

# دوازدهمین کنگره ملی سراسری فناوریهای نوین در حوزه توسعه پایدار ایران

12<sup>th</sup> National Congress of  
the New Technologies in Sustainable Development of Iran

senaconf.ir

## مروری بر روش‌های کاهش درگ از طریق کنترل لایه‌ی مرزی

عاطفه پورجاهد<sup>۱</sup>، سیاوش چاکی پور<sup>۲</sup>، محمدحسین قاسمی<sup>۳</sup>

atpourjahed@jsu.ac.ir

۱. استادیار گروه مهندسی شیمی، دانشگاه صنعتی جندی شاپور دزفول

siavashchakipour@gmail.com

۲. دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی شیمی/پدیده‌های انتقال، دانشگاه صنعتی جندی شاپور دزفول

mohmmdhoseinghasemi@gmail.com

۳. دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی شیمی/پدیده‌های انتقال، دانشگاه صنعتی جندی شاپور دزفول

### چکیده

پدیده‌ی تلاطم و جریان‌های آشفتگی سیالات در سراسر زندگی روزمره‌ی ما دیده می‌شود؛ این پدیده یکی از دلایل اصلی اتلاف انرژی است. همه‌ی ما در مورد بحران جهانی انرژی و مشکل گرمایش زمین مطلع هستیم، بنابراین نیاز داریم میزان مصرف انرژی را در زندگی روزمره و بخصوص در صنعت کاهش دهیم. برای رسیدن به این منظور افزایش بهره‌وری، یکی از عوامل کلیدی است. یکی از مشکلات اصلی در جریان‌های آشفتگی، نیروی ویسکوزیته‌ای است که در سطوح مشترک، اعم از مرز جامد-مایع یا جامد-گاز، ایجاد می‌شود. نیروی مقاومت سیال یا درگ که در اثر اغتشاش ایجاد می‌شود، راندمان را تا حد زیادی کاهش می‌دهد، بنابراین کاهش نیروهای اصطکاک می‌تواند به طور قابل توجهی راندمان را بهبود بخشد. در این مقاله، روش‌های کنترل لایه مرزی که می‌تواند به کاهش درگ کمک کند، بررسی شده است. روش‌هایی مانند افزودنی‌های پلیمری، سطوح فوق آب‌گریز، کاهش درگ ناشی از حباب‌های هوا، کاهش درگ ناشی از تغییر در شکل جسم، کاهش درگ با روش‌های مرکب به همراه کاربردهای آن‌ها در زمینه‌های مختلف مورد بررسی قرار گرفته است. در نهایت برخی از ایده‌های جدید برای بهبود تکنیک‌های کاهش درگ فعلی ارائه شده است.

### واژه‌های کلیدی

درگ، کاهش درگ، ویسکوزیته، سطوح فوق آب‌گریز، میکرومورفولوژی

# دوازدهمین کنگره ملی سراسری فناوریهای نوین در حوزه توسعه پایدار ایران

12<sup>th</sup> National Congress of  
the New Technologies in Sustainable Development of Iran

senaconf.ir

## ۱. مقدمه

هر جا یک جسم و یک سیال در تماس باهم در حال حرکت باشند، اگر سرعت نسبی سیال به سرعت آستانه‌ی خود برسد، آشفتگی به وجود می‌آید [۱،۲]. نیروی درگ، همیشه در طبیعت بین سطح مشترک سیال و جامد وجود دارد. در زندگی روزمره، ما با نمونه‌های مختلفی از نیروی درگ برخورد داریم، مانند هواپیماها، وسایل نقلیه دریایی، خودروها، خطوط لوله گاز و نفت، قطارهای راه آهن و حتی هنگام شنا با لباس شنا. نیروی حاصل از ویسکوزیته، عامل اصلی مصرف انرژی است و با مجذور سرعت سیال نسبت مستقیم دارد. بنابراین اگر سرعت بیشتر باشد، مقاومت سیال در برابر حرکت بیشتر است، و نیروی درگ نیز افزایش می‌یابد. در نتیجه افزایش سرعت، منجر به مصرف انرژی بیشتر برای غلبه بر نیروی درگ می‌شود، که به نوبه‌ی خود منجر به مصرف سوخت بیشتر و انتشار آلاینده‌های مضر بیشتری می‌گردد [۳]. پژوهشگران طی سالیان گذشته در مقالات بسیاری سعی کرده بودند تا با صیقلی و صاف کردن سطوح که باعث کاهش اصطکاک بین مرز سطح مشترک جامد-سیال می‌شود، نیروی درگ را کم کنند. کاهش درگ با این روش، در آزمایشات مختلف تأیید شد و هم اکنون برای کاربردهای مختلف سیالات با موفقیت در مقیاس بزرگ تجاری به کار رفته است. اما با پیشرفت در مهندسی سیالات، مفهوم فوق با چالش‌های جدی روبرو شد و تحقیقات اکنون به فکر سایر فناوری‌های کاهش درگ به روش‌های نوین است [۴-۷].

با پیشرفت تکنولوژی، محققان با استفاده از شبیه‌سازی‌های مختلف همراه با آزمایش به این نتیجه رسیدند که اگر ضخامت لایه‌ی مرزی ویسکوز زیرین بیشتر از ارتفاع آشفتگی حاصل از زبری سطح تماس باشد، تمام زبری سطح ناهموار در زیر آن لایه قرار گرفته و می‌توان سطح جدید را به عنوان سطح صاف هیدرودینامیکی در نظر گرفت. اکنون نیروی اصطکاک به نیروی مقاومت حاصل از ویسکوزیته‌ی لایه‌ی زیرین تبدیل می‌شود و این مقاومت را نمی‌توان فقط با صاف کردن سطوح تماس کاهش داد و رویکرد کاهش درگ به صورت سنتی پاسخگو نخواهد بود [۸-۱۰]. در اوایل دهه‌ی ۱۹۸۰، ریف و همکاران، مطالعه‌ی بسیار جالبی در مورد بدن کوسه انجام دادند و به چگونگی کاهش نیروی درگ به کمک مورفولوژی فلس‌های کوسه در هنگام شنا در شرایط آشفتگی، پی بردند [۱۱]. در سال‌های بعد از آن، محققان مختلفی بر کاهش نیروی درگ در طبیعت متمرکز شدند؛ به عنوان مثال، توجه به عمل خودتمیزکنندگی برگ‌های نیلوفر آبی و همچنین ساختارهای ریز موجود بر روی برگ‌های آن که اثر فوق آب‌گریز به آن‌ها می‌بخشد. همان طور که محققان به مشاهدات خود در طبیعت می‌پرداختند، روش‌های جدیدی را برای کاهش نیروی درگ یافتند که یکی از نمونه‌های آن، پوست انعطاف‌پذیر دلفین است که به طور قابل توجهی نیروی درگ روی پوستشان را در هنگام شنا با سرعت بالا کاهش داده و اتلاف انرژی را کاهش می‌دهند [۱۲-۱۴].

پیشرفت تکنولوژی، و تجزیه و تحلیل‌های مختلف انجام شده روی پدیده‌ی لغزش، به این واقعیت منجر شد که می‌توانیم سرعت سیال را با همان اتلاف انرژی قبلی به طور قابل توجهی افزایش دهیم [۱۵-۱۸]. وونگ و همکاران، لایه‌ی مرزی آشفتگی را روی صفحه تخت با استفاده از گرداب‌های جریان القایی پلاسما دست‌کاری کردند. نیروی پلاسما در آشفتگی تولید شده در طول جریان دخالت می‌کرد و به این ترتیب باعث کاهش نیروی مقاومت سیال می‌شد [۱۹]. آلبرز و همکاران، تاثیر امواج سطحی عرضی و شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ را در گرداب‌های فشار صفر در طول جریان آشفتگی مطالعه کردند که به کاهش درگ تا ۲۶ درصد و صرفه‌جویی در انرژی تا ۱۰ درصد منجر شد [۲۰]. در حال حاضر، روش‌های جدید دیگری مانند کاهش درگ با تزریق میکروحباب هوا و کاهش درگ به وسیله‌ی افزودنی‌های پلیمری، با کاربردهای عملی بزرگ خود مورد توجه قرار گرفته‌اند. لو ژانگ و همکاران، در بررسی خود، روش‌های مختلف کاهش درگ دیواره‌ها را با ایجاد میکروارتعاشات توسط محرک پیزوالکتریک، بر اساس کنترل نیروی حجمی و تغییر شکل دیواره و حرکت دیواره، مورد مطالعه قرار دادند [۲۱، ۲۲]. هدف ما در این مقاله بررسی فناوری‌های نوین کاهش درگ است، و در نهایت چند ایده جهت بهبود روش‌های فعلی برای اثرگذاری بیشتر پیشنهاد شده است.

## ۲. کاهش نیروی درگ به کمک افزودنی‌های پلیمری

تقریباً همه‌ی ماهی‌ها، فلس‌هایی دارند که سرتاسر بدن آن‌ها را پوشانده و به ماده‌ای بنام گلیکوپروتئین که بدن آن‌ها ترشح می‌کند، آغشته است. این ماده حایل بین بدن ماهی و آب است، و علاوه بر مکانیسم دفاعی و کمک به تنظیم pH پوست، نقش مهم دیگری را ایفا

# دوازدهمین کنگره ملی سراسری فناوریهای نوین در حوزه توسعه پایدار ایران

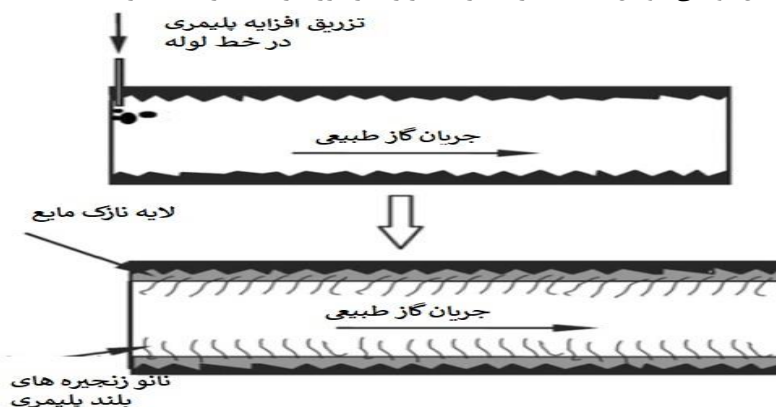
12<sup>th</sup> National Congress of  
the New Technologies in Sustainable Development of Iran

senaconf.ir

می‌کند و آن کاهش درگ در حین حرکت ماهی است [۲۳،۲۴]. بافت پوشش ماهی دارای تعداد نسبتاً زیادی سلول است که عمدتاً پروتئین‌های پلی‌ساکارید را به همراه سایر مواد فیبری ترشح می‌کنند که در اثر تقابل با آب، به یک لایه‌ی مخاطی روی پوست ماهی تبدیل می‌شوند [۲۵،۲۶]. پوست کوسه به صورت طبیعی توسط تعداد زیادی از ساختارهای ریزشیردار ساخته شده است که به تشکیل زنجیره‌های طولانی مخاطی بر روی بدن آن کمک می‌کند. این زنجیره‌های مخاطی قارچ را از پوست کوسه دور نگه می‌دارد و همچنین به کاهش نیروی درگ کمک می‌کند [۲۷].

در دهه ۱۹۴۰، محققان افزودنی‌های پلیمری را به عنوان یک عامل کاهش دهنده درگ استفاده کردند و دریافتند که در واقع نیروی درگ را تا ۳۰ درصد در مقایسه با سیال اصلی کاهش می‌دهند [۲۸]. پس از گذشت بیش از ۷۰ سال، تحقیقات چن و همکاران [۲۹] در سال ۲۰۱۴، رویکردهایی بر مبنای ترکیب مصنوعی پوست کوسه و مواد افزودنی پلیمری برای کاهش درگ پیشنهاد کردند. نتایج آزمایش نشان داد، حداکثر کاهش درگی که با این نوع پوست صاف در شرایط مشابه به دست می‌آید، تا ۶۰ درصد است. هنوز مسائل مختلفی در فناوری افزودنی‌های پلیمری وجود دارد و مطالعات گسترده‌ای روی مشکلات مختلف در حال انجام است [۳۰-۳۲]. افزودنی‌های پلیمری زنجیره‌های کوچکی را تشکیل می‌دهند که به طور طبیعی کشیده می‌شوند و به دلیل اثر القایی در لایه‌ی ویسکوز زیرین قرار می‌گیرند و در نتیجه حالت آشفته سیال را به حالت آرام تبدیل می‌کنند [۳۳]. افزودن مواد پلیمری، سه هدف اصلی را دنبال می‌کند، اول این که ضخامت لایه‌های ویسکوز زیرین را افزایش می‌دهد که عملکرد بافری را در برابر دیواره ایجاد می‌کند، دوم و مهم‌تر از همه، گرادیان سرعت را به دلیل اثر لغزش روی سطح تماس جامد-سیال کاهش داده و در نتیجه نیروی درگ کاهش می‌یابد. در نهایت با تشکیل نانوزنجیره‌های بلند، شدت تلاطم کاهش پیدا کرده و شرایط جریان ثابت در داخل لایه مرزی حاصل می‌شود [۳۴،۳۵]. تغییر جهت و چرخش این نانوزنجیره‌های بلند به کاهش درگ کمک می‌کند، زیرا در جریان آشفته، که هر زنجیره در انتهای خود تحت سرعت‌های متفاوتی قرار می‌گیرد، زنجیره می‌چرخد تا اختلاف سرعت را به حداقل برساند و خود را موازی با جریان تراز کند [۳۶]. نتایج تجربی متعددی نشان دادند که افزودنی‌های پلیمری به عنوان عوامل کاهش دهنده درگ، مقاومت را در فصل مشترک جامد-مایع کاهش می‌دهند. پیشرفت‌های اخیر به این نتیجه رسیدند که این روش برای لایه مرزی گاز-جامد نیز موثر است [۳۸،۳۹].

یک نمونه از کاربرد این روش، صنعت خطوط لوله انتقال گاز طبیعی است. تزریق عامل کاهش دهنده درگ پلیمری، به کاهش مقاومت اصطکاکی و در نتیجه افزایش دبی خروجی کلی کمک می‌کند. با وجود طیف گسترده‌ای از ترکیبات شیمیایی به عنوان عامل کاهش دهنده درگ، باید ترکیبی را انتخاب کنیم که در ساختار مولکولی خود دارای یک گروه قطبی در یک سر باشد تا با دیواره‌های داخلی لوله پیوند ایجاد کند و بدین ترتیب به صاف شدن دیواره‌ی جامد کمک کند. انتهای دیگر این ساختار ملکولی باید دارای گروه غیرقطبی باشد تا به کاهش آشفته‌گی گاز و کاهش ضخامت لایه مرزی کمک کند [۴۰]. در سال ۲۰۰۰، عامل کاهش دهنده درگ در یک خط لوله گاز در خلیج مکزیک مورد آزمایش قرار گرفت، نتایج نشان داد که ۱۰ تا ۱۵ درصد افزایش در تولید گاز و ۲۰ درصد کاهش افت فشار در سراسر خط لوله به وجود آمده است. این آزمایش توانایی عوامل کاهش دهنده درگ، برای کاربرد در مرز گاز-جامد را تایید کرد [۴۱].



شکل ۱- کاهش درگ در لوله‌های انتقال گاز به وسیله‌ی زنجیره‌های بلند پلیمری [۳۷].

# دوازدهمین کنگره ملی سراسری فناوریهای نوین در حوزه توسعه پایدار ایران

12<sup>th</sup> National Congress of  
the New Technologies in Sustainable Development of Iran

senaconf.ir

## ۳. کاهش درگ با روش میکرومورفولوژی

تئوری انتخاب طبیعی و تکامل طی میلیون‌ها سال، در کنار هم به گیاهان و جانوران مختلف کمک کرد تا در طبیعت زنده بمانند و بر این اساس، ویژگی‌های مختلفی برای حفظ حیات در طبیعت ایجاد شد. این ویژگی‌های مختلف به طور کلی تغییرات مورفولوژیکی در طول زمان هستند [۴۲-۴۴]. به عنوان مثال ما می‌دانیم که چگونه کوسه‌ها یکی از سریع‌ترین حیوانات در محیط‌های دریایی هستند؛ بدن ساده‌ی کوسه به آن در دستیابی به چنین سرعت‌های بالایی کمک می‌کند. اما محققان بعدها دریافتند که علاوه بر این، پوست آن‌ها دارای ساختارهای ریزی است که به کوسه‌ها کمک می‌کند که هنگام شنا سرعت خود را افزایش دهند [۴۵،۴۶]. این فلس‌های بسیار کوچک که تمام بدن کوسه را می‌پوشاند، سفت و شفاف است و ابعادی معادل ۲۰۰ میلی‌متر در ۲۰۰ میلی‌متر در ۳۰ میلی‌متر دارد [۴۷،۴۸]. در دهه‌های اخیر استفاده از مورفولوژی پوست کوسه به طور گسترده مورد مطالعه قرار گرفته است و با موفقیت‌هایی در کاربردهای عملی برای کاهش درگ روبرو شده است. والش در تحقیقات خود عمدتاً بر پارامترهای ارتفاع ریزشیار و عرض آن تمرکز کرد و به بررسی اثرات آن پرداخت و سعی کرد ارتفاع و عرض را برای افزایش راندمان کاهش درگ بهینه کند که عملاً سنگ بنای کاهش درگ با اقتباس از طبیعت (بیومیمتیک) را بنا گذاشت [۴۹].

برچرت و همکاران، در آزمایش خود سطوح الهام گرفته شده از مواد زیستی، مانند پوست کوسه‌ها را در شرایطی مانند تونل‌های نفتی و آبی آزمایش کردند و دریافتند که با استفاده از این سطوح ۱۰ درصد کاهش درگ در مقایسه با سطوح صاف معمولی به وجود آمد [۵۰،۵۱]. همان طور که قبلاً توضیح داده شد، ارتفاع و عرض میکروشیار عامل کلیدی در کاهش درگ است. چوبی در حین مطالعه میدان‌های جریان در اطراف شیارها به این نتیجه رسید که نسبت ارتفاع به عرض شیارها باید در محدوده‌ی خاصی باشد و اگر در آن محدوده نباشد، کاهش درگ اتفاق نمی‌افتد یا بسیار کم‌تر خواهد بود [۵۲].

با پیشرفت در تحقیقات سطوح مختلف الهام گرفته شده از طبیعت، موارد دیگری نیز مورد بررسی قرار گرفت؛ مواردی که علاوه بر کاهش درگ دارای خواص دیگری مانند خودتمیزشوندگی، ضدسروب بودن، دفع آب و غیره هستند و می‌توان از آن‌ها برای کاربردهای عملی استفاده کرد [۵۳،۵۴]. موارد مختلفی درباره‌ی پوست کوسه‌ها، مانند ساختار موهای ضخیم کوچک روی فلس‌ها مورد بررسی قرار گرفت؛ همچنین آزمایش‌ها به این نتیجه رسیدند که قسمتی از فلس‌ها تحت برخی عوامل سفت و انعطاف ناپذیر شده، و راندمان کاهش درگ این سطوح الهام‌گرفته شده از طبیعت را افزایش می‌دهند [۵۵،۵۶]. هان و زانگ با ساختن پوست مصنوعی کوسه با استفاده از لاستیک سیلیکونی، و تحت آزمایش قرار دادن آن، نشان دادند که می‌توان نیروهای مقاوم را تا حدود ۸ درصد کاهش داد [۵۷،۵۸]. یکی از این روش‌ها برای ساخت پوست مصنوعی کوسه، نورد زیستی (بیورول) آن با اندازه‌ی میکرو است. این پوست‌های مصنوعی دارای راندمان کاهش درگ، در حدود ۱۰ درصد بیشتر از سطح پوست صاف نرمال بودند [۵۹].

پروتئین ترشح شده توسط کوسه‌ها به نام موکوس، سرتاسر پوست آن‌ها را پوشانده، و هنگامی که این مخاط با آب تماس پیدا می‌کند، ساختارهای زنجیره‌ای کوچکی را در کل سطح پوست تشکیل می‌دهد. به دلیل وجود این زنجیره‌های کوچک ضخامت لایه‌ی ویسکوز زیرین افزایش می‌یابد. موکوس همچنین دارای خاصیت روان‌کنندگی است که باعث ایجاد اثر لغزشی روی مرز جامد-سیال می‌شود و در نتیجه گرادیان سرعت کم‌تر شده و اصطکاک کم‌تری ایجاد می‌کند. این زنجیره‌های کوچک روی سطح نیز اثر آرام بخشی دارند که منجر به جریان پایدارتر و در نتیجه اغتشاش کم‌تر در لایه‌ی مرزی می‌شود [۶۰،۶۱]. مورفولوژی سطح کوسه بسیار پیچیده است و در طی سال‌ها تکامل به یک سطح فوق آب‌گریز تبدیل شده است. شیارهای ریز روی سطح می‌توانند هوا را در داخل خود به دام ببندازند و در نتیجه فصل مشترک جامد-مایع را به فصل مشترک جامد-گاز تغییر دهند، که منجر به نیروی اصطکاک کم‌تری می‌شود. همچنین به دلیل پدیده‌ی لغزش در فصل مشترک، کاهش درگ بیشتری را شاهد هستیم [۲۷].

یکی دیگر از عوامل کاهش درگ، بافت انعطاف‌پذیر پوست کوسه است، اگرچه فلس‌ها سفت و با زاویه‌ی ثابت هستند، این زاویه به دلیل انعطاف‌پذیری بافت‌های درونی، با شنا کردن کوسه به طور مداوم تغییر می‌کند [۲۵،۶۲]. فلس‌های بیرون زده‌ی عمودی روی پوست

# دوازدهمین کنگره ملی سراسری فناوریهای نوین در حوزه توسعه پایدار ایران

12<sup>th</sup> National Congress of  
the New Technologies in Sustainable Development of Iran

senaconf.ir

کوسه به عنوان پارو در قایق عمل می کند و نیروی رانش را در هنگام شنا فراهم می کند، همراه با این عملکرد، رانش و کاهش نیروهای ویسکوز به دلیل سایر ویژگی های مورفولوژیکی منجر به کاهش درگ بیشتری می گردد [۲۵،۶۳].

لو و همکاران، بافت ریزشبارداری را که با استفاده از روش نورد زیستی تولید کرده بودند، روی خطوط لوله گاز طبیعی امتحان کردند و نتایج نشان داد که ۸ تا ۱۰ درصد افت فشار کمتری نسبت به قبل ایجاد شد [۶۴-۶۶].

با استفاده از مایوهای الهام گرفته شده از پوست کوسه، اسپیتز ۷ مدال طلا و فلپس در مجموع ۱۴ مدال طلا در رویدادهای ورزشی مختلف به دست آورده بودند، در سال ۲۰۱۰ کمیته مسابقات با توصیف این لباس های الهام گرفته از فناوری زیستی که مزایای ناعادلانه ای به ورزشکاران می داد، استفاده از آن ها را در رقابت های ورزشی ممنوع کرد. اگرچه آن ها ممنوع بودند، اما جنبه تجاری استفاده از مایوهای الهام گرفته از طبیعت برای عموم مردم موفقیت بزرگی بود [۶۷]. کاربردهای دیگر شامل سطح الهام گرفته شده از طبیعت در یک توپ گلف است، که باعث می شود مسافت بیشتری را در هوا طی کند و به مسافت های دورتری برسد [۶۸].

به عنوان یک آزمایش تجربی، میکروریبلت های الهام گرفته از طبیعت در موتورهای هوا، نتایج کاهش حدود ۵ درصدی تنش برشی دیواره را نشان داد [۶۹]. مشکل نشت منافذ روی جداره ی کشتی ها با استفاده از پوسته ی بسیار ظریف و پیچیده ای که از طبیعت الهام گرفته شده بود، تا ۸۵ درصد کاهش یافت [۷۰]. با استفاده از پوست الهام گرفته شده ای که سطح هواپیما را می پوشاند، ۲ درصد کاهش درگ به وجود آمد [۷۱]. حوزه های وسیع کاربرد این فناوری های الهام گرفته از طبیعت، محققان را برای توسعه ی آن ها ترغیب می کند.

## ۴. کاهش درگ با روش سطح فوق آبگریز

گیاهان و جانوران مختلفی که در طبیعت می بینیم، دارای ویژگی های منحصر به فردی هستند؛ بسیاری از آن ها دارای پوست یا سطوح فوق العاده آبگریز هستند، به عنوان مثال برگ گیاهانی مانند نیلوفر آبی و برنج، بال پروانه، چشم مگس و غیره. برخی از این سطوح در شکل ۲ نشان داده شده است. [۷۲]



شکل ۲- نمونه هایی از سطوح آبگریز در طبیعت [۸۱]

منظور از سطوح فوق آبگریز سطوحی است که دارای زاویه تماس ۱۵۰ درجه یا بیشتر باشند [۷۳-۷۶]. وقتی به این سطوح فوق آبگریز نگاه می کنیم، مشاهده می شود که دارای برجستگی های بسیار کوچک، فرورفتگی های کوچک و ستون های ریزی روی سطحشان هستند. هر قطره آبی که روی این سطوح می افتد، سطح را خیس نمی کند، بلکه فوراً روی سطح می غلتد. زاویه تماس یکی از پارامترهای کلیدی

# دوازدهمین کنگره ملی سراسری فناوریهای نوین در حوزه توسعه پایدار ایران

12<sup>th</sup> National Congress of  
the New Technologies in Sustainable Development of Iran

senacnf.ir

برای ارزیابی آب‌گریزی هر سطحی است، برای یک قطره آب ایده‌آل بر روی سطح صاف، زاویه تماس با معادله یانگ همان طور که در رابطه‌ی شماره ۱ مشاهده می‌شود، محاسبه می‌شود:

$$\theta = \cos^{-1} \left( \frac{\gamma_{sp} - \gamma_{sl}}{\gamma_{lv}} \right) \quad (1)$$

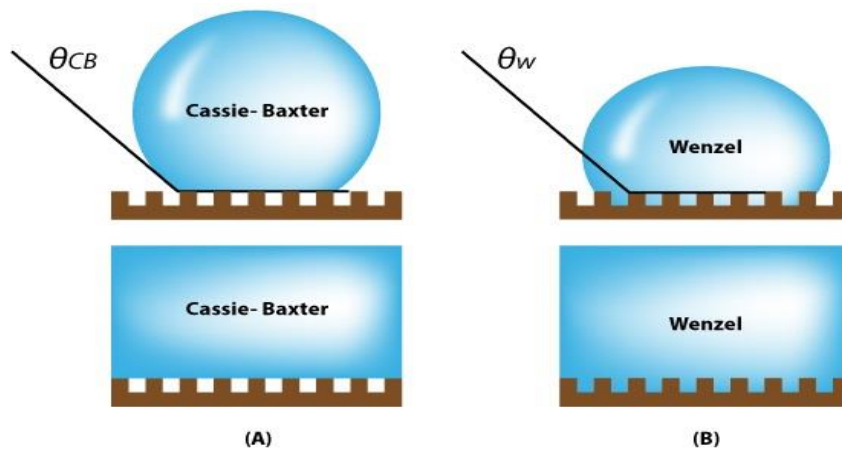
در اینجا  $\gamma_{lv}$ ،  $\gamma_{sl}$ ،  $\gamma_{sp}$  به ترتیب کشش‌های سطحی جامد-بخار، جامد-مایع و مایع-بخار و  $\theta$  زاویه تماس را نشان می‌دهند. بر این اساس می‌توان اثر زبری را در سطوح فوق آب‌گریز به صورت رابطه‌های ۲ و ۳ تشریح کرد:

$$\cos_{wenzel}^{app} = r \cos \theta \quad (2)$$

$$\cos_{cassie}^{app} = \phi (\cos \theta + 1) - 1 \quad (3)$$

در اینجا  $\cos_{wenzel}^{app}$  و  $\cos_{cassie}^{app}$  به عنوان زاویه تماس ونزل و کازی هستند، و  $\phi$  نسبت سطح جامد به سطح پیش‌بینی شده برای تماس قطره‌ی آب است. زبری سطح  $r$  با نسبت سطح کل به مساحت پیش‌بینی شده توصیف می‌شود، و  $\theta$  زاویه تماس جدید است. دو زاویه‌ی تماس برای قطره‌ی آب وجود دارد، که یکی در مدل کازی به عنوان مرطوب‌کننده‌ی جزئی و دیگری در مدل ونزل به ترکنده‌ی مطلق شناخته می‌شوند. [۷۷،۷۸]

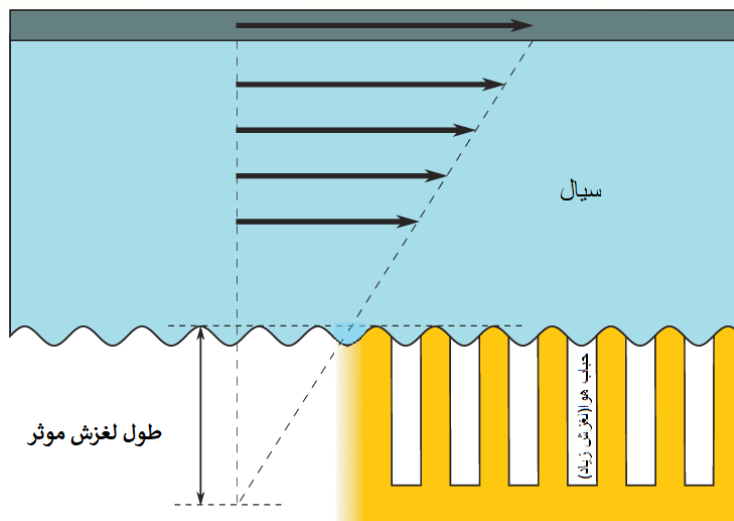
در سطوح فوق آب‌گریز، هوا در بین شیارهای ریز به دام افتاده و حفره‌های هوایی را تشکیل می‌دهد که در شکل ۳ نشان داده شده است.



شکل ۳ - نحوه‌ی قرار گرفتن قطره‌ی آب در مدل ونزل و کازی [۸۲]

قطرات آب که توسط هوای فشرده بلند می‌شوند، زاویه تماس بیشتری ایجاد می‌کنند. حباب‌های هوا در حفره‌ها ساکن نیستند، بلکه با سرعت‌های خاصی می‌چرخند و عملکردی مشابه یاتاقان‌ها دارند. سرعت سیال در فصل مشترک جامد-مایع صفر است که به این معنی است که شرایط لغزش وجود ندارد، اما با به دام افتادن هوا، لایه سطح مشترک جامد-مایع به یک سطح مشترک جامد-گاز تبدیل می‌شود و بالشتک هوا بین آن تشکیل می‌شود. سرعت لایه مرزی جامد-مایع در قسمت بالا و پایین این بالشتک هوا متفاوت است که باعث ایجاد لغزش می‌شود. منطقه‌ی لغزش موثر در شکل ۴ نشان داده شده است، که طول آن عامل مهمی برای ارزیابی ماهیت فوق آب‌گریز است. این سطوح فوق آب‌گریز در کاهش اصطکاک سطحی در جریان آرام و متلاطم مفید هستند و تحت شرایط خاصی می‌توانند به کاهش درگ بیش از ۲۰ درصد دست یابند [۷۹،۷۸].

یکی از ویژگی‌های مهم سطوح فوق آب‌گریز این است که وقتی آب روی سطح می‌افتد، شکلی شبیه به گوی به خود می‌گیرد و به محض این که سطح مایل می‌شود، دانه‌های آب می‌غلطند، و گوی‌های آب، آلودگی‌های ریز روی سطح را با خود حمل می‌کنند. این خاصیت، بسیاری از پژوهشگران را در توسعه سطوح خودتمیزشونده، ضد رسوب، نجسب، خوداستریل‌شونده و ضد لک ترغیب کرد [۸۰]. سطوح فوق آب‌گریز کاربردهای خود را در ابزارهای نوری، صنعت پوشاک، تجهیزات پزشکی، حمل و نقل و سوخت پیدا کرده است.



شکل ۴ - طول لغزش موثر قطره آب روی سطح فوق آبگریز [۸۳].

### ۵. کاهش درگ با تزریق حباب هوا

تاکنون تکنیک‌های مختلف اصلاح سطح را برای کاهش درگ در لایه مرزی آشفته بررسی کرده‌ایم. یکی از این روش‌ها که مورد بررسی قرار می‌دهیم، کاهش درگ با استفاده از حباب هوا است. در این روش، با تزریق گاز دو پدیده‌ی متفاوت مورد بررسی قرار می‌گیرند، که یکی کاهش درگ در جریان لایه‌ای هوا و دیگری کاهش درگ در جریان حباب هوا هستند. برایانر و همکاران، در مطالعه‌ای نشان دادند که کاهش درگ بسیار بالاتری در چند متری محل تزریق گاز به درون مایع حاصل می‌شود. این آزمایش ۲۵ درصد کاهش درگ بیشتری را در انژکتور شکاف باز در مقایسه با طراحی صفحه متخلخل نشان داد [۸۴]. آزمایش‌ها نشان داد که میزان کاهش درگ با استفاده از حباب در مجاورت محل‌های تزریق گاز مؤثرتر است و همچنین زمانی که عدد رینولدز بسیار زیاد است، این روش در کاهش درگ و مصرف انرژی، اثر کمتری دارد. نتایج نشان داد که لایه‌ی هوای تشکیل شده در زیر صفحه، عملکردهای زیادی، مانند روان‌کاری، کاهش درگ و کاهش ضرایب اصطکاک تا ۸۰ درصد دارد [۸۴، ۸۵].

از آن جایی که بسیاری از اصول مهندسی سیالات و مکانیسم‌های عملکردی آن تاکنون برای ما روشن نشده است، استدلال‌های ارائه شده برای این روش کاهش درگ رضایت بخش نیست. به طور کلی باید باور داشت که به نوعی تبادل تکنه‌ی بین لایه مرزی و ناحیه بافر گاز، کاهش می‌یابد، و منجر به کاهش اصطکاک می‌شود [۸۴]؛ از نظر تئوری گفته می‌شود که به دلیل وجود حباب‌های موضعی در داخل ناحیه بافر، ویسکوزیته افزایش می‌یابد و در نتیجه ضخامت لایه ویسکوز زیرین در ناحیه بافر افزایش می‌یابد [۸۶]. دروژینین و همکاران، در شبیه‌سازی عددی خود دریافتند که در صورت وجود جریان برشی آشفته، حباب‌ها به سمت هسته گرداب حرکت می‌کنند و در نتیجه نوسانات و آشفتگی جریان را کاهش می‌دهند [۸۷]. کوماگای و همکاران، دستگاهی را با استفاده از فناوری کاهش درگ با حباب هوا توسعه دادند و از آن در بدنه کشتی استفاده کردند، این دستگاه درگ را ۵ تا ۱۰ درصد کاهش داد و آن را به یک دستگاه خوب جهت صرفه جویی در انرژی تبدیل کرد [۸۸]. جون ژانگ و همکاران، با استفاده از لوله‌ی القای هوای بال‌دار، یک روش جدید روان‌کاری حباب هوا برای کاهش مقاومت اصطکاکی در بدنه کشتی استفاده کردند و نتایج نشان داد که کاهش درگ به عوامل زیادی بستگی دارد، که شامل عمق غوطه‌وری، زاویه‌ی حرکت، فشار و سرعت جریان هوای ورودی است [۸۹]. قابلیت کاهش درگ به وسیله‌ی میکروحباب‌های هوا توسط بسیاری از محققین از طریق تحلیل‌های تجربی و عددی مختلف مورد آزمایش قرار گرفته و کاربردهای بالقوه آن را در کشتی‌ها و قایق‌ها و صنایع دریایی نشان داده شده است [۹۰].

# دوازدهمین کنگره ملی سراسری فناوریهای نوین در حوزه توسعه پایدار ایران

12<sup>th</sup> National Congress of  
the New Technologies in Sustainable Development of Iran

senaconf.ir

## ۶. روش‌های ترکیبی کاهش درگ

به جز روش‌های کاهش درگ ذکر شده در بالا، ممکن است ترکیب دو یا بیش از دو مورد از آن‌ها منجر به کاهش درگ بیشتری شود. بر اساس این رویکرد، ژانگ و همکاران، تولید نانوزنجیره‌های مصنوعی بلندی را پیشنهاد دادند که شبیه سطح شیاردار پوست کوسه است؛ در این تحقیق، روش افزودنی‌های پلیمری با روش میکروشیاردار کردن، ترکیب شد [۹۱]؛ از نظر تئوری اگر راندمان کاهش درگ در روش سطح میکروشیاردار ۸ درصد و در روش افزودنی‌های پلیمری ۱۰ درصد باشد، راندمان کاهش کشش سطح میکروشیاردار مصنوعی توسعه یافته باید ۲۰ درصد یا حتی بیشتر باشد.

در سال ۲۰۱۱ اولین سطح شیاردار بیوسنتزی برای ساخت پیشنهاد شد. تولید شامل سه مرحله اصلی بود، که اولین مرحله، پیش‌فرآوری قالب پوست کوسه بود [۵۷،۵۸]؛ مرحله‌ی دوم ساخت قالب بود که باید در شرایط گاززدایی و خلاء مطلق انجام می‌شد تا هرگونه گاز محلول و آلودگی مایع حذف شود. مرحله نهایی ساخت سطح میکروشیاردار مصنوعی بود. فناوری قالب‌گیری با قالب نرم همراه با فناوری‌های پیوند، مزایای خاص خود را دارد که یکی از آن‌ها حفظ عامل کاهش درگ و ساخت مقرون‌به‌صرفه است [۹۱]. برای تأیید روش کاهش درگ ترکیبی، آزمایشی در مرکز تحقیقات کشتی چین در یک تونل آبی انجام شد، سطح کامپوزیت تولید شده به طور موثر در طول آزمایش تحت سرعت‌های جریان مختلف، درگ را بیش از ۲۴/۹ درصد کاهش داد، و آن را به موفقیت بزرگی تبدیل کرد و دریچه‌های جدیدی را پیش روی ما باز کرد [۹۱].

## ۷. نتیجه‌گیری و پیشنهادات

در این مقاله، به تفصیل در مورد مکانیسم‌ها، کاربردها و تکنیک‌های ساخت در بیشتر روش‌های کاهش درگ بحث و بررسی شد. بر اساس این بررسی‌ها نتایج زیر به دست آمد:

(۱) افزودنی‌های مورد استفاده برای کاهش درگ تا ۳۰ درصد راندمان دارند. با این حال، برای حفظ میزان بالای کاهش درگ، افزودن مواد روی سطح باید به طور منظم انجام شود، همچنین افزودنی‌ها باعث آلودگی محیط زیست دریایی می‌شوند.

(۲) روش مورفولوژی برای کاهش درگ گسترده‌ترین روش مورد استفاده است که می‌تواند درگ را ۸ تا ۱۲ درصد کاهش دهد. این روش‌ها در بسیاری از کاربردهای عملی مانند خطوط لوله گاز طبیعی، لباس شنا، هواپیماها و غیره به کار گرفته شده است. مزیت اصلی این روش این است که با شبیه سازی عددی و نتایج تجربی تأیید شده‌اند. اما نقطه ضعف آن، راندمان کاهش درگ پایین آن در مقایسه با روش‌های دیگر است.

(۳) روش سطح فوق آب‌گریز می‌تواند درگ را تا ۲۰ درصد یا بیشتر کاهش دهد، یکی از مزایای عمده این روش این است که می‌توان آن را هم در جریان آرام و هم در جریان آشفته اعمال کرد. یکی دیگر از مزایای این سطوح، خاصیت خودتمیزشوندگی آن‌ها است، به این معنی که می‌توان از آن در محیط‌های نامطلوب بدون کمک خارجی مانند تکنیک‌های اصلاح سطح یا مواد افزودنی استفاده کرد، اما نقطه ضعف آن این است که هنوز در مرحله آزمایشگاهی است، و تا به حال کاربرد عملی نداشته است.

(۴) روش کاهش درگ با حباب هوا دارای راندمان کاهش کشش بیش از ۳۰ درصد است که در مقایسه با اصلاح سطح توسط مواد افزودنی یا سطوح فوق آب‌گریز و روش‌های میکرومورفولوژی بسیار بالا است، اما مشکل این روش این است که کنترل آن آسان نیست. تزریق مداوم گاز و حفظ لایه‌ی هوا در قسمت زیرین محل‌های تزریق گاز و همچنین مکانیسم زیر لایه مرزی آن هنوز چندان واضح نیست، بنابراین درک ما از این روش بسیار محدود است.

(۵) در بین همه روش‌های بررسی شده احتمالاً یکی از بهترین روش‌ها کاهش درگ ترکیبی است. اثر روش‌های ترکیبی دارای راندمان بیش از ۵۰ درصد است. اما مکانیسم آن بسیار پیچیده است و بسیاری از مکانیسم‌های اساسی آن هنوز برای ما ناشناخته است، بعلاوه این روش هنوز برای کاربردهای عملی مناسب نیست.



# دوازدهمین کنگره ملی سراسری فناوریهای نوین در حوزه توسعه پایدار ایران

12<sup>th</sup> National Congress of  
the New Technologies in Sustainable Development of Iran

senacnf.ir

در حال حاضر از روش‌های مختلفی جهت کاهش درگ استفاده می‌شود، اما هنوز مسائل زیادی در این حوزه وجود دارد که حل نشده‌اند، که می‌توان به موارد زیر اشاره کرد؛

(۱) در برخی از روش‌های کاهش درگ، شرایط آزمایش دارای اهمیت خیلی زیادی است، مثلاً اگر شرایط جریان متفاوت باشد یا تغییر کند، به کاهش درگ منجر نمی‌شود. این بدان معناست که برای کاهش موثر درگ، پارامترهای تنظیم شده در تمام مدت باید ثابت باشند، که حفظ این شرایط برای جریان در محیط عملیاتی امکان‌پذیر نیست. بنابراین، نیاز به توسعه روش‌هایی وجود دارد که حتی در شرایط مختلف باعث کاهش درگ می‌شوند.

(۲) در برخی از تکنیک‌های کاهش درگ، شامل استفاده از افزودنی‌ها یا تکنیک‌های اصلاح سطح با گذشت زمان یا عوامل محیطی نامطلوب، این سطوح فرسوده و از هم گسسته می‌شوند و دیگر نمی‌توانند کاهش درگ را فراهم کنند، بنابراین محافظت از این عوامل یا سطح، در برابر آلودگی و شرایط نامساعد محیطی اهمیت دارد. این یکی از حوزه‌های مهمی است که باید بیشتر مورد بررسی قرار گیرد.

(۳) بسیاری از تکنیک‌های ذکر شده در بالا فقط در مرحله آزمایشگاهی هستند و هنوز در کاربردهای میدانی واقعی به کار گرفته نشده‌اند و ما فقط می‌دانیم که توانایی کاهش درگ به صورت نظری یا فقط از طریق شبیه‌سازی‌های عددی وجود دارد، بنابراین نمی‌دانیم که این تکنیک‌ها در واقعیت چگونه عمل می‌کنند. بنابراین، استفاده از این روش‌ها در کاربردهای عملی در زمینه‌های مختلف مهندسی زمینه‌ای است که باید بیشتر مورد تحقیق قرار گیرد.

دوازدهمین کنگره ملی سراسری  
فناوریهای نوین در حوزه توسعه پایدار ایران  
12<sup>th</sup> National Congress of  
the New Technologies in Sustainable Development of Iran

senaconf.ir

۸. منابع:

- [1] P. Moin, K. Mahesh, Direct numerical simulation: a tool in turbulence research, *Annu. Rev. Fluid Mech.* 30 (1998) 539–578.
- [2] K.R. Sreenivasan, R.A. Antoni, The phenomenology of small-scale turbulence, *Ann. Rev. Fluid Mech.* 29 (1997) 435–472.
- [3] P.I. Oden, G.Y. Chen, R.A. Steele, et al., Vis- cous drag measurements utilizing micro fabricated cantilevers, *Appl. Phys. Lett.* (1996) 3814–3816.
- [4] B. Feng, D. Chen, J. Wang, The flow structure on drag-reduced riblet surfaces, *Int. J. Mech.* 2 (6) (2012) 105–112.
- [5] R. Gruneberger, H. Wolfram, Drag Characteristics of Longitudinal and Transverse Riblets at Low Dimensionless Spacing's, *Exp. Fluids* 50 (2) (2011) 363–373.
- [6] J.A. Gallagher, A.S.W. Thomas, Turbulent Boundary Layer Characteristics over Stream wise Grooves 2nd Applied Aerodynamics Conference, Seattle, USA, 1984.
- [7] B. Bhushan, Y.C. June, K. Koch, Micro, Nano and Hierarchical Structures for Super hydrophobicity, Self-Cleaning and Low Adhesion, *Philosophical Transactions of the Royal Society A -Mathematical Physical and Engineering Sciences* 2009 (367) (1894) 1631–1672.
- [8] D. Zhang, Y. Luo, H. Chen, Application and Numerical Simulation Research on Biomimetic Drag-Reducing Technology for Gas Pipelining, *Oil Gas- European Magazine* 37 (2) (2011) 85–90.
- [9] Y. Zhu, S. Granik, Rate-Dependent Slip of Newtonian Liquid at Smooth Surfaces, *Phys. Rev. Lett.* 87 (9) (2001) 096105.
- [10] D.M. Bushnell, K.J. Moore, Drag Reduction in Nature, *Annu. Rev. Fluid Mech.* 23 (1991) 65–79.
- [11] W.E. Reif, A. Dinkelacker, Hydrodynamics of the Squamation in Fast Swimming Sharks, *Neues Jahrbuch Fuer Geologie and Palaeontologie* 164 (1982) 184–187.
- [12] F.E. Fish, The Myth and Reality of Gray's Paradox: Implication of Dolphin Drag Reduction for Technology, *Bioinspiration Biomimetics* 1 (2) (2006) 17–25.
- [13] F.E. Fish, C.A. Hui, Dolphin Swimming—A Review, *Mammal Review* 21 (4) (1991) 181–195.
- [14] V.V. Pavlov, Dolphin Skin as a Natural Anisotropic Compliant Wall, *Bio inspiration and Biomimetics* 1 (2) (2006) 31–40.
- [15] P. Hao, C. Wong, Z. Yao, Laminar Drag Reduction in Hydrophobic Micro channels, *Chem. Eng. Technol.* 32 (6) (2009) 912–918.
- [16] Lu Si, Yao Zhao-Hui, Hao Peng-Fei, Drag reduction in ultra hydrophobic channels with micro-nano structured surfaces, *Sci. China-Phys., Mech. Astronomy* 53 (7) (2010) 1298–1305.
- [17] C. Lv, C. Yang, P. Hao, Sliding of water droplets on microstructured hydrophobic surfaces, *Langmuir* 26 (11) (2010) 8704–8708.
- [18] Yang Cheng-Wei, He Feng and Hao Peng-Fei, The apparent contact angle of water droplet on the micro-structured hydrophobic surface, *Sci. China-Chem.*, 53 (4) (2010) 912–916.
- [19] Chi Wai Wong, Y. Zhou, Y. Li, Bingfu Zhang, Skin Friction Drag Reduction Based on Plasma-Induced Streamwise Vortices (2016). 10.1007/978-3-662-48868- 3\_22.
- [20] Marian Albers, Pascal Meysonnat, Daniel Fernex, Richard Semaan, Bernd Noack, Wolfgang Schröder, Drag Reduction and Energy Saving by Spanwise Traveling Transversal Surface Waves for Flat Plate Flow, *Flow, Turbulence and Combustion.* 105 (2020), <https://doi.org/10.1007/s10494-020-00110-8>.
- [21] Lu Zhang, Xiaobiao Shan, Tao Xie, Active Control for Wall Drag Reduction: Methods, Mechanisms and Performance. *IEEE Access.* 8 (2020) 1-1. 10.1109/ ACCESS.2020.2963843.
- [22] Zhang De-Yuan, Luo Yue-Hao, Li Xiang, Numerical simulation and experimental study of drag reducing surface of a real shark skin, *J. Hydrodynamics* 23 (2) (2011) 204–211.
- [23] K.L. Shephard, Functions for Fish Mucus, *Rev. Fish Biol. Fish.* 4 (4) (1994) 401– 429.
- [24] G. Flik, J.H. Vanrijs, S.E.W. Bonga, Evidence for the Presence of Calmodulin in Fish Mucus, *Eur. J. Biochem.* 138 (3) (1984) 651–654.

# دوازدهمین کنگره ملی سراسری فناوریهای نوین در حوزه توسعه پایدار ایران

12<sup>th</sup> National Congress of  
the New Technologies in Sustainable Development of Iran

senaconf.ir

- [25] Y. Luo, Recent Progress in Exploring Drag Reduction Mechanism of Real Sharkskin Surface: A Review, *J. Mech. Med. Biol.* 15 (3) (2015) 1530002.
- [26] Y. Luo, Recent Research Progress Of Biological Shark- Skin Surface: A Review, *J. Surf. Interfaces Mater.* 2 (3) (2014) 167–181.
- [27] Y. Luo, D. Zhang, Y. Liu, Chemical, Mechanical And Hydrodynamic Properties Research On Composite Drag Reduction Surface Based On Biological SharkSkin Morphology And Mucus Nano-Long Chain, *J. Mech. Med. Biol.* 15 (5) (2015) 1530084.
- [28] B.A. Toms, Some Observations on the Flow of Linear Polymer Solutions through Straight Tubes at Large Reynolds Numbers. Conference: First International Congress on Rheology. Amsterdam, the Netherlands, 1948.
- [29] H. Chen, X. Zhang, D. Che, Synthetic Effect of Vivid Shark Skin and Polymer Additive On Drag Reduction Reinforcement, *Adv. Mech. Eng.* 6 (2014) 425701.
- [30] Bhushan B. Biomimetics, Lessons from Nature-An Overview, *Philosophical Transactions of the Royal Society A. Mathematical Physical and Engineering Sciences* 2009 (367) (1893) 1445–1486.
- [31] K.S. Choi, G.E. Gadd, H.H. Pearcey, Tests Of Drag-Reducing Polymer Coated On A Riblet Surfa- Ce, *Appl. Sci. Res.* 46 (3) (1989) 209–216.
- [32] C. Christodoulou, K.N. Liu, D.D. Joseph, Combined Effects of Riblets and Polymers on Drag Reduction In Pipes, *Phys. Fluids A* 3 (5) (1991) 995–996.
- [33] C.M. White, M.G. Munga, Mechanics And Prediction Of Turbulent Drag Reduction With Polymer Additives, *Annu. Rev. Fluid Mech.* 40 (2008) 235– 256.
- [34] J.M. Toonder, M.A. Hulsen, G.D.C. Kuiken, Drag Reduction by Polymer Additives in A Turbulent Pipe Flow: Numerical and Laboratory Experiments, *J. Fluid Mech.* 337 (1997) 193–231.
- [35] T. Wei, W.W. Willmarth, Modifying Turbulent Structure with Drag-Reducing Polymer Additives in Turbulent Channel Flows, *J. Fluid Mech.* 245 (1992) 619– 641.
- [36] T. Min, H. Choi, J.Y. Yoo, Maximum Drag Reduction In A Turbulent Channel Flow By Polymer Additives, *J. Fluid Mech.* 492 (2003) 91–100.
- [37] K.N. Liu, C. Christodoulout, O. Ricciust, Drag Reduction In Pipes Lined With Riblets, *AIAA J.* 28 (10) (1999) 1697–1698.
- [38] G.J. Heynderickx, A.K. Das, J.D. Wilde, Effect of Clustering On Gas-Solid Drag In Dilute Two- Phase Flow, *Industry Eng. Chem. Res.* 43 (16) (2004) 4635–4646.
- [39] H.A.D. Bari, E. Suali, Z. Hassan, Glycolic Acid Ethoxylate Lauryl Ether Performance As Drag Reduction Anget In Aqueous Media Flow In Pipelines, *J. Appl. Sci.* 8 (23) (2008) 4410–4415.
- [40] Y. Luo, Y. Liu, D. Zhang, Advanced Progress In Nature Gas Pipelining Applying Different Drag Reduction/ Energy Saving Technologies: A Review, *Eur. J. Environ. Civ. Eng.* 19 (8) (2015) 931–949.
- [41] J.C. Huey, E.K. Gene, S.F. Michael, DRA for Gas Pipelining Successful In Gulf of Mexico Trial, *Oil Gas J.* 98 (23) (2000) 54–58.
- [42] B. Bhushan, Adhesion and Stiction: Mechanisms, Measurement Techniques and Methods for Reduction, *J. Vac. Sci. Technol.*, B 21 (6) (2003) 2262–2296.
- [43] Y. Luo, Y. Liu, Numerical Simulation of Micro Flow Field on Biomimetic Sharkskin Micro-Grooved Surface, *Adv. Mater. Res.* 884–885 (2014) 378–381.
- [44] G. Zhang, J. Zhang, G. Xie, et al., Cicada Wings: A Stamp from Nature for Nano imprint Lithography, *Small* 12 (2) (2006) 1440–1443.
- [45] M.D. Naresh, V. Arumugam, R. Sanjeevi, Mechanical Behavior of Shark Skin, *J. Bio- Science* 22 (4) (1997) 431–437.
- [46] D.W. Bechert, M. Bruse, W. Hage, Fluid Mechanics of Biological Surfaces and Their Technological Application, *Naturwissenschaften* 87 (4) (2000) 157–171.
- [47] Y. Luo, D. Zhang, Investigation on Fabricating Continuous Vivid Sharkskin Surface by Bioreplicated Rolling Method, *Appl. Surf. Sci.* 282 (2013) 370–375.
- [48] Y. Luo, D. Zhang, Study on the Micro-Replication Precision of Shark Skin, *Appl. Mech. Mater.* 44–47 (2011) 1151–1157.
- [49] M.J. Walsh, Riblets as Viscous Drag Reduction Technique, *AIAA J.* 21 (4) (1983) 485–486.

دوازدهمین کنگره ملی سراسری  
فناوریهای نوین در حوزه توسعه پایدار ایران  
12<sup>th</sup> National Congress of  
the New Technologies in Sustainable Development of Iran

senaconf.ir

- [50] D.W. Bechert, M. Bruse, W. Hage, Experiments on Drag Reducing Surfaces and Their Optimization With An Adjustable Geometry, *J. Fluid Mech.* 338 (1997) 59–87.
- [51] D.W. Bechert, M. Bartenwerfer, The Viscous Flow on Surfaces with Longitudinal Ribs, *J. Fluid Mech.* 206 (1989) 105–129.
- [52] H. Choi, P. Moin, J. Kim, Direct Numerical Simulation of Turbulent Flow over Riblets, *J. Fluid Mech.* 255 (1993) 503–539
- [53] B. Dean, B. Bhushan, Shark-Skin Surfaces for Fluid- Drag Reduction in Turbulent Flow: A Review, *Philosophical Transactions of the Royal Society A. Mathematical Physical and Engineering Sciences* 2010 (368) (1929) 4775– 4806.
- [54] G.D. Bixler, B. Bhushan, Bioinspired Rice Leaf And Butterfly Wing Surface Structures Combining Shark Skin and Lotus Effects, *Soft Matter* 8 (44) (2012) 11271–11284.
- [55] A. Lang, P. Motta, M.L. Habegger, Shark Skin Separation Control Mechanisms, *Mar. Technol. Soc. J.* 45 (4) (2011) 208–215.
- [56] A.W. Lang, P. Motta, P. Hidalgo, Bristled Shark Skin: Microgeometry for Boundary Layer Control, *Bioinspiration Biomimetics* 3 (4) (2008) 046005.
- [57] Han Xin, Zhang De-Yuan, Study on the Micro-Replication of Shark Skin, *Sci. China Ser. E: Technol. Sci.* 51 (7) (2008) 890–896.
- [58] Han Xin, Zhang De-Yuan, Li Xiang, et al., Bio- Replicated Forming Of The Biomimetic Drag Reducing Surfaces In Large Area Based On Shark Skin, *Chinese Sci. Bull.* 53 (10) (2008) 1587–1592.
- [59] Y. Luo, D. Zhang, Y. Liu, Bio/Micro Rolling Fabrication of Biological Sharkskin Morphology on Semi-Cured Coating and Drag Force Experimental Research, *J. Mech. Med. Biol.* 16 (2) (2015) 1650016.
- [60] T.L. Daniel, Fish Mucus. In Situ Measurement of Polymer Drag Reduction, *Biol. Bull.* 160 (3) (1981) 376–382.
- [61] Li FengChen, Cai WeiHua, Zhang HongNa, Influence Of Polymer Additives On Turbulent Energy Cascading In Forced Homogeneous Isotropic Turbulence Studied By Direct Numerical Simulations, *Chin. Phys. B* 21 (11) (2012) 114701.
- [62] Y. Luo, Y. Liu, D. Zhang, Influence of morphology for drag reduction effect of sharkskin surface, *J. Mech. Med. Biol.* 14 (2) (2014) 1450029.
- [63] J. Oeffner, G.V. Lauder, The Hydrodynamic Function of Shark Skin and Two Biomimetic Applications, *J. Experimental Biol.* 215 (5) (2012) 785–795.
- [64] Y. Luo, D. Zhang, Experimental Research On Biomimetic Drag-Reducing Surface Application In Natural Gas Pipelines, *Oil Gas-European Magazine* 38 (4) (2012) 213–214.
- [65] D. Zhang, Y. Luo, H. Chen, Exploring Drag-Reducing Grooved Internal Coating for Gas Pipelines, *Pipeline Gas J.* 238 (3) (2011) 58–60.
- [66] Y. Luo, D. Zhang, Y. Liu, Exploring a Method to Effectively Avoid Drop-Out Of Internal Coating In Natural Gas Pipelines, *Oil Gas-European Magazine* 40 (2) (2014) 96–97.
- [67] R. Stefani, Olympic Swimming Gold: The Suit Or The Swimmer In The Suit, *Significance* 9 (2) (2012) 13–17.
- [68] F. Alam, T. Steiner, H. Chowdhury, A Study of Golf Ball Aerodynamic Drag, *Procedia Eng.* 13 (2011) 226–231.
- [69] C.B. Claudia, U. Schulz, Shark Skin Inspired Riblet Coatings for Aerodynamically Optimized High Temperature Applications in Aero engines, *Adv. Eng. Mater.* 13 (4) (2011) 288–295.
- [70] M.L. Carman, T.G. Estes, A. Feinberg, Engineered Antifouling Micro Topographies Correlating Wettability with Cell Attachment, *Biofouling* 22 (1–2) (2006) 11–21.
- [71] P.R. Viswanath, Aircraft Viscous Drag Reduction Using Riblets, *Prog. Aerosp. Sci.* 38 (627) (2002) 571–600.
- [72] Y. Luo, Y. Liu, J. Anderson, Improvement of Water Repellent and Hydrodynamic Drag Reduction Property on Bio-Inspired Surface and Exploring Shark- Skin Effect Mechanism, *Appl. Phys. A* 120 (1) (2015) 369–377.

# دوازدهمین کنگره ملی سراسری فناوریهای نوین در حوزه توسعه پایدار ایران

12<sup>th</sup> National Congress of  
the New Technologies in Sustainable Development of Iran

senaconf.ir

- [73] Noural Nowrouz Mohammad, Bakhsh Mohammad Saadat, Sekhvat Setareh, Analysis of Shear Rate Effects on Drag Reduction in Turbulent Channel Flow with Superhydrophobic Wall, *J. Hydrodynamics* 25 (6) (2013) 944–953.
- [74] X. Gao, L. Jiang, Biophysics: Water-Repellent Legs of Water Striders. *Nature*, 432 (7013) (2004) 36-36.
- [75] T. Sun, L. Feng, X. Gao, et al., Bioinspired Surfaces With Special Wettability, *Acc. Chem. Res.* 38 (8) (2005) 644–652.
- [76] Noural Nowrouz Mohammad, Sekhvat Setareh, Mofidi Alireza, Drag Reduction in a Turbulent Channel Flow with Hydrophobic Wall, *J. Hydrodynamics* 24 (3) (2012) 458–466.
- [77] R.N. Wenzel, Resistance of solid surfaces to wetting by water, *Ind. Eng. Chem.* 28 (8) (1936) 988–994.
- [78] A.B.D. Cassie, S. Baxter, Wettability of porous surfaces, *Trans. Faraday Soc.* 40 (1944) 546–551.
- [79] B. Wang, Y. Zhang, L. Shi, Advances in the Theory of Superhydrophobic Surfaces, *J. Mater. Chem.* 22 (38) (2012) 20112–20127.
- [80] Z. Guo, W. Liu, B. Su, Superhydrophobic Surfaces: From Natural to Biomimetic to Functional, *J. Colloid Interface Sci.* 353 (2) (2011) 335–355.
- [81] K. Koeltzsch, A. Dinkelacker, Mann R. Grund-, Flow over Convergent and Divergent Wall Riblets, *Exp. Fluids* 33 (2) (2002) 346–350.
- [82] L. Wen, J.C. Weaver, G.V. Lauder, Biomimetic Shark Skin: Design, Fabrication and Hydrodynamic Function, *J. Experimental Biology* 217 (10) (2014) 1656–1666.
- [83] P. Motta, M.L. Habegger, A. Lang, et al., Scale Morphology And Flexibility In The Shortfin Mako *Oxyrinchus* And The Blacktip Shark *Carcharhinus Limbatus*, *J. Morphol.* 273 (10) (2012) 1096–1110.
- [84] E. Brianr, S.W. Eric, A. Keary, Bubble- Induced Skin-Friction Drag Reduction And The Abrupt Transition To Air-Layer Drag Reduction, *J. Fluid Mech.* 612 (2008) 201–236.
- [85] W.C. Sanders, E.S. Winkel, Bubble Friction Drag Reduction in A High-ReynoldsNumber Flat-Plate Turbulent Boundary Layer, *J. Fluid Mech.* 552 (2006) 353–380.
- [86] J.L. Lumley, Drag Reduction in Two Phase and Polymer Flows, *Phys. Fluids* 20 (10) (1977) 65–71.
- [87] O.A. Druzhinin, S. Elghobashi, Direct Numerical Simulations of Bubble-Laden Turbulent Flows Using Two-Fluid Formulation, *Phys. Fluids* 10 (3) (1998) 685–697.
- [88] I. Kumagai, Y. Takahashi, Y. Murai, Power-Saving Device for Air Bubble Generation Using A Hydrofoil To Reduce Ship Drag: Theory, Experiments, And Application to Ships, *Ocean Eng.* 95 (2015) 183–194.
- [89] Jun Zhang, Shuo Yang, Jing Liu, Numerical Investigation of Frictional Drag Reduction with an Air Layer Concept on the Hull of Ship, *J. Hydrodyn.* 32 (2019), <https://doi.org/10.1007/s42241-019-0063-8>
- [90] H. Kato, K. Miura, H. Yamaguchi, Experimental Study on Microbubble Ejection Method for Frictional Drag Reduction, *J. Mar. Sci. Technol.* 3 (3) (1998) 122–129.
- [91] Zhang De-Yuan, Li Yuan-Yue, Han Xin, et al., High-Precision Bio-Replication of Synthetic Drag Reduction Shark Skin, *Chinese Sci. Bull.* 56 (9) (2011) 938–944.