

(یادداشت مهندسی)

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

خشیار معاون^۳دانشکده مهندسی مکانیک و هوافضا
دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقاتمحمد طیبی رهنی^۲دانشکده مهندسی مکانیک و هوافضا
دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات و
دانشکده مهندسی هوافضا،
دانشگاه صنعتی شریف
(تاریخ دریافت: ۹۱/۰۶/۲۶؛ تاریخ پذیرش: ۹۲/۰۵/۱۳)منوچهر راد^۱دانشکده مهندسی مکانیک و هوافضا
دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات

چکیده

مطالعه حاضر شامل بررسی اثر نانو پوشش‌های ابرآب‌گریز بر روی ضریب پسای اصطکاکی می‌باشد. به منظور انجام بررسی تجربی، از دستگاه دیسک دوار به عنوان دستگاه آزمایش استفاده شده و ضریب پسای دیسک آلومینیومی دارای نانو پوشش TiO_2 ابرآب‌گریز، با ضریب پسای دیسک آلومینیومی بدون پوشش مقایسه شده است. این پوشش با استفاده از روش سل-ژل روی سطح ایجاد شده و زاویه تماسی در حدود 160° درجه ایجاد می‌نماید. آزمایش‌ها در محدوده اعداد رینولدز 10^5 تا 4×10^6 انجام و نتایج حاصل حاکی از حدود 30% کاهش پسا به واسطه نانو پوشش در جریان لایه‌ای و حدود 15% در جریان آشفته بوده است.

واژه‌های کلیدی: کاهش پسای اصطکاکی، دستگاه دیسک دوار، پوشش ابرآب‌گریز، پوشش نانو، جریان آشفته

Experimental Investigation of Viscous Drag Reduction, Regarding Superhydrophobic Nano-Coating in Laminar and Turbulent Flows

M. Rad

Dep't. of Mech. and Aerospace Eng.
Sci. and Research Branch,
Islamic Azad Univ. Tehran

M. Taeibi-Rahni

Dep't. of Mech. and Aerospace Eng.
Sci. and Research Branch,
Islamic Azad Univ. Tehran and
Aerospace Eng. Dep't.
Sharif Univ. of Tech.

Kh. Moaven

Dep't. of Mech. and Aerospace Eng.
Sci. and Research Branch,
Islamic Azad Univ. Tehran

(Received: 16 September, 2012; Accepted: 4 August, 2013)

ABSTRACT

In this research, effects of superhydrophobic nano-coating on frictional drag coefficient have been investigated. A rotating disc apparatus is used as the experimental set-up to compare the frictional drag force on an aluminum disc with TiO_2 superhydrophobic nano-coating and a smooth coatless aluminum disc. The superhydrophobic nano-coating is prepared, using sol-gel method and is able to produce a contact angle of 160° degrees. Experiments were performed in the range of Reynolds number from 10^5 to 4×10^6 . The results show about 30% drag reduction in laminar flows as well as about 15% drag reduction in turbulent flows.

Keywords: Frictional Drag Reduction, Rotating Disc Apparatus, Superhydrophobic Coating, Nano-coating, Turbulent Flow

۱- استاد (نویسنده پاسخگو): m.rad@sharif.ir

۲- استاد: taeibi@sharif.edu

۳- دانشجوی کارشناسی ارشد: khashayarmoaven@gmail.com

فهرست علائم

%DR	درصد کاهش درگ، %
I_{Coated}	شدت جریان دیسک دارای نانو پوشش، A
$I_{No Load}$	شدت جریان ناشی از اصطکاک، A
I_{Smooth}	شدت جریان دیسک بدون پوشش، A
Ra	پارامتر زبری، μm
$Re = \frac{\rho r^2 \omega}{\mu}$	عدد رینولدز
Rz	پارامتر زبری، μm
r	شعاع دیسک، m
T	دما، $^{\circ}C$
θ_0	زاویه تماس، degree
λ_c	طول نمونه برداری، mm
μ	ویسکوزیته دینامیکی، $N.S/m^2$
ρ	چگالی kg/m^3
ω	سرعت چرخشی rad/sec

۱- مقدمه

مصرف بالای سوخت و انتشار گازهای گلخانه‌ای به مقدار زیاد، 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 کاهش انتشار گازهای آلاینده شود همواره مورد توجه بوده و سرمایه‌گذاری‌های وسیعی در این بخش صورت گرفته است. در کشور ما نیز با توجه به میزان بالای مصرف سوخت، اتخاذ راهکارهایی برای کاهش مصرف انرژی اجتناب ناپذیر است. یکی از روش‌های عملی و قابل استفاده در این جهت، کاهش نیروی پسای^۱ وارده به اجسام است.

درکشتی‌ها، زیر دریایی‌ها، انواع هواپیماها و همچنین پره‌های پمپ‌ها و توربین‌ها، پسای پسته‌ای درصد اصلی نیروی پسای را ایجاد می‌کند که این موضوع توجه زیادی را به روش‌های کاهش این نیرو معطوف کرده است [۱]. علاوه بر این، کاهش پسای 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. همچنین کاهش پسای می‌تواند باعث افزایش سرعت گردد که این امر می‌تواند در کاربردهای نظامی و دفاعی نیز مفید واقع شود.

روش‌های مختلفی برای کاهش پسای 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 کاهش پسا، 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 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 [۷-۸] اشاره نمود. آنها با الهام گرفتن از برگ نیلوفر آبی و با استفاده از تکنولوژی نانو، یک پوشش آب‌گریز تولید نموده 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.

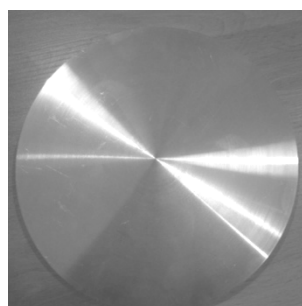
هنوچ^۶ و همکارانش [۹] با استفاده از ساختارهای سیلیکونی، دو نوع پوشش آب‌گریز به نام‌های نانوگرس^۷ و نانوبریک^۸ را توسعه داده و اثر این پوشش‌ها را به صورت تجربی بر روی کاهش پسا بررسی نمودند. نتایج در رژیم جریان لایه‌ای به صورت کاهش پسا تا ۵۰ درصد گزارش شده است.

روثین^۹ و همکارانش [۱۰-۱۱] با ایجاد سطح آب‌گریز از سیلیکون، به بررسی تجربی اثر این سطح بر روی کاهش پسا در جریان آشفته 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

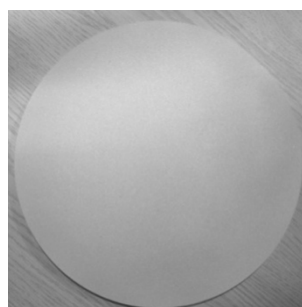
2- Riblet
3- Compliant Coatings
4-Miller
5- Particle Image Velocimetry
6- Henoach
7- Nanograss
8- Nanobrick
9- Rothstein
10- Jing

1- Drag

تنظیم شده، همچنین فاصله نازل تا دیسک آلومینیومی در حدود ۳۰ سانتی متر تنظیم و عملیات سندبلاست انجام شده است. تصویر دیسک آلومینیومی قبل از سندبلاست در شکل ۱-الف و تصویر آن پس از سندبلاست در شکل ۱-ب مشاهده می شود. سپس، به منظور زدودن چربی و ناپاکی های دیگر، سطح سندبلاست شده به وسیله استون کاملاً تمیز شده و در هوای آزاد قرار داده گرفته تا کاملاً خشک شود. لازم به ذکر است که شستشو به وسیله استون به منظور اطمینان از تمیزی سطح، به طور متوالی تکرار شده است.



(الف)



(ب)

شکل (۱): (الف) دیسک آلومینیومی قبل از سندبلاست و (ب) دیسک آلومینیومی پس از سندبلاست.

پس از آن محلول سل مورد نظر به طریقی که توضیح داده می شود تهیه گردید. مواد لازم برای تهیه سل TiO_2 عبارتند از اتانول مطلق، تیتانیوم بوتوکسید $(Ti(OC_4H_9)_4)$ با عیار ۹۷ درصد، آب دوبار تقطیر شده و دی اتانول آمین. پس از تهیه این نسبت $Ti(OC_4H_9)_4:EtOH:H_2O:NH(C_2H_4OH)_2=14:112:2:3$ با هم مخلوط می شوند، 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 ۲,۴۰۰ دور بر دقیقه) هم زده می شود، سپس چند قطره آب دوبار تقطیر شده به سل اضافه کرده و بعد از مدتی هم زدن دی اتانول آمین به صورت قطره به سل اضافه می شود و محلول یک ساعت دیگر هم می خورد تا کاملاً یکنواخت شده و

روش لیتیس بولتزمن^۱ به مطالعه عددی اثر کاهش پسای ایجاد شده به واسطه وجود دیواره های آب گریز 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 آب گریز، می تواند موجب ایجاد کاهش پسای بیشتری گردد اما در سطوح آبدوست، وجود زبری موجب افزایش افت فشار خواهد شد. از جمله سایر پژوهش های قابل ذکر می توان به مطالعات اونال^۲ و همکارانش [۱۳]، رکنی [۱۴]، محمدنوری و همکارش [۱۵] و استنزل^۳ و همکارانش [۱۶] اشاره نمود.

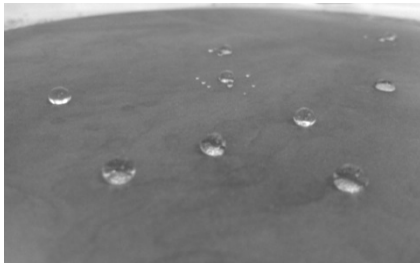
در تحقیق حاضر اثر نانو پوشش TiO_2 ابر آب گریز بر روی ضریب پسای اصطکاکی به صورت تجربی بررسی شده است. از آنجایی که به تازگی پوشش های بر پایه TiO_2 بسیار مورد توجه قرار گرفته اند و همچنین تاکنون اثر این نوع پوشش بر روی ضریب پسا بررسی نشده، بنابراین در این مطالعه، از پوشش نانوی آب گریز بر پایه TiO_2 استفاده شده است. همچنین جهت انجام آزمایش های 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 آشفته را نیز شامل می شود.

۲- نحوه تهیه و اعمال پوشش نانو

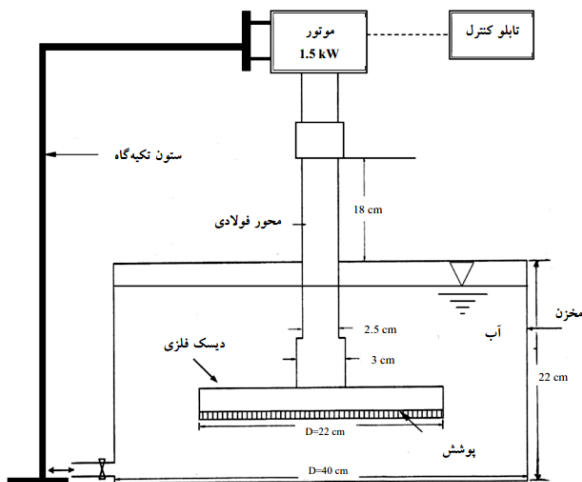
در این مطالعه، با توجه به امکانات موجود، از روش سل-ژل که یکی از موفق ترین روش ها جهت ایجاد پوشش های نانو می باشد، استفاده شده است. با توجه به بزرگ بودن ابعاد دیسک، این روش نیاز به امکانات پیچیده زیادی نداشته و بنابراین جهت انجام پوشش دهی بر روی اجسام با ابعاد بزرگ نیز روش بسیار مناسبی می باشد.

به منظور ایجاد پوشش مورد نظر بر روی سطح دیسک و چسبندگی بهتر پوشش و همچنین بهبود خواص آب گریزی، ابتدا سطح دیسک آلومینیومی سندبلاست^۴ شده است. از آنجایی که ایجاد سطح مرتبه ای با زبری در حد میکرون که به طور یکنواخت بر روی سطح پخش گردد می تواند موجب تقویت خواص آب گریزی شود، یکی از اهداف این مرحله، ایجاد این نوع زبری به کمک سندبلاست بوده است. عملیات سندبلاست با استفاده از ذرات سیلیسیم با ابعاد $0.2 \mu m$ اجرا شده است. نازل دستگاه با قطر ۳ میلی متر انتخاب و فشار هوا بر روی ۵ بار

1- Lattice-Boltzmann Method
2- ÜNAL
3- Stenzel
4- Sand Blast



شکل (۳): نحوه قرارگیری قطره آب بر روی سطح دیسک بعد از اعمال پوشش.



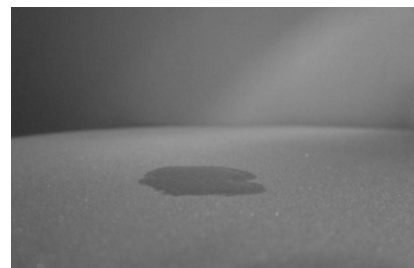
شکل (۴): شماتیک دستگاه دستگاه دیسک گردان مورد استفاده جهت انجام آزمایش‌ها.

این دستگاه شامل یک قاب فلزی به عنوان نگهدارنده اجزا، یک موتور سه فاز ۵۰ هرتز جریان متناوب با توان ۱/۵ کیلووات، ساخت شرکت G.E.C Machines انگلستان، 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 مدل LS600 ساخت شرکت JAPANAUTONICS به منظور کنترل و تنظیم دور موتور، یک دور سنج ساخت شرکت JAPANOMEGA به منظور اندازه‌گیری دقیق سرعت چرخش دیسک و یک جریان سنج دیجیتال ساخت شرکت JAPAN OMEGA 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 ساخت شرکت JAPAN OMEGA 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. پس از قرار

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 پوشش دهی 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 خشک کن 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 شکل‌های ۲-۳ مشاهده می‌گردد. همان‌طور که در این دو شکل مشخص است، قبل از اعمال پوشش قطره آب کاملاً بر روی سطح دیسک پخش شده و 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.

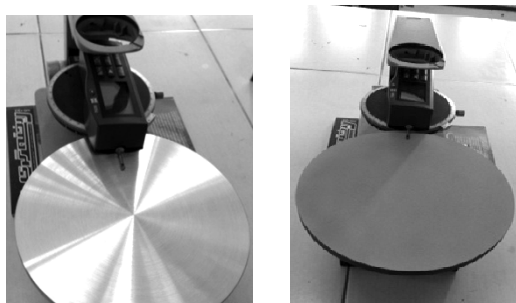
۳- شرح دستگاه آزمایش

دستگاه مورد استفاده جهت انجام آزمایش‌ها، یک دستگاه دیسک گردان است که در قبل نیز به منظور بررسی اثر پوشش هم‌جهت مرکب بر روی ضریب پسا مورد استفاده قرار گرفته است [۱۷]. شماتیک این دستگاه در شکل ۴ مشاهده می‌شود.



شکل (۲): نحوه قرارگیری قطره آب بر روی سطح دیسک قبل از اعمال پوشش.

جدول میانگین ۵ بار اندازه‌گیری است که 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 بلاست شده مشخص شود. به منظور اندازه‌گیری زبری سطح از معیار Ra و طول نمونه برداری (۸C) برابر با ۰/۸mm استفاده شده است. معیار Ra متداول‌ترین و پراستفاده‌ترین پارامتر جهت آنالیز ساختار سطح است که در قدیم در انگلستان میانگین خط مرکزی و در آمریکا میانگین ریاضیاتی نامیده می‌شد [۱۸]. لازم به توضیح است که دیمانسیون متوسط زبری از جنس طول است که معمولاً بامیکرومتر یا میکرواینچ نمایش داده می‌شود. مقدار Ra در یک طول نمونه برداری، زبری متوسط را بیان کرده، بنابراین اثر یک قله و دره غیر یکنواخت در نتیجه آماده‌سازی قطعات سطح قطعه کار دچار خراشی شده باشد، اثر این خراش در نتیجه نهایی زبری اندازه‌گیری شده بسیار ناچیز خواهد بود. بنابراین Ra 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.



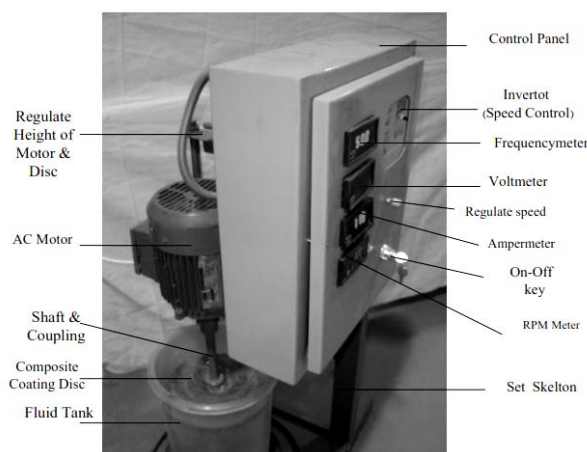
شکل (۶): مراحل انجام زبری‌سنجی بر روی دیسک سند بلاست شده و دیسک با سطح صاف.

جدول (۱): زبری سطح دیسک با سطح صاف و دیسک سند بلاست شده.

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

همان‌طور که ملاحظه می‌شود، با استفاده از سند بلاست، 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

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 گردیده و عدد بدون بعد فرود بر جریان و ضریب پسا تأثیری نداشته باشد. تصویر دستگاه آزمایش در شکل ۵ نشان داده شده است.



شکل (۵): تصویر دستگاه دیسک گردان مورد استفاده جهت انجام آزمایش‌ها.

۴- نتایج آزمایش‌های انجام شده و تحلیل آنها

به منظور انجام آزمایش‌ها از دودیسک استفاده شده است. دیسک اول با سطح دارای نانوپوشش ابرآب‌گریز 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 سند بلاست شده و دیسک با سطح صاف اندازه‌گیری شده است. مراحل انجام این کار به این ترتیب است که ابتدا پرآب دستگاه بر روی سطح قطعه مورد نظر قرار داده می‌شود و با استفاده از پیچ تنظیم دستگاه، پرآب به طور دقیق در تماس با سطح دیسک و بدون اعمال هیچ فشاری بر روی سطح ثابت می‌گردد. در شکل ۶ مراحل انجام اندازه‌گیری نشان داده شده است.

همچنین، نتایج حاصل از اندازه‌گیری زبری سطح بر روی دیسک‌ها در جدول ۱ ارائه شده است. مقادیر ارائه شده در این

برای انجام تست‌های دیسک گردان 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 [۱۹]، لزجت و چگالی آب متناظر با این دما به دست آمده و در جدول ۲ نمایش داده شده است.

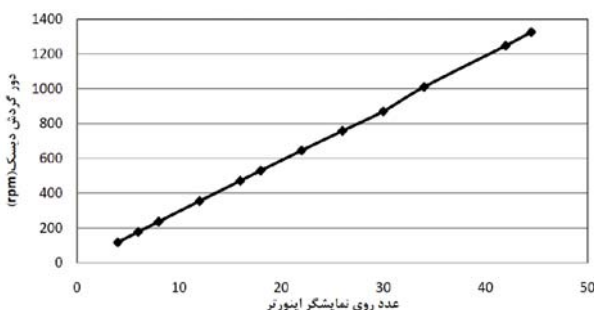
جدول (۲): دمای اندازه‌گیری شده و خواص آب متناظر آن.

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

از این خواص به منظور محاسبه عدد رینولدز استفاده شده است. عدد رینولدز از رابطه (۱) محاسبه می‌شود [۲۰].

$$Re = \frac{\rho r^2 \omega}{\mu} \quad (1)$$

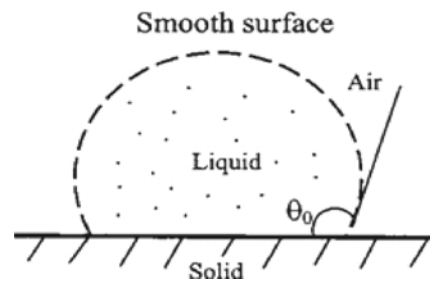
از آنجایی که عددی که نمایشگر اینورتر دستگاه دیسک گردان نمایش می‌دهد بیانگر دور گردش دستگاه نبوده و تنها نسبت مستقیم با دور گردش دارد، ابتدا می‌بایست عدد روی اینورتر را تغییر داده و سپس با اندازه‌گیری دور به وسیله سنسور دورسنج ارتباط بین این دو عدد را به دست آورد. دور گردش دستگاه جهت محاسبه سرعت خطی و عدد رینولدز اهمیت دارد. نمودار مربوط به دور گردش و عدد روی نمایشگر اینورتر در شکل ۹ نمایش داده شده است. در جدول ۳ نیز اعداد مربوط به دور دستگاه و عدد متناظر آن بر روی اینورتر و همچنین عدد رینولدز متناظر با آنها، ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود عدد نشان داده شده توسط دستگاه و دور گردش به صورت خطی باهم ارتباط مستقیم دارند.



شکل (۹): عدد نمایش داده شده بر روی اینورتر و دور گردش متناظر آن.

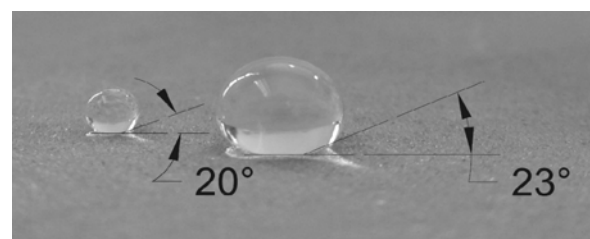
سپس، یک بار دیسک بدون پوشش و یک بار دیسک دارای نانوپوشش ابرآب‌گریز در سرعت‌های مورد نظر در مخزن آب

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 ۷ نشان داده شده است.



شکل (۷): شماتیک زاویه تماس [۱۸].

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. طریقه انجام این کار بدین ترتیب است که ابتدا چند قطره با حجم ۱/۳ 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 ۸ 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.

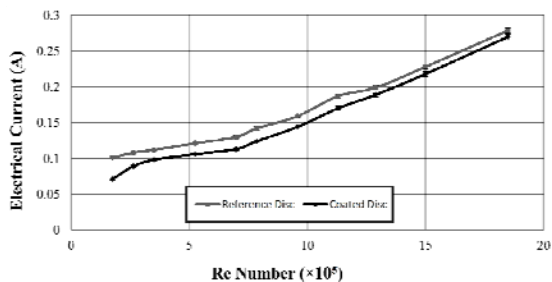


شکل (۸): اندازه‌گیری زاویه تماس بر روی سطح دیسک پوشش داده شده.

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 ۱/۵ درصد است.

جدول (۴): مقادیر شدت جریان اندازه‌گیری شده برای هر دیسک در اعداد رینولدز مختلف.

شدت جریان موتوری بدون بار (A)	شدت جریان متناظر با دیسک بدون پوشش (A)	شدت جریان متناظر با دیسک با پوشش نانو (A)	شدت جریان موتوری بدون بار (A)
۰/۱۱۹	۰/۱۹۰	۰/۲۲۰	۱/۷۵E + ۰۵
۰/۰۸۷	۰/۱۷۶	۰/۱۹۵	۲/۶۴E + ۰۵
۰/۰۳۸	۰/۱۳۶	۰/۱۵۰	۳/۵۱E + ۰۵
۰/۰۱۲	۰/۱۱۸	۰/۱۳۳	۵/۲۶E + ۰۵
۰/۰۱۰	۰/۱۲۳	۰/۱۴۰	۶/۹۹E + ۰۵
۰/۰۱۱	۰/۱۳۵	۰/۱۵۳	۷/۸۶E + ۰۵
۰/۰۱۱	۰/۱۵۵	۰/۱۷۰	۹/۵۸E + ۰۵
۰/۰۱۱	۰/۱۸۱	۰/۱۹۸	۱/۱۳E + ۰۶
۰/۰۱۱	۰/۲۰۰	۰/۲۱۰	۱/۲۹E + ۰۶
۰/۰۱۰	۰/۲۲۸	۰/۲۳۸	۱/۵۰E + ۰۶
۰/۰۱۰	۰/۲۸۰	۰/۲۸۹	۱/۸۵E + ۰۶



شکل (۱۰): شدت جریان الکتریکی بر حسب عدد رینولدز برای دیسک بدون پوشش و با پوشش نانو.

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.

$$\%DR = 100 \times \frac{I_{Smooth} - I_{Coated}}{I_{Smooth} - I_{NoLoad}} \quad (2)$$

در این رابطه، I_{Smooth} شدت جریان موتور در حالت دیسک با

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. 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 و اعداد گزارش شده در جدول ۴ متوسط این سه بار اندازه‌گیری می‌باشند.

جدول (۳): عدد رینولدز و دور گردش متناظر عدد روی نمایشگر اینورتر.

عدد روی نمایشگر اینورتر	دور چرخش دیسک (rpm)	$Re = \frac{\rho r^2 \omega}{\mu}$
۴	۱۱۷/۶	۱/۷۵E + ۰۵
۶	۱۷۷/۴	۲/۶۴E + ۰۵
۸	۲۳۶/۲	۳/۵۱E + ۰۵
۱۲	۲۵۳/۹	۵/۲۶E + ۰۵
۱۶	۴۷۰/۸	۶/۹۹E + ۰۵
۱۸	۵۲۹/۳	۷/۸۶E + ۰۵
۲۲	۶۴۴/۸	۹/۵۸E + ۰۵
۲۶	۷۵۷/۴	۱/۱۳E + ۰۶
۳۰	۸۶۹/۸	۱/۲۹E + ۰۶
۳۴	۱۰۱۰	۱/۵۰E + ۰۶
۳۸	۱۱۳۰	۱/۶۸E + ۰۶
۴۲	۱۲۴۷	۱/۸۵E + ۰۶
۴۴/۵	۱۳۲۵	۱/۹۷E + ۰۶

همچنین، نمودار شدت جریان بر حسب عدد رینولدز نیز برای دیسک مرجع و دیسک دارای پوشش نانو ابرآب‌گریز در شکل ۱۰ 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

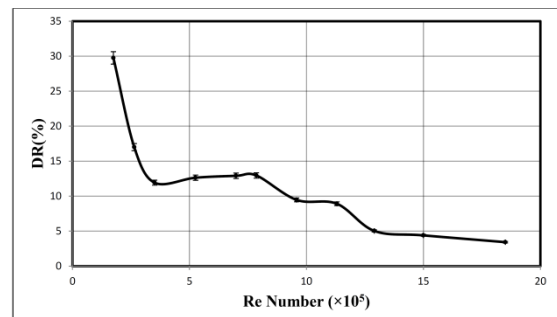
سطح جامد آب‌گریز بوده و این حالت مشابه عبور سیال بر روی سیال است [۷، ۸ و ۱۵]. علت کاهش پسا و ایجاد لغزش به هنگام استفاده از سطوح آب‌گریز را می‌توان به دام افتادن هوا در حفره‌های بسیار ریز روی سطح دانست. از آنجایی که لزجت هوا بسیار کمتر از آب می‌باشد. در حقیقت می‌توان گفت که سیال در بعضی از نقاط بسیار ریز روی سطح با هوا در تماس بوده که این امر موجب لغزش سیال بر روی سطح و کاهش گردان 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 آشفته سهم دیفیوژن مولکولی کم شده و سهم پخش آشفتگی افزایش می‌یابد و همچنین با توجه به اینکه در جریان آشفته گردان‌های 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. این موضوع منجر خواهد شد تا مقدار کاهش پسا در جریان لایه‌ای به مراتب بیشتر از مقدار کاهش پسا در جریان آشفته 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 آشفته، ساختارهای آشفتگی و به ویژه گردابه‌های نزدیک دیواره و در جریان، ضعیف شده که این موضوع علت کاهش درگ در رژیم جریان آشفته است. اما توجه به این نکته ضروری است که طول لغزش می‌بایست از مقدار مشخصی بیشتر باشد تا اثر محسوسی بر جریان آشفته 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 آشفته 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

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.

مقدار کاهش پسا در اعداد رینولدز مختلف در جدول ۵ نمایش داده شده و همچنین نمودار کاهش پسا بر حسب عدد رینولدز در شکل ۱۱ مشاهده می‌شود. مقدار عدم قطعیت مقادیر نشان داده شده در این شکل برابر ۳ درصد می‌باشد.

جدول (۵): درصد کاهش پسا بر حسب عدد رینولدز و مقادیر شدت جریان خالص مربوط به هر دیسک.

$Re = \frac{\rho r^2 \omega}{\mu}$	$I_{Coated} - I_{NoLoad}$	$I_{Smooth} - I_{NoLoad}$	%DR
$1/75E + 0.5$	۰/۰۷۱	۰/۱۰۱	۲۹/۷۵
$2/64E + 0.5$	۰/۰۸۹	۰/۱۰۸	۱۷/۰۰
$3/51E + 0.5$	۰/۰۹۸	۰/۱۱۲	۱۱/۹۲
$5/26E + 0.5$	۰/۱۰۶	۰/۱۲۱	۱۲/۶۳
$6/99E + 0.5$	۰/۱۱۲	۰/۱۳۰	۱۲/۹۰
$7/86E + 0.5$	۰/۱۲۳	۰/۱۴۲	۱۲/۹۵
$9/58E + 0.5$	۰/۱۴۳	۰/۱۵۹	۹/۴۶
$1/13E + 0.6$	۰/۱۷۰	۰/۱۸۷	۸/۹۱
$1/29E + 0.6$	۰/۱۸۸	۰/۱۹۹	۵/۰۳
$1/50E + 0.6$	۰/۲۱۷	۰/۲۲۸	۴/۳۹
$1/85E + 0.6$	۰/۲۶۹	۰/۲۷۹	۳/۴۲



شکل (۱۱): مقدار کاهش پسا بر حسب عدد رینولدز.

لازم به ذکر است که در جریان بر روی دیسک دوار مورد آزمایش، جریان همواره به صورت مخلوطی از جریان آشفته و جریان لایه‌ای می‌باشد. با بالا رفتن سرعت چرخش دیسک و عدد رینولدز، از گستره ناحیه جریان لایه‌ای کاسته شده و به ناحیه جریان آشفته افزوده می‌شود. بنابراین می‌توان گفت در رینولدزهای بالاتر، سهم جریان آشفته 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

7. Balasubramanian, A.K., Millera, C., and Rediniotis, O.K. "Microstructured Hydrophobic Skin for Hydrodynamic Drag Reduction", AIAA J., Vol. 42, No. 2, pp. 411-414, 2003.
8. Balasubramanian, A.K., Miller, A.C., Lance, T., and Rediniotis, O.K. "Biomimetic Nanostructure Skin for Hydrodynamic Drag Reduction", AIAA 41st Aerospace Science Meeting and Exhibit, 2003.
9. Henoeh, C., Krupenkin, T.N., Kolodner, P., Taylor, J.A., Hodes, M.S., Lyons, A.M., Peguero C., and Breuer, K. "Turbulent Drag Reduction, Using Superhydrophobic Surfaces", the 3rd AIAA Flow Control Conf., 2006.
10. Rothstein, J.P., Ou, J., and Perot, B., "Laminar Drag Reduction in Microchannels, Using Ultrahydrophobic Surfaces", Physics of Fluids, Vol. 16, No. 12, pp. 4635-4643, 2004.
11. Rothstein, J.P., Daniello, R.J., and Waterhouse, N.E. "Drag Reduction in Turbulent Flows over Superhydrophobic Surfaces", Physics of Fluids, Vol. 21, No. 8, pp. 1-9, 2009.
12. Cui, J., Li, W., and Lam, W. "Numerical Investigation on Drag Reduction with Superhydrophobic Surfaces by Lattice-Boltzmann Method", Computers and Mathematics with Applications, Vol. 61, No. 12, pp. 3678-3689, 2011.
13. Ünal, B., Ünal U.O., Politis, G., Sampson, R., and Atlar, M. "Boundary Layer and Surface Roughness Measurements of Nanostructured Anti-Fouling Coatings on Flat Plates", Int. Conf. on Ship Drag Reduction (SMOOTH-Ships), 2010.
14. Rokni, S. "Measurement and Calculation of Skin Friction Drag Coefficient on a Nano-Coated Flat Plate", M.Sc. Thesis, Islamic Azad Univ. South Tehran Branch, 2010 (In Persian).
15. Noori, N.M. and Mofidi, A. "Large Eddy Simulation of Turbulent Flow over Hydrophobic Surfaces", Aerospace Mech. J., Vol. 7, No. 4, pp. 77-86, 2011 (In Persian).
16. Stenzel, V., Wilkea, Y., and Hage, W. "Drag-Reducing Paints for the Reduction of Fuel Consumption in Aviation and Shipping", Progress in Organic Coatings, Vol. 70, No.4, pp. 224-229, 2011.
17. Fakhari, A. and Rad, M. "Ships and Submarines Drag Reduction by Means of Compliant Coating", the 5th Iran Hydraulics Conf., 2005.
18. Moaven, Kh. "Experimental Evaluations and Numerical Analysis of Flow in Variation of Friction Drag Coefficient at Reynolds Numbers Range Of 10^3 to 4×10^6 and Effects of Nano-Coating on Different Surfaces", M.Sc. Thesis, Islamic Azad Univ., Sci. and Research Branch, 2012 (In Persian).
19. Cengel, Y.A. and Cimbala, J.M. "Fluid Mechanics: Fundamentals and Applications", Mcgraw Hill, New York, 2006.
20. Schlichting, H. and Gersten, K. "Boundary Layer Theory", Springer, Berlin, 8th Ed., 2000.

این زبری‌ها نباید دارای ابعاد بسیار بزرگ باشند زیرا می‌توانند خود موجب افزایش پسا شوند، بنابراین ابعاد زبری‌ها در حدود میکرو و با توزیع یکنواخت بسیار مطلوب است.

۵- نتیجه‌گیری

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 آشفته و در محدوده اعداد رینولدز 10^5 تا 4×10^6 بررسی شد. نتایج حاکی از کاهش پسا در حدود 15% الی 30% درصد در جریان لایه‌ای و کاهش پسا در حدود 4% الی 15% درصد در جریان آشفته بودند.

۶- مراجع

1. Samaha, M.A., Vahedi Tafreshi, H., and Gad-El-Hak, M. "Superhydrophobic Surfaces: from the Lotus Leaf to the Submarine", Comptes Rendus Mecanique, Vol. 340, No. 1, pp. 18-34, 2012.
2. Zhang, K., Choi, H.J., and Jang, Ch.H. "Turbulent Drag Reduction Characteristics of Poly (Acrylamide-Co-Acrylic Acid) in a Rotating Disk Apparatus", Colloid Polymer Science, Vol. 289, No's. 17-18, pp. 1821-1827, 2011.
3. Deutsch, S., Moeny, M., Fontaine, A.A. and Petrie, H., "Microbubble Drag Reduction in Rough Walled Turbulent Boundary Layers with Comparison Against Polymer Drag Reduction", Experiments in Fluids, Vol. 37, No. 5, pp. 731-744, 2004.
4. Gruneberger, R. and Hage, W. "Drag Characteristics of Longitudinal and Transverse Riblets at Low Dimensionless Spacings", Experiments in Fluids, Vol. 50, No. 2, pp. 363-373, 2011.
5. Carpenter, P.W. "Recent Progress in the Use of Compliant Walls for Laminar Flow Control", Progress in Industrial Mathematics, Vol. 12, pp. 178-187, 2008.
6. Segawa, T., Mizunuma, H., Murakami, K., Li, F.C., and Yoshida, H. "Turbulent Drag Reduction by Means of Alternating Suction and Blowing Jets", Fluid Dynamics Research, Vol. 39, No. 7, pp. 552-568, 2007.