جریان پایا بوده و از تنش های برشی ناشی از اصطکاک دیواره و تغییرات توربولانس صرف نظر کنیم، آنگاه تعادل نیروها بصورت زیر نوشته خواهد شد [۱].

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial n} = 2\omega w + r\omega^2 \frac{\partial r}{\partial n} - \frac{w^2}{R_{sl}} \quad (1-1)$$

توزیع سرعت در جریان واقعی داخل پروانه بعلاوه وجود لایه های مرزی و چرخش جریان توسط تیغه ها و انحنای نصف النهاری یکنواخت نمی باشد. جریان سیال در داخل پروانه متأثر از شکل هندسی پروانه می باشد که باعث ایجاد گرادیان فشاری در راستای عمود بر جریان می شود. وجود گرادیان فشار بر روی میدان غیر یکنواخت سرعت در مسیر منحنی شکل، موجب می شود که هر خط جریان تمایل به داشتن انحنای متفاوتی داشته باشد تا تعادل نیروهای مذکور برقرار شود؛ در این شرایط می توان گفت که در یک گرادیان فشار معلوم، سرعت محلی کمتر سیال، انحنای بیشتر خط جریان را در پی خواهد داشت. در طی این پروسه "جریان های ثانویه" (مؤلفه های سرعت در راستای عمود بر جریان) ایجاد می شوند.

جریان ثانویه که در نتیجه تأثیر نیروهای کوریولیس و گریز از مرکز ایجاد می شود به شدت بر توزیع سرعت در داخل و خارج از پروانه تأثیر گذار بوده و بدین ترتیب افت های فشار در دیفیوزر و یا حلزونی و پایداری منحنی هد-دبی نیز متأثر از این پدیده خواهد بود. از آنجایی که بررسی اثرات جریان های ثانویه فقط با نگاه به رابطه بالا کمی مشکل بنظر می رسد، لذا اثرات چرخش، بار تیغه،

انحنای نصف النهاری و خط جریان را بصورت مجزا و با مدل های ساده ای بررسی کرده و سپس با ترکیب آنها به تشریح الگوهای جریان مشاهده شده در داخل پروانه می پردازیم. از آنجایی که جریان ثانویه وابسته به تعادل بین نیروهای گریز از مرکز و کوریولیس می باشد، لذا نسبت  $b_z/b_c$  برای مطالعه جریان های ثانویه پارامتر مهمی خواهد بود که به آن عدد روسبی اطلاق می شود.

تحلیل مکانیزم های عمده جریان ثانویه در داخل پروانه ها با بکار گیری جمله هایی از عدد روسبی انجام می شود. این جمله ها را می توان در ۴ مدل ساده بررسی کرد که در اینجا دو مورد مهم آن ذکر می شود:

### ۱. انحنای نصف النهاری (مرجع ۱).

توزیع سرعت در مقطع نصف النهاری یک پروانه شعاعی و یا مختلط اغلب ناشی از چرخش جریان از راستای محوری به راستای شعاعی و یا نیمه محوری می باشد. تعادل بین مؤلفه شتاب گریز از مرکز  $\omega^2 r \cos \varepsilon$  در راستای عمود بر جریان از یک طرف و شتاب کوریولیس و مؤلفه شتاب گریز از مرکز ناشی از انحنای خط جریان  $c_m^2/R_m$  از طرف دیگر، موجب ایجاد عدد روسبی  $Ro_m$  با توجه به تعادل نیروها در مرجع ۱ می شوند. از آنجایی که جمله  $2w/u$  از مرتبه یک می باشد لذا در دبی های بالا، نیروهای کوریولیس تعیین کننده بوده ( $Ro_m < 1$ ) و جریان ثانویه به سمت تویی جریان می یابد. انتظار می رود که این رفتار با جدایش جریان تغییر کند به گونه ای که در نواحی جدا شده جریان، سرعت نسبی بسیار کوچک شده و عدد روسبی بزرگتر از ۱ می شود، در نتیجه سیال از تویی به پوشش جلویی تغییر مسیر می دهد؛ حال برای پایستاری جرم، لایه مرزی جریانی در جهت عکس بر سیال اعمال می کند. این همان پدیده آشنای بازچرخش در ورودی پروانه در دبی های پایین خواهد بود. بنظر می رسد که این تغییر الگوی جریان در ورودی پروانه تاثیر بسزایی بر توزیع جریان در خروجی پروانه- بخصوص شیفته ناحیه کم انرژی از تویی به پوشش جلویی و یا بالعکس- داشته باشد. ناپایداری های نوع S (تخت بودن منحنی در برخی نواحی) در منحنی مشخصه می تواند متأثر از این جابجایی باشد. غیر یکنواخت بودن توزیع سرعت در خروجی پروانه همچنین می تواند موجب افت های مختلط در دیفیوزر و یا حلزونی شود. انحنای نصف النهاری مانند توزیع جریان در ورودی پروانه، بیانگر هر گونه عدم یکنواختی در توزیع جریان در فاصله بین پوشش جلویی<sup>۱</sup> و تویی در مقطع نصف النهاری بوده و در نتیجه تاثیر بسزایی بر بازده پمپ و پایداری منحنی هد-دبی خواهد داشت. باید

<sup>۱</sup> Shroud



توجه داشت که از آنجایی که سرعت جریان در داخل پروانه کاهش یافته و می چرخد، هر گونه آشفتگی و اختلال در جریان ورودی پروانه، مقداری مضاعف بین پاساژهای پروانه خواهد داشت.

## ۲. تأثیر گردش (مرجع ۲).

در یک پاساژ چرخشی با تیغه هایی با انحنای به عقب، نیروهای گریز از مرکز حاصل از چرخش و انحنای مسیر، در جهت مخالف نیروی کوریولیس خواهند بود. ترکیب این نیروها منجر به ایجاد عدد  $Ro_B$  با دو مؤلفه خواهد شد. برای تیغه های شعاعی ( $\beta_{2B} = 90$  و  $\cos \beta_{2B} = 0$ ؛  $R/R_{s1}$  خیلی کوچک و یا صفر می باشد) در حالتیکه  $Ro_B=0$  باشد، جریان ثانویه بسمت سطح فشاری تیغه جریان یافته و الگوی جریان شناخته شده جت-ویک را شاهد خواهیم بود. در پروانه هایی با انحنای زیاد تیغه،  $Ro_B$  مقداری نزدیک به یک خواهد داشت. در این شرایط الگوی جریان وابسته به تعادل نیروها خواهد بود که با مدل های ساده قابل پیش بینی نمی باشد. در این شرایط بسته به کوچکترین تغییرات در هندسه پروانه، جریان ثانویه می تواند منجر به شیفت سرعت بیشینه به سطح فشاری و یا مکشی تیغه شود.

اعمال همزمان اثرات چرخش و انحنای نصف النهاری بر روی سیال، یک جریان ثانویه حلزونی شکل را بدنبال خواهد داشت. چگونگی خروج این جریان حلزونی شکل از پروانه می تواند بر جریان در قسمت محیطی پایین دست پروانه و نوسانات فشار در این ناحیه، تأثیر گذار باشد. اندازه گیری های جریان در صفحات مختلف در داخل پروانه نشان از یک الگوی جریان غیر سیستماتیک و غیر قابل پیش بینی در داخل پروانه می باشد. پیچیدگی تعادل نیروهای داخل پروانه نشان از این دارد که چرا پیش بینی جریان با استفاده از روش CFD کاری دشوار می باشد.

پس بطور کلی می توان گفت که نسبت های مختلف شتاب گریز از مرکز به کوریولیس، "عدد روسبی"، می تواند توجیحی برای الگوهای مختلف جریان در داخل پروانه باشد. همچنین با کمک این عدد می توان درک درستی از تأثیر برخی پارامترهای هندسی و نرخ دبی بر روی جریان داخل پروانه داشت.

## ۲-۱ بازچرخش در داخل پروانه

پمپی که در دبی ای پایین تر از دبی اوپتیوم کار می کند، اصطلاحاً گفته می شود که در شرایط بار-پایین کار می کند. در این شرایط، جریان به صورت سه بعدی می باشد چرا که ما شاهد جدایش جریان در پروانه و جمع کننده خواهیم بود.

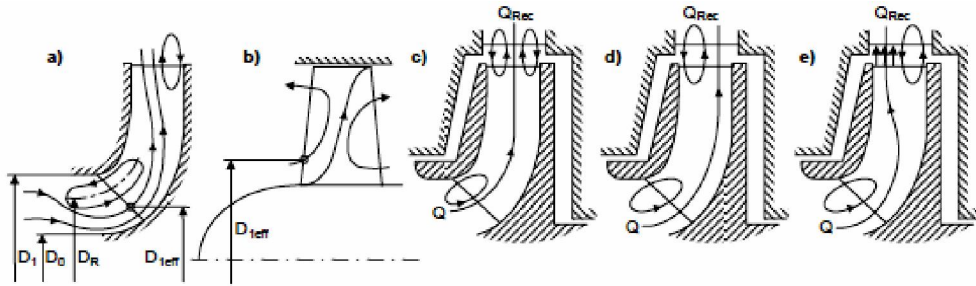
برهم کنش بین پروانه و محفظه در ورودی و خروجی جریان، عامل مهمی در کارایی بار-پایین پمپ‌ها می‌باشد. این رفتار به طور وسیعی تعیین کننده منحنی Q-H، نیروهای شعاعی و محوری، نیروهای برانگیخته هیدرولیکی، نویزها و کاویتاسیون می‌باشد. طراحی یک پمپ با یک کارایی مناسب در شرایط کارکرد بار-پایین، بیشتر بر پایه تجربه می‌باشد. پیدایش بازچرخش و جدایش یک شرط لازم ولی ناکافی در بروز مشکلات مربوط به شرایط کارکرد بار-پایین (کاویتاسیون، نویز، نیروهای هیدرولیکی و...) می‌باشند. در پروسه طراحی می‌توان تلاش کرد که شروع بازچرخش در  $q^*$  های کوچکتر اتفاق بیفتد ولی نمی‌توان به طور کامل آن را حذف کرد.

### ۱-۲-۱ بازچرخش در ورودی پروانه

طی کارکرد پمپ در شرایط شیر فلکه بسته، بازچرخش به صورت ناگزیر در ورودی پروانه گسترش می‌یابد. تعاریف متفاوتی در نحوه شروع بازچرخش در ورودی پروانه ارائه شده است که شاید بتوان بطور کلی در دو مورد زیر آنها را خلاصه کرد:

با جدایش جریان در کناره پوشش جلویی، گرادیان فشار مثبت در راستای جریان باعث برگشت جریان در این نواحی شده و سیال به سمت لوله مکش جریان می‌یابد. این جریان برگشتی توسط جریان اصلی ورودی به پروانه، تغییر مسیر داده و وارد پروانه می‌شود. حال با توجه به اینکه پروانه در حال چرخش می‌باشد، جریان جدا شده به دیواره چسبیده و همراه با آن می‌چرخد و بدین ترتیب ما شاهد گردش جریان در این نواحی خواهیم بود. این گردابه با القای مؤلفه سرعت محیطی  $C_u$  در راستای عمود بر جریان، موجب ایجاد گرادیان فشاری در این راستا می‌شود که با افزایش این فشار ما شاهد رشد گردابه و شروع بازچرخش در ورودی پروانه خواهیم بود (شکل ۱-۱).

با کاهش جریان (افزایش زاویه حمله و یا افزایش میزان افت فشار)، ما شاهد جدایش جریان [۲] در کناره پوشش جلویی خواهیم بود. در ناحیه جدا شده جریان، سرعت نسبی کاهش و عدد روسبی افزایش می‌یابد. با افزایش عدد روسبی سیال در ناحیه جدا شده به سمت پوشش جلویی جریان می‌یابد؛ حال برای بقای پیوستگی، لایه مرزی جریان را بسمت تویی باز می‌گرداند و بدین ترتیب گردش جریان در این ناحیه اتفاق می‌افتد. با تأثیر گرادیان فشار عمود بر جریان (مانند بالا) گردابه در راستای لبه هادی رشد کرده و ما شاهد بازچرخش در این ناحیه خواهیم بود (شکل ۱-۱).



شکل (۱-۱) - الگوهای بازچرخش جریان در مقطع نصف النهاری [۳]

بنابراین با توجه به تعاریف بالا می توان گفت که برای ایجاد بازچرخش در ورودی پروانه دو شرط زیر باید به طور همزمان ارضا شوند:

(۱) جدایش محلی جریان

(۲) گرادیان فشار قوی در جهت عمود بر جریان اصلی

## ۲-۲-۱ بازچرخش جریان در خروجی پروانه

همانطور که در شکل (۱-۱) نشان داده شد، بازچرخش در خروجی پروانه نیز اتفاق می افتد. از آنجایی که بازچرخش از سمت استاتور به داخل پروانه (در قسمت خروجی) رخ می دهد، پس باید یک برهم کنش قوی بین این اجزاء برقرار باشد. تعیین نقطه شروع بازچرخش در خروجی پروانه امری مشکل می باشد چرا که این پدیده دارای ساختاری بسیار ناپایدار بوده و شرایط پایین دست، بر روی جریان خروجی از پروانه شدت تاثیر گذار می باشد بطوریکه حتی در دبی های نزدیک به دبی طراحی نیز ممکن است در خروجی پروانه ما شاهد بازچرخش باشیم [۴].

## ۳-۱ پیشینه پژوهش

در اینجا ما مقالات موجود در زمینه بازچرخش در پروانه را مورد بررسی قرار داده و در صورت لزوم در مواردی، نکاتی را برای تکمیل بحث مربوطه در مقاله و همچنین مقایسه با کار دیگران ارائه می کنیم که با خط فاصله در ابتدای جملات مشخص شده اند.

یکی از اولین مقالات در مورد بازچرخش جریان در داخل پروانه، توسط Fraser [۵] منتشر شد. وی در مقاله خود به بررسی رابطه بین سرعت مکش ورودی  $s$  و سرعت مخصوص  $n$  پرداخته و با ارائه نمودارهایی نشان داد که با افزایش مقادیر  $n$  و  $s$ ، بازچرخش در نسبت دبی های بالاتری اتفاق می افتد. وی در پایان مقاله خود مقایسه ای بین کاویتاسیون کلاسیک و کاویتاسیون ناشی از بازچرخش انجام داده و نشان داده است که کاویتاسیون کلاسیک در سطح مکشی

تیغه در ورودی پروانه و کاویتاسیون ناشی از بازچرخش در سطح فشاری تیغه در ورودی و خروجی پروانه اتفاق می افتد.

- بازچرخش جریان در داخل لوله مکش نیز نفوذ داشته و ما شاهد برگشت جریان تا طول قابل ملاحظه ای در لوله مکش خواهیم بود که باعث القای پیش-چرخش<sup>۱</sup> در جریان ورودی می شود.

Karassik [۷۶] در مقالات خود به تحقیق راجع به تأثیر بازچرخش بر شروع کاویتاسیون در  $NPSH_r$  های پایین و عوامل مؤثر بر شروع زودتر بازچرخش پرداخته است. وی اینگونه آغاز می کند که یکی از روش های کاهش  $NPSH_r$  (یا افزایش سرعت مکش درونی) افزایش قطر چشم پروانه می باشد. وی سپس با بیان این مطلب که نباید  $s$  بالاتر از رنج ۸۵۰۰ تا ۹۵۰۰ باشد؛ علت این امر را اینگونه بیان می کند که در  $NPSH_r$  های پایین ولی کافی (در دبی طراحی، کاویتاسیون کلاسیک اتفاق نمی افتد) بازچرخش در دبی های خیلی نزدیک به دبی طراحی اتفاق می افتد و در این شرایط،  $NPSH_r$  در هسته گردابه (در هسته گردابه سرعت ماکزیمم و فشار مینیمم می باشد) از مقدار  $NPSH_r$  بیشتر شده و با شروع کاویتاسیون، ما شاهد فرسایش فلز در سطح فشاری خواهیم بود.

Yedidiah [۸, ۹, ۱۰, ۱۱] مقالات متعددی در زمینه بازچرخش ارائه کرده است.

وی در ابتدا با ارائه روابطی به تعریف بازچرخش در ورودی پروانه پرداخته و دو عامل اساسی را در علت به وجود آمدن بازچرخش در ورودی پروانه دخیل می داند: یکی تشکیل نواحی سکون در نزدیکی دیواره و دیگری تاثیر ویسکوزیته سیال بر گسترش این ناحیه. وی در ادامه به بررسی یک سری از آزمایشات خود پرداخته و نتایج زیر را ارائه می کند.

۱. با بسط لبه هادی تیغه در لوله مکش، شدت بازچرخش و از آنجا هد پمپ در دبی های نزدیک به صفر بیشتر می شود.

۲. یکی از عوامل ایجاد هیستریزیس در نمودار Q-H، ایجاد و ناپدید شدن بازچرخش می باشد.

۳. تأثیر بازچرخش در  $NPSH_r$  های پایین بر روی منحنی مشخصه، باعث بروز ناپایداری هایی در عملکرد پمپ می شود.

۴. از آنجایی که بازچرخش در ورودی پروانه باعث افزایش انرژی سیال می شود به این ترتیب مانع از افت فشار در دبی های نزدیک به دبی صفر در منحنی مشخصه می شود (پدیده "منحنی

---

<sup>1</sup> Pre-rotation