

مدلسازي رفتار هيدروديناميكي برس تميز كننده

مهدی لوئی پور ٔ

مربى

دوار

برای پنج دهه است که جریان در اطراف دیسک دوار به عنوان نمونه ای به منظور تحلیل جریان لایه مرزی سه بعدی در رژیم آرام- مغشوش مورد بررسی قرار می گیرد. مطالعه چنین جریانی به درک صحیح از فرآیند گذرا در این زمینه کمک نموده است. تحلیل هیدرودینامیکی برس تمیز کننده دوار که کاربرد آن در دستگاه تمیز کننده بدنه کشتی ها می باشد، به روش های متفاوتی قابل انجام است. در این مقاله، نتایج تحلیل عددی توسط نرم افزار Fluent ، تحلیل ابعادی و أزمایشات میدانی مقایسه شده اند. در واقع، یک مطالعه نیمه تجربی به منظور بررسی جریان لایه مرزی در اطراف دیسک دوار در داخل آب توصیف گردیده است. داده های محاسباتی به منظور بررسی نحوه تغییرات نیروی مکش و گشتاور ایجاد شده تهیه تا راه برای یک طراحی بهینه هموار گردد. نتایج حاصل از آزمایش نه تنها با پیش بینی های تئوریک، بلکه با نتایج استخراج شده از مطالعات دیگران انطباق خوبی نشان داده است.

محمد على بدرى^۲ استاديار

واژههای راهنما: شبیه سازی عددی، تحلیل ابعادی، دیسک دوار، برس تمیز کننده

۱– مقدمه

بررسی رفتار هیدرو دینامیکی برس دوار در درون آب و استخراج حاکمیتهای مربوط به نیروها و ممانهای اعمال شده با توجه به گستردگی کاربرد های عملی آن از اهمیت خاصی بر خوردار است. از جمله این کاربردها که در این مقاله مورد توجه قرار گرفته است، به کار گیری این مکانیزم در سیستمهای تمیزکننده بدنه کشتی در آب [۱] و اندازه گیری مقاومت چسبندگی فولینگهای^۳ دریایی به سطوح قرار گرفته در زیر آب با جنسهای متفاوت می باشد [۲و ۳]. به دلیل طولانی بودن زمان قرارگیری کشتی در آب ، کشتی همواره تحت تأثیر ناصافیهای ناشی از جلبک های دریایی^۴ است.

ا نویسنده مسئول، مربی، پژوهشکده علوم و تکنولوژی زیردریا، دانشگاه صنعتی اصفهان loueipour@cc.iut.ac.ir

⁴ Marine barnacles

⁵ Toxic Paint

⁷ استادیار، پژوهشکده علوم و تکنولوژی زیردریا، دانشگاه صنعتی اصفهان

³ Fouling

و هم بایستی در محل داک خشک استفاده شوند. دستگاه تمیز کننده بدنه کشتی در زیر آب را می توان یک سیستم نیمه اتوماتیک دانست. این دستگاه از یک منبع تغذیه که بر روی عرشه قرار دارد به همراه یک ارابه کوچک که بر روی بدنه کشتی حرکت می کند تشکیل شده است. بر روی ارابه تعدادی برس با جـنس مخصوص قرار می گیرد که می توانند با سرعت دورانی مناسب از طریق موتور هیدرولیکی بچرخند. چرخهای ارابه نیز توسط همین سیستم به حرکت درمی آید. طراحی سیستم به گونه ای انجام شده که ارابه دارای شناوری تقریباً خنثی می باشد. در این میان غواص به عنوان راننده ارابه بدون هیچگونه نیروی اضافی، ارابه را بر روی دیواره های کشتی به حرکت درمی آورد. بنابراین، برسهای دوار از مهمترین ابزارهای سیستمهای تمیزکننده بدنه کشتی در آب جهت حذف فولینگها از روی بدنه کشتی ها و سازه های دریایی می باشند. در این راستا استخراج نیروی مکش ایجاد شده به علت چرخش برسها و همچنین گشتاور مورد نیاز این چرخش نقش کلیدی در طراحی این سیستم ها و همچنین صحت عملکرد آنها دارد. از طرف دیگر جهت حذف فولینگ های چسبیده بر روی بدنه کشتی ها لازم است میزان نیروی چسبندگی این موجـودات استخراج گردد. از جمله روش های اندازه گیری مقاومت چسبندگی فولینگ های برروی سطوح جهت طراحی ابزار تمیز کننده استفاده از مکانیزم دیسک دوار در سیال می باشد [۴و ۵]. همچنین روابط هيدروديناميكي استفاده شده دراين مقالات ونتايج حاصله ازاينكار پژوهشي انطباق لازم رانشان ميدهد. بنابراین بدلیل اینکه یکی از مهمترین مسائل در زمینه حمل و نقـل دریـایی کاسـتن هزینـه هـای جـاری و هزینه های تعمیر و نگهداری کشتی ها و دیگر وسایل حمل و نقل می باشد، استفاده از ایـن دسـتگاه بسـیار اقتصادی می باشد.

در طی پنج دهه اخیر، جریان حول دیسک چرخان مطالعات نمونه در مورد جریان لایه مرزی سه بعدی در رژیم گذرا را به خود اختصاص داده است. مطالعه این نوع جریان به ارتقاء دانش بشر در مورد فرآیندهای گذرا و درک فیزیک آن کمک نموده است. یکی ازآخرین مطالعات توسط Reed و Saric انجام شده است [۶ و۷]. جریان روی دیسک چرخنده مورد توجه تئوریسین ها بوده است. جذابیت این مطالعه پس از بررسی وجود حل تشابهی توسط Karman [۸] که از حل دقیق معادلات ناویر استوکس ناشی شده بود آشکار گردید. سالیان درازی است که آشکار شده [۹-۱۲] دیواره ها می توانند رژیم گذرا را برای لایه مرزی دو بعدی به تعویق بیاندازند. اگرچه مطالعات قبلی [۹ و ۱۰] بر روی لایه مرزی دو بعدی تحت تاثیر یک دیسک چرخان متمرکز بوده است، در اینجا جریان به صورت سه بعدی با فرضییات ساده کننده ای مدل و نتایج از طریق عددی و تحلیل ابعادی مقایسه شده است. مطالعات مطالعات مطالعات مدل و نتایج از مردان متمرکز بوده است، در اینجا جریان به صورت سه بعدی با فرضییات ساده کننده ای مدل و نتایج از مریق عددی و تحلیل ابعادی مقایسه شده است. مطالعات مطالعات صرفا بر روی اندور ای از ۲۰] و کاری مدل ا

جهت استخراج نیروهای گفته شده، می توان از سه روش حل تحلیلی،حل عددی و انجام آزمایش های میدانی استفاده نمود. در روش اول بطور کاملاً اصولی و بر مبنای تئوری های حاکم بر مساله ، سیستم تحلیل شده و انواع نیروها و گشتاورهای وارد بر آن در شرایط متفاوت کاری شناسایی می شوند. منتها به

¹ Dry dock

دلیل پیچیده بودن شرایط هیدرودینامیکی مساله ، استخراج روابط صریحی که بیانگر تمامی نیروها و گشتاورهای شناخته شده باشند نیازمند تحلیل های عددی می باشند. بویژه که برخی از معادلات حاکم بر مساله با توجه به شرایط مرزی موجود، قابل حل پارامتری نبوده و مجبور به حل عـددی آنها در شرایط خاص خواهیم بود [۷و ۱۶ و ۱۷]. روش دوم سعی در بدست آوردن تمامی نیروها و گشتاورهای شناخته شده در روش اول به طریق مدلسازی عددی و روش سوم از طریق آزمایشات میدانی دارد. در این روش علاوه بر آنکه تنها تعدادی از این نیروها و گشتاورها در آزمایش های معمولی قابل حصول بوده و بقیه به تجهیزات پیشرفته تری احتیاج دارند، انواع خطاهای موجود در شرایط آزمایشگاهی و دستگاههای مورد استفاده موجب محدودیت هایی در بدست آوردن مقادیر مورد نیاز خواهند شد. از سوی دیگر نتایجی که این دو روش ارائه می دهند، متفاوت خواهند بود. از این رو در بخش ۲ ابتدا محاسبه نیروی مکش انجام شده تا مرود استفاده قرار گرفته اند. این معادلات مودن مقادیر مورد نیاز خواهند شد. از سوی دیگر نتایجی که این مورد استفاده قرار گرفته اند. این معادلات میان این رو در بخش ۲ ابتدا محاسبه نیروی مکش انجام شده تا مدل عددی (بخش ۳) ، روابط تجربی معتبر (بخش ۴) و نتایج حاصل از آزمایشات انجام شده در بخش ۵ مدل عددی (بخش ۳) ، روابط تجربی معتبر (بخش ۴) و نتایج حاصل از آزمایشات انجام شده در امکان مقایسه نتایج فراهم گردد. بنابراین به منظور در دست داشتن امکان مقایسه، پس از استفاده از قابلیت مدل عددی (بخش ۱) ، روابط تجربی معتبر (بخش ۴) و نتایج حاصل از آزمایشات انجام شده در بخش ۵ مدل عددی (بخش ۲) ، روابط تجربی میتبر این استفاده در تحلیل ابعادی اشاره شده می باشند تا به همراه مدل عددی (بخش ۲) ، روابط تعربی معتبر (بخش ۴) و نتایج حاصل از آزمایشات انجام شده در بخش ۵ مدل مدود استفاده قرار گرفته اند. این معادلات مبنای استفاده در تحلیل ایمادی مقایسه، بس از استفاده از قابلیت مدل مدو (بخش ۲) ، روابط تجربی معتبر (بخش ۴) و نتایج حاصل از آزمایشات انجام شده در بخش ۵

۲- معادلات حاکم و آنالیز بعدی R در نظر گرفته شده است که توسط شافتی به شعاع R با سرعت برای بررسی مسئله، دیسکی به شعاع R در نظر گرفته شده است که توسط شافتی به شعاع R با سرعت زاویه ای
$$\omega$$
 در آب به گردش می آید. حل دقیق این مساله بسیار مشکل است و معمولا با فرضیاتی انجام می شود. به عنوان مثال اگر سرعت نقاط روی دیسک از رابطه $w = r.\omega$ به دست آیـد و رابطـه برنـولی روی سطح زیرین دیسک به صورت $\omega^2 = -0.5 \rho \cdot r^2$ در نظر گرفته شود، نیروی وارد شده به سطح زیرین دیسک به صورت $\omega^2 = -0.5 \rho \cdot r^2$ در نظر گرفته شود، نیروی وارد شده به سطح نیرین دیسک به صورت $\omega^2 = -0.5 \rho \cdot r^2$ و نیروی وارد شده از سطح زیرین دیسک به صورت $\omega^2 = -0.5 \rho \cdot r^2$ و نیروی وارد شده از سطح در حال تمیز کاری به دیسک برابر بالایی دیسک برابر $(2\pi \cdot r) = -0.5 \rho \cdot r^2$ و نیروی وارد شده از سطح در حال تمیز کاری به دیسک برابر بالایی دیسک برابر $\omega^2 = -0.5 \rho \cdot r^2$ و نیروی وارد شده از سطح در این تمیز کاری به دیسک برابر بالایی دیسک برابر (2 $\pi \cdot r^2 - r^2$). و لذا $\omega^2 - r^2 - r^2$ و لیزا کرد به دیسک برابر بالایی دیسک برابر (2 $\pi \cdot r^2 - r^2$) و نیروی وارد شده از سطح در حال تمیز کاری به دیسک برابر بالایی دیسک برابر (2 $\pi \cdot r^2 - r^2$). و این وی وارد شده از سطح در این تمیز کاری به دیسک برابر بالایی دیسک برابر وی وارد شده بردیسک برابر و در با (1 $\pi \cdot r^2 - r^2$). و لیزا $\omega^2 - r^2 - r^2$ و لیز ای و در دار این کاری به دیسک برابر بالایی دیسک برابر و در این و در بالای و در بالا و در بالا و در بالای در مین و در بالا و در بالا و در بالای در میند و در در این و در بالا و در این و در این و در بالا و در در بالا و در با

$$\frac{1}{R}\frac{\partial}{\partial R}(Ru_r) + \frac{\partial u_z}{\partial z} = 0 \tag{1}$$

$$\rho \left(u_r \frac{\partial u_r}{\partial r} - \frac{u_{\theta}^2}{r} + u_z \frac{\partial u_r}{\partial z} \right) = -\frac{\partial P}{\partial r} + \mu \left(\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial u_r}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 u_r}{\partial z^2} - \frac{u_r}{r^2} \right)$$
(7)

$$\rho \left(u_r \frac{\partial u_\theta}{\partial r} + \frac{u_r u_\theta}{r} + u_z \frac{\partial u_\theta}{\partial z} \right) = \mu \left(\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial u_\theta}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 u_\theta}{\partial z^2} - \frac{u_\theta}{r^2} \right)$$
(7)

$$\rho \left(u_r \frac{\partial u_z}{\partial r} + u_z \frac{\partial u_z}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \mu \left(\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial u_z}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 u_z}{\partial z^2} \right) \tag{(f)}$$

در شکل (۱-الف) هندسه مسئله مورد بررسی ارائه گردیده است. بر اساس این شکل، شرایط مرزی $u_{\theta} \approx r \omega$, $z \approx \delta$, $r \approx R$ مؤثر در این مسئله ρ (دانسیته سیال) ، $u_{\theta} \approx r \omega$, $z \approx \delta$, $r \approx R$ مؤثر در این مسئله ρ (دانسیته سیال) ، μ (لزجت سیال) ، ε (زبری نسبی سطح) ، D (قطر خارجی مؤثر در این مسئله ρ (دانسیته سیال) ، μ_s (نیروی اصطکاک سطح) ، ω (سرعت زاویه ای برس) برس) ، μ_s (کشتاور مورد نیاز برس بر روی شفت) ، F_s (نیروی فشاری یا مکشی بر روی برس) و δ (فاصله برس تا سطح) در نظر گرفته شده و اعمال کردیده است و مهمترین پارامترهای مؤثر در این مسئله مواد مورد نیاز برس بر روی شفت) ، F_s (نیروی فشاری یا مکشی بر روی برس) و δ (فاصله برس تا سطح) در نظر گرفته شده اند.

،
$$\pi_2 = \frac{\delta}{D}$$
 ، $\pi_1 = \frac{\rho\omega D^2}{\mu} = \operatorname{Re}_D$ با توجه به پارامترهای مؤثر، اعداد بدون بعد در چهار دسته $\pi_2 = \operatorname{Re}_D$ ، $\pi_1 = \frac{\rho\omega D^2}{\mu} = \operatorname{Re}_D$ ، $\pi_2 = \frac{\delta}{\mu}$ در این $\pi_3 = \frac{F}{\rho\omega^2 D^4}$ و $\pi_3 = \frac{F}{\rho\omega^2 D^4}$ در این $\pi_4 = \frac{f_s}{\rho\omega^2 D^4}$ و $\pi_3 = \frac{F}{\rho\omega^2 D^4}$ در این تحلیل مورد توجه قرار گرفته است.

با توجه با اعداد بدون بعد معرفی شده و با استفاده از معادلات پیوستگی و ممنتوم در جهت r خواهیم داشت :

$$\frac{U_r}{R} = -\frac{U_z}{\delta} \tag{(a)}$$

$$\rho \frac{U_r^2}{R} - \rho R \omega^2 = -\frac{P}{R} + \mu \frac{U_r}{\delta^2}$$
(9)

: همچنين از معادله ممنتوم در جهت
$$heta$$
 داريم

$$U_r = \frac{R.\mu}{\delta^2.\rho} \tag{Y}$$

با جایگذاری در رابطه (۶)، فشار از رابطه
$$P \sim R^2 (\frac{\mu^2}{\delta^2 . \rho} - \rho.\omega^2)$$
 و سپس از طریـق انتگـرال گیـری از
فشار $F \sim \pi R^4 (\frac{\mu^2}{\delta^2 . \rho} - \rho.\omega^2)$ محاسبه گردیده است. به منظور
انجام تحلیل ابعادی برای گشتاور وارد بر صفحه از رابطه $T_d = \int_0^R 2\pi r^2 \tau_{z\theta} dr$ استفاده شـده کـه در ایـن

٣-مدل تحليل عددي و الگوريتم حل

Fluent در حل عددی سیستم، مساله بصورت دو بعدی معرفی شده و با استفاده از قابلیت های نـرم افـزار Fluent مدل گردیده است. شکل های (۱–ب) و (۱–ج) شرایط مرزی مدل و اجزاء سیستم را نشان می دهـد. بـرای بررسی تاثیر عوامل مختلف هندسی برروی عملکرد سیسـتم و نیروهای وارده، تحلیل براسـاس دیسـک با سرعتهای زاویه ای متفاوت وشعاعهای مختلف انجام شده است. شعاعهای ۱۲/۵، ۱۴، ۱۸ و ۲۰ سانتی متـر و سرعتهای زاویه ای متفاوت وشعاعهای مختلف انجام شده است. شعاعهای ۱۲/۵، ۱۴، ۱۴، ۸۸ و ۲۰ سانتی متـر و سرعتهای زاویه ای متفاوت وشعاعهای مختلف انجام شده است. شعاعهای ۱۲/۵، ۱۴، ۱۴، ۸۸ و ۲۰ سانتی متـر و سرعتهای زاویه ای متفاوت وشعاعهای مختلف انجام شده است. شعاعهای ۱۲/۵، ۱۴، ۱۴، ۸۸ و ۲۰ سانتی متـر و kg/m^3 دیسک با دریمای زاویه ای در ۲۰۰، ۵۰۰ و ۱۵۰۰ دور بر دقیقه در مدل در نظر گرفتـه شـده و فاصـله دیسک از دیواره برابر ۱ سانتی متر لحاظ گردیده است. سیال مورد استفاده آب با مشخصات چگالی kg/m^3 دیسک از دیواره برابر ۱ سانتی متر لحاظ گردیده است. سیال مورد استفاده آب با مشخصات چگالی ای ۱۰۰۰ و ۱۰۰۰ و ۱۰۰۰ دور بر دقیقه در مدل در نظر گرفتـه شـده و فاصـله اسرعت های زاویه ای برابر ۱ سانتی متر لحاظ گردیده است. سیال مورد استفاده آب با مشخصات چگالی ای ای درسک از دیواره برابر ۱۰ سانتی متر لحاظ گردیده است. سیال مورد استفاده آب با مشخصات چگالی در باید. درمای ۲۰ درجـه سـانتیگراد در نظـر گرفتـه شـده است. برای مدل سـازی است. تحلیل بافرض سیال غیر قابل تراکم و بدون نیاز به معادله انرژی انجام گردیده است. برای مدل سـازی جریان اغتشاشی از مدل x - k دو معادله ای استفاده شده و ضرایب با توجه به پیش فرض های نرم افزار در نظر گرفته شده است.



شرایط مرزی بکار رفته براساس هندسه نمایش داده شده در شکل (۱-ب)، درجدول شماره (۱) آورده شده است. درحلهای نهایی از الگوریتم ساده SIMPLE برای حل و QUICK برای گسسته سازی استفاده شده است. برای استخراج مقدار عددی نیروها و گشتاورها پس از خارج کردن مقادیر مربوط به گره ها (Node values) روی سطوح متحرک از این مقادیر با استفاده از الگوریتم ذوزنقه ای انتگرال گیری شده است. همچنین اندازه سلول های شبکه و میدان حل و نواحی مختلف به منظور المان بندی مدل به ترتیب در جدول (۲) و شکل (۲) آورده شده است.

جدول ۱ - شرایط مرزی

А	Pressure Outlet
В	Axis Of Rotation
С	Stationary Wall
D	Rotating Wall

جدول ۲ - اندازه سلولهای شبکه بر حسب سانتیمتر

ناحیه ۱	ناحیه ۲	ناحیه ۳
0.25×0.25	2×0.25	3×0.25

Region 1	Region 2	Region 3	
، بندی مد	به منظور المان	ن حل و نواحی مختلف	شکل ۲ – میدار

4- روابط تجربی علاوه بر روشهای معرفی شده روابط تجربی ذیل نیز جهت محاسبه گشتاور پیچشی وارد بر یک دیسک دوار قابل استفاده می باشد. جریانی که توسط یک دیسک دوار در یک سیال بی نهایت ایجاد می گردد از طریق حل دقیق با معادله ناویر - استوکس قابل تعیین می باشد دیسکی که با سرعت زاویه ای ω می چرخد باعث تولید یک جریان سه بعدی شعاعی (r) ، مماس یا محیطی (ϕ) موازی سطح دیسک و محوری (Z) به سمت عمود بر وجه دیسک می گردد. تنش برشی در حرکت آرام ($10^{5} \times c > R$) با توجه به روابط تجربی عبارتست از [۲ و ۱۸] :

$$\tau_{zr} = 0.51 \rho(\gamma.\omega^3)^{\frac{1}{2}} r \tag{A}$$
$$\tau_{z\theta} = -0.616 \rho(\gamma.\omega^3)^{\frac{1}{2}} r$$

که $R = r^2 . \omega / \gamma$ ، عدد رینولدز و γ لزجت سینماتیکی می باشد. همچنین تنش برشی در حرکت مغشوش ($Re = r^2 . \omega / \gamma$) برابر است با:

$$\tau_{zr} = 0.0225 \rho (\frac{\gamma}{\delta})^{1/4} . C^{7/4} \left[1 + (\frac{r\omega}{c})^2 \right]^{3/8}$$
(9)

$$\tau_{z\theta} = 0.0225\rho(\frac{\gamma}{\delta})^{1/4} \cdot C^{7/4} \left[1 + \left(\frac{c}{r\omega}\right)^2 \right]^{3/8}$$
(1.)

که در این رابطه مقادیر δ,C از این قرار هستند:

$$\delta = 0.526 \mathbf{r} (\gamma / \mathbf{r}^2 . \omega)^{1/5} \tag{11}$$

$$C = 0.162r\omega \tag{11}$$

مجموعه روابط بالا ، $\rho_w = \beta$ چگالی سیال (آب دریا) ، γ ویسکوزیته سینماتیکی آن ، r فاصله از مرکز دیسک ، ω سرعت دورانی برس و δ ضخامت لایه مرزی تشکیل شده بر روی دیسک می باشد. با جایگذاری روابط (۱۱) و (۱۲) در رابطه (۱۰) خواهیم داشت :

$$\tau_{Z\theta} = 26.678 \times 10^{-3} \rho \gamma^{1/5} \omega^{9/5} r^{8/5}$$
(1°)

با انتگرال گیری از این تنش برشی درکل سطح دیسک به شعاع R و استفاده از رابطه $\gamma = \frac{\mu}{\rho}$ خواهیم

$$T_{d} = 36.44 \times 10^{-3} (\rho^{4} \mu \omega^{9} R^{23})^{1/5}$$
 (14)

۵- تست های آزمایشگاهی

همانگونه که ذکر شد، یکی از روشها جهت استخراج حاکمیت های مربوط به نیروها و ممان های اعمال شده به سیستم برس دوار، انجام مجموعه ای از آزمایش های میدانی است. در این مرحله دو مجموع آزمایشی با محرک های هیدرولیکی و الکتریکی ساخته شد و مدل هایی با ابعاد واقعی از برس دوار بکار رفته در سیستم تمیز کننده بدنه کشتی ساخته شد. پارامترهای متغیر در این آزمایشها عبارت بودند از سرعت چرخش برس، فاصله برس تا سطح و قطر برس. پارامترهای اندازه گیری شده نیز عبارتند از نیروی مکش، گشتاور پیچشی و نیروی جانبی.

مجموعه آزمایشی اول (شکل ۳-الف) با موتور الکتریکی و برس نایلونی به قطر ۳۰ سانتیمتر ساخته شده است.گرچه سیستم الکتریکی دارای معایبی می باشد که انجام تست با این نیروی محرکه را محدود میسازد، لیکن این مجموعه به عنوان قدم اول در آزمایشات طراحی و ساخته شد، ساده بودن طراحی و ساخت سیستم مزیت اصلی آن می باشد. در سیستم الکتریکی، دستیابی به سرعت های دورانی مختلف به سادگی امکان پذیر نبود و نیز میزان گشتاور تولیدی متغیر بود و همچنین موتور الکتریکی در حین انجام آزمایش و در مدت زمان بسیار کم، داغ شده و امکان سوختن آن وجود داشت. این در حالی است که در سیستم هیدرولیک این مشکلات ناچیز است. در ضمن، سیستم هیدرولیکی، سیستمی است که میزان گشتاور حاصله مستقل از تعداد دور بر دقیقه می باشد و امکان ایجاد محدوده وسیعی از سرعتهای دورانی بدون تغییر در راندمان سیستم وجود دارد. علاوه بر آن، امکان تغییر جهت چرخش در سیستم هیدرولیک بسیار آسان است. همچنین هیدروموتور به راحتی قادر است در زیر آب کار کند. با توجه به موارد و مزایای ذکر شده در مرحله دوم مجموعه آزمایشی الکترو هیدرولیکی (شکل ۳–ب) طراحی و ساخته شد. مشخصات این محموعه آزمایشی در ضمیمه ۱ آمده است. پارامتر متغیر در این آزمایش، فشار سیستم هیدرولیک و نتیجتا سرعت دورانی دیسک دوار بوده و بدین واسطه گشتاور پیچشی مورد نیاز سیستم و نیروی مکش ایجاد شده سرعت دورانی دیسک دوار بوده و بدین واسطه گشتاور پیچشی مورد نیاز سیستم و نیروی مکش ایجاد شده مرعوعه آزمایشی در ضمیمه ۱ آمده است. پارامتر متغیر در این آزمایش، فشار سیستم هیدرولیک و نتیجتا مرعت دورانی دیسک دوار بوده و بدین واسطه گشتاور پیچشی مورد نیاز سیستم و نیروی مکش ایجاد شده مرعوعه ای از دیسک ها با شعاع های ۱۲۰۸،۲۰۱۴ سانتی متر استفاده شد. در مجموعه تستهای اول مجموعه ای از دیسک ها با شعاع های ۱۴٬۱۸٬۲۰٬۱۲٬۱۰ سانتی متر استفاده شد. در مجموعه تستهای اول دیروی مکش و گشتاور پیچشی در سرعتهای ۱۰۰۰، ۲۰۰۵،۲۰۰٬۱۰۰ و ۱۵۰ دور بر دقیقه نیروی مکش و دیسک با شعاع ۱۲/۵ سانتی متر در سرعتهای ۱۰۰۰،۲۰۰، ۱۰۰۰ دور بر دقیقه نیروی مک و در سیستان اول گشتاور پیچشی وارده بر دیسک اندازه گیری گردید. این آزمایشات با برس با قطر ۳۰ سانتی متر نیز انجام گرفت و اثر برس بر عملکرد دستگاه ثبت و در قسمت نتایج ارائه گردیده است.





ب) دستگاه الکتروهیدرولیک

الف) دستگاه الکتریکی

شکل ۳- نمایش دستگاه های آزمایشی ساخته شده

۶-نتايج

در تحلیل های عددی انجام شده ابتدا از طریق کانتور فشار، نیروی مکشی اعمال شده بر برس و به واسطه کانتور سرعت دورانی، گشتاور درگ وارد شده بر دیسک محاسبه گردیده است. درشکل های (۴-الف) و (۴-ب) که نتایج تحلیل های عددی می باشد، به ترتیب تنش برشی در شعاع های گوناگون دیسک و سرعت های دورانی مختلف نمایش داده شده است. همچنین شکل های (۵-الف) و (۵-ب) به ترتیب تـنش فشـاری در شعاع های گوناگون دیسک و سرعت های دورانی مختلف دیسک را نمایش می دهند. چنانچه در شکل (۴-الف) ملاحظه می شود، میزان تنش برشی وارده بریک نقطه بر روی سطح دیسک دوار ودر شعاع خاص مستقل از ابعاد دیسک بوده و در هر دیسک با افزایش شعاع مقدار این تنش افزایش می یابد. با انتگرال گیری روی سطح هر دیسک، گشتاور پیچشی محاسبه می شود. در شکل(۵-الف) تنش فشاری وارده به نقاط سطح دیسک بدست آمده است. همانگونه که مشاهده می شود مقدار تنش فشاری با ابعاد دیسک تناسب داشته است . به عبارت دیگر مقداراین تنش در یک نقطه با شعاع خاص بر روی سطح دیسک، با افزایش قطر دیسک افزایش داشته است. در هر دیسک نیز با افزایش شعاع میزان این تنش کاهش داشته است. چنانچه در شکل (۴-ب) ملاحظه می شود، میزان تنش برشی وارده بریک نقطه بر روی سطح دیسک دوار ودر شعاع خاص با افزایش سرعت دورانی افزایش داشته است. از طرف دیگر در هر دیسک نیز با افـزایش شـعاع مقـدار این تنش افزایش می یابد. با انتگرال گیری روی سطح هر دیسک، گشتاور پیچشے محاسبه مے شود. در شکل(۵-ب)تنش فشاری وارده به نقاط سطح دیسک بدست آمده است. همانگونه که مشاهده می شود مقدار تنش فشاری نیزبا افزایش سرعت دوران، افزایش نشان می دهد. به عبارت دیگر مقداراین تنش در یک نقط ه با شعاع خاص بر روی سطح دیسک، با افزایش سرعت دوران افزایش داشته است. در هر دیسک نیز با افزایش شعاع میزان این تنش کاهش داشته است. در یک نگاه کلی، نتایج موید آنالیز ابعادی انجام پذیرفته می باشد.







در ادامه نتایج حاصله از تحلیل عددی، تستهای آزمایشگاهی، آنالیز عددی و نتایج تجربی با هم مقایسه شده است. همانگونه که ذکر شددر تمام روشهای فـوق و بـرای بررسـی تـاثیر عوامـل مختلـف، دیسـک بـا شعاعهای ۱۲/۵، ۱۴، ۱۸ و ۲۰ سانتی متر و سرعت های دورانی ۳۰۰، ۵۰۰، ۸۰۰، ۱۰۰۰ و ۱۵۰۰ دور بر دقیقه در نظر گرفته شده است. نمودار مقایسه ای این نتایج در شکل های مربوطه آورده شده است. در یک نگاه کلی تغییرات نیروی مکش بوجود آمده و گشتاور مورد نیاز برای چرخاندن شفت دیسک صعودی می باشند. شکل های (۶) و (۷) نیروی مکش ایجاد شده و شکل های (۸) و (۹) گشتاور مورد نیاز را بـر مبنـای تغییرات سرعت دورانی دیسک و شعاع آن نشان می دهند. در شکل (۶) نحوه تغییرات نیروی مکش دیسک بر حسب شعاع دیسک های مختلف نمایش داده شده است. سرعت دورانی ۱۰۰۰ دور بـر دقیقـه و شـعاع دیسک ۱۲/۵ سانتی متر (شکل ۷) به عنوان مبنای مقایسه نتایج تحلیل از طریق نرم افزار Fluent و تحلیل ابعادی ونیز داده های اندازه گیری از طریق مجموعه آزمایشی قرار گرفته اند. مقایسه نتایج آزمایش نشان می دهد که این نتایج بیشتر با نتایج شبیه سازی به وسیله نرم افزار Fluent همخوانی داشته و به دلیل برخی فرضیات ساده کننده در تحلیل ابعادی، اختلاف حاصله در بازه ۲/۵ تا ۱۵ درصد می باشد. بیشترین انحراف در دور ۱۵۰۰ دور بر دقیقه اتفاق می افتد که در طراحی دستگاه واقعی سعی گردیده نقطه طـرح، از این سرعت دورانی فاصله داشته باشد. نحوه تغییرات گشتاور مورد نیاز نسبت به سرعت دورانی دیسک و نیز شعاع آن در شکل های (۸) و (۹) آورده شده اند. خاطر نشان می گردد، این گشتاور توسط مکانیزم طراحی شده از طریق برس به سازه دستگاه و درنهایت به load cell مربوطه انتقال یافته و انـدازه گیـری مـی شـود. مقایسه نتایج نشان می دهد که داده های اندازه گیری و داده هـای تجربـی در مجمـوع همخـوانی بیشـتری دارند. دلیل این نکته اعمال برخی فرضیات ساده کننده که مهمترین آن وجود برس بر روی دیسک است می باشد. در مدل ساخته شده در نرم افزار Fluent و تحلیل ابعادی، این واقعیت اغماض گردیده است و لذا گشتاور محاسبه شده از این دو طریق به میزان کمتری محاسبه شده است. در این مورد، انحراف نتایج از ۰/۵ تا ۱۴ درصد مشاهده شده است. همچنین مقدار گشتاور مورد نیاز برای دیسک هایی با شعاع ۱۵ سانتی

متر در سرعت دورانی ۱۰۰۰ دور بر دقیقه برابر ۳/۸ نیوتن متر محاسبه شده است. ایـن در حـالی اسـت کـه نتایج تحلیل عددی در همین شرایط گشتاور ۳/۱۹ نیوتن متر با حدود ۱۵ در صد انحراف را ارائه نموده اند.

نمودار مربوط به تغییرات کوپل پیچشی بر حسب سرعت دورانی برس و فاصله برس با سطح در شکل (۱۰) نمایش داده شدهاند. فاصله d=0 مربوط به حالتی است که سیستم در جهت عمودی آزاد بوده تا فاصله خود را با سطح تنظیم کند. همچنین نمودار مربوط به تغییرات نیروی مکش ایجاد شده بر اثر چرخش برس بر حسب سرعت دورانی برس و فاصله برس با سطح در شکل (۱۱) نمایش داده شدهاند. بعلت نزدیکی نتایج بدست آمده در محدوده دقت سنسورها، تنها یک منحنی برای نشان دادن رفتار آنها کافی میباشد. لازم به ذکر است برای نمایش تغییرات نتایج آزمایش از یک منحنی درجه ۲ استفاده شده و نتایج تا دور ۸۰۰ دور بر دقیقه برون یابی شدهاند تا پیش بینی نتایج امکان پذیر گردد.





شکل ۱۱ - تغییرات نیروی مکش ایجاد شده توسط سیستم بر حسب سرعت دورانی دیسک و فاصله آن تا سطح

۷-جمع بندی و نتیجه گیری

به کمک کانتور فشار و سرعت دورانی مقادیر نیروی مکش و گشتاور درگ به ترتیب بدست آمده اند. با توجه به نتایج حاصل از مدل، بیشینه نیروی مکش در سرعت دورانی ۱۵۰۰ دور بر دقیقه و شعاع دیسک ۱۲/۵ سانتی متر، تقریباً برابر با ۸۲/۸ کیلوگرم و گشتاور درگ برابر ۲/۸ نیوتن متر بدست آمده است. ایـن مقادیر کمتر از نتایج پیش بینی شده حاصل از داده های نتایج آزمایش و نیز نتایج تجربی می باشند. علت این امـر ایجاد دیسک بجای برس در مدل می باشد. وجود فرچه ها در برس باعث می گردد که جریان مغشوش تر از جریان اطراف یک دیسک شده و در نتیجه نیروی مکش و گشتاور درگ ، بیش از نیرو و گشتاور یک دیسک بدون برس محاسبه شود. از این رو اعداد بدست آمده برای حل یک دیسک معقول به نظر می رسند. مطلب قابل توجه اینکه با توجه به نتایج آزمایش، نیـروی مکش توسط طـراح و بـه صورت بهینـه بـا اسـتفاده از پارامترهای سرعت زاویه ای محور برس و فاصله برس از سطح کـه در قالب اعـداد بـدون بعـد قـبلاً معرفی

گردیدند انتخاب شده و در این صورت نقطه کار دستگاه بدست می آید. نکته مهم دیگر اینکه بر اساس همخوانی نتایج محاسباتی، تجربی و آزمایشی نقطه طرح دستگاه در نزدیکی ۱۰۰۰ دور بر دقیقه در نظر گرفته شده است. این نکته به حصول نتایج مدل و محاسباتی به صورت کاربردی کمک شایانی نموده است، به طوری که به عنوان یک استنتاج کلی می توان گفت نیروی مکش با توان دوم سرعت زاویه ای و گشتاور با توان چهارم آن تغییر می کند.

مراجع

[۱] مهدی لوئی پور، "سیستم تمیز کننده بدنه کشتی درآب"، تهران، دومین کنفرانس ملی صنایع دریایی ایران، ص ۹۹–۸۹، دی ماه (۱۳۷۹).

[2] Ackerman, J. D., Ethier, C. R., Allen, D. G., and Spelt, J. K., "Investigation of Zebra Mussel Adhesion Strength using Rotating Disks", Journal of Environmental Engineering, Vol. 118, No. 5, pp. 708-724, (1992).

[۳] مهدی لوئی پور، "بررسی اثرات مخرب ارگانیسم های دریایی برروی سازه و تجهیزات دریایی و ارائه روش های حذف موجودات"، بندرعباس، پنجمین کنفرانس علوم و فنون دریایی و جوی ایران، اسفند (۱۳۷۹).

- [4] Crisp, D. J., Walker, G., Young, G. A. and Yule, A. B., "Adhesion and Substrate Choice in Mussels and Barnacle", Journal of Colloid Interface Science, Vol. 104, pp. 40-50, (1985).
- [5] Loeb, G. I., Laster, D., and Gracik, T., "The Influence of Microbial Fouling Films on Hydrodynamic Drag of Rotating Discs", Marine Biodeterioration, an Inter-disciplinary Study, J. D. Costlow and R. C. Tipper, eds., Naval Ins. Press, Annapolis, Md., pp. 88-94, (1984).
- [6] Reed, H. L. and Saric, W. S., "Stability of 3 Dimensional Boundary Layers" Annual Rev. Fluid Mech. Vol. 21, pp. 235-284, (1989).
- [7] Colley, A. J., Thomas, P. J., Carpenter, P. W., and Cooper, A. J., "An Experimental Study of Boundary-layer Transition Over a Rotating", Fluid Dynamics Research Centre, School of Engineering, University of Warwick, Coventry, CV4 7AL, United Kingdom, Vol. 11, pp. 3340-3352, (1999).
- [8] Ersoy, H. V., "Unsteady Flow Due to Concentric Rotation of Eccentric Rotating Disks," Meccanica, Vol. 38, No. 3, pp. 325-334, (2003).
- [9] Carpenter, P. W., and Thomas, P. J., "Flow Over Compliant Rotating Disks", Journal of Engineering Mathematics, Vol. 57, pp. 303-315, (2007).

- [10] Lingwood, R. J., "Absolute Instability of the Boundary Layer on a Rotating Disk", Journal of Fluid Mech., Vol. 299, pp. 17-34, (1995).
- [11] Erdogan, M. E., "Unsteady Flow between Eccentric Rotating Disks Executing Nontorsional Oscollations," International Journal of Non- Linear Mechanics, Vol. 35, No. 4, pp. 691-699, (2000).
- [12] Jarre, S., Gal, P. Le, and Chauve, M. P., "Experimental Analysis of the Instability of the Boundary Layer over a Rotating Disk", Europhys. Lett. Vol. 14, pp. 649-654, (1991).
- [13] Jana, R., Maji, M., Das, S., Maji, S. L., and Ghosh, S. K.," Hydrodynamic Flow between Two Non-coincident Rotating Disks Embedded in Porous Media", World Journal of Mechanics, Vol. 1, pp. 50-56, (2011).
- [14] Guria, M., Jana, R. N., and Ghosh, S. K., "Unsteady MHD Flow between Two Disks with Non-coincident Parallel Axes of Rotation," International Journal of Fluid Mechanics Research, Vol. 34, No. 5, pp. 425-433, (2007).
- [15] Fitzgerald, J. W., Martin, J. E., and Modert, E. F., "Blubber and Compliant Coatings for Drag Reduction in Fluids", in Proceedings of the International Symposium on Seawater Drag Reduction, Newport, Rhode Island, pp. 543-550, (1998). (unpublished).
- [16] Cooper, A. J., and Carpenter, P. W., "The Stability of the Rotating-disk Boundary-layer Flow over a Compliant Wall", Type I & Type II Instabilities, Journal of Fluid Mechanics, Vol. 350, pp. 261-270, (1997).
- [17] Lucey, A. D., and Carpenter, P. W., "Boundary-layer Instability over Compliant Walls", Comparison Between Theory and Experiment, Phys. Fluids Vol. 7, pp. 2355-2364, (1995).
- [18] Colley, A. J., "An Experimental Investigation of the Flow in the Boundary Layer above a Rotating Disk, with Compliant Characteristics, in Water", Ph.D. Dissertation, Department of Engineering, University of Warwick, Coventry, England, (1997).

- R' شعاع شفت : T_d : گشتاور وارد بر دیسک دوار
 - مولفه سرعت زاویه ای : \mathbf{u}_{θ}
 - u_r : مولفه سرعت شعاعی
 - u ، مولفه سرعت قائم : u
- w : سرعت زاویه ای گردش دیسک
- z : مختصات در راستای قائم رو به بالا

- مادهای یونانی δ : ضخامت لایه مرزی μ : لزجت سیال ρ : چگالی سیال τ_{z0} : تنش شعاعی وارد بر دیسک دوار τ_{zr} : تنش زاویه ای وارد بر دیسک دوار

مشخصات	نوع دستگاه / تجهيز	رديف
$Q = 14 \ [cc/t]$, $P_{max} = 100 \ [bar]$	موتور هيدروليک	١
از نوع پراکسیمیتی با دقت [<i>rps</i>] 1±	سنسور سرعت زاویهای	٢
از نوع خمشی با نشانگر دیجیتال و دقت $[Kg]$	لودسل	٣
حداکثر فشار ۱۵۰ بار، دبی متغیر ۱۲-۶۴ لیتر بر دقیقه	منبع قدرت	۴
ابعاد گوناگون ۱۲/۵ تا ۲۰ سانتی متر	دیسک	۵

ضمیمه ۱ – مشخصات تجهیزات استفاده ش

Abstract

Over last 5 decades, flow over a rotating-disk has provided a paradigm for the study of laminar-turbulent transition in three-dimensional boundary-layer flows. The study of such flows has made major contributions to our knowledge of the flow associated with the transition process. It is possible to analysis of such disks due to the hydrodynamic aspects in different ways. In this paper, three different approaches are invoked. Numerical solution by FLUENT is compared with the scale analysis and test results obtained by field data using an experimental set up. Also, a comparison with other experimental results is presented. In fact, a semi-experimental study is considered which investigates the laminar-turbulent transition of the boundary layer over rigid and compliant under-water-rotating-disks. Data are presented and analyzed to produce the change of force and torque along some typical disks to optimize our designation procedure. Such disks are used in under-water cleaners applying cleaning of ship halls. It is the first time that such data has become available and collected for a compliant disk. The experimental observations are not only in qualitative agreement with our theoretical predictions, but confirm the results of previous authors as well.