

بررسی تجربی کاهش پسای اصطکاکی با استفاده از نانو پوشش ابرآب‌گریز در جریان‌های لایه‌ای و مغشوش

خشایار معاون

دانشکده مهندسی مکانیک و هوافضا

دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات

تهران، ایران

khashayar.moaven@gmail.com

با توجه به میزان بالای مصرف سوخت، اتخاذ راهکارهایی برای کاهش مصرف انرژی اجتناب‌ناپذیر است. یکی از روش‌های عملی و قابل استفاده در این جهت، کاهش نیروی پسای^۱ وارده به اجسام است.

درکشتی‌ها، زیردریایی‌ها، انواع هواپیماها و همچنین پره‌های توربین‌ها و پمپ‌های صنایع آب و برق، پسای پوسته‌ای درصد اصلی نیروی پسا را ایجاد می‌کند که این موضوع توجه زیادی را به روش‌های کاهش این نیرو معطوف کرده است [۱]. علاوه بر این، کاهش پسا می‌تواند منجر به افزایش مسیر پیموده شده با مصرف میزان مشخصی از سوخت و سبک شدن وسایل به واسطه نیاز به سیستم رانش کوچک‌تر نیز شود.

تاکنون روش‌های گوناگونی برای کاهش پسا مورد بررسی و استفاده قرار گرفته‌اند که از جمله آنها می‌توان به استفاده از زنجیره‌های بلند پلیمری [۲]، استفاده از میکرو حباب‌ها [۳]، اضافه کردن ساختارهایی مانند ریبلت‌ها^۲ [۴]، ایجاد پوشش‌های هم‌جهت مرکب^۳ [۵] و روش‌های فعالی مانند دمش یا مکش در سطح [۶] اشاره نمود. یکی از روش‌های مهم کاهش پسای اصطکاکی، که از جمله نوین‌ترین روش‌ها می‌باشد، استفاده از فناوری نانو در این زمینه است. با پیشرفت فناوری نانو و توسعه پوشش‌های ابرآب‌گریز در سال‌های اخیر و همچنین با توجه به خواص ویژه‌ای از قبیل جلوگیری از خوردگی، تمیز شدن خودکار، استحکام بالا و غیره، که توسط این پوشش‌ها ایجاد می‌شود، توجه بسیاری از محققین به این پوشش‌ها جلب شده و

چکیده — در این مقاله، اثر نانو پوشش ابرآب‌گریز بر روی ضریب پسای (درگ) اصطکاکی بررسی شده است. به منظور انجام بررسی تجربی از دستگاه دیسک دوار به عنوان دستگاه آزمایش استفاده شده و ضریب پسای دو دیسک آلومینیومی کاملاً مشابه که یکی از آنها دارای نانو پوشش TiO_2 ابرآب‌گریز، و دیگری با سطح صاف و بدون پوشش بوده است مقایسه شده‌اند. این پوشش با استفاده از روش سل-ژل بر روی سطح ایجاد شده و زاویه تماسی در حدود ۱۶۰ درجه ایجاد می‌نماید. آزمایش‌های انجام شده در این مطالعه در محدوده اعداد رینولدز 10^5 تا 2×10^6 بوده و نتایج آن‌ها نشان دهنده ۳۰٪ کاهش پسا به واسطه نانو پوشش در جریان لایه‌ای و تا حدود ۱۵٪ در جریان مغشوش بوده است.

واژه‌های کلیدی — کاهش پسای اصطکاکی؛ پوشش ابرآب‌گریز؛ پوشش نانو؛ جریان مغشوش.

۱. مقدمه

مصرف بالای سوخت و انتشار زیاد گازهای گلخانه‌ای از جمله چالش‌های مهم پیش روی اکثر کشورهای جهان در زمینه حمل و نقل و خطوط انتقال می‌باشد. از این رو توسعه روش‌هایی که موجب کاهش مصرف سوخت و انتشار گازهای آلاینده شود همواره مورد توجه بوده و سرمایه‌گذاری‌های وسیعی در این بخش صورت گرفته است. در کشور ما نیز

1- Drag
2- Riblet
3- Compliant Coatings

در تحقیق حاضر اثر نانوپوشش TiO_2 ابرآب‌گریز بر روی ضریب پسای اصطکاکی به صورت تجربی بررسی شده است. از آنجایی که به تازگی پوشش‌های بر پایه TiO_2 بسیار مورد توجه قرار گرفته‌اند و همچنین تاکنون اثر این نوع پوشش بر روی ضریب پسا بررسی نشده، بنابراین در این مطالعه، از پوشش نانوی آب‌گریز بر پایه TiO_2 استفاده شده است. همچنین جهت انجام آزمایش‌های تجربی از دستگاه دیسک دوار با سیال آب استفاده شده است. با توجه به سرعت چرخش و شعاع دیسک مورد استفاده، محدوده رینولدز به دست آمده، جریان مغشوش را نیز شامل می‌شود.

۲. نحوه تهیه و اعمال پوشش نانو

در این مطالعه، با توجه به امکانات موجود، از روش سل-ژل که یکی از موفق‌ترین روش‌ها جهت ایجاد پوشش‌های نانو می‌باشد، استفاده شده است. با توجه به بزرگ بودن ابعاد دیسک، این روش نیاز به امکانات پیچیده زیادی نداشته و بنابراین جهت انجام پوشش‌دهی بر روی اجسام با ابعاد بزرگ نیز روش بسیار مناسبی می‌باشد.

به منظور ایجاد پوشش مورد نظر بر روی سطح دیسک و چسبندگی بهتر پوشش و همچنین بهبود خواص آب‌گریزی، ابتدا سطح دیسک آلومینیومی سندبلاست^{۱۱} شده است. از آنجایی که ایجاد سطح مرتبه‌ای با زبری در حد میکرون که به طور یکنواخت بر روی سطح پخش گردد می‌تواند موجب تقویت خواص آب‌گریزی شود، یکی از اهداف این مرحله، ایجاد این نوع زبری به کمک سندبلاست بوده است. عملیات سندبلاست با استفاده از ذرات سیلیسیم با ابعاد دو دهم میکرومتر اجرا شده است. نازل دستگاه با قطر ۳ میلی‌متر انتخاب و فشار هوا بر روی ۵ بار تنظیم شده، همچنین فاصله نازل تا دیسک آلومینیومی در حدود ۳۰ سانتی‌متر تنظیم و عملیات سندبلاست انجام شده است.

سپس به منظور زدودن چربی و ناپاکی‌های دیگر، سطح سندبلاست شده به وسیله استون کاملاً تمیز شده و در هوای آزاد قرار داده شده است تا کاملاً خشک شود. لازم به ذکر است که شستشو به وسیله استون به منظور اطمینان از تمیزی سطح، به طور متوالی چند بار تکرار شده است.

پس از آن محلول سل مورد نظر به طریقی که توضیح داده می‌شود تهیه گردید. مواد لازم برای تهیه سل TiO_2 ، عبارتند از اتانول مطلق، تیتانیم بوتوکسید $(Ti(OC_4H_9)_4)$ با عیار ۹۷ درصد، آب دوبار تقطیر شده و دی

4- Sand Blast

پژوهش‌های متعددی در زمینه استفاده از پوشش‌های نانو ابرآب‌گریز به صورت عددی و تجربی انجام گرفته است.

از جمله پژوهش‌های انجام شده در این زمینه می‌توان به تحقیقات میلر^۴ و همکارانش [۷ و ۸] اشاره نمود. آنها با الهام گرفتن از برگ نیلوفر آبی و با استفاده از تکنولوژی نانو، یک پوشش آب‌گریز تولید نمودند و اثر این پوشش را بر روی کاهش پسا به صورت تجربی بر روی صفحه تخت و بیضی و جریان درون لوله مورد بررسی قرار دادند. در این آزمایش‌ها اندازه‌گیری توزیع سرعت بر روی سطح به وسیله PIV^۵ انجام پذیرفت و مشخص شد که سرعت سیال بر روی سطح جامد صفر نبوده و در حقیقت سیال بر روی سطح از شرط مرزی عدم لغزش تبعیت نمی‌کند، بلکه سیال دارای مقداری لغزش بر روی سطح آب‌گریز است.

هنوج^۶ و همکارانش [۹] با استفاده از ساختارهای سیلیکونی، دو نوع پوشش آب‌گریز به نام‌های نانوگرس^۷ و نانوپریک^۸ را توسعه داده و اثر این پوشش‌ها را به صورت تجربی بر روی کاهش پسا بررسی نمودند. نتایج در رژیم جریان لایه‌ای به صورت کاهش پسا تا ۵۰ درصد گزارش شده است.

روثین^۹ و همکارانش [۱۰ و ۱۱] با ایجاد سطح آب‌گریز از سیلیکون، به بررسی تجربی اثر این سطح بر روی کاهش پسا در جریان مغشوش درون میکروکانال پرداختند. نتایج گزارش شده توسط آنها، حاکی از کاهش افت فشار بیش از ۵۰ درصد در حالت‌های خاص است. جینگ^{۱۰} و همکارانش [۱۲] با استفاده از روش لئیس بولتزمن^{۱۱} به مطالعه عددی اثر کاهش پسای ایجاد شده به واسطه وجود دیواره‌های آب‌گریز درون کانال پرداختند. آنها در مطالعه خود از روش جریان دوفازی استفاده کرده و افت فشار درون کانال را به زاویه تماس مربوط نمودند. آنها همچنین نشان دادند که وجود زبری بر روی سطح آب‌گریز، می‌تواند موجب ایجاد کاهش پسای بیشتری گردد اما در سطوح آبدوست، وجود زبری موجب افزایش افت فشار خواهد شد. از جمله سایر پژوهش‌های قابل ذکر می‌توان به مطالعات اونال^{۱۲} و همکارانش [۱۳] و استنزل^{۱۳} و همکارانش [۱۴] اشاره نمود.

4- Miller
5- Particle Image Velocimetry
6- Henoch
7- Nanograss
8- Nanobrck
9- Rothstein
10- Jing
11- Lattice-Boltzmann Method
12- ÜNAL
13- Stenzel

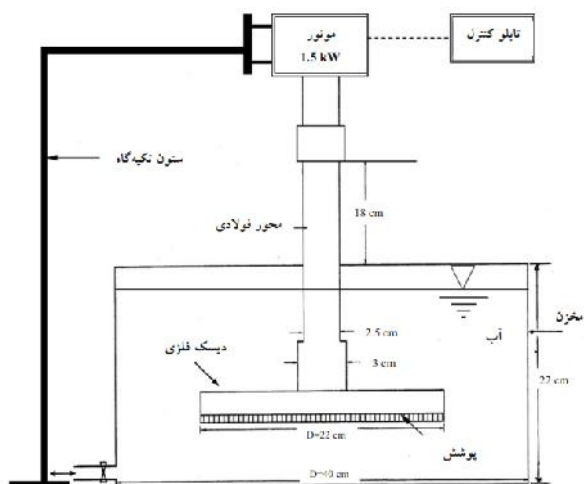


شکل ۲ نحوه قرارگیری قطره آب بر روی سطح دیسک بعد از اعمال پوشش.

۳. شرح دستگاه آزمایش

دستگاه مورد استفاده جهت انجام آزمایش‌ها، یک دستگاه دیسک گردان است. شماتیک این دستگاه در «شکل ۳» مشاهده می‌شود.

این دستگاه شامل یک قاب فلزی به عنوان نگهدارنده اجزا، یک موتور سه فاز جریان متناوب با توان یک و نیم کیلووات، به منظور ایجاد گشتاور لازم جهت چرخاندن دیسک، یک مخزن آب از جنس پلاستیک که دیسک مورد آزمایش در آن قرار داده می‌شود، یک اینورتر به منظور کنترل و تنظیم دور موتور، یک دور سنج به منظور اندازه‌گیری دقیق سرعت چرخش دیسک و یک جریان سنج دیجیتال با قابلیت اندازه‌گیری شدت جریان در محدوده صفر تا پنج آمپر که توانایی اندازه‌گیری جریان گذرنده از هر کدام از سیم‌های متصل به موتور را دارد و همچنین یک ولت متر دیجیتال به منظور اندازه‌گیری ولتاژ با قابلیت اندازه‌گیری در محدوده ۰ تا ۷۵۰ ولت است. دیسک مورد نظر برای آزمایش، با قطر ۲۲ سانتی‌متر، با استفاده از یک محور به موتور متصل شده و به وسیله یک پیچ، که در داخل شیار تعبیه شده بر روی شفت موتور محکم می‌شود، در جای خود ثابت می‌شود.



شکل ۳ شماتیک دستگاه دیسک گردان مورد استفاده جهت انجام آزمایش‌ها.

اتانول آمین. پس از تهیه این مواد با نسبت $Ti(OC_4H_9)_4:EtOH:H_2O:NH(C_2H_4OH)_2=14:112:2:3$ و به طریق زیر با هم مخلوط می‌شوند: ابتدا تیتانیوم بوتوکسید به صورت قطره به قطره در مقدار کافی اتانول مطلق حل کرده و به مدت یک ساعت در دمای محیط به شدت و با دور بالا (در حدود ۲۴۰۰ دور بر دقیقه) هم زده می‌شود، سپس چند قطره آب دوبار تقطیر شده به سل اضافه کرده و بعد از مدتی هم زدن دی اتانول آمین به صورت قطره به قطره به سل اضافه می‌شود و محلول یک ساعت دیگر هم می‌خورد تا کاملاً یکنواخت شده و هیچگونه ذراتی در آن مشاهده نگردد، زمانی که محلول به رنگ زرد کم رنگ شفاف در آمد، سل به مدت ۲۴ ساعت تحت عملیات پیرسازی قرار گرفته و آماده استفاده برای پوشش‌دهی می‌شود. از آنجایی که به علت بزرگ بودن ابعاد دیسک مورد نظر، امکانات لازم جهت پوشش‌دهی با روش غوطه‌وری و یا روش اسپینینگ وجود نداشت سل تهیه شده به وسیله ایزوپروپانول رقیق شد تا امکان اسپری کردن آن بر روی قطعه ایجاد شود. سپس سل رقیق شده بر روی سطح اسپری شده و با استفاده از اسفنج، بر روی سطح کاملاً پخش شده است. پس از این مرحله، سطح قطعه با استفاده از خشک‌کن برقی خشک شده و دوباره عملیات پوشش‌دهی با محلول سل تکرار شده است. این عملیات به منظور به دست آوردن پوشش‌هایی با ضخامت مناسب ۳ مرتبه تکرار گردید و در مرحله آخر، قطعه به حال خود رها شد تا در دمای محیط کاملاً خشک شود. پس از گذشت ۲۴ ساعت از اعمال آخرین مرحله پوشش‌دهی، پوشش ایجاد شده بر روی سطح پایدار شده و آماده انجام آزمایش‌های اندازه‌گیری زاویه تماس می‌باشد. نحوه قرارگیری قطره آب بر روی سطح قبل و بعد از اعمال پوشش به ترتیب در «شکل ۱» و «شکل ۲» مشاهده می‌گردد. همان‌طور که در این دو شکل مشخص است، قبل از اعمال پوشش قطره آب کاملاً بر روی سطح دیسک پخش شده و سطح آن را خیس می‌کند اما پس از اعمال پوشش، قطره آب جمع شده و سطح را تر نمی‌کند. از دیگر مزایای پوشش اعمال شده شفافیت آن می‌باشد که امکان کاربرد آن را در اجسام مختلف و صنایع گوناگون فراهم می‌سازد.



شکل ۱ دیسک آلومینیومی قبل از پوشش‌دهی و خیس شدن سطح آن با آب.

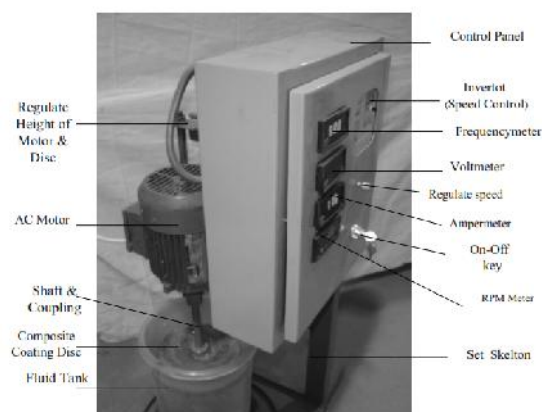
با توجه به بزرگی سطح دیسک، اندازه‌گیری زبری بر روی سه ناحیه از سطح صورت گرفته تا یکنواختی زبری به ویژه بر روی دیسک سند بلاست شده مشخص شود. به منظور اندازه‌گیری زبری سطح از معیار Ra و طول نمونه برداری برابر با ۰.۸ mm استفاده شده است. نتایج حاصل از اندازه‌گیری زبری سطح بر روی دیسک‌ها در «جدول ۱» ارائه شده است. مقادیر Ra در یک طول نمونه برداری، زبری متوسط را بیان کرده، بنابراین اثر یک قله و دره غیر یکنواخت در نتیجه نهایی تأثیر به سزایی نخواهد گذاشت. به طور مثال اگر در حین آماده‌سازی قطعات سطح قطعه کار دچار خراشی شده باشد، اثر این خراش در نتیجه نهایی زبری اندازه‌گیری شده بسیار ناچیز خواهد بود. بنابراین پارامتر مناسبی جهت ارائه شرایط زبری سطح است. علاوه بر این در «جدول ۱» مقادیر زبری که با پارامتر Rz اندازه‌گیری شده است نیز گزارش شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، با استفاده از سندبلاست، سطح قطعه زبر شده و به زبری با ابعاد میکرون، که به منظور ایجاد سطح مرتبه‌ای مورد نظر بوده است، رسیده است. همچنین سطح دیسک صاف، دارای زبری به مراتب کمتری بوده که نشان از صافی مناسب این سطح دارد.

به منظور بررسی میزان آب‌گریزی سطح و موفقیت پوشش اعمالی، زاویه تماس استاتیکی قطره آب و سطح پوشش داده شده اندازه‌گیری شده است. زاویه تماس به عنوان زاویه‌ای مشخص می‌شود که بین سطح جسم و خط مماسی که از محل تماس مایع-گاز به سمت مرز سه فاز رسم شده، به وجود آمده و از سمت قطره اندازه‌گیری می‌شود. شماتیک این زاویه در «شکل ۶» نشان داده شده است. اگر مقدار این زاویه از ۹۰ درجه کوچک‌تر باشد، سطح آب‌دوست و اگر مقدار این زاویه بزرگتر از ۹۰ درجه باشد، سطح آب‌گریز است. در صورتی که مقدار این زاویه از ۱۵۰ درجه بزرگ‌تر باشد، به سطح ابرآب‌گریز گفته می‌شود. در تحقیق حاضر با استفاده از یک دوربین با قابلیت عکس‌برداری از اشیاء بسیار نزدیک و با استفاده از نرم‌افزار پردازش تصویر، زاویه تماس تعیین شده است.

جدول ۱ زبری سطح دیسک مرجع و دیسک سندبلاست شده

دیسک سندبلاست شده			دیسک با سطح صاف		
ناحیه	Ra(μm)	Rz(μm)	ناحیه	Ra(μm)	Rz(μm)
ناحیه ۱	۵/۲۷۵	۳۴/۱۵	ناحیه ۱	۰/۳۲۰	۲/۴۷۶
ناحیه ۲	۴/۹۲۸	۲۵/۹۰	ناحیه ۲	۰/۳۲۵	۲/۰۰۰
ناحیه ۳	۵/۳۰۸	۲۹/۸۳	ناحیه ۳	۰/۳۰۸	۲/۱۰۳

پس از قرار گرفتن دیسک در عمق مناسب از آب، موتور روشن شده و دیسک شروع به چرخیدن می‌کند. با تنظیم اینورتر و خواندن دور از روی دورسنج می‌توان به سرعت چرخشی مورد نظر دست یافت. تغییر سرعت چرخش موجب تغییر عدد رینولدز جریان می‌شود. ابعاد مخزن دستگاه طوری انتخاب شده که دیسک به مقدار کافی از کف مخزن و دیواره‌های آن فاصله داشته باشد تا اثرات دیواره‌ها بر جریان روی دیسک وارد نشود. همچنین دیسک در عمق مناسبی از آب قرار داده می‌شود تا فاصله کافی از سطح آب داشته باشد و اثرات سطح تماس مشترک آب و هوا خنثی گردد. تصویر دستگاه آزمایش در «شکل ۴» نشان داده شده است.



شکل ۴ تصویر دستگاه دیسک گردان و اجزا آن.

۴. نتایج آزمایش‌های انجام شده و تحلیل آن‌ها

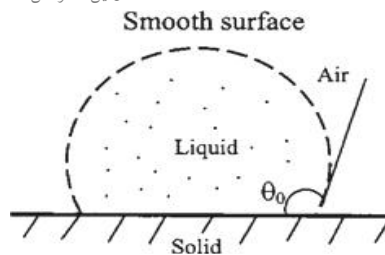
همان‌طور که پیش‌تر نیز اشاره شد، به منظور انجام آزمایش‌ها از دودیسک استفاده شده است. دیسک اول با سطح دارای نانوپوشش ابرآب-گریز و دیسک دوم با سطح صاف و بدون پوشش از جنس آلومینیوم که به عنوان دیسک مرجع استفاده شده است. به منظور انجام آزمایش‌ها، ابتدا زبری سطح دیسک سندبلاست شده و دیسک با سطح صاف اندازه‌گیری شده است. در شکل ۵ انجام زبری سنجی نشان داده شده است.



شکل ۵ انجام زبری سنجی بر روی دیسک صاف و سندبلاست شده.

جدول ۲ دمای اندازه‌گیری شده آب و خواص متناظر آن

دما (C)	چگالی (kg/m ³)	لزجت دینامیک (N.S/m ²)
۲۷/۷	۹۹۶/۵	۰/۰۰۰۸۵



شکل ۶ شماتیک زاویه تماس [۱۵].

دور گردش دستگاه جهت محاسبه سرعت خطی و عدد رینولدز اهمیت دارد. این کار بوسیله انجام یک سری آزمایش‌های کالیبراسیون انجام شده است و رابطه بین دور گردش و عدد روی نمایشگر و همچنین عدد رینولدز متناظر با هر کدام در «جدول ۳» نمایش داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود عدد نشان داده شده توسط دستگاه و دور گردش به صورت خطی باهم ارتباط مستقیم دارند.

سپس یک بار دیسک بدون پوشش و یک بار دیسک دارای نانوپوشش ابرآب‌گریز در سرعت‌های مورد نظر در مخزن آب گردانده شده و جریان هر سه سیم متصل به موتور به دقت اندازه‌گیری شده است. از آنجایی که شدت جریان موتور با مقدار گشتاور موتور نسبت مستقیم داشته و گشتاور نیز به طور مستقیم با نیروی پسای اصطکاکی اعمالی بر روی سطح دیسک متناسب است، از این اندازه‌گیری می‌توان جهت محاسبه مقدار کاهش پسا استفاده نمود. به منظور به دست آوردن شدت جریان ایجاد شده به واسطه اصطکاک قطعات موتور، یکبار موتور بدون بار نیز در همان سرعت‌های قبلی به چرخش درآمده و شدت جریان هر سه سیم نیز که ناشی از اصطکاک قطعات موتور بود اندازه‌گیری گردید. از آنجایی که بارگذاری بر روی موتور به صورت متقارن انجام شده، جریان اندازه‌گیری شده بر روی سه سیم با یکدیگر اختلاف ناچیزی دارند.

طریقه انجام این کار بدین ترتیب است که ابتدا چند قطره با حجم ۱ میلی‌لیتر بر روی نقاط مختلفی از سطح به آرامی و با دقت بسیار قرار داده می‌شود و پس از عکس‌برداری از قطرات با زاویه مناسب، عکس‌ها به نرم‌افزار پردازشگر منتقل و خطوط مماس بر قطره و سطح به دقت رسم می‌شود. سپس زاویه تماس قطره با سطح تعیین می‌گردد. در «شکل ۷» تصویر قطره روی سطح و زاویه تماس اندازه‌گیری شده متناظر با آن مشاهده می‌گردد. همان‌طور که در این شکل مشخص است، زاویه تماس قطره و سطح در حدود ۱۵۷ تا ۱۶۰ درجه است.

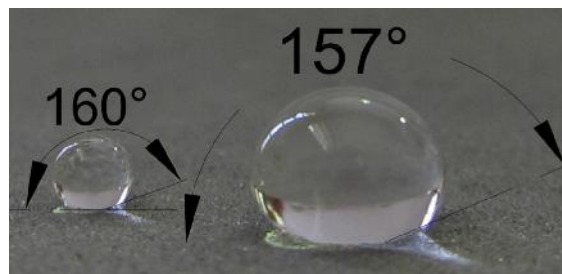
جهت انجام تست‌های دیسک گردان و به منظور اندازه‌گیری مقدار کاهش پسا، ابتدا مخزن دستگاه تا ارتفاع مناسب به وسیله آب مقطر پر شده و سپس دمای آب به وسیله ترمومتر دیجیتال اندازه‌گیری شده است. با استفاده از جدول‌های خواص آب [۱۶]، لزجت و چگالی آب متناظر با این دما به دست آمده و در «جدول ۲» نمایش داده شده است. از این خواص به منظور محاسبه عدد رینولدز استفاده شده است. عدد رینولدز از رابطه (۱) محاسبه می‌شود [۱۷].

جدول ۳ عدد رینولدز متناسب با دور چرخش دیسک

عدد روی نمایشگر اینورتر	دور چرخش دیسک (rpm)	$Re = \frac{\dots r^2 \bar{S}}{\dots}$
۴	۱۱۷/۶	$1/75E+5$
۶	۱۷۷/۴	$2/64E+5$
۸	۲۳۶/۲	$3/51E+5$
۱۲	۳۵۳/۹	$5/26E+5$
۱۶	۴۷۰/۸	$6/99E+5$
۱۸	۵۲۹/۳	$7/86E+5$
۲۲	۶۴۴/۸	$9/58E+5$
۲۶	۷۵۷/۴	$1/13E+6$
۳۰	۸۶۹/۸	$1/29E+6$
۳۴	۱۰۱۰	$1/50E+6$
۳۸	۱۱۳۰	$1/68E+6$
۴۲	۱۲۴۷	$1/85E+6$
۴۴/۵	۱۳۲۵	$1/97E+6$

$$Re = \frac{\dots r^2 \bar{S}}{\dots} \quad (1)$$

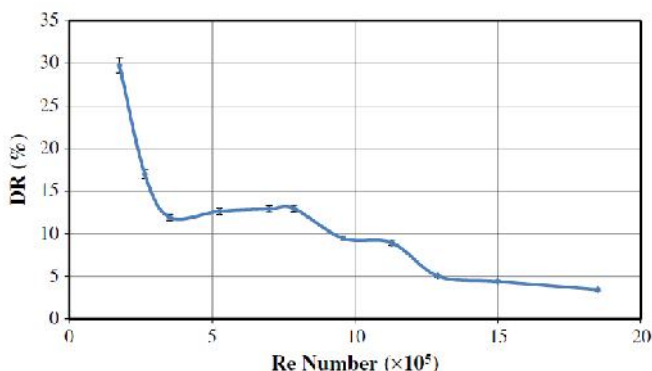
از آنجایی که عددی که نمایشگر اینورتر دستگاه دیسک گردان نمایش می‌دهد بیانگر دور گردش دستگاه نبوده و تنها نسبت مستقیم با دور گردش دارد، ابتدا می‌بایست عدد روی اینورتر را تغییر داده و سپس با اندازه‌گیری دور به وسیله سنسور دورسنج ارتباط بین این دو عدد را به دست آورد.



شکل ۷ زاویه تماس دیسک پوشش‌دار.

مقدار کاهش پسا در اعداد رینولدز مختلف در «شکل ۹» مشاهده می-شود. مقدار عدم قطعیت مقادیر نشان داده شده در این شکل برابر ۳ درصد می‌باشد.

لازم به ذکر است که در جریان بر روی دیسک دوار مورد آزمایش، جریان همواره به صورت مخلوطی از جریان مغشوش و جریان لایه‌ای می‌باشد. با بالا رفتن سرعت چرخش دیسک و عدد رینولدز، از گستره ناحیه جریان لایه‌ای کاسته شده و به ناحیه جریان مغشوش افزوده می‌شود. بنابراین می‌توان گفت در رینولدزهای بالاتر، سهم جریان مغشوش به مراتب بیشتر از سهم جریان لایه‌ای در به وجود آوردن نیروی پسا است. همان‌طور که در تحقیقات پیشین نیز ذکر شده، اثر مستقیم آب‌گریزی در دینامیک سیالات، لغزش سیال بر روی سطح جامد آب‌گریز بوده و این حالت مشابه عبور سیال بر روی سیال خواهد بود. علت کاهش پسا و ایجاد لغزش به هنگام استفاده از سطوح آب‌گریز را می‌توان به دام افتادن هوا در حفره‌های بسیار ریز روی سطح دانست. از آنجایی که لزجت هوا بسیار کمتر از آب می‌باشد، در حقیقت می‌توان گفت که سیال در بعضی از نقاط بسیار ریز روی سطح با هوا در تماس بوده که این امر موجب لغزش سیال بر روی سطح و کاهش گرادیان سرعت شده و بنابراین پسا کاهش می‌یابد. همچنین تماس آب با هوا در بخشی از سطح منجر به کاهش سطح تماس می‌شود که این امر نیز می‌تواند دلیل کاهش پسای اصطکاکی باشد. از آنجایی که با افزایش عدد رینولدز و گذار از جریان لایه‌ای به جریان مغشوش سهم دیفیوژن مولکولی کم شده و سهم پخش اغتشاشی افزایش می‌یابد و همچنین با توجه به اینکه در جریان مغشوش گرادیان‌های تنش برشی و سرعت در نزدیکی دیواره بسیار شدیدتر از جریان لایه‌ای است، این موضوع می‌تواند منجر به خروج بخشی از هوای به دام افتاده روی سطح شده و در نتیجه آن مقدار لغزش سیال روی سطح کاهش می‌یابد.



شکل ۹ مقدار کاهش پسا بر حسب عدد رینولدز.

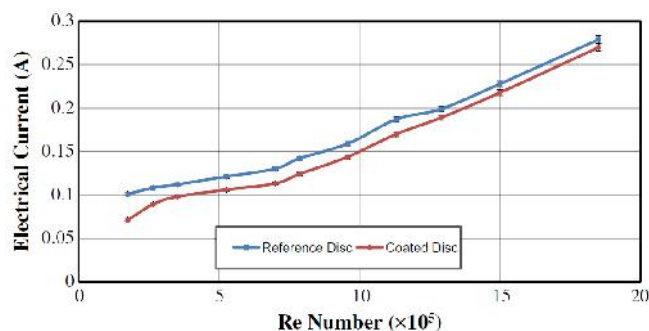
به منظور بهتر شدن امکان مقایسه، در نهایت جریان میانگین گذرنده از سه سیم به عنوان جریان مورد مقایسه گزارش شده است.

به منظور دقت بهتر و حصول اطمینان از اندازه‌گیری‌های انجام شده، آزمایش‌ها برای هر مرحله و در هر سرعت چرخش دیسک سه بار تکرار شده است و در تمامی آزمایش‌ها به عدد روی ولت متر نیز دقت شده است تا مقدار ولتاژ ثابتی را نشان دهد. نمودار شدت جریان بر حسب عدد رینولدز نیز برای دیسک مرجع و دیسک دارای پوشش نانو ابرآب‌گریز در «شکل ۸» نشان داده شده است. برای رسم این نمودار ابتدا اعداد متناظر با شدت جریان موتور بدون بار، از مقادیر شدت جریان‌های اندازه‌گیری شده برای دیسک بدون پوشش و با پوشش نانو کم شده تا عدد نمایش داده شده در نمودار تنها به واسطه گشتاور دیسک و به تبع آن پسای اصطکاکی روی سطح دیسک باشد. مقدار عدم قطعیت مقادیر نشان داده شده در این شکل برابر یک و نیم درصد است.

همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، شدت جریان که نسبت مستقیم با گشتاور و به تبع آن نیروی پسای اصطکاکی وارد شده به دیسک دارد، در دیسک دارای پوشش نانو کمتر از شدت جریان برای دیسک با سطح صاف بدون پوشش است. به منظور به دست آوردن مقدار کاهش پسای متناظر با هر عدد رینولدز از رابطه (۲) استفاده شده است.

$$\%DR = 100 \times \frac{I_{Smooth} - I_{Coated}}{I_{Smooth} - I_{NoLoad}} \quad (1)$$

که در این رابطه، I_{Smooth} شدت جریان موتور در حالت دیسک با سطح صاف، I_{Coated} شدت جریان موتور در حالت دیسک دارای پوشش نانو، $I_{No Load}$ شدت جریان موتور در حالت بدون بار و $\%DR$ درصد کاهش پسا می‌باشد.



شکل ۸ شدت جریان الکتریکی بر حسب عدد رینولدز برای دیسک بدون پوشش و با پوشش نانو.

حدود ۱۵ الی ۳۰ درصد در جریان لایه‌ای و کاهش پسا در حدود ۴ الی ۱۵ درصد در جریان مغشوش بودند.

منابع

- [1] M.A. Samaha, H. Vahedi Tafreshi and M. Gad-El-Hak, "Superhydrophobic Surfaces: from the Lotus Leaf to the Submarine", in *Comptes Rendus Mecanique*, Vol. 340, No. 1, 2012, pp. 18-34.
- [2] K. Zhang, H.J. Choi and Ch.H. Jang, "Turbulent Drag Reduction Characteristics of Poly (Acrylamide-Co-Acrylic Acid) in a Rotating Disk Apparatus", in *Colloid Polymer Science*, Vol. 289, 2011, pp. 1821-1827.
- [3] S. Deutsch, M. Moeny, A.A. Fontaine and H. Petrie, "Microbubble Drag Reduction in Rough Walled Turbulent Boundary Layers with Comparison Against Polymer Drag Reduction", in *Experiments in Fluids*, Vol. 37, No. 5, 2004, pp.731-744.
- [4] R. Gruneberger and W. Hage, "Drag Reduction Characteristics of Longitudinal and Transverse Riblets At Low Dimensionless Spacings", in *Experiments in Fluids*, Vol. 50, No. 2, 2011, pp. 363-373.
- [5] P.W. Carpenter, "Recent Progress in the Use of Compliant Walls for Laminar Flow Control", in *Progress in Industrial Mathematics*, Vol. 12, 2008, pp. 178-187.
- [6] T. Segawa, H. Mizunuma, K. Murakami, F.C. Li and H. Yoshida, "Turbulent Drag Reduction by Means of Alternating Suction and Blowing Jets", in *Fluid Dynamics Research*, Vol. 39, No. 7, 2007, pp. 552-568.
- [7] A.K. Balasubramanian, C. Millera and O.K. Rediniotis, "Microstructured Hydrophobic Skin for Hydrodynamic Drag Reduction", in *AIAA J.*, Vol. 42, No. 2, 2003, pp. 411-414.
- [8] A.K. Balasubramanian, A.C. Miller, T. Lance and O.K. Rediniotis, O.K. "Biomimetic Nanostructure Skin for Hydrodynamic Drag Reduction", in *AIAA 41st Aerospace Science Meeting and Exhibit*, 2003.
- [9] C. Henoach, T.N. Krupenkin, P. Kolodner, J.A. Taylor, J.A., M.S. Hodes, A.M. Lyons, C. Peguero and K. Breuer, "Turbulent Drag Reduction Using Superhydrophobic Surfaces", in *3rd AIAA Flow Control Conf.*, 2006.
- [10] J.P. Rothstein, J. Ou and B Perot, B., "Laminar Drag Reduction in Microchannels Using Ultrahydrophobic Surfaces", in *Physics of Fluids*, Vol. 16, No. 12, 2004, pp. 4635-4643.
- [11] J.P. Rothstein, R.J. Daniello and N.E. Waterhouse, "Drag Reduction in Turbulent Flows over Superhydrophobic Surfaces", in *Physics of Fluids*, Vol. 21, No. 8, 2009, pp. 1-9.
- [12] J. Cui, W. Li and W. Lam, "Numerical Investigation on Drag Reduction with Superhydrophobic Surfaces by Lattice-Boltzmann Method", in *Computers and Mathematics with Applications*, Vol. 61, No. 12, 2011, pp. 3678-3689.
- [13] B. Ünal, U.O. Ünal, G. Politis, R. Sampson and M. Atlar, "Boundary Layer and Surface Roughness Measurements of Nanostructured Anti-Fouling Coatings on Flat Plates", in *Int. Conf. on Ship Drag Reduction (SMOOTH-Ships)*, 2010.
- [14] V. Stenzel, Y. Wilkea and W. Hage, "Drag-Reducing Paints for the Reduction of Fuel Consumption in Aviation and Shipping", in *Progress in Organic Coatings*, Vol. 70, No.4, 2011, pp. 224-229.
- [15] Kh. Moaven, "Experimental Evaluations and Numerical Analysis of Flow in Variation of Friction Drag Coefficient at Reynolds Numbers Range Of 10^5 to 4×10^6 and Effects of Nano-Coating on Different Surfaces", M.Sc. Thesis, Islamic Azad Univ., Sci. and Research Branch, 2012.
- [16] Y.A. Cengel and J.M. Cimbala, "Fluid Mechanics: Fundamentals and Applications", McGraw Hill, New York, 2006.
- [17] H. Schlichting and K. Gersten, "Boundary Layer Theory", Springer, Berlin, 8th edition, 2000.

این موضوع منجر خواهد شد تا مقدار کاهش پسا در جریان لایه‌ای به مراتب بیشتر از مقدار کاهش پسا در جریان مغشوش باشد، بنابراین با توجه به این موارد می‌توان روند کاهش مقدار کاهش پسا با افزایش عدد رینولدز را توجیح نمود. هرچه توانایی سطح در به دام انداختن هوا و نگه داشتن آن بیشتر باشد، مقدار کاهش پسا نیز بیشتر خواهد بود. در جریان مغشوش، ساختارهای اغتشاشی و به ویژه گردابه‌های نزدیک دیواره و در جریان ضعیف شده که این موضوع علت کاهش درگ در رژیم جریان مغشوش است. اما توجه به این نکته ضروری است که طول لغزش می‌بایست از مقدار مشخصی بیشتر باشد تا اثر محسوس بر جریان مغشوش داشته باشد. همان‌طور که پیش از این نیز بیان شد، طول لغزش با مقدار هوای محبوس شده در سطح و میزان توانایی آن سطح در نگه داشتن هوای به دام افتاده و یا به عبارت دیگر میزان آب‌گریزی سطح و ماندگاری این آب‌گریزی در شرایط مختلف نسبت مستقیم دارد. در پوشش تولید شده در این مطالعه، احتمالاً با افزایش رینولدز مقدار هوای محبوس شده در پوشش کم شده و پوشش توانایی ایجاد طول لغزش بسیار مؤثری را ندارد و به همین علت نیز مقدار کاهش پسا در جریان مغشوش کم است. مقدار آب‌گریزی سطح و توانایی آن در به دام انداختن هوا را می‌توان با معیاری مانند زاویه تماس بیان نمود. زبری سطح یکی از عوامل مؤثر در جهت افزایش مقدار آب‌گریزی است، زیرا امکان به دام افتادن هوا بر روی سطح را افزایش می‌دهد. البته این زبری‌ها نباید دارای ابعاد بسیار بزرگ باشند زیرا می‌توانند خود موجب افزایش پسا شوند، بنابراین ابعاد زبری‌ها در حدود میکرون و با توزیع یکنواخت بسیار مطلوب است.

۵. نتیجه گیری

نانو پوشش آب‌گریز بر پایه TiO_2 با موفقیت و به روش سل-ژل بر روی سطح دیسک از جنس آلومینیوم نشانده شد. به منظور به دام افتادن بهتر هوا بر روی سطح و ایجاد کاهش پسای بیشتر، سطح با ساختار مرتبه‌ای میکرو/نانو ایجاد شد. زبری میکرو به وسیله سندبلاست بر روی سطح ایجاد شده و پوشش نانو بر روی آن موجب ایجاد زاویه تماس قطره و سطح آلومینیوم در حدود 160° درجه شده است که نشان دهنده کارایی پوشش اعمالی است. زاویه تماس سطح سندبلاست شده آلومینیوم بدون پوشش تقریباً صفر درجه است که نشان دهنده آب‌دوستی سطح است. با استفاده از دستگاه دیسک دوار اثر نانوپوشش ابرآب‌گریز ایجاد شده در کاهش ضریب پسای اصطکاکی، در جریان لایه‌ای و مغشوش و در محدوده اعداد رینولدز 10^5 تا 2×10^6 بررسی شد. نتایج حاکی از کاهش پسا در